

n° 825

- Aplanir les effets de conjoncture et viser les nouveaux horizons
- Lot 34A dernier TOARC de la LGV Est Européenne
- A28 - Section Rouen/Alençon - Concession Alis
- Route des Tamarins à la Réunion. Un terrassement à flanc de montagne
- Terrassements de l'A24 entre Viseu et Chaves au Portugal
- Maîtrise de l'humidification des sols traités en place
- Étude des mécanismes des perturbations de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme : résultats



Terrassements

sommaire

Travaux
numéro 825

décembre 2005
Terrassements



Notre couverture

Terrassements
sur le contournement Nord
d'Angers

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Patrick Bernasconi

RÉDACTION

André Colson et Mona Mottot
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83 - colsona@fnntp.fr
Tél. : (33) 01 44 13 31 03 - mottotm@fnntp.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 ABONNEMENTS

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

France (11 numéros) : 190 € TTC
Etranger (11 numéros) : 240 €
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).

Éditions Science et Industrie S.A.

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

éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

6

matériels

14

PRÉFACE

Michel Lallement

17

TERRASSEMENTS

◆ Aplanir les effets de conjoncture et viser les nouveaux horizons

- *Smoothing out economic cycle effects and targeting new horizons*

Divers auteurs

18

◆ Le lot 34 A dernier TOARC de la LGV Est Européenne est livré à Réseau Ferré de France (RFF)

- *Work section 34 A of the final project phase for the East European high-speed train line is delivered to Réseau Ferré de France (RFF)*

E. Hosotte, Ch. Bellet

27

◆ A28 - Section Rouen/Alençon - Concession Alis. Défi gagné pour le constructeur et ses partenaires

- *A28 - Rouen/Alençon Section - Alis Concession. Successful challenge for the contractor and its partners*

Ch. Roulet, Cl. Aimé

36

◆ La Route des Tamarins à la Réunion. Un terrassement à flanc de montagne

- *Route des Tamarins highway in Reunion. Earthworks on the mountainside*

Divers auteurs

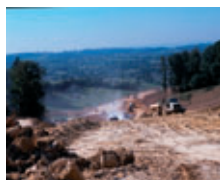
49

◆ Les terrassements de l'A24 entre Viseu et Chaves au Portugal. De la conception à la réalisation

- *Earthworks on the A24 between Viseu and Chaves in Portugal. From design to construction*

J.-M. Saccone, I. Ben Fredj, Fr. Legrain

63



Sommaire

décembre 2005

Terrassements

Dans les prochains numéros

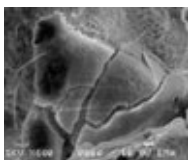
- Routes et Travaux urbains**
- Ponts**
- Le Havre**
- Port 2000**
- International**
- Environnement**
- Réhabilitation**
- Énergies renouvelables**
- Sols et fondations**



◆ Maîtrise de l'humidification des sols traités en place
- *Controlled moistening of soils treated in situ*

G. Fondain, E. Lavallée

72



◆ Etude des mécanismes des perturbations de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme : résultats

- *Study of the mechanism of disturbance of the stabilisation of treated soils in capped layers : results*

N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier

77

**répertoire
des fournisseurs**

83

Le terrassement : un ouvrage en terre

La réalisation d'un ouvrage en terre constitue une activité à part entière de tous les actes de construction. Sa simplicité n'est qu'apparente.

En effet, le terrassement est un véritable métier :

- c'est d'abord une opération de haute technicité réclamant des approches géotechniques quasi scientifiques ;
- c'est aussi la maîtrise des conditions climatiques, particulièrement sur les sites de sols fins, tant au niveau de la programmation, de la conception du projet qu'au stade de la réalisation ;
- c'est également le choix de moyens adaptés et de méthodes innovantes ;
- c'est encore la maîtrise des contraintes environnementales par l'utilisation des matériaux naturels, contribuant largement au développement durable ;
- mais c'est surtout un métier de bon sens, un véritable "art" fondé sur le savoir-faire d'équipes soudées et expérimentées.

L'ensemble de ces caractéristiques repose sur l'expérience acquise sur le terrain pour concevoir, piloter, coordonner et finalement réaliser de manière économique les plus grands ouvrages d'infrastructures.

La profession de terrassier s'est constituée depuis plusieurs années en un syndicat professionnel et occupe une place majeure parmi les acteurs des travaux publics.

En effet, tout projet commence à l'évidence par le terrassement.

L'apport de notre métier s'est traduit en particulier par des progrès techniques substantiels par exemple dans le traitement des sols naturels comme vient de le manifester le symposium TREMTI.

L'évolution des techniques nous a permis d'augmenter notablement les possibilités d'utilisation des matériaux. C'est ainsi que des matériaux naturels peuvent constituer, après traitement, des couches d'assise ou de fondation de chaussée.

Il nous est apparu opportun d'élargir nos échanges sur le terrain de l'Europe avec un premier colloque européen qui s'est tenu au Palais des Congrès les 26 et 27 octobre derniers.

Au-delà d'un premier objectif commun qui réside dans l'identification de notre métier et dans sa valorisation, les intérêts de ce premier colloque européen nous paraissent multiples et importants, particulièrement en termes d'avancées techniques, de recherche et de spécifications applicables à notre activité :

- la technique du terrassement doit prendre en compte les progrès réalisés par l'ensemble des pays européens ;
- la réalisation d'ouvrages en terre est de plus en plus complexe et réclame des moyens de recherche spécifiques ; il semble souhaitable que les professionnels européens du terrassement additionnent leurs efforts pour promouvoir une recherche appliquée de dimension européenne ;
- l'harmonisation des spécifications

applicables aux travaux de terrassement est vitale pour le développement de nos activités.

Nous espérons vivement que se constitue régulièrement une plate-forme d'échanges périodique de notre savoir-faire. Nous apporterons notre soutien aux pays européens désirant poursuivre cette initiative du Syndicat des Terrassiers français.



■ **MICHEL LALLEMENT**
Président du Syndicat professionnel des Terrassiers de France

Aplanir les effets de conjoncture

Après l'achèvement des travaux de la LGV Est et avant que ne commence le chantier de l'A19, Deschiron (Sogea Construction, groupe Vinci), qui fête cette année son 120^e anniversaire, est confronté comme ses grands concurrents à la raréfaction des grands projets. Aguerrie à faire face aux cycles caractéristiques des grands travaux, l'entreprise trouve un relais temporaire d'activité dans le développement des projets de dimension régionale et se mobilise dans une évolution du métier qui l'implique de façon croissante dans les études, la conception et l'amont global des projets.

" Dans les grands projets de terrassement, le système de dévolution des marchés et le poids de la concurrence conduisent l'entreprise à développer son inventivité et à trouver des idées qui baissent le prix – pas des idées qui remettent en cause la technicité, mais des idées qui viennent en plus."

Prononcées devant une carte de France piquée d'épingles figurant les chantiers en cours et les projets, les paroles de Patrick Boisson, le directeur général adjoint de Deschiron, laissent clairement entendre que dans les grands travaux, la bonne stratégie est celle qui concilie vision élargie et maîtrise du moindre détail.

Le détail, c'est une étude de prix qui doit permettre de connaître le vrai prix d'une affaire et qui impose de "faire le chantier sur le papier", avec ses différents scénarios, l'évaluation du rendement, la prévision des moyens, la planification, etc., tout ce qui est nécessaire pour l'emporter mais ne suffit plus désormais. D'où les idées, voire les astuces touchant le réemploi des matériaux, les mouvements de terre, l'optimisation des distances de transport, etc., auxquelles est rodé le bureau d'études

et qui constituent une valeur ajoutée de l'entreprise. C'est aussi une rigoureuse "volonté d'être dans la vérité des choses" qui conduit ici à organiser la réunion de transfert des dossiers directement entre le bureau d'études et les chantiers.

À côté de cela, nul n'ignore que les grands travaux sont affaire de grands cycles. Après avoir enregistré de bons résultats depuis 1999, Deschiron comme ses concurrents se trouve confronté à une raréfaction des projets. Le creux d'activité qui se dessine au-delà de l'achèvement de la LGV Est conduit l'entreprise à s'intéresser à des affaires de dimension régionale que suivent deux agences dans les régions Est et Rhône-Alpes. "En fait, poursuit Patrick Boisson, il n'y a pas aujourd'hui de schéma directeur. Des projets existent, comme le TGV Rhin-Rhône, l'autoroute Nîmes-Montpellier, le canal Seine-Nord, etc., mais les financements ne sont pas acquis et nul ne sait quand ils se débloquent. Il faut s'accommoder de cette façon plus chaotique dont sont gérés les grands projets, tout en sachant que les chantiers sous forme de concession, telle l'A19, confiée à Vinci – en attendant les contrats de partenariat –, sont appelés à se déve-

A19 : "CERNER LES PROBLÈMES ET PEAUFINER LA PRÉPARATION"

Attribuée à Vinci dans le cadre d'une concession dont le contrat a été signé en mai 2005 entre l'État français et Arcour, le maître d'ouvrage, l'autoroute A19, qui reliera Artenay (A10) et Courtenay (A6), longue de 101 km, sera mise en chantier à la fin 2006. Étroitement associé aux études de conception, Deschiron s'est vu confier par Socaly, le maître d'œuvre, l'étude préliminaire géotechnique. Début mai ont ainsi commencé en laboratoire les travaux de sondage et d'analyse de carottés qui permettront de programmer la réutilisation des matériaux en déblais.

"D'ores et déjà, on sait que les terrains traversés comporteront beaucoup de marnes et de calcaires altérés, avec une zone d'argiles à silex près de Montargis, où sera construit un grand viaduc sur le Loing, indique Delphine Reynier, la directrice de travaux. L'objectif est de mettre à profit le fait d'être associé à la conception pour peaufiner la préparation et cerner tous les problèmes de façon que 2007, qui sera le moment fort des travaux, soit une année explosive."

À la demande d'Arcour et de l'INRAP, Deschiron a par ailleurs engagé début juillet le diagnostic archéologique du tracé, préalable à l'ouverture éventuelle de fouilles sur décision du préfet.

A19. Exceptionnellement longue avec 101 km, l'A19, qui traverse pour l'essentiel la plaine de la Beauce, ne sera pas un chantier record pour les volumes. En phase de préparation, l'analyse des carottages faite en laboratoire permet d'inventorier toutes les possibilités de réutilisation des matériaux en déblai

A19. Despite its exceptional length of 101 km, the A19, which chiefly passes through the Beauce plain, will not be a record project in terms of volumes. In the preparation stage, through core sample analysis performed in laboratory, all the possibilities for re-use of the excavation materials are identified



et viser les nouveaux horizons

lopper. Le signe de cette évolution, qui va dans le bon sens, c'est le nombre croissant de projets en conception-construction, c'est-à-dire que l'on doit porter du stade d'avant-projet sommaire à celui d'avant-projet définitif. L'autoroute A19, dont Deschiron a fait une grande partie des études de terrassement, a été gagnée de cette façon."

■ UN PARC DE 350 MACHINES DÉTENUES EN PROPRE

Face à une mutation du marché qui engage son savoir-faire en profondeur, l'entreprise doit s'adapter et réagir. Pour autant, elle ne doit pas perdre son âme, surtout s'il s'agit d'un de ses points forts. 120 ans exactement après la création de l'entreprise par Firmin Deschiron, un migrant creusois qui s'est signalé dans le métier en s'équipant en pionnier de matériel moderne (premières pelles à vapeur dans les années 1910), le parc machines de Deschiron – 350 machines totalisant une puissance de 90 000 ch et d'une valeur de 100 M€ – reste un trait significatif de l'entreprise et un motif de fierté. Deschiron achète (50 grosses machines ont été acquises pour le chantier du TGV Est), revend et gère mécaniquement. Ce dernier volet est même le métier de la filiale FETP (France-Est TP), basée à Pont-Saint-Vincent. Ses 80 mécaniciens assurent l'entretien des machines ainsi que les petites et les grosses réparations. L'entreprise s'est spécialisée dans la maintenance préventive, notamment grâce à l'analyse des huiles et le diagnostic informatique.

"Le matériel focalise la passion du métier, et c'est une valeur de l'entreprise, souligne Patrick Boisson. D'ailleurs, ici, on pense davantage "outil de travail" que "machine". C'est pour cela que chaque engin est géré individuellement et que chacun d'entre eux est connu sur le bout des doigts pour ses qualités comme pour ses faiblesses."

La performance du matériel va de pair avec celle des hommes. Depuis 2003, pour aguerrir ses jeunes conducteurs d'engin sur le terrain sans affecter la production, Deschiron nomme sur tous ses chantiers importants un moniteur de conduite. La plupart du temps lui-même conducteur d'engin, celui-ci a pour mission, par un suivi individuel, de perfectionner les jeunes titulaires du Caces sur le plan de la sécurité et du rendement. Très attentif aux attentes de ses collaborateurs et mobilisé sur les enjeux de formation, Deschiron développe par ailleurs un important programme de formation in-

terne (lecture de plans, topographie, connaissance des sols, mécanique, etc.) et s'est associé début 2005 au projet de banque numérique du savoir des métiers du BTP sur DVD-Rom de Sogea Construction pour la partie terrassements.

■ A28, SECTION L3 ÉCOMMOY / DISSAY-SUR-COURCILLON : UN FINISH AU SPRINT

Après six ans d'interruption liée aux procédures de sauvegarde des lieux de reproduction du scarabée pique-prune (*Osmoderma eremita*), une espèce protégée par la convention internationale de Berne et la directive européenne Habitat, les travaux de la section L3 ont marqué, en juillet 2003, la reprise de la construction de l'axe Tours-Le Mans. Lancés sur la rive sud du Loir, où une zone inondable de 5 km (sur 10) a imposé d'importants travaux d'enrochements et aménagements d'assainissement, les terrassements de la section se sont poursuivis sur la rive nord (15 km) après la construction du viaduc franchissant la rivière à la hauteur de Mon-

Patrick Boisson
DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT
Deschiron

Frédéric Privé
DIRECTEUR D'EXPLOITATION
Deschiron

Laurent Garguilo
DIRECTEUR DES TRAVAUX
(SECTION L3, A28)
Deschiron

Jean-Yves Reynier
DIRECTEUR DE TRAVAUX
(LOT 12, TRONÇON A LGV EST)
Deschiron

Sandra Lamboley
RESPONSABLE TRAVAUX (ZAC N° 2
DE L'EUROPORT DE VATRY)
Deschiron

Cyril Bouziges
DIRECTEUR DE TRAVAUX
(SECTION M3A A85)
Deschiron

Delphine Reynier
DIRECTRICE DE TRAVAUX (A19)
Deschiron

UN PIONNIER DU MANAGEMENT QSE

Certifié ISO 9002 pour la qualité depuis 1996, Deschiron a bénéficié dès 1999 de la triple certification qualité (ISO 9001), sécurité (LSC version 97/01) et environnement (ISO 14001), à une époque où la certification sécurité ISO 9800 n'était pas encore accessible dans l'Hexagone, et depuis lors, l'entreprise est dotée d'un système de management QSE intégré. Désignée priorité à l'échelle du groupe VINCI depuis 2003, la sécurité fait l'objet chez Deschiron de démarches d'autant plus exigeantes que son système de management répond à des critères de type industriel. Chaque accident donne lieu à une enquête, et une "réunion sécurité terrain", la RST, est organisée une fois par mois par petits groupes depuis 2000. "L'essentiel, dans les initiatives prises, est d'intéresser et d'impliquer la base, sans quoi il est vain d'espérer une amélioration", estime Patrick Boisson. Début 2004 a ainsi été mis en place un petit groupe d'une vingtaine de collaborateurs, les "chevaliers de la sécurité", qui arborent un casque et un gilet spécial. Engagés sur une charte et choisis pour leur professionnalisme et leur fibre sécurité, ils ont pour mission d'incarner l'exemple et de dispenser une ou deux fois par an des formations sur le terrain.

En matière d'environnement, l'entreprise dispose sur ses chantiers de responsables spécialisés de niveau ingénieur, en charge du plan de respect de l'environnement (PRE) des projets, qui ont pour mission de répondre aux exigences de la réglementation et aux attentes des maîtres d'ouvrage et des riverains. Beaucoup est fait en matière de protection de l'eau, de prévention des pollutions accidentelles et de gestion des déchets.

"La gestion de l'eau fait l'objet d'une belle maîtrise, souligne Patrick Boisson. En 2003, la canicule n'a par exemple pas entraîné un seul arrêt de chantier. Et bien que l'on n'ait jamais communiqué sur ce sujet, on a pu remarquer que l'appropriation des enjeux environnementaux essaime jusque dans les familles de nos collaborateurs."

Photo 1

A28. Des passages supérieurs réservés aux grands mammifères (sangliers, chevreuils, renards, etc.) sont aménagés dans les zones de forêt (ici, la forêt de Bercé, à mi-parcours de la section L3)

A28. Overpasses reserved for the large mammals (wild boars, roe deer, foxes, etc.) are developed in forest areas (here, Bercé forest, midway on section L3)



Photo 2

A28. Le recours à la technologie laser permet d'accélérer les travaux de réglage et d'atteindre une précision de 10 mm

A28. The use of laser technology allows grading work to be performed faster and with a precision to within 10 mm



► tabon. "Outre cette zone inondable, la principale particularité du chantier a été la présence au nord et en fond de remblais de zones compressibles sur une longueur totale de 2 km, qui a nécessité purges, assainissements et traitement par préchargement", indique Laurent Garguilo, le directeur de travaux. Sur un tracé traversé par 16 cours d'eau (dont certains de première catégorie piscicole) ou talwegs, la nature du terrain, constitué d'argiles sableuses ou limono-sableuses particulièrement sensibles à

l'eau a par ailleurs imposé de très importants aménagements provisoires d'assainissement, suivis avec toute l'attention requise par le chargé environnement du chantier.

Aléa de taille, la date prévue pour la mise en service de l'autoroute a été ramenée en cours d'opération d'avril 2006 à décembre 2005. Le chantier s'est donc poursuivi en travail posté durant tout l'hiver 2005, imposant de nombreux traitements supplémentaires des matériaux et des mesures draconiennes de sécurité sur le viaduc, où les engins avaient interdiction de se croiser, et mobilisant d'importants moyens humains et matériels de renfort. Au plus fort de l'activité, quelque 250 personnes et 150 machines ont ainsi pu être dénombrées sur le chantier (photos 1 et 2).

A28, SECTION L3 (25 KM)

- Objet du contrat : terrassements, y compris couche de forme, et assainissements
- Maître d'ouvrage : Cofiroute
- Maître d'œuvre : Socaso
- Calendrier terrassement : juillet 2003 - juillet 2005

Quantités

- Déblais : 3,6 millions de mètres cubes
- Remblais : 2,9 millions de mètres cubes
- Couche de forme : 200 000 m³ de sables argileux traités en centrale
- Terre végétale : 350 000 m³
- Matériaux impropres : 500 000 m³

Moyens

- 2 échelons de scrapeurs
- 2 ateliers de pelles type Liebherr 974 et tombereaux Caterpillar 773
- 4 ou 5 ateliers moyens (travaux de décapage ou de purge)
- 5 équipes assainissements

■ LGV EST. LOT 12 TRONÇON A – CLAYE-SOUILLY/ LIZY-SUR-OURCQ : ALÉAS SUR LA VOIE

Les chantiers de lignes à grande vitesse, c'est une de leurs caractéristiques, s'accompagnent pour les entreprises de la réalisation des études d'exécution – un "plus" conséquent pour qui connaît le niveau d'exigence du Référentiel technique du maître d'ouvrage, qui s'est ajouté dans le cas du lot n° 12, tronçon A à la tension du délai dès le démarrage, puisqu'il s'agissait d'un des derniers lots notifiés. Pas des plus simples, l'équation de base s'est aussi rapidement compliquée, car les terres agricoles traversées, dans la plaine de la Brie, ont révélé des conditions géologiques et géotechniques sensi-



Photo 3
LGV Est. Pour l'essentiel, les 24 km du lot n° 12 traversent les vastes étendues agricoles de la Brie, à l'exception de la vallée de la Théroouanne, que la voie franchit au moyen d'un viaduc de 300 m
LGV Est High-Speed Train Line. The 24 km of work section No. 12 mostly pass through the vast agricultural expanses of the Brie region, with the exception of the Théroouanne Valley, which the track crosses by means of a 300-metre viaduct

blement différentes de ce qui était défini dans le marché. Les campagnes de reconnaissance ont ainsi mis en évidence un nombre de cavités devant être comblées au coulis de ciment beaucoup plus important que ce qui était initialement prévu, et il en est allé de même avec les terrains compressibles de la vallée de la Théroouanne, une zone marécageuse "sensible" franchie par un viaduc de 300 m, les purges à réaliser en fond de déblais (270 000 m³ au lieu de 90 000 m³) et les masques de protection des talus (120 000 m³ au lieu de 74 000 m³). À ces imprévus sont venus s'ajouter d'autres, telles les contraintes de circulation imposées par la DDE dans une région soumise à d'importants flux automobiles. Sur le plan de la sécurité, la conjonction d'une emprise deux fois moins large que dans le cas d'une autoroute et l'impossibilité d'aménager des voies de détournement ont accru les contraintes de phasage. Pour prévenir les risques liés à la coactivité (surveillés de près par la Cramif), des passes charretières prototypes ont dû être installées sur tous les lieux où intervenaient simultanément les terrassiers et les ouvragistes. Enfin, la gestion par l'entreprise de nombreuses occupations temporaires a généré de fréquents contacts et réunions avec les agriculteurs et entraîné une part significative de travaux connexes en marge d'un chantier où ceux-ci ne manquaient déjà pas. "Au final, concluent Frédéric Privé, le directeur d'exploitation, et Jean-Yves Reynier, le directeur de travaux, tous ces aléas sont venus bouleverser la programmation et ont conduit à ren-

forcer les moyens, à refondre les plannings et à travailler en permanence sous très haute tension pour tenir le délai coûte que coûte." (photos 3, 4, 5, 6 et 7).

Photo 4
LGV Est. Au fur et à mesure de l'avancement, les cavités du terrain ont fait l'objet de campagnes de reconnaissance et donné lieu à des forages et à des injections venant bousculer l'ordonnement des travaux

LGV Est High-Speed Train Line. As the work progressed, reconnaissance campaigns were carried out on cavities in the ground, and drilling and injection works were performed, disturbing the work schedule



Photo 5
LGV Est. Pour pallier les risques liés à la coactivité des terrassiers et des équipes de génie civil, des passes charretières prototypes ont été aménagées sur tous les sites de construction d'ouvrages
LGV Est High-Speed Train Line. To overcome the risks related to concurrent work by earthwork contractors and civil engineering teams, prototype truck passageways were developed on all the engineering structure construction sites



Photo 6
LGV Est. D'importantes purges ont précédé la réalisation des masques de protection des talus, dont le volume global atteint 120 000 m³
LGV Est High-Speed Train Line. Extensive drainage preceded the laying of facing membranes to protect the earth banks, whose total volume amounts to 120,000 cu.m



Photo 7
LGV Est. Toutes les arases réalisées dans les marnes gypseuses, soit 5 km sur les 24 du tracé, ont été étanchéifiées à l'aide de géomembranes bitumineuses
LGV Est High-Speed Train Line. All the levelling performed in the gypseous marls, namely 5 km out of the 24 km of route, were sealed using bituminous geomembrane barriers

LGV EST. LOT 12, TRONÇON A (24,350 KM)

- Objet du contrat : terrassements, assainissements, ouvrages d'art et rétablissements de circulation
- Titulaire : groupement Deschiron (mandataire), GTM Terrassement, GTM Génie civil et Services, Sogea TPI, Chantiers Modernes, Composants Précontraints, Eurovia, Sobeia Environnement
- Maître d'ouvrage : Réseau Ferré de France
- Maître d'œuvre : SNCF
- Calendrier des travaux : 1^{er} juin 2003 - 1^{er} septembre 2005, y compris les études d'exécution

Quantités

- Déblais : 4 millions de mètres cubes
- Remblais : 1,8 million de mètres cubes
- Couche de forme et sous-couche : 270000 m³
- Mise en dépôt : 2 millions de mètres cubes

Moyens

- 2 échelons de scrapeurs
- 6 ateliers de pelles (type Liebherr 974, 964, 954 et 944) et tombereaux Caterpillar 773, 740 et 725
- Effectif en pointe : 300 personnes pour le terrassement

ZAC N° 2 DE L'EUROPORT DE VATRY (CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE) : LE RELAIS DES PROJETS RÉGIONAUX

Si la plate-forme aéroportuaire de Vatry (Seine-et-Marne), tournée vers l'Europe et dédiée au fret, n'a pas véritablement pris son envol depuis son ouverture en janvier 2000, la construction d'infrastructures logistiques dans la zone, elle, va bon train. Après avoir créé une première ZAC de 265 ha, la SEM Europort en a mis en chantier une seconde de 120 ha en juin dernier, dont Deschiron a achevé les terrassements en septembre dernier, et un nouveau projet du même type est prévu pour 2006 à Illange (Moselle), au nord de Metz.

"Contrairement à ce que l'on pourrait croire, ce type de travaux n'est pas plus simple qu'une plate-forme de TGV, affirme Sandra Lamboley, la responsable des travaux, et en réglage, le travail est équivalent à une section de 35 km d'autoroute. Et pour la sécurité, des précautions particulières doivent aussi être prises, car il est plus difficile de se repérer dans un espace fermé."

Point particulier qui illustre la technicité requise sur ce chantier, la totalité des matériaux de déblais devait être utilisée en remblai sans traitement, obligeant à soigner les mouvements de terre et les reprises après intempéries (les fortes pluies de juillet ont contraint le chantier à s'arrêter 10 jours de suite). Sur le plan de la préparation et des études d'exécution, le savoir-faire requis n'a pas été moindre

Photo 8

Vatry. À proximité immédiate de l'Europort et des grands axes routiers, la première tranche de travaux de la seconde ZAC a été achevée en septembre

Vatry. In the immediate vicinity of the Europort and the major trunk roads, the first work section for the second "ZAC" mixed development zone was completed in September



car un respect rigoureux des infrastructures existantes (bassin, réseaux) et de celles à venir faisait partie des exigences contractuelles (photos 8 et 9).

ZAC N° 2 DE L'EUROPORT DE VATRY (120 HA)

- Objet du contrat : terrassements et études d'exécution
- Maître d'ouvrage : SEM Europort
- Maître d'œuvre : Iris Conseil
- Calendrier travaux : juin-septembre 2005

Quantités

- Déblais : 2,2 millions de mètres cubes
- Remblais : 2,2 millions de mètres cubes

Moyens

- 2 échelons de scrapeurs
- 1 atelier de pelle (type Liebherr 984) et tombereaux Caterpillar 773
- Effectif : 60 personnes

■ A85, SECTION M3A – ESVRES/ ÉPEIGNÉ-LES-BOIS : TRANSPORTS LONGUE DISTANCE (photos 10 et 11)

Située au sud-est immédiat de Tours entre les vallées de l'Indre (au sud) et du Cher (au nord), la section M3A de l'A85 est encadrée par deux viaducs franchissant le Chezelle et le Beugnon. D'un point de vue environnemental, le tracé traverse plusieurs zones archéologiques sensibles, passe à proximité de cinq Znieff (zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique) de type 1 et de six stations botaniques, et doit respecter les périmètres de protection de la tour du Brandon, un monument



Photo 9
Vatry. Aux prises avec un matériau crayeux, les conducteurs de Deschiron ont aussi dû s'adapter à une géométrie d'emprise inhabituelle

Vatry. Struggling with a chalky material, Deschiron's operators also had to adapt to an uncustomary land configuration



Photo 10
A85. Dans sa partie ouest, où la section traverse une vaste zone de plaine, la plate-forme autoroutière est aménagée sur un remblai "rasant" d'une épaisseur de 1 à 3 m longue de 14 km

A85. In its western part, where the section passes through a vast plain area, the motorway formation level is developed on a "low-built" embankment 1 to 3 m thick and 14 km long

historique, ainsi que de la zone de captation de l'eau potable de la commune de Bléré.

"Sur le plan géotechnique, il comprend principalement deux parties, indique Cyril Bouziges, le directeur de travaux. À l'est il s'agit d'une section classique composée d'une succession de déblais et de remblais dans un terrain composé d'ar-



Photo 11
A85. À partir d'août, où il a atteint son pic d'activité avec 220 personnes, le chantier s'est concentré sur le transport longue distance d'un million de mètres cubes de matériaux extraits de la butte calcaire de son extrémité ouest

A85. From August on, when it reached its peak activity with 220 workers, the project focused on long-distance transport of one million cubic metres of materials extracted from the calcareous hillock at its western end

giles à silex et de limon, et à l'ouest d'un long remblai rasant avec neuf rétablissements de circulation par passage supérieur et d'une butte calcaire de 1 million de mètres cubes, qui constituent la vraie particularité du chantier."

Répartis en faible épaisseur (entre 1 et 3 m), les 800 000 m³ de matériau du remblai rasant proviennent en effet en intégralité de la butte calcaire. Commencé en avril 2005, leur transport à longue distance mobilise la quasi-totalité des engins roulants du chantier, notamment depuis août, où le chantier est entré dans sa phase de production maximale et rassemble une grande majorité des conducteurs de l'entreprise devenus disponibles après l'achèvement d'autres opérations – et il devrait se prolonger jusqu'à la fin de l'année, et "peut-être au-delà si les conditions météorologiques l'exigent".

A85, SECTION M3A (24 KM)

- Objet du contrat : terrassements, assainissements et plate-forme support de chaussée d'autoroute
- Maître d'ouvrage : Cofiroute
- Maître d'œuvre : Socaso
- Calendrier terrassements : novembre 2004 - septembre 2006

Quantités

- Terre végétale mise en dépôt : 360 000 m³
- Déblais : 2 millions de mètres cubes
- Remblais : 1,5 million de mètres cubes
- Minage : 200 000 m³
- Couche d'arase : 250 000 m³ de matériau de fourniture extérieure traités

Moyens

- 2 échelons de scrapeurs
- 2 ateliers de pelle (type Liebherr 974) et tombereaux Caterpillar 773
- Effectif du chantier en pointe : 220 personnes

ABSTRACT

Smoothing out economic cycle effects and targeting new horizons

Various authors

After completion of work on the eastern high-speed train line and until the A19 motorway project gets under way, Deschiron (Sogea Construction, Vinci group), which is celebrating its 120th anniversary this year, is, like its major competitors, faced with the diminishing number of large projects. Used to coping with the cycles characteristic of major work projects, the company is in the meantime working temporarily on the development of projects on a regional scale, and is deploying its forces in an industrial policy by which it is increasingly involved in engineering, design and the upstream aspects of projects generally.

RESUMEN ESPAÑOL

Allanar los efectos de coyuntura y alcanzar nuevos horizontes

Autores diversos

Tras la finalización de las obras de la Línea de Alta Velocidad Este y antes de que de comienzo la obra de la Autopista A19, Deschiron (Sogea Construction, grupo Vinci), que conmemora este año su 120º aniversario, tropezó así como sus grandes competidores con la escasez de proyectos significativos. Acostumbrado a hacer frente a los ciclos característicos de grandes trabajos, la empresa ha encontrado una solución temporal de actividad en el desarrollo de los proyectos de dimensión regional y se moviliza hacia una evolución de la actividad que le implica de forma incremental en los estudios, el establecimiento del concepto y los estudios preliminares de los proyectos.

Le lot 34 A dernier TOARC de la LGV Est Européenne est livré à Réseau Ferré de France (RFF)

Etienne Hosotte

DIRECTEUR DE PROJET
Fougerolle-Ballot Terrassements

Christophe Bellet

INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN
Fougerolle-Ballot Terrassements

Le lot 34 A est situé à l'est de la LGV Est Européenne, sur les départements de Meurthe-et-Moselle et de la Moselle. Long de 25 km, c'est un des lots les plus importants de la ligne puisqu'il a nécessité de terrasser plus de 10 000 000 de mètres cubes dans des matériaux à dominante argileuse et marno-calcaire. Il a également nécessité la construction de 25 ouvrages d'art dont trois non courants, sur l'autoroute A31, la RD 910 et la rivière la Seille.

Le maître d'ouvrage, Réseau Ferré de France (RFF) a confié la maîtrise d'œuvre de ce lot au groupement SNCF-Arcadis et les travaux au groupement Fougerolle-Ballot Terrassements (mandataire), Bec, Demathieu et Bard, Lingenheld, Muller GC, MTHA et Trabet.

A l'intérieur du délai global de 28 mois, le groupement s'est organisé en trois phases dont une période de préparation où toutes les énergies ont été mobilisées pour identifier et préciser les risques et trouver des solutions techniques satisfaisantes. Certains secteurs ont mobilisé très tôt les experts géotechniciens; leurs préconisations ont permis au groupement d'anticiper tous désordres et de réagir très vite lorsque les seuils d'alerte étaient atteints. Cette stratégie a ménagé une campagne 2004 de très forte activité et a permis au groupement en 2005 de livrer en avance le lot 34 A à RFF.

■ PRÉSENTATION DU LOT 34 A

(photo 1)

Le contrat

Alors que d'autres lots de la LGV Est étaient déjà en pleine activité, ce chantier de 25 km qui s'étend entre Champey-sur-Moselle et Flocourt, sur les départements de la Meurthe-et-Moselle et de la Moselle, a été notifié début août 2003 par RFF à un groupement de six entreprises, dont Fougerolle Ballot Terrassements est mandataire.

L'ensemble des études d'exécution, des travaux de terrassements, d'hydraulique, d'ouvrages d'art et de rétablissement des voies de communications devait être mené à bien dans un délai global de 28 mois.

Le groupement SNCF-Arcadis assurait la maîtrise d'œuvre.

Les travaux de terrassements ont été effectués par le groupement Fougerolle Ballot, Bec, Lingenheld. Les ouvrages d'art ont été réalisés par le groupement Demathieu et Bard, Bec, Muller G.C et le groupement Lingenheld, MTHA s'est chargé des travaux d'hydraulique.

L'entreprise Trabet était titulaire des travaux des chaussées des rétablissements de communication. Conforme à une nouvelle base de contractualisation proposée par RFF, ce marché comporte ainsi une nomenclature des risques prévisibles liés à différentes phases de l'exécution, aux enchaînements et aux délais, aux critères de qualité ou d'environnement.



Nature et qualité des matériaux du site (figure 1)

Contexte géologique

Le lot débute sur la rive droite de la Moselle et franchit ensuite la côte liasique du bois Fréhaut établie sur les argiles à amalathées et les grès médioliasiques du Pliensbachien.

Plus à l'est, ces formations constituent avec les argiles à Promicrocérans le substratum de la vallée de la Seille, partiellement inondable, qui a été surcreusé entre la RD 910 et le ru du Grand Breuil,

Photo 1
Plate-forme ferroviaire terminée sous un des passages grande faune

Completed railway track subgrade under one of the large game overpasses

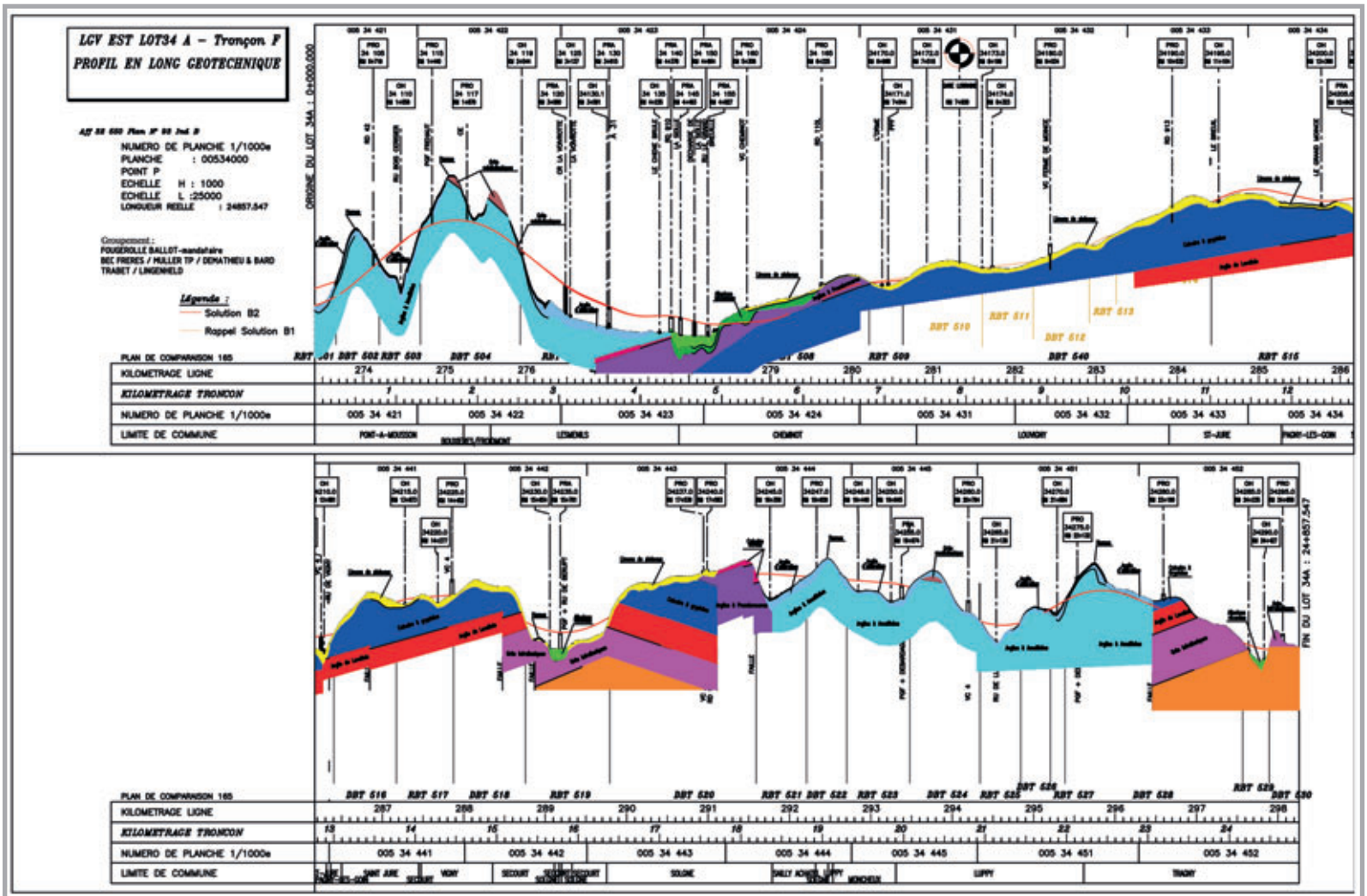


Figure 1
Profil en long géotechnique

Geotechnical longitudinal profile



puis comblé par des alluvions récentes très peu consistantes de 6 à 8 m d'épaisseur.

Ensuite, sur une douzaine de kilomètres, le tracé se développe sur un plateau structural à ossature marno-calcaire du Sinémurien (calcaires à Gryphées), constamment recouvert par un manteau limoneux. Localement, ce plateau est entaillé par des thalwegs (ru de Vigny, ru du Bérupr...) où affleure, à la faveur de failles, le soubassement triasique représenté de haut en bas par les argiles de Levallois et les grès infraliasiques.

Au niveau de la commune de Solgne, un réseau de failles fait apparaître le calcaire ocreux, et à nouveau les argiles à Promicrocérans et les argiles à amalthées qui occupent les vastes étendues boisées de l'extrémité est du lot.

Hypothèse de réutilisation des matériaux et mouvement des terres

Les matériaux les plus réutilisés en remblais sont les calcaires à gryphées, les limons et les argiles à Promicrocérans.

Une partie très importante des limons est réservée aux parties supérieures des terrassements (PST). Le déficit en matériaux réutilisables en remblais dans la partie ouest du chantier est à l'origine de

distances de transport assez longues : 32 % des matériaux sont transportés à plus de 1500 m. Plus de 1 million de mètres cubes sont transportés d'est en ouest, en traversant les brèches que constituent la Seille, la RD 910 et l'autoroute A31, et en utilisant les ouvrages provisoires métalliques que le groupement a décidé d'installer dès la période de démarrage du chantier (photo 2). Les excédents de déblais sont mis en dépôts définitifs; huit sont mis à disposition par le maître d'ouvrage et un négocié directement par le groupement. Tous sont rendus à un usage agricole en suivant un protocole très strict établi en concertation avec les organismes de la profession agricole.

ORGANISATION DU CHANTIER

Le délai et la date de notification du marché, en août 2003, ont amené le groupement à organiser le chantier en trois étapes avec une stratégie de planning axée sur les objectifs principaux suivants :

- ◆ s'affranchir des contraintes de sectionnement du chantier dues aux voies interceptées;
- ◆ la nécessité de réaliser au plus vite les remblais en zones compressibles.



Photo 2
Ouvrage provisoire
de franchissement
de l'autoroute A31
et plate-forme
de montage de l'ouvrage
définitif

Temporary structure
for crossing the A31
motorway and platform
for erection
of the permanent
structure

Préparation du chantier et études

La première étape, qui englobe la période de préparation de deux mois correspond à l'année 2003. Dans cette première phase, les études d'exécution ont été confiées à deux bureaux d'études spécialisés qui ont lancé l'établissement des premiers plans sur la base des éléments connus dans le marché (D.G.G.H. en particulier). Ce démarrage rapide a amené le groupement à confier une mission très importante à un coordonnateur études-travaux, véritable charnière entre le terrain et les bureaux d'études.

Parallèlement, en effet, les géomètres du groupement confirmaient la topographie du projet, en particulier dans les zones antérieurement boisées des extrémités ouest et est. De même, les reconnaissances géotechniques étaient menées par les géologues du groupement, appuyés par un bureau d'études régional spécialisé.

Cette anticipation des études a provoqué un certain nombre de reprises de plans d'exécution, mais a permis de prendre très tôt connaissance de sujétions techniques particulières et de lancer des études techniques spécifiques. De plus, l'objectif du groupement de pouvoir commencer les travaux en grandes masses, avec des plans visés par la maîtrise d'œuvre, dès le printemps 2004, a été atteint.

Au cours de cette phase préliminaire, trois zones ont été confirmées comme présentant des risques de tassements ou d'instabilité importants. Dans la vallée du Bérup et de la Seille, les reconnaissances

ont fait apparaître une grande hétérogénéité dans les valeurs de cohésion et angles de frottement des matériaux d'assise des remblais.

A l'issue d'études géotechniques complémentaires, les dispositifs de drainage et les phasages des remblais ont été modifiés, en utilisant des techniques éprouvées et ne bouleversant pas le coût du projet.

Ainsi, dans la vallée du Bérup les reconnaissances ont identifié des alluvions récentes et une frange d'altération des grès infraliasiques dans lesquels un tassement de 70 cm en première consolidation était attendu, mais avec un délai de consolidation de 5 à 9 mois qui devenait incompatible avec le délai global. Les purges prévues initialement ont donc été remplacées par des colonnes ballastées sous les blocs techniques de l'ouvrage et un maillage de drains verticaux a été mis en place sous les parties les plus hautes du remblai. De cette manière, les remblais de préchargement ont été mis en œuvre suffisamment tôt et ont permis la réalisation des pieux de fondation dans un terrain consolidé. De plus, cette technique a permis de solutionner le problème lié à la stabilité longitudinale du remblai, de part et d'autre du ru du Bérup.

Pendant tout le chantier, le suivi des tassements du remblai dans la vallée du Bérup s'est fait par quatre profilomètres, dix cellules de mesure de la pression interstitielle et deux piézomètres.

Dans la vallée de la Seille, le remblai repose sur un faciès compressible d'alluvions récentes de 6 à 8 m d'épaisseur, reposant sur des alluvions anciennes en profondeur, de 4 m d'épaisseur. Le sub-

Figure 2a
 Vue en plan
 de l'instrumentation
 dans la vallée de la Seille
 Plan view
 of instrumentation
 in the Seille Valley

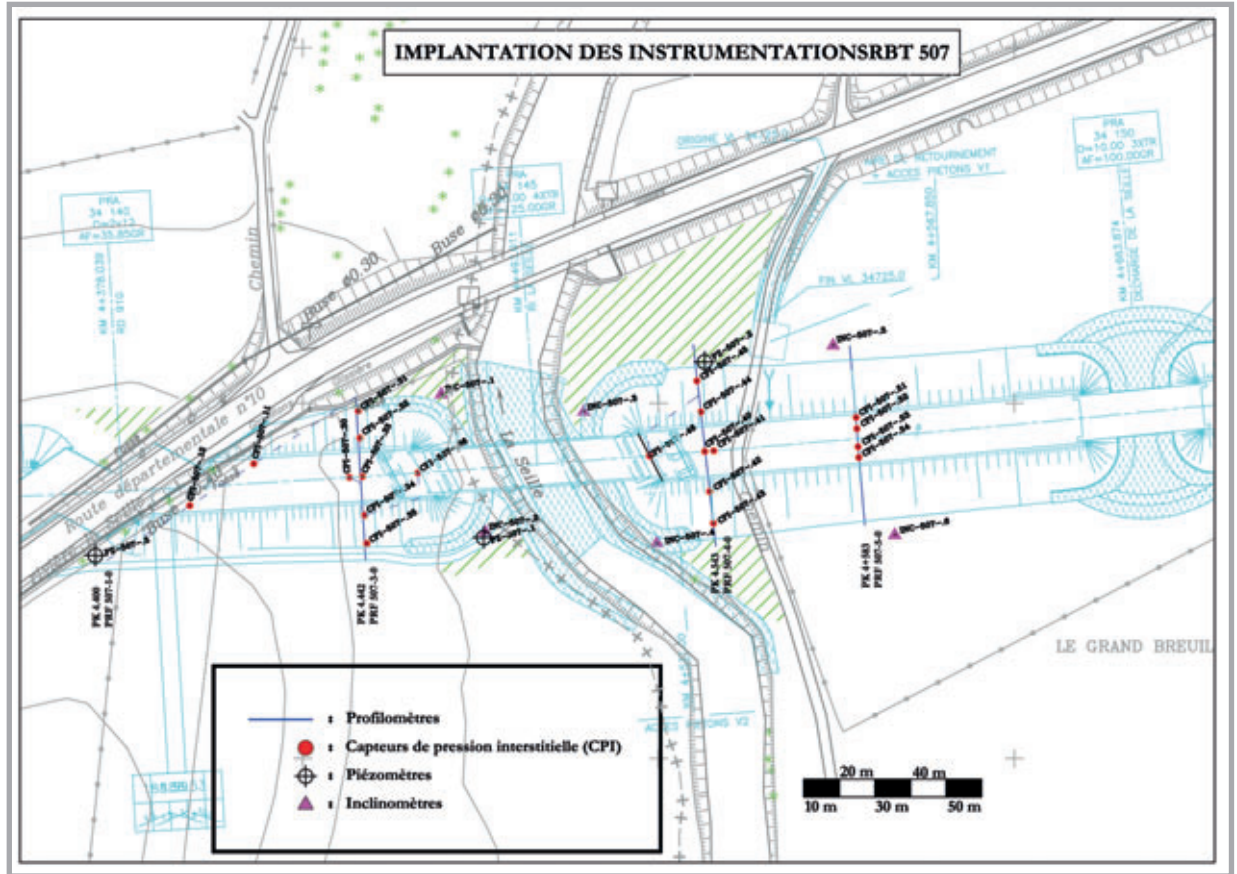
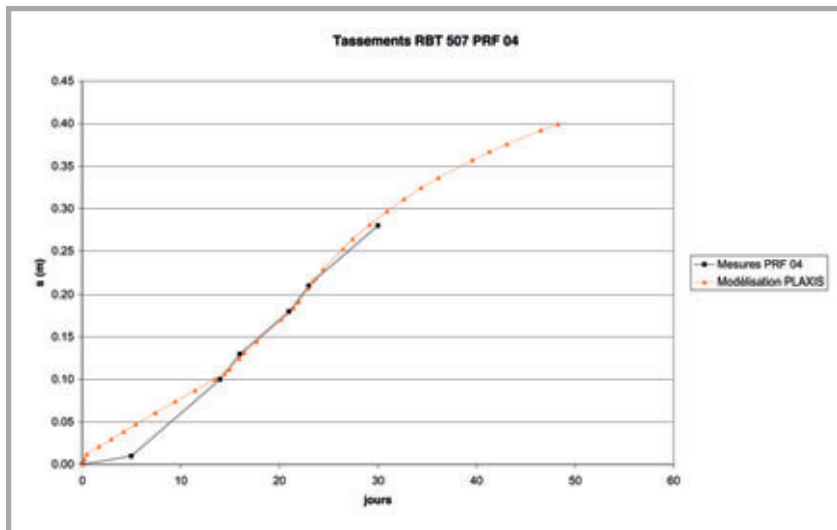


Figure 2b
 Prévisions
 de tassements
 dans la vallée de la Seille
 Predictions concerning
 subsidence in the Seille
 Valley



stratum se compose d'argile marneuse à Promicrocéras dont une frange altérée sur une épaisseur de 2 à 3 m pouvait générer également des tassements. Les calculs de stabilité et de tassement du remblai, établis avec les caractéristiques de cisaillement des matériaux identifiés dans le cadre des reconnaissances complémentaires, ont fait apparaître des amplitudes de tassement de l'ordre de 1,60 m et des délais de consolidation incompatibles avec les délais contractuels. Le maillage des drains verticaux a dû ainsi être sensiblement resserré. Les calculs de stabilité ont également abouti à des coefficients de sécurité sensiblement

inférieurs à 1,5, tant dans le sens transversal que longitudinal de part et d'autre des berges de la Seille.

Les divergences d'appréciation des experts géotechniciens sur ce sujet, ont amené le groupement, en concertation avec le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, à établir un modèle géotechnique numérique aux éléments finis à partir duquel une méthode observationnelle a été élaborée. Elle s'est appuyée sur la comparaison des valeurs mesurées sur le terrain à celles déterminées a priori par le calcul. Cette méthode a nécessité la mise en œuvre de neuf profilomètres, six inclinomètres, cinq piézomètres et de trente cellules de pression interstitielle. Les mesures étaient effectuées suivant une fréquence variable, parfois journalière pendant les phases de montée du remblai (figures 2a et 2b). Une procédure spécifique à l'instrumentation de ce remblai a été établie. Elle précise les moyens et modes opératoires à respecter et définit les seuils d'alerte liés à des valeurs anormales constatées lors des mesures de chaque instrumentation. Une chaîne de prévention a également été définie pour préciser les différents niveaux et les délais décisionnels.

Préalablement à la réalisation de ce remblai, les drains verticaux ont été mis en place sous la première couche de matériaux drainants (ZI et ZH) qui en constituent l'assise.

Parallèlement, une recherche a été menée par le groupement pour assurer la stabilité dans le sens

longitudinal, de part et d'autre de la Seille. Dans ce site où se succèdent ponts-rails et remblais, les ingénieurs ont été tentés de réaliser un ouvrage unique enjambant la Seille et la RD 910. A cette éventualité, le maître d'ouvrage a préféré la solution d'un allongement du seul ouvrage sur la Seille qui est ainsi passé de quatre à cinq travées de 9 à 18 m. Les blocs techniques de ce nouvel ouvrage, écartés ainsi des berges de la Seille, ont permis de retrouver un équilibre et une stabilité satisfaisants (photo 3).

La troisième zone, peut-être la plus spectaculaire, concerne le vallon du bois du Cerisier. Ce vallon très encaissé est coupé par le projet, avec un biais important d'environ 50 grades, par un remblai de grande hauteur (environ 25 m). En fond de vallon, un ouvrage hydraulique constitué d'un cadre en béton armé rétablit le ru du Cerisier, sur une longueur de 90 m.

Les reconnaissances géotechniques ont fait apparaître, en fond de vallon et sur les versants, une épaisseur importante de 3 à 6 m d'argiles à amalthées altérées très plastiques dans lesquelles peuvent se développer des glissements plus ou moins profonds (photo 4).

La complexité de ce site a nécessité la modélisation numérique aux éléments finis du comportement sol-structure entre l'ouvrage hydraulique et le remblai et permettant également de vérifier la stabilité du remblai sur son sol d'assise. Avec des tassements attendus d'environ 20 cm, la modélisation a amené à modifier légèrement l'assise du remblai en y intégrant une bêche de pieds et une banquette latérale.

Ici également, une instrumentation importante a été mise en place : quatre profilomètres dont deux le long de l'ouvrage hydraulique, cinq inclinomètres, quatre cellules de pression interstitielle et des cellules de déformation à l'intérieur de l'ouvrage.

Travaux de terrassements et d'ouvrages

La deuxième étape concerne la campagne de travaux de l'année 2004 où les gros terrassements ont été menés jusqu'au niveau couche de forme. Les moyens mobilisés par le groupement ont été considérables pendant cette période :

- ◆ 500 personnes étaient présentes sur ce chantier dont plus de 300 affectées aux travaux de terrassements ;
- ◆ les moyens matériels étaient constitués de plus de 150 machines dont la production journalière dépassait 60 000 m³ :
 - 2 échelons de motorscrapers CAT 631,
 - 1 échelon de pelle CAT 385 et dumpers de 35 t,
 - 1 échelon de pelle CAT 385 et dumpers de 50 t,
 - 1 échelon de pelle CAT 375 et camions 8 x 8,
 - 1 échelon de pelle CAT 375 et tombereaux de 40 t,



Photo 3
Ouvrage allongé sur la Seille
Lengthened bridge over the Seille

Photo 4
Assise de remblai et glissement fossile
Foundation of backfill and fossil slip

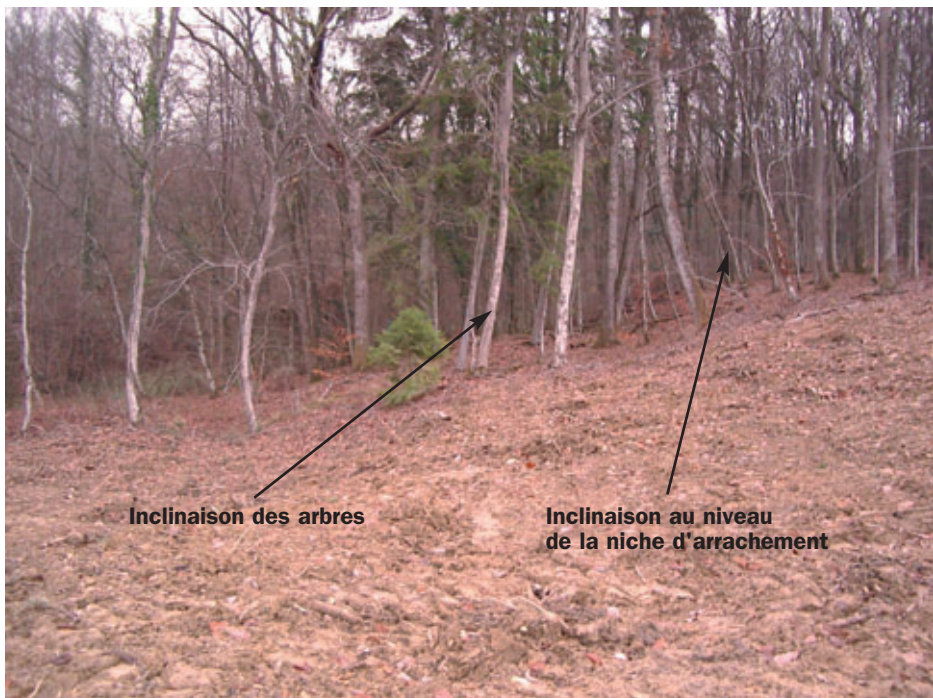


Photo 5
Echelon
de motorscrapers

*Fleet
of motorscrapers*



Photo 6
Pelle et tombereau
en action

*Shovel
and dumper
in action*



Photo 7
Pelle et ripper

*Shovel
and ripper*



- 4 échelons de pelles de 50 t avec tombereaux de 35 ou 40 t (photos 5, 6 et 7).

Au cours de cette période de forte activité, les fréquences des mesures des instrumentations géotechniques se sont calées aux cadences de mise en œuvre des remblais et certains résultats ont conduit le groupement à bouleverser sa stratégie de terrassement.

Le cas s'est ainsi présenté sur les zones "à risques" où les valeurs de tassement mesurées sur les profilomètres ou de cisaillement mesurées sur les inclinomètres ont atteint les seuils d'alerte préalablement définis.

Dans la vallée de la Seille, la montée du remblai a dû être interrompue pour permettre la dissipation des pressions interstitielles dont les valeurs mesurées avaient atteint les seuils d'alerte.

Dans le vallon du Bois du Cerisier, alors que le remblai atteignait 7 m de hauteur, des mouvements anormaux ont été constatés à grande profondeur dans les faciès sains des argiles à amalthées. Ces déformations ont conduit le groupement à modifier

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Travaux préparatoires aux terrassements

Plus de 150 000 ml de drains verticaux

Terrassements de la plate-forme ferroviaire, de la zone de la gare lorraine et des rétablissements de communication

- Décapages de terre végétale, déblais et reprises sur stocks : > 10 000 000 m³
- Traitements à la chaux ou aux liants hydrauliques : > 400 000 m³
- 650 000 m³ de matériaux de zone inondable et de zone humide
- 540 000 m³ de matériaux de masques drainant et de protection
- 360 000 m³ de couche de forme et de sous-couche

Ouvrages d'art

- 15 ponts-routes (PRO) dont 4 servent de passages grande faune
- 7 ponts-rails (PRA)
- 3 ouvrages non courants (OANC), 1 sur l'autoroute A31, 1 sur la RD 910, et 1 sur la rivière La Seille

Assainissement

- 38 000 m de fossés
- 1 700 m d'ouvrages hydrauliques
- 18 000 m de fossés préfabriqués à barbacanes

Chaussées

- 30 000 m² d'enduits
- 5 000 t d'enrobés

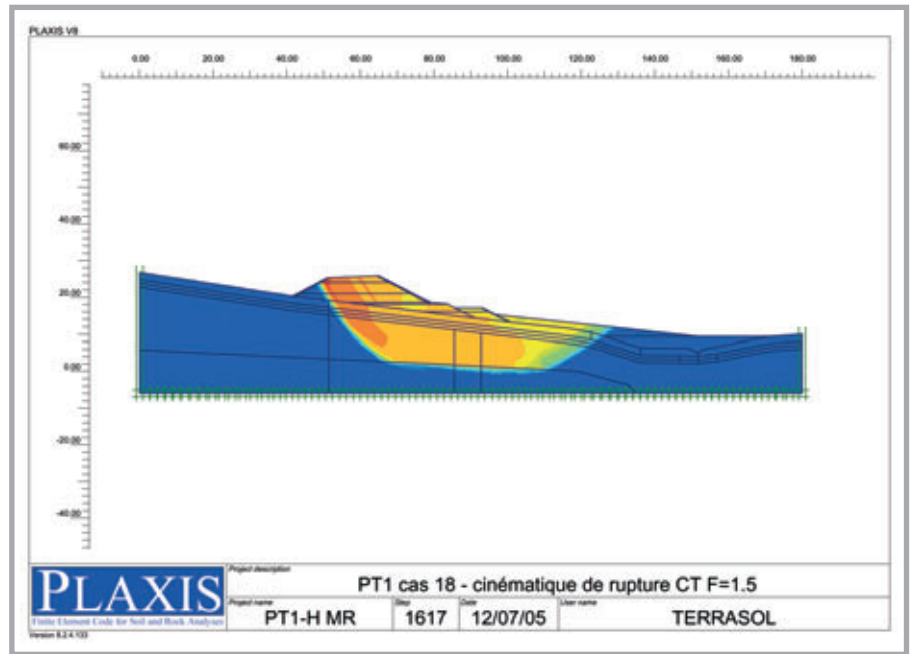
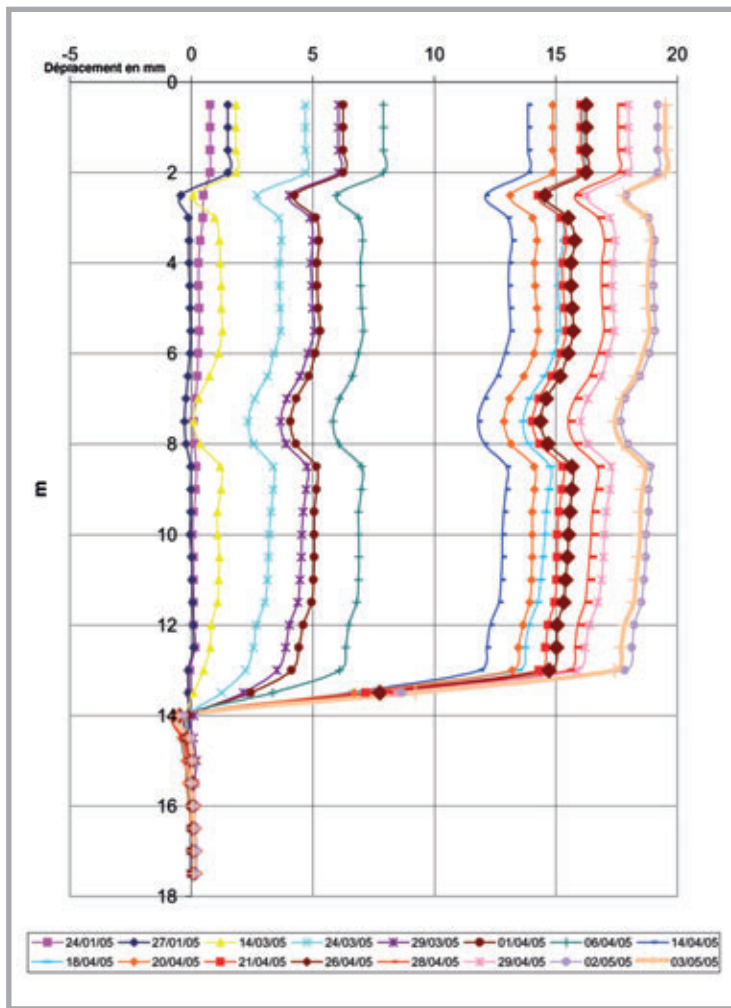


Figure 3a
Mesures inclinométriques
Clinometric measurements

Figure 3b
Modélisation numérique du remblai
Digital modelling of the embankment

la géométrie de la base du remblai en élargissant les banquettes déjà existantes pour s'opposer aux déformations constatées et prendre en compte des hypothèses de cisaillement résiduelles dans les faciès cisailés. Ces mesures prises rapidement ont été justifiées à partir d'un calage des modèles numériques aux éléments finis (figures 3a et 3b). Le dispositif d'instrumentation déjà en place a été augmenté par un grand nombre d'inclinomètres complémentaires, des cellules de pression interstitielles disposées au droit des zones de rupture. Le groupement a entrepris également très rapidement la réalisation de nouveaux sondages afin de comprendre au mieux les mécanismes mis en jeu sous l'assise du remblai. Des essais au piézocône et des mesures de dissipation très longues supérieures à 24 heures ont été réalisés pour tenir compte de la nature surconsolidée des matériaux et leur faible perméabilité (proche de 10^{-9} m/s). Les renforcements mis en œuvre ont conduit à une stabilisation et permirent la poursuite de la construction du remblai, tout en suivant rigoureusement l'évolution des mouvements à partir de l'instrumentation (photo 8). Le déblai voisin, entaillé dans les argiles à amalthées compactes, a lui aussi été l'objet d'une alerte. Un des inclinomètres profonds qui instrumente ce haut déblai a subi une déformation cisailante suffisamment importante pour que le groupement décide de l'arrêt des terrassements pendant la période nécessaire à la compréhension du phénomène. Des essais complémentaires au piézocône ont été effectués avec des mesures de pression



Photo 8
Remblai du vallon
du bois du Cerisier
*Embankment of the dale
in "bois du Cerisier" woods*

interstitielles sur une longue durée. Ces essais ont révélé une pression anormale au niveau de la déformation. D'autres sondages par carottage et essais de cisaillement à l'appareil triaxial à haute pression ont été réalisés. Une nouvelle modélisation réalisée aux éléments finis à l'aide du code de calcul Plaxis a conduit à la modification de la géométrie du talus du déblai, tout en ne remettant pas en cause les délais de livraison de la plate-forme ferroviaire (figures 4a et 4b).

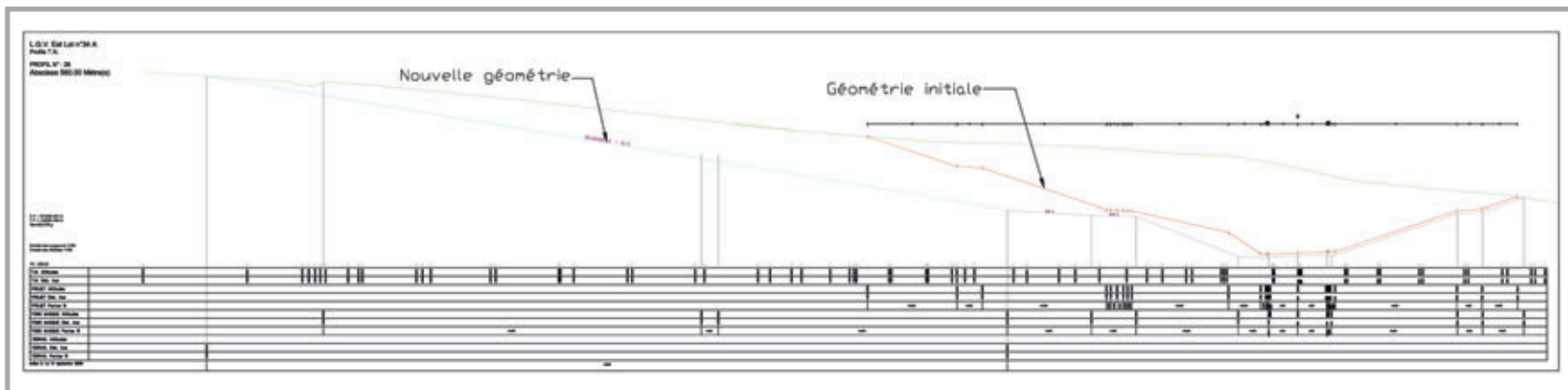


Figure 4a
Profil en travers modifié
Modified cross section



Les études techniques supplémentaires, imposées par les mesures et observations du remblai du valon du Cerisier et du déblai voisin ont largement débordé à l'extérieur de la deuxième étape et ont abouti à des dispositifs confortatifs qui ont tout de même pu être mis en œuvre sans perturber les délais de livraison des plates-formes.

Les finitions de plates-formes

La troisième et dernière étape, réalisée en 2005 a concerné tous les travaux de plates-formes : couches de forme et sous-couches. Entre les deux, une masse très importante d'ouvrages hydrauliques a dû être réalisée et un phasage très précis a été



Photo 9
Les fossés préfabriqués à barbacanes
Prefabricated ditches with weep holes

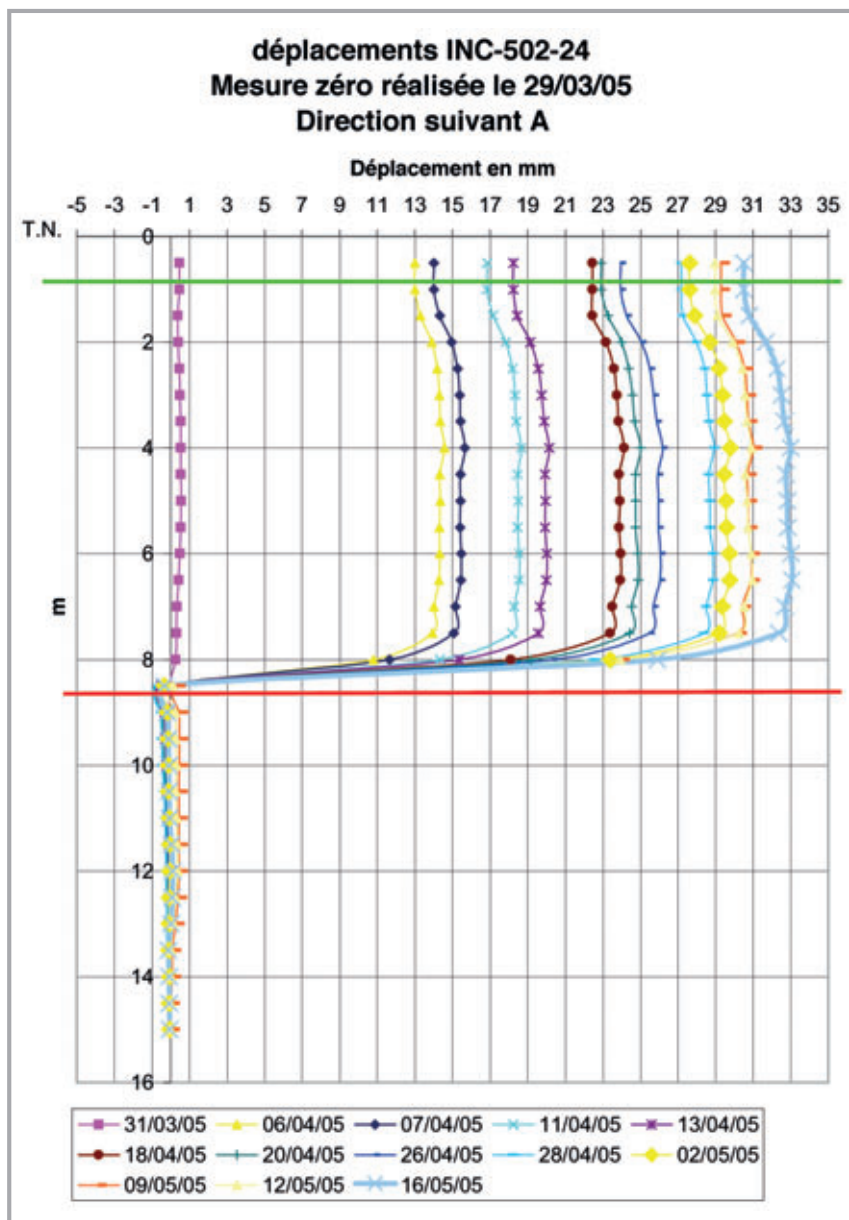


Figure 4b
Mesure inclinométrique dans le talus de déblai
Clinometric measurements in the excavation slope



Photo 10
Modelage des dépôts
Deposit modelling

élaboré et suivi pour permettre l'enchaînement des tâches en garantissant aux différentes équipes les meilleures conditions de sécurité possibles. C'est lors de cette phase que la plus grande partie des fossés préfabriqués à barbacanes ont été construits (photo 9).

La mise en œuvre et le réglage des couches de forme et sous-couches ont été assurés par des boteurs CAT D6 et niveleuses CAT 14H, tous équipés de systèmes de guidage GPS.

Cette dernière étape a également été celle des finitions et des modelages définitifs de dépôts sur lesquels les matériaux préalablement décapés ont été mis en œuvre en respectant les protocoles agricoles (photo 10).

■ CONCLUSION

Une organisation basée sur le partenariat avec la maîtrise d'œuvre et le maître d'ouvrage, une très forte mobilisation au cours de la première étape, un souci permanent de rechercher et d'identifier les risques, l'anticipation et la réactivité face aux aléas géotechniques, ont permis au groupement de livrer une moitié du chantier avec deux mois d'avance et l'autre moitié avec un mois d'avance!

ABSTRACT

Work section 34 A of the final project phase for the East European high-speed train line is delivered to Réseau Ferré de France (RFF)

E. Hosotte, Ch. Bellet

Work section 34 A is located east of the East European high-speed train line, in the Meurthe-et-Moselle and Moselle regions. 25 km long, it is one of the largest work sections on the line, since it required more than 10,000,000 cubic metres of earthworks in predominantly clayey and marly-calcareous rock materials. It also required the construction of 25 civil engineering structures, including three linking structures, on the A31 motorway, county road RD 910 and the Seille river.

The Client, Réseau Ferré de France (RFF), awarded project management for this work section to the SNCF-Arcadis consortium, and it awarded the works to the consortium formed by Fougerolle-Ballot Terrassements (leader), Bec, Demathieu et Bard, Lingenheld, Muller GC, MTHA and Trabet.

Within the overall completion period of 28 months, the consortium organised itself in three stages, including a preparation period in which every effort was made to identify and clarify risks and to find satisfactory technical solutions. Some sectors deployed geotechnical experts at a very early stage; their recommendations enabled the consortium to anticipate all faults and to respond very quickly when alert thresholds were reached. This strategy paved the way for very intense activity during the 2004 season and enabled the consortium to deliver work section 34 A to RFF ahead of schedule in 2005.

RESUMEN ESPAÑOL

El lote 34 A, último TOARC de la Línea de Alta Velocidad Este Europea se entrega a Réseau Ferré de France (RFF)

E. Hosotte y Ch. Bellet

El lote 34 A está ubicado al Este de la Línea de Alta Velocidad Este Europea, en los departamentos de Meurthe-et-Moselle y de la Moselle. Con una longitud de 25 km, se trata de uno de los

lotes más importantes de la línea ya que fue preciso proceder a movimientos de tierras de más de 10 000 000 de metros cúbicos en materiales a dominante arcillosa y de marga arcillosa. También ha sido necesario la construcción de 25 obras de fábrica, de las cuales tres no convencionales, en la autopista A31, la carretera departamental RD910 y el río La Seille.

La entidad contratante, Réseau Ferré de France (RFF) ha encargado la dirección del proyecto de este lote a la agrupación SNCF-Arcadis y las obras a la agrupación Fougerolle-Ballot Terrassements (mandatario), Bec, Demathieu & Bard, Lingenheld, Muller GC, MTHA y Trabet.

Durante el plazo total de 28 meses, la agrupación se ha originado en tres etapas entre las cuales un período de preparación en la cual se han movilizado todas las energías para identificar y precisar los riesgos y encontrar las soluciones técnicas satisfactorias. Diversos sectores han movilizado muy rápidamente los peritos geotécnicos; sus preconizaciones han permitido a la agrupación anticipar cualquier disconformidad y reaccionar con suma rapidez cuando se alcanzaban los límites de alerta. Esta estrategia ha permitido desempeñar una campaña 2004 de muy intensa actividad y ha permitido también a la agrupación, en 2005, entregar con adelanto el lote 34 A a RFF.

A28 - Section Rouen/Alençon

Défi gagné pour le constructeur et

Mis en vigueur au 2 décembre 2001, le contrat de concession de l'autoroute A28 Rouen-Alençon confié à la société Alis représente pour ses actionnaires un défi sans précédent dans le monde autoroutier. La première phase du contrat, 4 ans de conception-réalisation pour les 125 km d'autoroute clés en mains, constitue pour le GIE-Constructeurs A28 et son ingénierie intégrée Alisée une permanente course contre la montre. La mobilisation à grande échelle de tous les personnels de chacune des sociétés impliquées dans ce projet d'envergure, ainsi que la participation active des administrations et collectivités locales auront été nécessaires : avec une organisation rigoureuse et une détermination constante, les acteurs du projet ont attaqué les études et les travaux sur tous les fronts, en innovant dans tous les domaines, techniques, financiers et autres. Grâce à cette motivation, le challenge de la conception-réalisation a été gagné et permet au concessionnaire Alis et à son exploitant Rotalis d'ouvrir ce tronçon d'autoroute avec deux mois d'avance sur le planning.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Historique du projet

Inscrite au schéma directeur routier national en 1987, l'autoroute A28 Rouen-Alençon est, à la charnière du nouveau millénaire, attribuée à la société concessionnaire Alis au terme d'un appel d'offres européen. Le contrat de concession est mis en vigueur le 2 décembre 2001 après 14 ans de procédures administratives.

A partir de cette date, le délai tendu de 4 ans, articulé en deux temps :

- ◆ 1,5 an de conception ;
- ◆ 2,5 ans de réalisation,

va se dérouler à une vitesse vertigineuse jusqu'à la livraison et la mise en service à fin 2005, précédant une ère d'exploitation de 62 ans.

Organisation de la concession

A nouveau millénaire, nouveau concessionnaire : le groupe Bouygues, absent jusque-là des sociétés concessionnaires d'autoroute en France, mais fort de son expérience en ce domaine dans d'autres parties du globe d'une part, et s'entourant d'autre part de partenaires compétents et reconnus, monte avec succès l'opération qui donne naissance à la société Alis.

Les compétences exercées par chacune des sociétés composant l'actionnariat d'Alis en assurent la solidité et contribuent à la réussite de l'opération en amenant les spécialités requises dans chaque métier (figure 1).

Autre fer de lance de la réussite : le financement. Avec un souci permanent de l'intérêt général, l'ensemble des partenaires du projet veille à son financement :

- ◆ en réduisant au plus juste les coûts de construction ;

- ◆ en optimisant la dette par un montage financier performant et original.

En effet, outre les fonds propres apportés par ses actionnaires, Alis met en place une émission d'obligations indexées sur l'inflation française. Ce système présente les avantages :

- ◆ d'éviter le paiement d'une prime liée à l'incertitude sur l'inflation ;
- ◆ d'autoriser une durée d'emprunt plus longue (30 ans).

Et par conséquent :

- ◆ de réduire les coûts financiers ;
- ◆ d'optimiser le niveau de subvention.

Cette première dans la zone euro fera succès auprès des investisseurs (figure 2).

Enfin, une volonté politique affirmée vient soutenir le projet A28 et permettre sa réalisation. L'Etat français pour moitié et l'ensemble des collectivités territoriales pour l'autre moitié contribuent au paiement de la subvention publique, soulignant l'importance des enjeux nationaux, régionaux, départementaux et communaux (figure 3).

Description générale de l'axe autoroutier, caractéristiques, principales quantités

L'A28 constitue un maillon central dans l'achèvement d'un axe européen nord-sud, reliant le Danemark et l'Allemagne au Portugal et à l'Espagne (figure 4).

A l'intérieur de nos frontières, elle permet la liaison Calais-Bayonne, et plus localement contribue à l'unité de la Normandie entre Rouen et Alençon. Cet itinéraire routier, jusqu'à aujourd'hui assuré par la RN 138, est un axe réputé dangereux, très emprunté par les poids lourds en provenance de la Manche. Le délestage de la RN 138 par l'A28 pour une grande partie de son trafic améliorera notablement la sécurité routière dans les départements traversés.

Par ailleurs, la répartition régulière de ses diffu-

Figure 1
Composition
de l'actionnariat d'Alis
*Alis share ownership
structure*

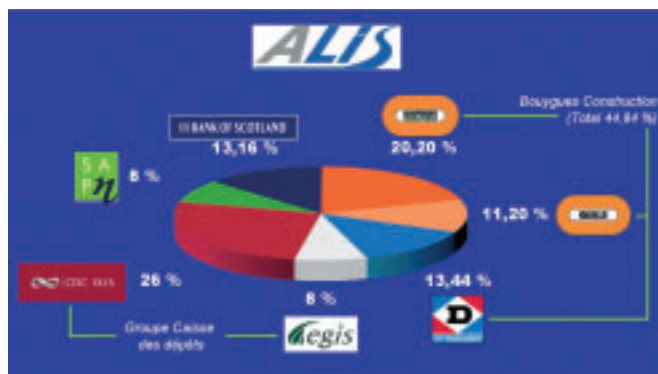


Figure 2
Tableau
de financement
du projet
*Cash flow
statement
for the project*

DEPENSES			RECETTES		
	M €	%		M €	%
répartition des coûts			ressources		
conception / construction	719,8	78,6	fonds propres des associés	74,5	8,1
société concessionnaire	82,3	9,0	subventions publiques (50% Etat - 50% collectiv. locales)	343,2	37,5
coûts financiers	113,6	12,4	dettes financières	498,0	54,4
TOTAL COÛTS	915,7	100,0	TOTAL FINANC[®]	915,7	100,0

- Concession Alis ses partenaires

Christian Roulet

CHEF DE SERVICE
Bouygues Travaux Publics



Claude Aimé

DIRECTEUR TECHNIQUE
DTP Terrassement



seurs et échangeurs et son intégration dans un axe européen majeur feront de l'A28 un catalyseur en Normandie des activités touristiques et économiques (figure 5).

D'une longueur de 125 km, la section Alis de l'A28 prend naissance sur l'A13 à hauteur du diffuseur de Bourg-Achard à l'ouest de Rouen et se raccorde sur l'A28 sud au niveau d'Alençon. Au 1/6^e de sa partie sud, l'A28 jouxte la RN 138 à hauteur de Sées et permet le raccordement à la future A88 en direction de Caen. Avec ses deux échangeurs, et six diffuseurs, l'A28 permet une desserte locale également répartie vers les différents pôles d'activités de la Normandie.

Les 125 km de section courante, complétés par 20 km de bretelles et 80 km de rétablissements, sont ponctués de 103 ouvrages d'art courants assurant la continuité des circulations locales (ferroviaires, routières, piétonnes) et la transparence environnementale (cours d'eau, faune).

Dans sa partie nord, deux viaducs totalisant près de 2 km enjambent les vallées de la Risle et du Bec à hauteur de Brionne.

Afin d'assurer la viabilité économique du projet, l'autoroute A28 a été conçue de façon évolutive, en adéquation avec les exigences du trafic. Ainsi, le profil en travers de la section courante présente une bande d'arrêt d'urgence réduite d'un mètre dans les zones à faible trafic. De même, la réalisation de certaines aires de service et de repos sera décalée dans le temps. Enfin, les viaducs de la Risle et du Bec sont réalisés pour une chaussée à 2 x 1 voie à l'ouverture de l'autoroute, correspondant à une prévision de trafic de 6 000 véhicules/jour; ces deux ouvrages seront doublés lorsque le trafic le nécessitera.

Organisation du groupement-constructeurs et de l'ingénierie intégrée, ressources humaines

Alis a confié à ses actionnaires entreprises du groupe Bouygues le contrat de conception-réalisation en 4 ans de l'autoroute. Celles-ci, regroupées en GIE-Constructeurs A28, vont à leur tour répartir sous une même direction les compétences de l'ensemble des partenaires dans les différents métiers, en associant au savoir-faire propre du GIE celui de sociétés et d'entreprises locales ou spécialisées. Ainsi, pour la conception, le mariage du GIE avec Scetauroute donne naissance à la société Alisée, ingénierie intégrée au constructeur, qui mobilise

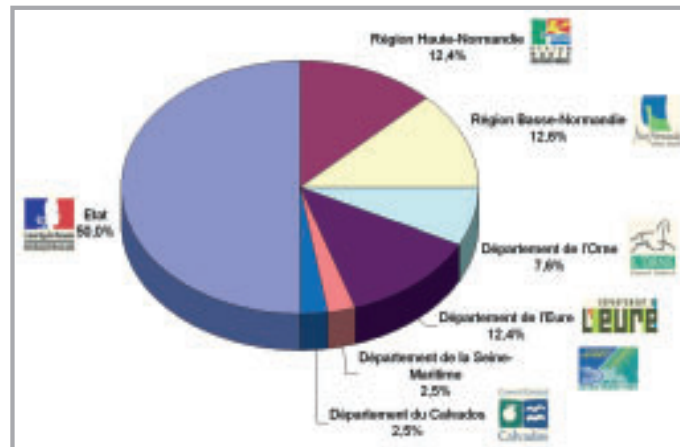


Figure 3
Répartition de la subvention publique

Breakdown of the public subsidy



Figure 4
A28 : maillon d'une liaison européenne

A28 : European connection link



Figure 5
A28 : un trait d'union en Normandie

A28 : a link in Normandy



Figure 6
Le regroupement de la conception et de la construction
Grouping of design and construction



Figure 7
L'organisation du GIE-Constructeurs A28
Organisation of the A28 contractors' consortium

administrations normandes, une vaste campagne de recrutement puis un plan de formation à grande échelle. En effet, sur les 400 postes à pourvoir :

- ◆ une moitié des personnes retenues (pour 195 postes) présentait les qualifications requises pour être directement opérationnelles ;

- ◆ l'autre moitié (pour 205 postes) a, préalablement à son intégration au chantier, suivi une formation initiale ou complémentaire dans les trois grands métiers de la construction autoroutière : conducteur d'engin (90 postes), maçon coffreur (65 postes), maçon canalisateur (50 postes).

Au-delà de cette gigantesque mobilisation pour assurer les cadences des travaux, le chantier se termine avec un bilan humain très positif puisque bon nombre de conducteurs d'engins et de maçons se sont vus :

- ◆ soit proposer de nouvelles affectations sur d'autres chantiers autoroutiers ;
- ◆ soit embaucher en CDI par les entreprises du GIE-Constructeurs A28.

Ainsi l'engagement de tous les partenaires du projet A28, aussi bien internes (concessionnaire, concepteur, constructeur, exploitant) qu'externes (l'Etat concédant, les administrations, les préfetures, les conseils généraux, les communes et tous les organismes locaux), a non seulement contribué à la réussite du challenge A28, mais se prolonge même au-delà sur d'autres opérations.

Planning contractuel, dates clés, grandes phases

Le contrat de concession signé le 2 décembre 2001 prévoyait 49 mois de conception-réalisation jalonnés de six dates clés intermédiaires avant le target final de la mise en service :

- ◆ trois jalons d'études dans la phase de conception ;
- ◆ trois jalons travaux dans la phase de réalisation (figure 8).

Nécessaires sur le plan financier (la réalisation des événements liés à ces dates conditionne le paiement progressif de la subvention publique à Alis), ces dates clés sont avant tout cruciales pour l'avancement du projet. Elles nécessitent, tant pour les études que pour les travaux, une mobilisation en masse, une rigueur de tous les instants, et une organisation solide dont les maîtres mots sont "coordination et communication".

Pour la phase de conception, c'est essentiellement le fonctionnement en ingénierie concourante qui a permis de tenir les échéances fixées, en développant pratiquement de front :

- ◆ les reconnaissances nécessaires aux études (notamment topographiques et géotechniques) ;
- ◆ les études techniques et environnementales (avec en particulier les études hydrauliques et les études acoustiques) ;
- ◆ leur soumission en concertation ;

► autour de son noyau dur de management et de coordination 150 personnes travaillant dans une vingtaine de bureaux d'études (figure 6).

De même, pour la construction calée suivant un découpage géographique nord/sud, le GIE qui réalise en propre une partie des travaux va co-ou sous-traiter le reste de la réalisation des travaux parmi :

- ◆ des sous-groupements : pour les chaussées, et pour les équipements fixes ;
- ◆ des SEP : pour les ouvrages d'art courants standards, et pour l'assainissement de la zone nord ;
- ◆ des entreprises spécialisées : pour les charpentes métalliques des viaducs ;
- ◆ des entreprises locales : pour les terrassements et assainissement de la zone sud (figure 7).

Ce sont 1500 personnes qui sont mobilisées sur le chantier pour la phase de réalisation des travaux, réparties :

- ◆ pour un premier tiers (500 personnes) à l'intérieur du personnel des trois filiales de Bouygues Construction constituant le GIE ;
- ◆ pour un deuxième tiers (600 personnes) par l'intermédiaire des entreprises sous-traitantes ;
- ◆ pour un troisième tiers (400 personnes) par recrutement local.

Pour cela, le GIE a lancé, en partenariat avec les

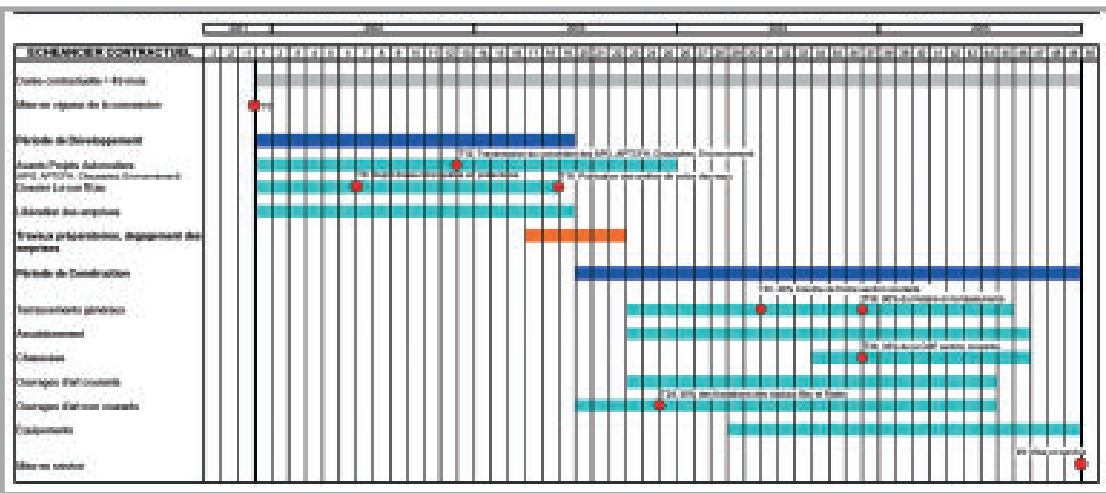


Figure 8
L'échéancier contractuel d'A28 : un challenge de 49 mois
The A28 contractual schedule : a 49-month challenge

- ◆ les acquisitions foncières;
- ◆ les fouilles archéologiques préventives.

L'ensemble faisant l'objet de nombreux dossiers soumis pour certains à autorisations administratives :

- ◆ approbation ministérielle, comme pour :
 - le droit d'évocation sur la jonction A28/A13,
 - le plan synoptique des aires annexes (PSAA),
 - les études préliminaires d'ouvrages d'art (EPOA) des deux viaducs,
 - les projets de routes nationales (PRN : sept dossiers);
- ◆ arrêté interpréfectoral pour le dossier de police de l'eau (DPE) (figure 9).

La collaboration efficace des services de l'Etat et des départements a également contribué au succès de cette phase de conception, permettant au GIE-Constructeurs A28 d'obtenir le 2 juillet 2003 l'ordre de service d'Alis pour les travaux généraux. Cette deuxième phase du contrat a pu démarrer à cette date et monter très vite en cadence de pointe grâce à l'anticipation maximale des contraintes et à la réalisation, à la fin de la phase précédente de conception, des travaux préparatoires :

- ◆ déviations des réseaux;
- ◆ déboisement, défrichage, pistes;
- ◆ ouvrages et rétablissements prioritaires, libérant au maximum l'axe de tout obstacle et donnant à la trace son caractère linéaire et fluide.

■ ÉCOUTE ET DIALOGUE

Concertation

Au fil de ses 125 km, l'autoroute A28 traverse une multiplicité d'administrations et de collectivités territoriales :

- ◆ deux régions : Haute-Normandie et Basse Normandie;
- ◆ trois départements : l'Eure, l'Orne et le Calvados (avec un impact fort sur un quatrième département : la Seine-Maritime);
- ◆ une douzaine de cantons;
- ◆ et 68 communes.

Pour réussir l'adhésion au projet de l'ensemble de ces diverses collectivités, Alis a engagé une démarche de proximité avec chacune en menant une concertation :

- ◆ unifiée : réunions au niveau de chaque canton avec l'ensemble des mairies qui les composent chacun;
- ◆ d'écoute : réunions de présentation initiale du projet dans chaque commune, réponse aux questions du public, et écoute attentive des demandes;
- ◆ de dialogue : réunions de présentation du projet avec ses mesures d'accompagnement prenant en compte l'intérêt général.

Les principales préoccupations des riverains concernent essentiellement les rétablissements et la des-

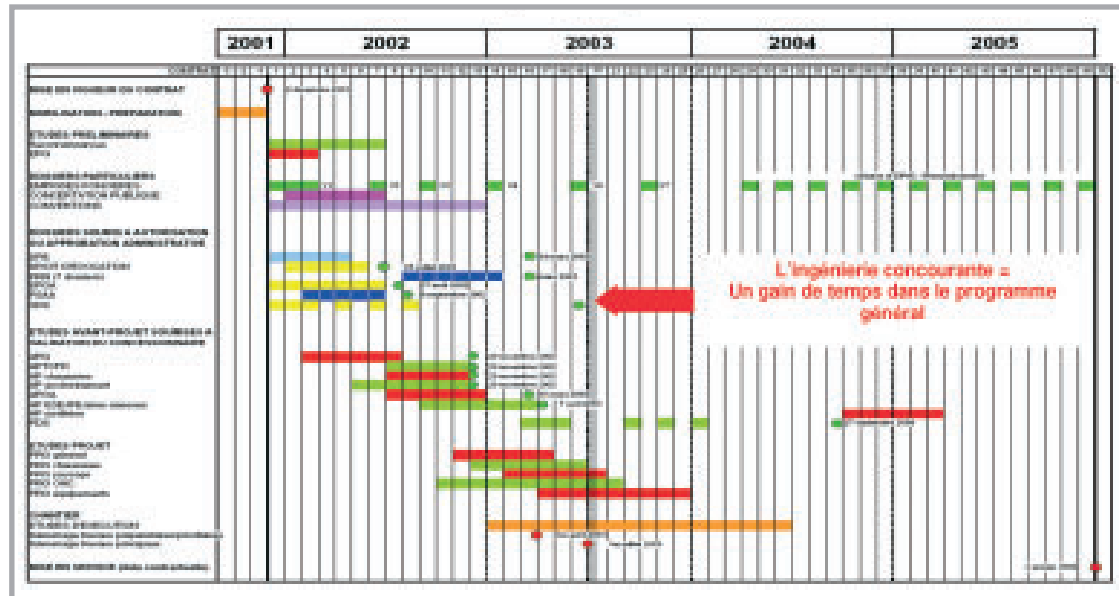


Figure 9
Le calendrier de l'ingénierie concurrente : un gain de temps sur le planning global
The concurrent engineering schedule : a time saving in the overall schedule

serte locale en termes de voiries, le respect de l'eau, la protection contre le bruit et l'insertion paysagère.

Dans ce sens :

- ◆ la participation technique des DDE et Conseils généraux pour les voiries principales (routes nationales et départementales) ont contribué à mettre au point le tissu des voiries locales (voies communales, chemins ruraux);
- ◆ le rôle des préfetures dans le dossier de police de l'eau a assuré la conservation de la qualité des eaux dans le milieu traversé par le ruban autoroutier;
- ◆ les interventions de bureaux d'études spécialisés ont contribué à "faire oublier" l'autoroute par la mise en place des dispositions adéquates contre les nuisances sonores (merlons acoustiques) et visuelles (merlons et aménagements paysagers). Avec une forte organisation et la cohésion des différents protagonistes, la concertation publique de l'autoroute A28 s'est déroulée en 6 mois, aboutissant à un projet consensuel.

Foncier

La réussite de l'autoroute A28 passait aussi par la maîtrise foncière. Mais les délais très tendus du projet obligeaient Alis et le GIE-Constructeurs à mener cette démarche en parallèle de la concertation sans en attendre les résultats définitifs, tant au niveau de la configuration finale de l'autoroute (acquisitions) qu'au niveau des phases provisoires de chantier avec notamment les déviations de voiries et les installations de chantier (occupations temporaires).

Avant même la prise de possession des terrains, les délais exigeaient également au niveau des études un ensemble de reconnaissances, notamment topographiques et géotechniques, mais aussi environnementales, nécessitant l'accès à des points alors "pleins champs".

La mise en place des diverses procédures (dé-

Photo 1
Quadrillage
systématique
de l'archéologie
préventive

*Systematic gridding
of preventive
archaeology*



dommages...) a permis d'effectuer dans les délais impartis l'ensemble des reconnaissances préalables d'une part, puis d'autre part de réaliser la quasi-totalité des acquisitions à l'amiable (1 % seulement de démarches en expropriation engagées sur 2 000 parcelles couvrant 1 200 hectares d'emprises au total) : libération des emprises au 1^{er} juillet 2003.

Archéologie

La maîtrise foncière ne pouvait être totale pour Alis qu'après maîtrise archéologique des terrains concernés. Aussi, dans le cadre de la loi Carcopino du 27 septembre 1941 et de ses nombreux amendements dont en particulier celui du 17 janvier 2001 relatif à l'archéologie préventive, Alis s'est rapproché des services de l'Etat pour collaborer étroitement à la mise en œuvre de la campagne de fouilles à l'échelle des 125 km de l'autoroute A28.

Dans un premier temps, à partir de l'été 2002, les équipes des archéologues des DRAC de Haute et de Basse Normandie ont réalisé avec l'appui logistique d'Alis des tranchées systématiques disposées en quinconce tout du long du tracé. Avec une dizaine de pelles, ces tranchées d'environ 3 m de large et 20 m de long réalisées au godet curage sans dents permettent d'établir un diagnostic archéologique complet :

- ◆ les zones ne révélant pas d'indice peuvent être rebouchées dans les 48 heures ;
- ◆ les sites inventoriés font l'objet d'un rapport immédiat aux DRAC.

Ces fouilles préventives ont abouti, après intervention des topographes, anthropologues, géomorphologues et autres spécialistes, à un rapport final de synthèse remis aux services de l'INRAP début 2003 (photo 1).

Les services régionaux de l'Archéologie ont alors décidé de procéder à des fouilles approfondies sur les sites présentant un réel intérêt scientifique. C'est ainsi que le projet A28 a permis de mettre

en évidence certains sites remarquables permettant de remonter le temps de l'histoire en Normandie au fil des ans ou des millénaires :

- ◆ Préhistoire : la vallée du Bec nous ramène à la même époque que les grottes de Lascaux. Pour la première fois en Normandie, un habitat du paléolithique avec 3 000 pièces de mobilier a témoigné de la fréquentation de chasseurs nomades dans ce secteur. Les maisons du néolithique découvertes sur le plateau de Bosrobert surplombant la vallée du Bec ont, elles, témoigné de l'arrivée des agriculteurs venus en Normandie depuis le Bassin Parisien ;

- ◆ époque gallo-romaine : indices à Menil-Froger et site funéraire à Bosrobert, avec son cortège de sépultures et de parures en bronze, fer et perles ;

- ◆ Moyen Âge : toujours à Bosrobert, découverte d'un site mérovingien-carolingien (photo 2).

Grâce à une implication forte d'Alis dans le processus d'investigations archéologiques, les fouilles ont à la fois :

- ◆ été riches : leurs résultats ont d'ailleurs fait l'objet de visites publiques et d'exposition lors des journées du Patrimoine en 2003 et 2004 ;

- ◆ menées très en amont des travaux et tenues dans le temps pour permettre le démarrage du chantier.

Environnement

L'autoroute A28 se situe globalement dans un milieu naturel sensible avec de forts enjeux agricoles, et présente localement des zones où l'attention générale est focalisée :

- ◆ zones classées ou en instance de classement Natura 2000 comme les berges de la Risle ;

- ◆ sites naturels protégés comme la vallée du Bec dans l'Eure du fait de l'abbaye du Bec-Hellouin classée monument historique, ou comme l'étang du Perron et celui de Bois-Roger dans l'Orne avec leurs prairies humides reconnues pour leur intérêt floristique ;

- ◆ espèces particulières comme le scarabée pique-prune qui avait déjà fait couler beaucoup d'encre sur l'A28 sud (Alençon/Le Mans) amenant à l'époque Cofiroute à une situation de blocage.

Le contexte de l'A28 était également contraignant, voire hostile, du fait :

- ◆ de l'historique du projet ;
- ◆ de la DUP de 1994 prorogée en 1999 ;
- ◆ des engagements de l'Etat ;

- ◆ des associations de défense de l'environnement, toujours actives sur le sujet A28 avec son lourd passé.

Face à cette problématique et aux délais extrêmement serrés avec notamment le point de passage obligé de l'autorisation préfectorale au titre de la loi sur l'eau, une anticipation forte et une démarche originale s'est imposée à Alis, au GIE et son ingénierie pour réussir le challenge :

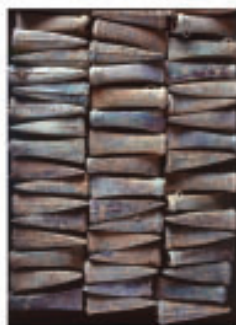


Photo 2
Archéologie, les découvertes
Archaeological discoveries



Photo 4
Vue générale du projet
General view of the project

- ◆ maîtriser les données environnementales du projet ;
 - ◆ intégrer la problématique environnementale comme une donnée à part entière de la conception de l'autoroute ;
 - ◆ dialoguer en permanence avec toutes les instances, associations et personnes concernées afin d'élaborer des solutions concertées ;
 - ◆ rechercher des solutions innovantes ;
 - ◆ être d'une transparence totale sur les problèmes rencontrés et les solutions apportées.
- On peut illustrer les résultats de cette démarche par quelques exemples :
- ◆ pour le dossier de police de l'eau : rassemblement dans un seul dossier des éléments intéressant les trois préfectures avec l'implication active de leurs services ; le dialogue permanent a permis d'aboutir à un dossier déposé en août 2002 et une autorisation en mars 2003, dans les temps pour le démarrage des travaux ;
 - ◆ au niveau des viaducs : implantation des piles, préservation des versants des vallées par minimisation des déboisements nécessaires aux pistes de chantier, étude de l'ombre des tabliers par rapport aux maisons des riverains des vallées ;
 - ◆ concernant le pique-prune : modification ponctuelle du tracé en deux endroits pour éviter des arbres contenant le fameux scarabée, transfert sur un site d'accueil sélectionné à Croisilles de neuf arbres et mise en place d'un suivi scientifique (photo 3).
 - ◆ à l'étang de Bois-Roger : technique de remblai de type terre renforcée (VSOL) afin de minimiser les emprises dans une zone où la largeur de bande DUP avait déjà été réduite, avec matériaux spécifiques et drainage préservant l'écoulement naturel des eaux indispensable au maintien de la flore des prairies jouxtant l'étang ;
 - ◆ en terme de paysage : intégration de l'autoroute suivant quinze séquences paysagères au fil des kilomètres, plantation de 400 pommiers dans le



Photo 3
Site de sauvegarde du pique-prune
Hermit beetle safeguard site



Photo 5
Obstacles Gacé
Gacé barriers

terrain acquis au diffuseur de Gacé et proposition de son exploitation à une association locale "Les vergers du pays d'Auge".
 Là encore, ces dispositions d'intégration ont permis à Alis de faire oublier l'autoroute.

■ TECHNIQUE ET TRAVAUX

Terrassements : géotechnique, organisation chantier, moyens

Présentation du projet

Sur les 125 km d'autoroute à construire, 14 millions de mètres cubes ont été déplacés. L'optimisation géométrique et géotechnique du projet a été poussée au maximum et, la réalisation des terrassements "grande masse" et des couches de forme en à peine 20 mois (juillet 2003 à fin 2004), a nécessité des moyens très importants, une organisation sans faille et des innovations ! (photo 4).

Géométrie

Le profil en long a été calé avec l'ICTAAL 2000, pour la géométrie, et en tenant compte des contraintes géotechniques du site : les quantités mises en dépôt ont été très faibles, compte tenu de la longueur du projet.

Des obstacles, tous les 110 m environ, sont venus perturber le mouvement des terres du chantier et ont obligé à en lever le maximum avant le démarrage des terrassements "grande masse" (photo 5).

Géologie

Du nord au sud

Dans l'Eure : formation de limons sur argile à silice, avec substratum crayeux (très peu affecté par le projet).

Dans l'Orne : à partir de Gacé, formations d'argile sur marno-calcaire du callovien ou calcaire du bathonien (D24 – Nonant-le-Pin et D13, D17 vers Sées)

PRINCIPAUX OBSTACLES

- 27 sites de fouilles archéologiques
- 65 voies latérales à déplacer
- 308 réseaux à déplacer - 480 indices de cavités à reconnaître
- 117 traversées hydrauliques - Deux viaducs
- 103 ouvrages d'art courants

PRINCIPALES QUANTITÉS

Terrassement

- Décapage : 2 100 000 m³
- Déblais : 12 000 000 m³
- Remblais : 8 000 000 m³ dont aménagement paysager et merlons 2 500 000 m³
- Traitement des remblais : 3 100 000 m³
- PST traitée : 1 900 000 m³
- CDF traitée : 1 200 000 m³

Assainissement

- Traversées hydrauliques 300 < Ø < 1 000 : 22 000 ml – 1 000 < Ø < 2 000 : 9 000 ml
- Dalots < 4 m² : 1 200 ml
- Ecrans de rive : 200 km

Photo 6
Déblai
de Gacé D32
Gacé excavation,
D32



Photo 7
Traitement
d'arase
Levelling
treatment



Photo 8
Wirgten 2500 S
Wirgten 2500 S



et pointement de "quartzite" (très peu affecté par le projet), au droit de la carrière de Chailloué.

Géotechnique

Nord du projet, dans l'Eure :

- ◆ limons de surface classés GTR A1h à th (matériaux constituant les couches de forme au nord) ;
- ◆ argile à silex avec bief de silex, sable argilo-limoneux, argile moyennement plastique chargée de silex, mélange de sable argileux et silex. Matériaux classés GTR CiAi et CiB5 état m à h.

Sud du projet :

- ◆ formation du callovien : argile moyennement plastique avec intercalation de bancs de calcaire à calcaires marneux, siège de circulation d'eau. Classement GTR A2 à C1A2, état m à th aux interfaces, quelques intercalations de marne à Gypse ;
- ◆ dans la butte de Gacé (D32) : présence d'un faciès de Gaize : argile glauconie, argile silex, très plastique A3 à A4 état h à th ;
- ◆ le calcaire franc bathonien tendre MDE : 70 à 80 dans D24 (Nonant-le-Pin) (source de la couche de forme au sud), D13 et D17 (vers Sées), classés GTR R22 ou R23.

Points particuliers forts, du chantier

L'une des particularités fortes de ce projet fut l'utilisation des matériaux du site, aussi bien pour les remblais que pour les couches de forme, sans pratiquement aucun apport extérieur.

Le déblai de Gacé (D32)

D'un volume de 350 000 m³, il a été l'un des plus difficiles de l'opération.

Des techniques de tri et de traitement des matériaux ont permis de réaliser, avec ce déblai, l'intégralité du remblai R31 (250 000 m³) en réalisant des parements en matériaux traités au pulvimixer et le cœur du remblai en matériaux traités à la charrue. Un dépôt positionné à l'aval du remblai, a permis de garantir la stabilité aval du remblai (photo 6).

PST/Arase

Le couple PST/CDF a été optimisé au maximum en fonction des matériaux rencontrés.

Traitement de l'ensemble des arases (chaux et/ou au liant) :

- ◆ chaque fois que les matériaux étaient aptes à constituer une AR2, une optimisation du couple PST/CDF a été réalisée (épaisseur minimale de CDF calcaire : 0,25 m ou en limon : 0,30 m) ;
- ◆ pour le reste, nous avons réalisé une AR12 dans les argiles à silex (épaisseur de CDF en calcaire ou en limon : 0,35 m) (photo 7).

La couche de forme

La couche de forme, au nord, a été réalisée sur 75 km en limons traités, et au sud, sur 45 km en

calcaire concassé et traité (5 km, au sud, ont été réalisés avec du sable extérieur traité en centrale). La performance visée en couche de forme était une PF3.

Au nord, couche de forme en limon

Le liant utilisé fut du Rolac 625 type S. Le traitement des limons en couche de forme a nécessité la réalisation de pré-stocks, traités à la chaux de 1 à 1,5 %.

L'optimisation des gisements de limons ayant généré des stocks de petites dimensions, la mise en place de centrales multiples ou le déplacement de celles-ci ne s'avérait adapté, ni à la disponibilité du parc matériel, ni au phasage de mise en œuvre, ni au planning. La technique de traitement en place a donc été adoptée pour les 2/3 du linéaire nord du chantier.

Le traitement en place des limons

Le traitement en place sur 50 km a demandé :

- ◆ une énergie de malaxage considérable. Quatre malaxages ont été nécessaires, avec des outils de dernière génération (Wirgten 2500S), avec suivi de la profondeur de malaxage (photo 8);
- ◆ un dispositif d'ajout d'eau par arroseuses-enfouisseuses, équipées de modules informatiques pour la gestion des débits, par un système de proportionnalité avec la vitesse d'avancement (cf. article "Maîtrise de l'humidification des sols traités en place", dans ce même numéro) (photo 9);
- ◆ le préreglage a été exécuté au bouteur et niveleuse asservie et guidée par GPS, le réglage final a été réalisé à la niveleuse asservie au théodolite motorisé.

Une grande rigueur dans les opérations et un contrôle qualité constant, ont permis d'obtenir, avec ce procédé, les caractéristiques mécaniques requises pour une plate-forme de type PF3.

Le traitement en centrale des limons

Vingt-cinq kilomètres du tracé ont été réalisés par traitement en centrale (rendement nominal de 1000 t/h), à partir d'un stock de limon prétraité à la chaux et repris par un "Rotograde" assurant une granulométrie fine (mouture) en malaxant le matériau. Le réglage final étant assuré par un autre "Rotograde".

Les performances mécaniques, obtenues par ces deux techniques de couche de forme, se sont révélées similaires, au point de vue mécanique et géométrique (nivellement et uni).

Au sud, couche de forme calcaire

Les matériaux nécessaires à la réalisation des 45 km de couche de forme en calcaire traité ont été pris à partir du déblai D24 (Nonant-le-Pin : 500 000 m³).

Ces matériaux ont été concassés à l'aide d'un concasseur primaire et secondaire, en 0/50 mm,



Photo 9
**Arroseuse-
enfouisseuse**
**Landfill sprinkler
system**



Photo 10
**Centrale
de Nonant-le-Pin**
**Nonant-le-Pin power
station**

puis traités en centrales au liant (Ligex 2R), par deux centrales de 1000 et 500 t/h (photo 10).

Le préreglage a été exécuté au bouteur et niveleuse asservie et guidée par GPS, le réglage final a été réalisé à la niveleuse asservie au théodolite motorisé.

Marnières

Le risque "cavité" sur les 80 km nord d'A28, a nécessité :

- ◆ une reconnaissance de près de 480 indices ;
- ◆ le décapage systématique de l'assiette autoroutière ;
- ◆ la réalisation de 85 000 m de forage ;
- ◆ la découverte de 29 anomalies souterraines dont 21 marnières et huit karsts ou zones décomprimées.

Certains vides ont atteint 1500 m³, pour la plupart, ils ont été traités par un coulis élaboré sur site, par

Photo 11
Comblement
de marnières

*Filling
in marl pits*



Photo 12
Échelon
de décapeuses

*Fleet
of scrapers*



► comblement gravitaire, par injection ou clavage (photo 11).

Organisation du chantier

Pour répondre à tous ces défis, nous avons choisi l'organisation suivante :

- ◆ le **tronçon nord** de 75 km a été réalisé en part propre, ce qui équivaut à deux ou trois chantiers habituels à réaliser dans un même délai ;
- ◆ le **tronçon sud** de 50 km a été sous-traité à des entreprises régionales dont nous avons assuré le pilotage complet, afin de respecter le planning de l'opération. La zone du déblai D32 et du remblai R31 de Gacé, nécessitant une technique particulière de réutilisation des matériaux, a été réalisée en part propre.

Moyens utilisés

Pour relever ce défi, le GIE a mobilisé, dès l'été 2003, 500 machines de terrassement réparties en échelons, dont :

- ◆ pour les déblais grande masse :
 - 7 échelons de décapeuses,
 - 13 échelons de pelles hydrauliques de 80 t.
- La cadence maximale obtenue en septembre 2003 a atteint 2 000 000 m³ dans le mois (photo 12) ;
- ◆ pour les PST et couche de forme traitées :
 - 10 boteurs D8 charrue à socles,
 - 20 malaxeurs de grande puissance,
 - 40 épanduses,
 - 20 niveleuses asservies et guidées, par GPS ou théodolite motorisé.

5 000 000 m³ ont été réglés en moins de 5 mois (photo 13) ;

- ◆ pour l'assainissement :
 - 10 ateliers de drainage profond,
 - 5 trancheuses pour la réalisation des écrans de rive.

Plus de 800 personnes ont travaillé pour l'exécution des terrassements.

Planning

L'ensemble des terrassements et couche de forme ont été réalisés en moins de 20 mois, soit un démarrage des terrassements grande masse en juillet 2003, et l'ensemble des couches de forme fini à fin 2004, ceci avec plus de 6 mois d'avance sur le planning prévisionnel des travaux qui prévoyait une fin des couches de forme en juin 2005.

Ouvrages d'art

La géographie du tracé A28 peut globalement se résumer ainsi :

- ◆ relief mouvementé dans la partie sud ;
- ◆ plaines dans la partie nord,
- ◆ deux vallées majeures à hauteur de Brionne : la Risle et le Bec, points sensibles en environnement (classement Natura 2000 en particulier).

Les viaducs

Ces deux brèches, distantes d'environ 5 km, sont franchies grâce à des viaducs :

- ◆ de 1320 m de long à 70 m de haut pour la Risle ;
- ◆ de 690 m de long à 40 m de haut pour le Bec.

La recherche d'un maximum de transparence visuelle pour l'intégration dans les sites d'une part, et le caractère critique des travaux des viaducs dans le planning général d'autre part, ont mis en avant la solution d'une ossature mixte en bipoutre pour les tabliers, avec des travées maximales de 90 m et 80 m respectivement, mises en place par lancement au-dessus des piles béton jalonnant les vallées.

Les deux ouvrages, réalisés en simultané, ont été attribués, pour les 7 300 t de charpente métallique, aux sociétés :

- ◆ Baudin Chateaufort pour la Risle, avec lancement par les deux culées et clavage central ;
- ◆ Eiffel pour le Bec, avec lancement par une seule culée.

Les piles, totalisant 24 500 m³ de béton armé, sont pour la plupart fondées superficiellement avec, pour celles en vallée, réalisation préalable d'un batardeau en palplanches.

Enfin, les hourdis en béton armé, totalisant 9 700 m³, ont été coulés en place sur trois paires d'équipages mobiles, à la cadence de 2,5 plots par semaine. Ainsi, après 27 mois de travaux ayant mobilisé jusqu'à 180 personnes en pointe, les viaducs s'achè-

PRINCIPAUX INTERVENANTS EXTÉRIEURS AU GIE-CONSTRUCTEURS, EN TERRASSEMENTS

- Assainissement zone nord : ATPM - GTM Tetra
- Couche de forme en centrale des limons zone nord : Sotruga
- Terrassement zone sud : Helary - Brougalay
- Assainissement zone sud : Laine TP - Semen TP
- Terrassement et assainissement zone sud : Routière Perez
- Terrassement et concassage zone sud : Charier
- Traitement en centrale des calcaires zone sud : SRTP
- Reconnaissance et comblement des marnières : Sefi-Intrafor

vent en même temps que le reste du chantier (photos 14 et 15).

Les ouvrages d'art courants

Les OAC se répartissent en 78 passages supérieurs (PS) et 25 passages inférieurs (PI) et font appel de par leur conception d'une part et des impératifs chantier d'autre part à une large panoplie de solutions techniques.

Pour la majorité des PS, la standardisation maximale de la conception (piles et culées ainsi que tabliers) a permis à la SEP 72 PS d'appliquer une logique industrielle dans les méthodes et les outils de coffrage et d'étaie. Ceux-ci, fabriqués en huit exemplaires, ont été déplacés d'ouvrage en ouvrage au fur et à mesure de leur achèvement, avec une cadence moyenne d'un ouvrage par semaine et une cadence de pointe de huit tabliers par mois.

Quelques PS atypiques ont nécessité des conceptions particulières et des méthodes appropriées. C'est le cas notamment des quatre ouvrages monotravées encadrant les deux viaducs, mais également de l'ouvrage sur l'autoroute A13 et des deux ponts-rails.

Sur l'A13, qui a été élargie par la SAPN à 2 x 3 voies, et où le nœud autoroutier avec A28 nécessitait la mise en place de voies collectrices et d'entrecroisement, la conception de l'ouvrage s'est orientée vers un bitraverse à murs-culées verticales afin de minimiser les portées et de permettre la mise en place d'éléments préfabriqués pour le tablier (poutres-dalles précontraintes). Ainsi, la gêne occasionnée par la construction de l'ouvrage au-dessus de l'autoroute A13 en circulation a été minimisée :

- ◆ pas de réduction du nombre de voies pour la réalisation des culées ;
- ◆ une seule voie supprimée sur chaque demi-chaussée pour la réalisation de la pile centrale, pendant une durée limitée (1 mois) ;
- ◆ immobilisation d'une seule nuit par demi-chaussée pour la pose des éléments préfabriqués sur chaque travée.

Pour le pont-rail PRA 3265 sous la voie ferrée Caen-Rouen à hauteur de la commune du Theillemont (Eure), où les conditions géotechniques nécessitaient la réalisation d'un radier général pour l'ouvrage, celui-ci a été conçu et mis en place suivant la méthode JMB largement éprouvée depuis 20 ans, par Autoripage® réalisé le temps d'un week-end (Pentecôte 2004).

Pour le pont-rail PRA 1309 sous la voie ferrée Paris-Granville sur la commune de Nonant-le-Pin (Orne), où les conditions géotechniques autorisaient des fondations sur semelles superficielles et donc un ouvrage plus léger, le GIE-Constructeurs A28 a testé en grandeur nature un nouveau procédé mis au point par Bouygues Construction. Avec ce procédé, dénommé Transpra, l'ouvrage qui a été préfabriqué



Photo 13
Niveleuse
asservie
*Servo controlled
grader*



Photo 14
Viaduc
de la Risle
*La Risle
viaduct*



Photo 15
Viaduc du Bec
Le Bec viaduct

hors zone ferroviaire est transporté sur des chariots automoteurs de gros calibre (de type Kamag, utilisés pour le transport des plates-formes pétrolières ou des fusées) : les vérins des chariots prennent appui sur des poutres transversales provisoires qui contreventent l'ouvrage pendant les opérations de levage et de transport. Ce procédé présente au moins trois avantages par rapport à l'Autoripage® :

- ◆ il ne nécessite pas la réalisation d'un radier de guidage : il est par conséquent plus économe en temps de construction et en quantité de béton (800 m³ seulement au PRA 1309 contre 2300 m³ au PRA 3265) ;

- ◆ le déplacement rapide sur chariots permet de préfabriquer à une plus grande distance de la voie ferrée : il est donc plus sécuritaire et dispense des blindages ou autres dispositions provisoires en pied de talus SNCF pendant la période de construction ;
- ◆ enfin, lors de la mise en place, il permet le talutage du remblai à 3 pour 2 selon les normes SNCF et évite de longues opérations de remblaiement : l'espace à remblayer se limite à la boîte de connexion entre l'ouvrage et la tête de talus.

Le PRA 1309 a également été mis en place à l'intérieur du temps d'un week-end (Pâques 2004), mais les atouts du procédé Transpra permettront

Photo 16
Pont-rail
PRA 1309
PRA 1309
railway bridge



PRINCIPALES QUANTITÉS À METTRE EN ŒUVRE (CHAUSSÉES)

- Grave bitume : 850 000 t
- BBM : 350 000 t
- GNT pour accotement : 250 000 t
- Assainissement de surface : 250 km
- Cunettes imperméables : 160 km (terre, limon traité, terre végétale)
- Cunettes et caniveaux bétons : 91 km
- Rétablissements : 103 u

PRINCIPAUX INTERVENANTS EXTÉRIEURS AU GIE-CONSTRUCTEURS, POUR LES CHAUSSÉES

- Screg Grands Travaux
- Le Foll
- Screg Normandie et Ile de France

au constructeur de s'engager à l'avenir contractuellement et en toute sécurité sur un délai de 24 heures depuis la fermeture de la ligne jusqu'à sa réouverture (photo 16).

Pour les PI, leur diversité, tant vis-à-vis des voies franchies (routes, voie ferrée, cours d'eau, passages faunes) que de leurs caractéristiques géométriques (longueur de brèche, largeur, biais), de leur positionnement sous l'autoroute (PI sous chaussées ou PI sous remblais) et de leur environnement (préservation des berges par exemple) a conduit à de nombreuses solutions tout en recherchant un maximum de rationalisation :

- ◆ portiques et cadres en béton armé ;
- ◆ piédroits en palplanches battues ;
- ◆ tabliers à poutres ou dalles préfabriquées ;
- ◆ buses métalliques (photo 17).

Ce sont au total :

- ◆ 50 300 m³ de béton ;
- ◆ 532 t de précontrainte ;
- ◆ 4 664 t d'aciers passifs,

qui, en 1 an et demi, ont été mis en place pour la réalisation des 42 800 m² de tabliers d'ouvrages d'art courants.

Chaussées

Conception

Sur les 125 km, le constructeur a, en regard des trafics attendus sur l'autoroute, opter pour une chaussée évolutive. Au fur et à mesure de l'augmentation du trafic poids lourd, la superstructure

de la chaussée sera périodiquement renforcée.

Au regard des résultats obtenus par le terrassement sur la couche de forme (en altimétrie et en performances mécaniques) : PF3 très proche PF4, les rechargements, à hypothèses de trafic égales, pourraient être optimisés ou repoussés de plusieurs mois par rapport aux hypothèses initiales.

La structure retenue est la suivante :

- ◆ une couche de GB 0/14 classe 4 : sur 9 cm d'épaisseur ;
- ◆ une couche de GB 0/14 classe 4 : sur 8 cm d'épaisseur (9 cm sur les 20 km sud) ;
- ◆ une couche de BBM 0/10 : sur 4 cm d'épaisseur.

(Les BAU étaient recouvertes avec la même couche de BBM de 4 cm).

Les matériaux de chaussée sont venus des carrières de Challoué ou de Vignats.

Moyens utilisés

Pour tenir le programme imposé il a été nécessaire de travailler pendant l'hiver 2004/2005.

Le groupement Chaussées a utilisé, au plus fort de l'activité :

- ◆ cinq postes d'enrobage (trois TSM25 et deux TSM21) sur les trois plates-formes de Challoué (au sud), Orbec (au centre) et Malleville (au nord) (photo 18) ;

- ◆ des ateliers de mise en œuvre configurés pour absorber une cadence de 700 t par site de production, soit trois alimentateurs Framex associés à trois finisseurs grande largeur Titan 525, équi-



Photo 17
Buses Vandré
et RD 758

**Vandré
and RD 758
culverts**



Photo 18
Centrale enrobés
Bituminous mixing plant



Photo 19
Mise en œuvre grave-bitume
Application of bitumen treated base material

pés chacun d'une table HPC (haut pouvoir compactant) (photo 19);

- ◆ des moyens de compactage, constitués de quatre cylindres vibrants de type CC551 ou CC772 par atelier;
- ◆ jusqu'à 130 poids lourds pour approvisionner le chantier en enrobés;
- ◆ en annexe, deux ateliers de réalisation d'accolement et deux ateliers d'enduit et de couche d'acrochage;
- ◆ quatre à huit ateliers de préparation et de finition d'assainissement de surface;
- ◆ trois ateliers de mise en œuvre de bétons extrudés.

Plus de 300 personnes ont travaillé à l'élaboration des chaussées.

Planning

Les 103 rétablissements ont commencé en mars 2003 et ont été achevés fin 2004. Les travaux d'enrobés, sur l'autoroute, se sont réalisés entre août 2004 et la fin de l'été 2005.

Cadence maximale : 10 km/j sur une demi-section et pour une couche.

CONCLUSION ET BILAN

Les 49 mois de la période de conception-réalisation de l'autoroute ont représenté un challenge permanent pour les équipes d'ingénierie et de travaux. Pour faire face à cette incessante course contre la montre, de nombreux facteurs se sont montrés décisifs :

- ◆ l'ingénierie concourante tout d'abord, pour mener de front des études habituellement échelonnées dans le temps;
- ◆ la cohésion des entreprises et de leurs hommes, quelle que soit leur entité dans le projet : concessionnaire, constructeur, ingénierie et bureaux d'études, exploitant;
- ◆ le partenariat des interlocuteurs : services de l'Etat et administrations, élus locaux : tous impliqués très tôt dans les divers processus;

◆ le dialogue et la transparence avec l'ensemble des intéressés, riverains et associations.

La mobilisation titanesque des moyens et des ressources des entreprises, avec son écho chez leurs interlocuteurs a permis de mener à bien ce projet d'envergure, avec au terme de cette première phase de conception-réalisation deux mois d'avance sur la livraison qui aura gagné une saison sur les congés scolaires : le cadeau de Noël est livré à la Toussaint.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Société concessionnaire Alis

Entreprises

GIE-Constructeurs A28

Maitre d'œuvre

Alisée, ingénierie intégrée au GIE-Constructeurs (SEP à 50 % GIE-Constructeurs A28 et 50 % Scetauroute)

Exploitant

Société Rotalis (réunissant Egis et SAPN)

ABSTRACT

A28 - Rouen/Alençon Section – Alis Concession. Successful challenge for the contractor and its partners

Ch. Roulet, Cl. Aimé

The concession contract for the Rouen-Alençon A28 motorway awarded to Alis company, which came into force on 2 December 2001, represents for its shareholders an unprecedented challenge in the motorway world. The first phase of the contract, four years of Design and Build for the 125 km of turnkey motorway, is a constant race against time for the A28 contractors' consortium and its integrated engineering unit Alisée. Large-scale deployment of all the personnel of each of the companies involved in this major project, and active participation by government departments and local bodies would be required : with strict organisation and constant determination, the project players attacked the design engineering and works on every front, innovating in all fields, technical, financial and other. As a result of this motivation, the Design and Build challenge was completed successfully, allowing the concession owner Alis and its operator Rotalis to open this motorway section two months ahead of schedule.

activa de las administraciones y corporaciones públicas fueron sumamente necesarias : con una organización rigurosa y una determinación constante, los actores del proyecto iniciaron los estudios y los trabajos con mucho empeño, innovando en todos los sectores, técnicos, financieros y otros. Por medio de esta motivación, se ha ganado el challenge del diseño-realización y ha permitido al concesionario Alis y a su operador Rotalis abrir este tramo de autopista con dos meses de anticipo sobre la planificación.

RESUMEN ESPAÑOL

A28 - Sección Rouen/Alençon – Concesión Alis. Desafío logrado para el constructor y sus asociados

Ch. Roulet y Cl. Aimé

El contrato de concesión de la autopista A28 Rouen-Alençon cuya entrada en vigor se remonta al 2 de diciembre de 2001 y atribuido a la empresa Alis representa para sus accionistas un reto sin precedente en el mundo de la autopista. La primera etapa del contrato, o sea 4 años de diseño-realización para los 125 km de autopista llave en mano, constituye para el GIE-Constructeurs A28 y su ingeniería integrada Alisée una permanente lucha contra el reloj. La movilización a gran escala de todos los empleados de cada una de las empresas involucradas en este importante proyecto, así como la participación

La Route des Tamarins à la Réunion

Un terrassement à flanc de montagne



© Eiffage/Razel

Notre numéro spécial d'octobre 2005 sur la Route des Tamarins développait la présentation de cette importante opération sur l'île de la Réunion, avec notamment les regards des maîtres d'ouvrage et des différents maîtres d'œuvre, architectes ou concepteurs. L'article qui suit décrit, avec plus particulièrement la vision des constructeurs, la réalisation des marchés Terrassement - Ouvrages d'Art - Assainissement - Rétablissements de Communication 1 et 2 (TOARC 1 et 2) de la section 2, entre les communes de l'Éperon et de Saint-Leu (photo 1).

Photo 1
Le tamarin, figure emblématique, fait partie du patrimoine culturel de l'île

The tamarind ("tamarin"), an emblematic figure, is part of the island's cultural heritage

La Route des Tamarins est sans doute actuellement la plus grosse opération routière en cours de réalisation en France, et le plus grand projet d'infrastructure entrepris à la Réunion. Il s'agit d'une voie express en site propre de 33,7 km, construite sur la côte ouest de l'île de la Réunion, afin de réunir, entre Saint-Paul et L'Étang-Salé-les-Bains, deux portions existantes à 2 x 2 voies de la RN1 (figure 1).

Cette route nationale est le principal axe structurant de l'île, reliant notamment les communes de Saint-Denis – capitale administrative –, Le Port – principal centre d'activités industrielles et commerciales –, Saint-Paul et Saint-Pierre. Ces quatre villes concentrent 60 % de la population de l'île, et la RN1 écoule quotidiennement des flux migratoires extrêmement importants – plus de 35 000 véhicules/jour – disproportionnés par rapport à la ca-



Jean-Jacques Gueguen



DIRECTEUR
D'OPÉRATION ROUTE
DES TAMARINS

Paul Barbier



DIRECTEUR DE PROJET
Scetauroute

Claude Savart



DIRECTEUR DE PROJET
Eiffage TP

Stéphane Querné



ADJOINT AU DIRECTEUR
DE PROJET
Razel

Daniel Héraly



DIRECTEUR DE PROJET
Razel

Philippe Cappello



DIRECTEUR
COMMERCIAL
Stips SA



Figure 1
Tracé général
de la Route
des Tamarins
*General
layout
of Route
des Tamarins
highway*

Figure 2
Profil en travers type
à 2 x 2 voies

*Typical two-lane
dual-carriageway
cross section*

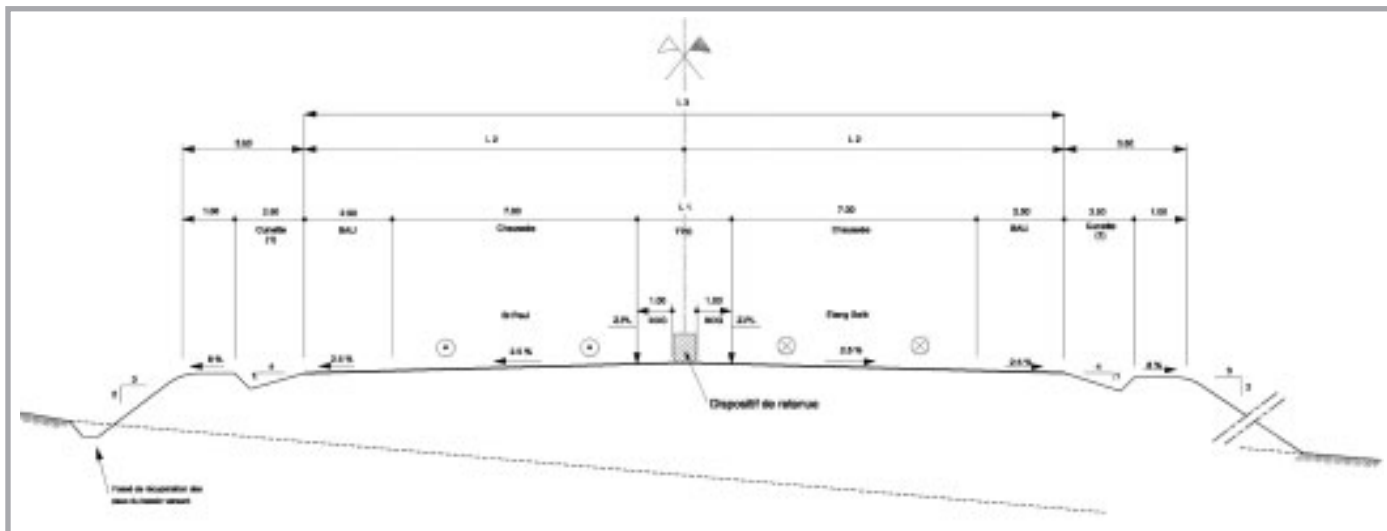
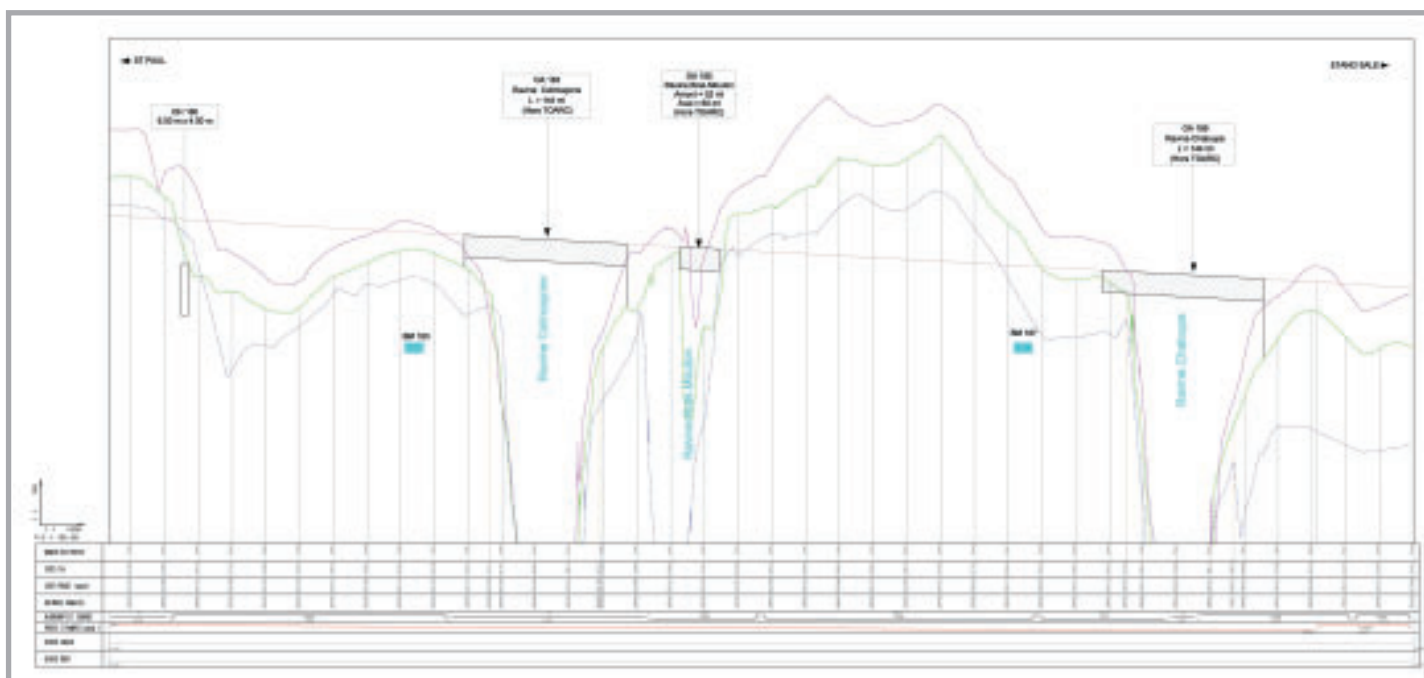


Figure 3
Extrait du profil
en long -
Zone de ravines

*Excerpt from
the longitudinal
profile -
Ravine area*



► capacité de la portion actuellement à deux voies en double sens, où des bouchons quotidiens se forment sur plusieurs kilomètres aux heures de pointe.

Historique - Financement - Acteurs

Dès 1990, une réflexion a été menée par la Région Réunion sur le réseau routier et l'étude du Schéma d'Aménagement Régional (SAR), prémices d'une longue procédure aboutissant le 3 mai 2002 au décret d'utilité publique de l'opération Route des Tamarins, et au lancement des premiers marchés de travaux en 2003.

700 millions d'euros (base 2004) sont consacrés à ce vaste projet, porté par l'Etat, la Région et l'Europe, par le biais des crédits Feder.

L'opération est pilotée par un comité de direction de projet, comprenant des représentants de l'Etat et de la Région Réunion. Une direction d'opération, dirigée par un ingénieur de la DDE, avec un adjoint de la Région, concrétise la volonté de l'Etat et de la Région de mener ensemble ce projet.

Côté maîtrise d'œuvre, l'opération est divisée en

deux sections de travaux linéaires et trois ouvrages exceptionnels :

- ◆ maîtrise d'œuvre DDE sur la section 1, du raccordement nord de Saint-Paul à la RD10, soit 6,1 km;
- ◆ maîtrise d'œuvre Scetauroute sur la section 2, de la RD10 au raccordement sud de l'Etang-Salèles-Bains, soit 27,6 km;
- ◆ maîtrise d'œuvre groupement Arcadis/Thales/Berlottier pour le viaduc de Trois-Bassins;
- ◆ maîtrise d'œuvre groupement Setec/Spielmann pour le viaduc de la Grande Ravine;
- ◆ maîtrise d'œuvre groupement Greish/Tremblet/Coyne et Belier/Zirk/Deleuze pour le viaduc de la Ravine Fontaine.

Le contrôle extérieur du maître d'ouvrage est par ailleurs confié au LCPC - Cete Méditerranée.

Caractéristiques du tracé

Afin de favoriser le développement socio-économique futur de la côte ouest, tant du point de vue touristique et démographique que sur le plan de l'extension de la culture de la canne à sucre, le parti a été pris d'écarter le tracé de la Route des Tamarins de la côte océane, et de l'accrocher à flanc

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitrise d'ouvrage

Etat et Région Réunion
Direction d'opération Route des Tamarins

Maitrise d'œuvre section 2

Scetauroute

Groupement d'entreprises TOARC 1 et 2

Eiffage TP agence Fougerolle
Ballot / Razel / Matière

de montagne, à une hauteur variant entre 200 m et 300 m. Le tracé ne rejoint la bande côtière qu'aux deux extrémités nord et sud, afin de se raccorder aux sections existantes au nord de Saint-Paul et au sud de L'Etang-Salé-les-Bains.

Le profil en travers type (figure 2) est :

- ◆ celui d'une 2 x 3 voies, soit 2 x 10,50 m avec TPC, du raccordement nord jusqu'à la RD10 ;
- ◆ d'une 2 x 2 voies, soit 2 x 7 m avec TPC, de la RD10 au raccordement sud.

La Route des Tamarins se situant à flanc de montagne, le profil en travers est souvent en profil mixte (déblai côté montagne/remblai côté mer).

Le profil en long (figure 3) est coupé par de très nombreuses ravines transversales, zones d'écoulement vers l'océan des eaux pluviales provenant des hauteurs de l'île. Rappelons que, même si la côte ouest est le secteur le moins pluvieux, la Réunion détient tous les titres mondiaux de pluviométrie entre douze heures et quinze jours.

Ces ravines marquent profondément le socle basaltique : par exemple la Grande Ravine a 200 m de profondeur à son intersection avec le tracé, et 330 m de large (photo 2). Les ravines seront franchies soit, pour les plus petites, par des ouvrages hydrauliques (voûtes ou cadres), soit par des ouvrages d'art non courants (OANC), soit par des viaducs exceptionnels (Ravines Trois-Bassins, Grande Ravine, Ravine Fontaine), pour les plus importantes. Sur le secteur de Saint-Leu, compte tenu d'une pente très forte du terrain naturel, les chaussées seront en profil en long décalé (figure 4).

La Route des Tamarins compte sur son tracé :

- ◆ 9 diffuseurs ;
- ◆ 4 ponts exceptionnels, jusqu'à 750 m de long ;
- ◆ 3 tunnels ou tranchées couvertes ;



© Photomontage CR Réunion

Photo 2
Photomontage
du viaduc sur Grande-Ravine
*Photomontage
of the viaduct over
Grande-Ravine*

- ◆ 23 ouvrages d'art non courants, jusqu'à 260 m de long ;
- ◆ plus de 120 traversées de ravines.

Planification des travaux

L'opération est envisagée en une seule section fonctionnelle, sans phasage. Les travaux ont débuté en mai 2003, et l'ouverture de la Route des Tamarins est prévue en 2008. A fin 2005, la plupart des marchés de travaux seront attribués.

TERRASSEMENTS SUR TOARC 1/TOARC 2

La section 2 de la Route des Tamarins comprend quatre lots TOARC à maîtrise d'œuvre Scetauroute. Les lots TOARC 1 et TOARC 2, entre la Ravine Saint-Gilles et la Ravine Fontaine, ont été attribués au groupement Eiffage TP, agence Fougerolle Bal-

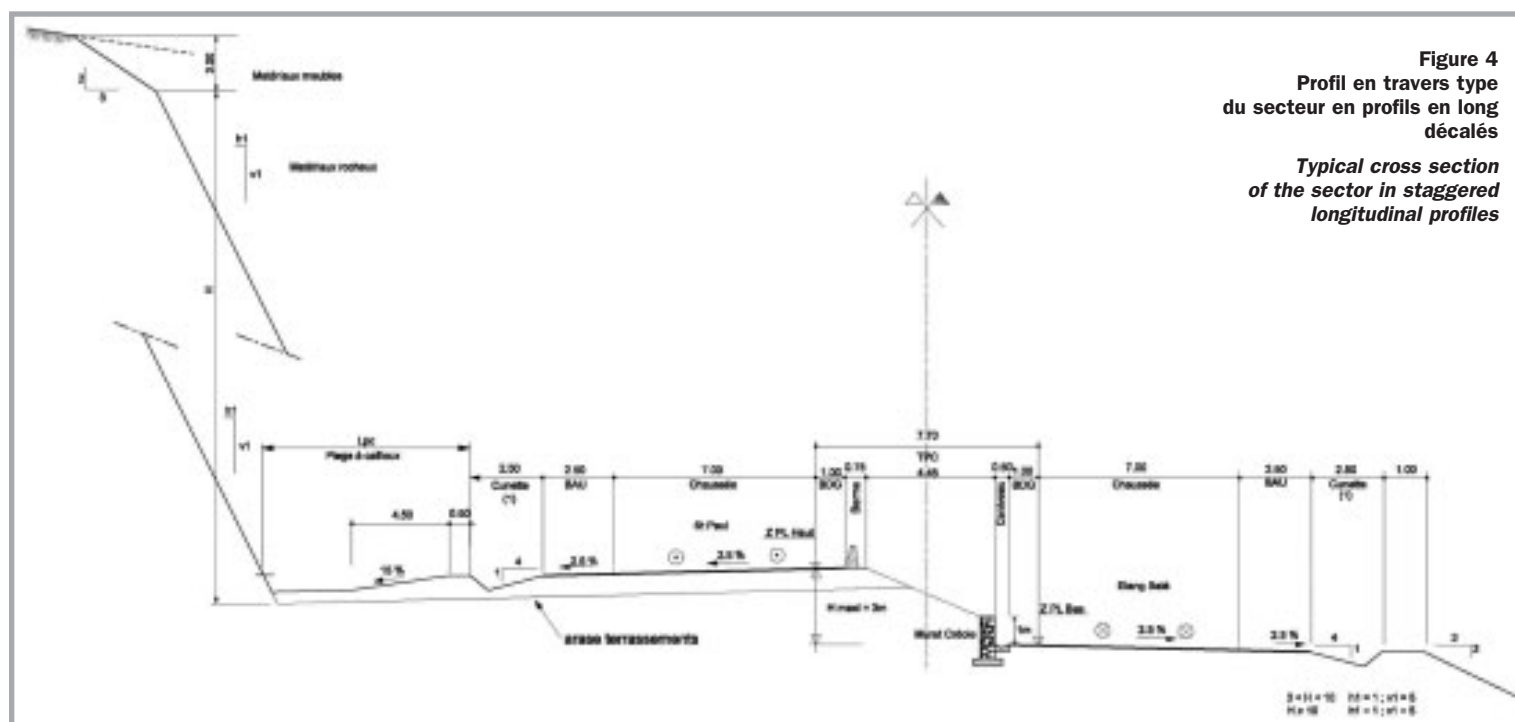


Figure 4
Profil en travers type
du secteur en profils en long
décalés
*Typical cross section
of the sector in staggered
longitudinal profiles*

Photo 3
Andains de blocs
en périphérie des champs
de cannes à sucre
à produire par chantier

*Block windrows on the edge
of sugar cane fields
to be produced by project*



© Eiffage/Razel

marquées que sur la section sud. Le tracé y rencontre de nombreux andains de blocs rocheux extraits de la préparation des champs de canne à sucre, et stockés en périphérie de ces champs (photo 3). Ces blocs seront pour partie valorisés par concassage dans le cadre des travaux, pour partie remis en andains sur des délaissés d'emprises, dans le cadre des aménagements paysagers. Le relief du TOARC 2 (7 km) est extrêmement marqué :

- ◆ plusieurs ravines infranchissables coupent le tracé ; des ouvrages non courants (Ravine Bras Grande Ravine, Ravine Cocâtre, Petite Ravine, etc.) ou exceptionnels (Grande Ravine) établiront la continuité du tracé à plus ou moins brève échéance. Toutefois, dans la plupart des cas, le terrassement s'achèvera avant la fin de construction des grands ouvrages d'art ;

- ◆ les pentes transversales du terrain naturel sont souvent très importantes. Par exemple, au sud du viaduc Trois-Bassins (RD9), la section courante passe en profil déblai, avec une dénivelée de 42 m côté montagne et 33 m côté océan. Sur ces pentes, les remblais sont systématiquement accrochés à la pente par des redans réalisés en déblai (photo 4) ;

- ◆ le terrain naturel est souvent constellé de blocs de rochers isolés, dont la stabilité sur pentes ne tient généralement qu'à la présence de la végétation tropicale. Cette instabilité a par exemple conduit à interdire le trafic des usagers sur la RD9 pendant le temps nécessaire au dégagement des emprises et à la création d'un piège à cailloux de grandes dimensions (photo 5) ;

- ◆ au sud du viaduc Trois-Bassins, le projet est à profils en long décalés sur 1,2 km, le décalage maximal étant de 3 m en hauteur ;

- ◆ les accès routiers aux diverses zones inter-ravines sont longs, étroits et sinueux (photo 6).

Géologie

Rappelons brièvement que l'île de la Réunion s'est formée il y a trois millions d'années, à partir d'épanchements volcaniques sous-marins (- 4000 m), puis aériens. Le Piton des Neiges (3071 m), situé au centre de l'île, est aujourd'hui éteint. L'activité volcanique reste intense avec le Piton de la Fournaise (2632 m), l'un des volcans les plus actifs au niveau mondial, situé au sud de l'île.

Le secteur géologique concerné par les travaux de la Route des Tamarins est issu des coulées volcaniques du Piton des Neiges. Il se caractérise par des faciès lithologiques très hétérogènes, formés de l'accumulation des épanchements volcaniques, avec des strates de natures, d'épaisseurs et largeurs très variables (du décimètre au mètre) :

- ◆ il s'agit plus précisément des coulées de lave des phases II, III et IV du Piton des Neiges. Les phases II et IV sont caractérisées par des basaltes

Photo 4
Vue aérienne
des aires
de la Saline

*Aerial view
of the Salina areas*



© Hervé Douiris

lot (mandataire)/Razel/Matière. Le TOARC 1 a été lancé en juillet 2004, le TOARC 2 en février 2005. Au sein du groupement, Matière réalise l'ensemble des ouvrages d'art (ouvrages hydrauliques et ouvrages courants), Eiffage TP et Razel se partageant les terrassements, l'assainissement, les chaussées des rétablissements et autres travaux divers. Les travaux devront être achevés en avril 2007 pour le premier marché, en septembre 2007 pour le second.

Caractéristiques des terrassements des deux TOARC

Les 14,5 km de section courante à 2 x 2 voies que totalise l'ensemble des deux TOARC sont situés à une altitude moyenne de 250 m, de part et d'autre de la Ravine Trois-Bassins.

Le TOARC 1 (7,5 km de longueur) traverse dans sa section nord un secteur de plantation irriguée de cannes à sucre, sur lequel – toutes proportions gardées – le relief est plus doux, et les ravines moins

aphyriques pouvant être vacuolaires ou scoriacés, et la phase III est représentée par des andésites alcalines. Dans le détail, ces coulées sont composées d'une alternance de bancs des roches précitées, de duretés très variables mais pouvant être très élevées, et de scories qui sont des roches nettement plus tendres et peu compactes ;

◆ ces différentes coulées sont surmontées de terrains meubles de couverture constitués de limons, d'un enchâssement de cailloux et de blocs, et/ou d'arènes basaltiques et de colluvions.

Classification géotechnique des matériaux rencontrés

Les matériaux de déblais ont été subdivisés en cinq classes :

◆ les classes 1 et 2 représentent les matériaux meubles (1) ou qui nécessitent un déroctage par ripage (2). Elles sont caractérisées par les terrains de couverture de nature essentiellement limoneuse ou graveleuse ;

◆ les classes 3, 4 et 5 concernent l'extraction par minage en prenant en compte une difficulté croissante du minage, plus précisément en passant d'une extraction minée dans des matériaux constitués par un mélange de matériaux grossiers et fins (classe 3 : tufs, scories, etc.), puis dans des matériaux rocheux peu épais ou présentant des vides (classe 4 : basaltes vacuolaires, scories compactes) et enfin dans des bancs massifs, durs, et épais (classe 5).

L'extraction de ces matériaux très hétérogènes nécessite donc une parfaite connaissance (en plus des caractéristiques géotechniques) de la disposition dans l'espace de ces différentes natures de terrains. Pour cette raison, des reconnaissances géotechniques ont été réalisées préalablement aux travaux, comme par exemple des puits à la pelle mécanique, des sondages destructifs et carottés, de la prospection géophysique (sismique réflexion notamment).

L'interprétation des résultats des essais de laboratoire effectués sur les échantillons prélevés au cours de ces reconnaissances géotechniques, ainsi que la corrélation des coupes des différents sondages énoncés ci-avant, ont conduit à concevoir puis à réaliser l'extraction et la réutilisation des matériaux du chantier.

En résumé, la réutilisation envisagée pour les matériaux rencontrés sera la suivante :

◆ les matériaux de classe 1 sont destinés aux aménagements paysagers ainsi qu'aux revêtements des zones de plantations paysagères, moyennant un amendement adapté ;

◆ les matériaux de classe 2 et 3 sont réutilisés en noyau, corps et enveloppe de remblai en tenant compte de leur état hydrique au moment des terrassements ;

◆ les matériaux plus nobles de classe 4, qui font

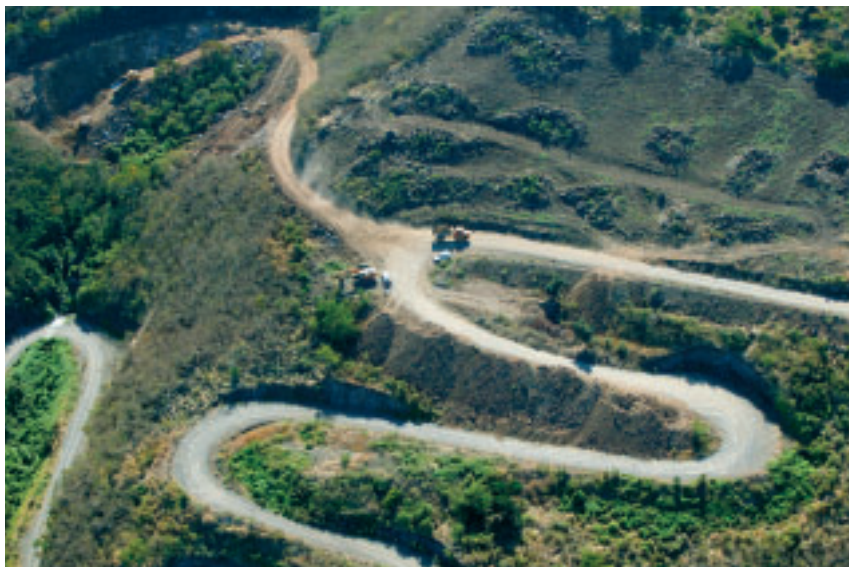


Photo 5
Vue aérienne secteur RD9 (au sud de la Ravine Trois-Bassins)

Aerial view of RD9 sector (south of the Trois-Bassins Ravine)



Photo 6
Les lacets impressionnants du "Chemin surprise" à Saint-Leu

The impressive twists of "Chemin surprise" at Saint-Leu

© Hervé Douris

l'objet d'une sélection, sont réservés pour les bases de remblais de grandes hauteurs, les corps de remblais et les remblais des fouilles. Ce matériau se classe en R62 ;

◆ les matériaux de classe 5 sont utilisés pour l'élaboration des différentes fractions granulaires du marché, sachant que leurs caractéristiques intrinsèques sont celles d'un rocher de type R61 avec LA + MDE < 40.

Terrassements - Ressources humaines

Les TOARC 1 et 2 constituent pour le groupement Eiffage TP/Razel/Matière une seule entité de travaux, à encadrement commun.

En fin d'année 2004 et début 2005, Eiffage TP et Razel ont mis en place un dispositif de recrutement local, afin de pourvoir à la constitution des équipes d'ouvriers, de techniciens de chantier et d'encadrement technique ou administratif nécessaire au bon déroulement des travaux.

Photo 7
Echelon
de terrassement
(TOARC 1 - Aire
de la Saline)

Earthworks
machinery (project
phase 1 - Salina
area)



© Eiffage/Razel

	TOARC 1	TOARC 2
Zonage	RD10 / Ravine Trois Bassins	Ravine Trois Bassins/ Ravine Fontaine
CARACTÉRISTIQUES		
Linéaire 2 x 2 voies	7,5 km	7 km
Altitude moyenne	290	240
Diffuseurs	2	1
Voies rétablies	3	2
Aires de repos/service	1 couple AS	-
QUANTITATIF		
Volume déblais	1 300 000 m ³	1 100 000 m ³
Volume remblais	920 000 m ³	970 000 m ³
Déblais à l'explosif	485 000 m ³	400 000 m ³
Tonnage concassé sur site	550 000 t	460 000 t
Linéaire canalisations	2 600 m	2 100 m
Linéaire fossés	9 900 m	7 900 m
OA courant PI	6	3
OA courant PS	-	2
OH (conduits Matière)	11	9
PARTICULARITÉS DU LOT		
Géologie	Limons / Basaltes / Scories	Limons / Basaltes / Scories
Profil en long		Chaussées décalées
Soutènement	Mur du barrage	
OA non courant (hors TOARC)	6	6
OA exceptionnels (hors TOARC)	Ravine Trois Bassins (nord)	Ravine Trois Bassins (sud) Grande Ravine Ravine Fontaine

Tableau I
Les principales quantités
des TOARC 1 et 2

Main quantities for project
phases 1 and 2



Cette campagne soutenue d'embauche et de formation à partir du tissu local, a été menée en coopération très active avec les services de la direction du Travail, l'ANPE, Afrobat, la Chambre de Commerce et d'Industrie et différents services de formation, tels que le Cirfim, l'armée (RSMA)... sur place, à la Réunion.

Ce travail en commun a permis de dégager, parmi une masse importante de curriculum vitae, et par le biais de réunions d'information, un certain nombre de candidatures intéressantes, afin de pourvoir à différents postes du chantier :

- ◆ soit en embauche directe, compte tenu de compétences acquises ;
- ◆ soit en contrat de professionnalisation débouchant sur des embauches ;
- ◆ soit en embauches directes, avec complément de formation.

A fin septembre 2005, l'effectif du groupement,

hors sous-traitants est de 123 personnes, comprenant :

- ◆ personnel déplacé métropolitain : 31 (26 %) :
- ◆ personnel en embauche directe (avec ou sans formation complémentaire) : 92 (74 %).

Exécution des déblais/remblais - ressources matériel

La présence dans les déblais basaltiques d'un pourcentage de matériaux rocheux, estimé à 60 % environ du volume à extraire, ainsi que la nécessité de réaliser de fortes cadences journalières, ont conduit le groupement à préconiser un fractionnement à l'explosif des déblais rocheux, et donc à s'entourer en sous-traitance, dès la prise d'affaire, de l'entreprise Stips, spécialiste du minage. Le recours à la technique du minage à l'explosif paraît évident dans le cadre de terrassements rocheux en métropole ; il l'est beaucoup moins à la Réunion, où la quasi-totalité des terrassements en secteurs rocheux se fait à l'aide de brise-roches hydrauliques. Ce point est développé plus avant au paragraphe "Minage des basaltes".

Les talus de remblais en matériaux bruts 0/500 sont dressés à 3H/2V.

Les talus de déblais sont dressés à 2H/1V dans les limons, 3H/2V dans les matériaux meubles ou altérés, 1H/5V dans les couches rocheuses. Compte tenu du manque de cohésion générale de certains massifs rocheux hétérogènes, où cohabitent basalte massif et scories, des pièges à cailloux sont prévus en pied de déblais. Leur dimensionnement, fonction des profondeurs de déblais, a été déterminé par une étude trajectographique.

Les matériaux meubles ou minés sont excavés exclusivement à l'aide de pelles hydrauliques, de 75 t (une unité), 45 t (deux unités) ou 33 t (deux unités). Des pelles munies de brise-roches hydrauliques à pic (BRH) ou à marteau (Terminator) accompagnent les pelles de production, afin de réduire les blocs isolés ou insuffisamment fractionnés au minage. L'usage du brise-roche Terminator, peu répandu et constituant une première à la Réunion, est décrit plus avant, au paragraphe "Utilisation du brise-roche Rocktec Terminator™".

Par ailleurs, deux des pelles de production, équipées d'attaches rapides, peuvent être munies en quelques minutes de dent de déroctage en lieu et place de leur godet, afin de pouvoir scarifier des zones de terrain compact découvertes lors de l'extraction.

Les principaux échelons de pelles fonctionnent à deux postes (photo 7).

La difficulté, voire l'impossibilité, de faire transiter des matériaux à travers les ravines, a conduit la maîtrise d'œuvre et le groupement à découper le projet en zones d'inter-ravines. Sur chacune de ces inter-ravines, nous avons recherché, si possible, à optimiser le projet, afin que le mouvement de ter-

re déblais/remblais s'équilibre sur chaque inter-ravine. De ce fait, les distances de transport sont généralement inférieures à 1 000 m. Les engins de transport les mieux adaptés aux faibles distances et aux fortes déclivités étant les tombereaux articulés, seul ce type de camion de chantier est utilisé. En fonction du dimensionnement des ateliers de chargement, les tombereaux mobilisés ont des capacités de 25 t, 30 t et 35 t. Eiffage TP aligne des tombereaux Caterpillar, Razel des tombereaux Volvo.

Elaboration des matériaux

La présence en grande quantité de matériaux rocheux basaltiques permet de produire sur le site même des travaux les granulats concassés calibrés susceptibles de couvrir l'ensemble des usages "nobles" des remblais de terrassement :

- ◆ remblais de purges et d'assise ouvrages d'art 0/150;
- ◆ remblais drainants 10/150;
- ◆ remblais de fouille et remblais contigus d'ouvrages d'art 0/100;
- ◆ couche de forme 0/60 des rétablissements de communication;
- ◆ couche de forme 0/150 de section courante (50 premiers centimètres).

Ces granulats sont produits à l'aide d'équipements mobiles de concassage/criblage, soit à partir des stocks de blocs extraits du terrain naturel ou triés des déblais, soit directement dans les déblais minés (photo 8). Préalablement aux opérations de concassage, les blocs sont fractionnés en 0/600, de façon à pouvoir être introduits dans le gueulard des concasseurs. Il est prévu un concasseur mobile sur chacun des TOARC.

■ ASSAINISSEMENT

La forte pluviosité de l'île de la Réunion, notamment en période cyclonique, lors de l'été austral de janvier à mars, nécessite des aménagements hydrauliques largement dimensionnés, dont la réalisation représente une part importante des marchés TOARC. Tous les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés en crue centennale.

La transparence hydraulique au niveau des ravines est assurée transversalement :

- ◆ pour les ravines secondaires, par de nombreux ouvrages hydrauliques de grande dimension (ponts cadres ou conduits préfabriqués Matière);
- ◆ pour les ravines principales, par les ouvrages d'art non courants ou exceptionnels.

Des fossés longitudinaux amont, se déversant en amont des ouvrages hydrauliques transversaux, la plupart du temps enrochés et/ou bétonnés, protègent les crêtes de déblais et les pieds de remblais des écoulements sur les bassins versants.



© Eiffage/Razel

L'assainissement longitudinal de la plate-forme routière est entièrement dirigé vers des bassins de rétention, situés en aval de la pente, sur chaque inter-ravine, soit une moyenne d'un bassin au kilomètre. L'eau collectée y est décantée et déshuilée avant son rejet dans le milieu naturel. Ces bassins ont par ailleurs été conçus pour se vider en moins de 72 heures, afin de ne pas favoriser le développement des larves de moustiques, porteurs de maladies infectieuses (paludisme).

Photo 8
Concasseur mobile et pelle d'approvisionnement

Mobile crusher and supply shovel

■ MINAGE DES BASALTES

Principales contraintes

Un des enjeux importants des terrassements à la Réunion est l'extraction des matériaux rocheux basaltiques et scoriacés indurés. L'énergie explosive est actuellement l'énergie qui permet le mieux d'obtenir une exploitation économique en grande masse des déblais rocheux.

Pour les seuls TOARC 1 et 2, les besoins en explosif ont été estimés à plus de 500 t.

A titre de comparaison l'importation d'explosifs sur l'île de la Réunion, avant les travaux de la Route des Tamarins, était d'environ :

- ◆ année 2000 : 18 t;
- ◆ année 2001 : 12 t;
- ◆ année 2002 : 16 t;
- ◆ année 2003 : 23 t.

Les raisons de ces faibles consommations sont liées :

- ◆ à l'absence de "culture explosif" et ce malgré la présence de coulées basaltiques sur la quasi-totalité de l'île;
- ◆ aux longs délais d'approvisionnement (2 à 3 mois) et peu nombreux pour le transport par ba-

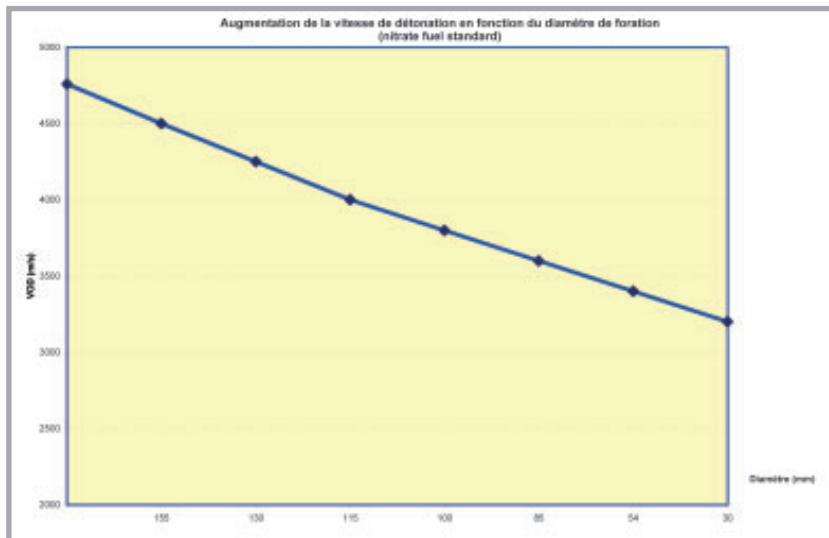


Figure 5
Augmentation de la vitesse de détonation du nitrate-fuel en fonction du diamètre du trou
Increase in the speed of nitrate/fuel oil detonation as a function of hole diameter

Photo 9
Chargement des big-bags de nitrate d'ammonium dans l'UFME

Loading Big Bags of ammonium nitrate into the mobile explosive production unit



© Eiffage/Razel

► teau entre la métropole et la Réunion (trois à quatre rotations par an);
◆ aux capacités de stockage limitées du dépôt d'explosifs de l'île (25 t).

L'un des enjeux stratégiques du chantier est donc de garantir la continuité de l'approvisionnement en explosifs sur l'île.

C'est pourquoi l'entreprise Stips, sous-traitante du groupement a proposé, en relation avec différents partenaires sociaux économiques de l'île (DRIRE, entreprises, préfecture, maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage...), de s'affranchir en grande partie de ces contraintes en proposant une solution technique permettant la fabrication d'explosifs à partir d'une unité mobile de fabrication d'explosif sur site (UMFE).

Cette unité permet de fabriquer sur chantier jusqu'à 8 t d'explosifs de type nitrate fuel par jour. Pour éviter la pénurie en explosifs encartouchés, ceux-ci sont réservés à des usages nobles (cartouches amorces pour initier la colonne d'explosifs fabriqués sur site).

Les intervenants associés à cette opération de distribution et de fabrication d'explosifs sont :

- ◆ la société Nitrochimie : mise à disposition à la société Stips d'une UMFE;
- ◆ La Hogue et Gueze : importation et stockage des explosifs encartouchés et artifices de mise à feu nécessaires à l'amorçage du nitrate fuel fabriqués sur site;

- ◆ la société SIER : l'importation et distribution sur chantier de la matière première nécessaire à la fabrication d'explosifs sur site (nitrate d'ammonium).

Explosifs retenus pour la fabrication sur site

Trois types d'explosifs sont actuellement fabriqués sur site de par le monde : le nitrate fuel (ANFO des anglo-saxons), les émulsions et les mélanges nitrate fuel - émulsion en différentes proportions. Sur le chantier de la Route des Tamarins, en complément des problèmes précités de logistique et de stockage, l'explosif nitrate fuel a été choisi pour les raisons technico-économiques suivantes :

- ◆ absence d'eau dans les déblais;
 - ◆ explosif le moins complexe à fabriquer sur site;
 - ◆ explosif économique, ayant un bon rapport énergétique;
 - ◆ explosif possédant une large plage de variation de ses caractéristiques détoniques en fonction du choix des diamètres de foration (à mettre en corrélation avec le type de matériaux à traiter : basaltes ou scories indurés) (figure 5).
- Les avantages de ce procédé de fabrication sont :
- ◆ une diminution des stockages et des transports de produits explosifs;
 - ◆ une suppression des manutentions sur le chantier de produits explosifs;
 - ◆ une limitation des quantités produites journalièrement aux seuls besoins locaux;
 - ◆ une diminution des risques de vols.

Fabrication d'explosifs sur site

Le nitrate d'ammonium (NA) conditionné en big bags d'une tonne arrive par bateau spécifique (matières dangereuses classe 5-1) sur la commune du Port. Ces big bags sont stockés dans un bâtiment spécifique chez l'importateur. Quotidiennement, en fonction de la quantité consommée, les produits sont :

- ◆ soit chargés directement dans la trémie de l'UMFE (photo 9);
 - ◆ soit livrés sur chantier (le remplissage de la trémie UMFE s'effectuant dans ce cas sur chantier). Les cartouches amorces et les détonateurs électriques sont stockés au dépôt de la Hogue et Gueze et transportés quotidiennement par Stips sur les zones de tir à bord de fourgons spécialement aménagés à cet effet.
- L'UMFE transporte séparément des produits non explosifs, puis les mélange selon un certain mode opératoire et en certaines quantités sur le site de chargement du tir.
- L'UMFE est un camion 4 x 4 équipé d'une trémie contenant le nitrate d'ammonium (capacité 3 t), d'un réservoir de fuel et d'une vis sans fin de type Archimède.
- Le mélange nitrate d'ammonium/fuel s'effectue de

façon contrôlée dans cette vis et permet d'obtenir l'imprégnation des grains de nitrate d'ammonium par le fuel. Le nitrate-fuel produit est déversé directement dans le trou de mine par une manchette souple (photos 10 et 11).

La capacité de chargement est de 50 kg d'explosifs par minute en débit instantané, et de 8 t environ de production mises en œuvre sur un poste de 8 heures.

Le contrôle qualité du produit fabriqué sur site est assuré quotidiennement par l'opérateur (mesure de la teneur en fuel du mélange).

En complément, mensuellement, des mesures de la vitesse de détonation (VOD) in situ permettent de contrôler l'homogénéité du mélange et de vérifier les caractéristiques détoniques de l'explosif dans le trou de mine.

Ces mesures sont réalisées par un appareil de type Minitrap de MREL.

Organisation du minage et méthodologie de déroctage à l'explosif

L'effectif de Stips affecté au minage des TOARC 1 et 2 est de 25 personnes environ.

Il comprend un ingénieur minage, un conducteur de travaux minage, deux chefs de chantier, et un responsable mécanique.

Les délais d'exécution du chantier imposent la nécessité de concevoir des tirs journaliers d'un volume important (5000 à 10000 m³).

La foration est effectuée en gros diamètre (115 et 127 mm).

La technique des tirs en masse utilisée est celle des tirs en cratère avec foration par passes comprises entre 4 à 9 m.

Sur ce chantier tous les trous de mines sont positionnés en coordonnées XYZ par le géomètre du groupement. Celui-ci transmet à l'ingénieur minage (préalablement à l'élaboration du plan de tir) le lever de la foration effectivement réalisée.

Cette méthodologie permet d'adapter aux conditions réelles les paramètres de tirs suivants :

- ◆ la séquence de mise à feu;
- ◆ la charge spécifique au volume réellement extrait (concept du travail de l'explosif à énergie constante).

Les talus sont réalisés en poste abattage après validation de plots d'essais en fonction de la qualité géotechnique des matériaux rencontrés.

Explosifs et amorçage

Les explosifs d'amorçage utilisés sont de type émulsion.

L'explosif fabriqué sur site est un type Nitro D8 à base de nitrate technique microporeux.

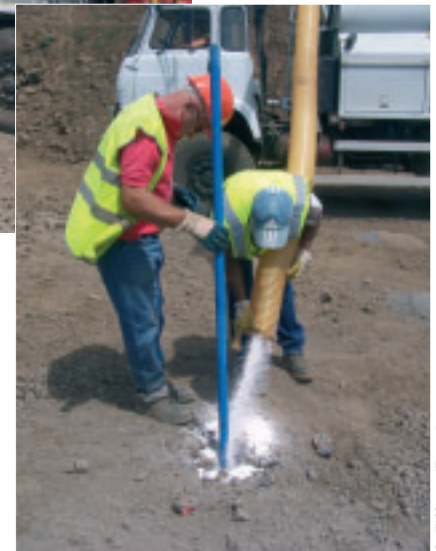
Les détonateurs sont de type électrique fond de trou à microretard. L'amorçage séquentiel est sys-



© Eiffage/Razel

Photo 10
Chargement gravitaire de nitrate-fuel dans les trous de mine avec l'UFME

Gravity-flow loading of nitrate/fuel oil into the mine holes with the mobile explosive production unit



© Eiffage/Razel

Photo 11
Détail du chargement de nitrate-fuel dans un trou de mine
Detail of nitrate/fuel oil loading into a mine hole

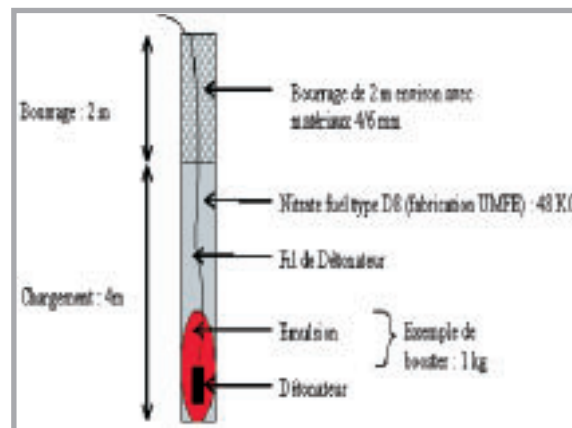


Figure 6
Plan de chargement type d'un trou en diamètre 115 m de hauteur 6,24 m

Typical loading plan for a hole 115 m in diameter and 6.24 m high

tématiquement utilisé sur tous les tirs (figure 6). La consommation spécifique moyenne oscille entre 400 g/m³ à 690 g/m³ environ, en fonction de la nature du terrain rocheux. La maille de foration est adaptée en fonction des hauteurs de passe de minage. Elle est comprise entre 10 et 16 m². Les mailles de minage dépendent des hauteurs de terrassement, des diamètres utilisés et des charges spécifiques nécessaires pour obtenir les rendements granulométriques souhaités.

Foration et équipements associés

Compte tenu de la qualité et de l'hétérogénéité des matériaux traversés (alternances de basaltes durs sains, de basaltes durs et fracturés, de faciès scoriacés avec ou sans cohésion : "scories" ou "brèches basaltiques") et des cadences imposées par le planning (10000 m³/j) le choix de l'entreprise Stips s'est naturellement porté, pour trois ateliers sur quatre, vers des perforatrices fond de trou, gros

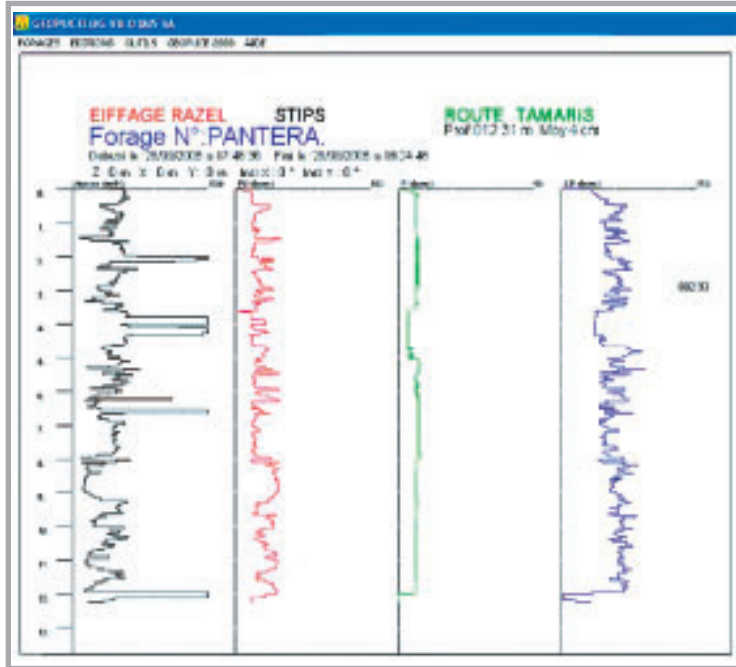


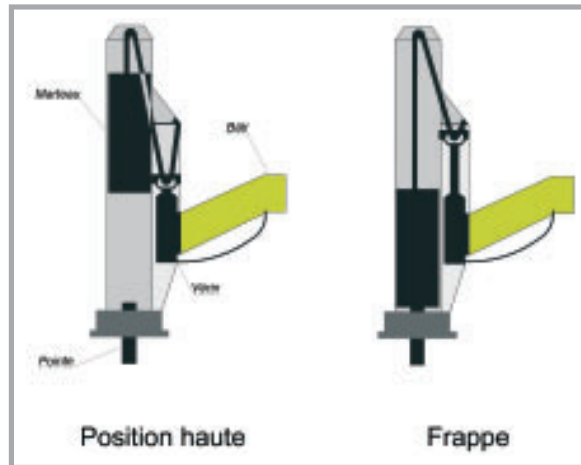
Figure 7
Graphes d'enregistrement
des paramètres
de foration
*Boring parameter
recording charts*



Photo 12
Le brise-roche Rocktec
Terminator RX500
sur pelle Cat 345
*The Rocktec Terminator
RX500 rock breaker
on Cat 345 shovel*

© Eiffage/Razel

Figure 8
Principe
de fonctionnement
du Rocktec
Terminator RX500
*Operating principle
of the Rocktec Terminator
RX500*



diamètre, équipées de compresseurs haute pression et haut débit :

- ◆ Ingersoll Rand ECM 695 ;
- ◆ Tamrock Titon 400 ;
- ◆ Atlas Copco I6.

La quatrième foreuse est une machine hors du trou possédant un compresseur de 14 m³ à 14 bars et le marteau hydraulique le plus puissant du marché : Tamroc Panthera 1100.

Toutes ces machines sont équipées de toute la panoplie d'instrumentation disponible sur le marché en termes de sécurité et de précision de foration (profondimètre, inclinomètre, climatisation...).

En complément, deux machines sur quatre sont équipées d'enregistreurs de paramètres de type Géopuce équipés de modem pour la transmission et le traitement de ces diagraphies en métropole.

Cet appareil mesure la vitesse d'avancement, le couple de rotation de la foreuse et la pression sur l'outil (figure 7).

Dans certaine configuration géologique (faciès à faible cohésion entre banc rocheux à forte cohésion) le trou après foration est affecté par un phénomène de type "pochage au droit des zones à faible cohésion".

Les hétérogénéités et les passages latéraux de faciès nous conduisent à tuber en PVC un grand nombre de trous (zone comportant des vides de type "tunnel de laves" ou "zones pochées").

Afin de tenir la cadence, trois foreuses travaillent en double poste.

Contraintes environnementales

Le tracé des TOARC 1 et 2 se trouve à proximité de zones d'habitation (moins de 100 m) ou de structures sensibles (ouvrages de génie civil, canalisation eaux et gaz, lignes électriques, réservoirs d'eau...).

Les vibrations générées par les tirs sont suivies à l'aide de sismographes numériques.

Conclusion

Les objectifs conjugués du chantier sont :

- ◆ de réaliser le minage de ce chantier dans des conditions de qualité et de sécurité optimale ;
- ◆ de limiter les impacts des tirs sur les structures environnantes ;
- ◆ d'obtenir pour les terrassiers dans ces matériaux complexes une fragmentation acceptable et compatible avec la mise en remblais.

Dans un contexte complexe principalement lié à la distance, l'insularité, et à la réglementation française sur les installations classées, l'utilisation de nitrate fuel fabriqué sur site sur un chantier dont la nature des matériaux est très hétérogène offre une solution permettant de réaliser des tirs de bonne qualité avec des rendements compatibles avec une cadence de terrassement élevée.

UTILISATION DU BRISE-ROCHE ROCKTEC TERMINATOR RX500

Fort du retour d'expériences de chantiers métropolitains dans les granites et les basaltes, le groupement Eiffage TP/Razel a mobilisé sur le site de

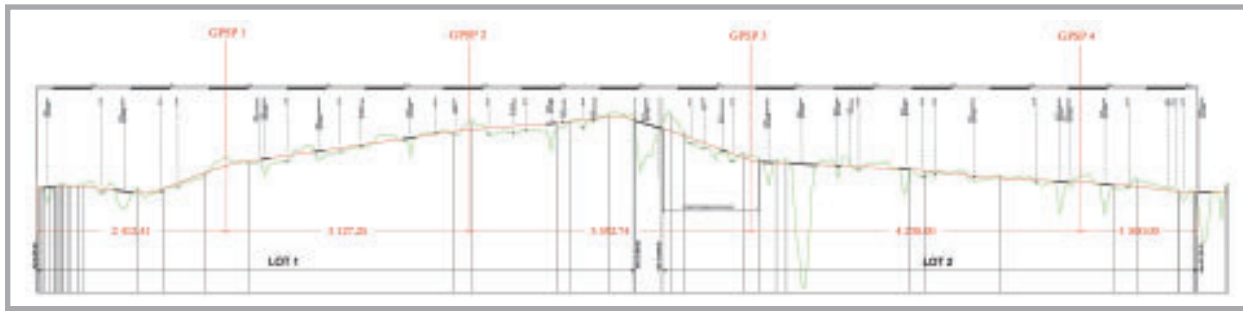


Figure 9
Répartition des pivots GPS de référence sur le tracé TOARC 1 - TOARC 2
Distribution of reference GPS pivots on the project phase 1 - project phase 2 route

la Route des Tamarins deux brise-roches à haute énergie (62000 Nm) de type Terminator RX500 de la société Rocktec. Les bâtis de ces brise-roches sont portés par des pelles hydrauliques sur chenilles de 45 t, de type Caterpillar 345, équipées en attache rapide (photo 12).

Contrairement aux brise-roches hydrauliques conventionnels, qui utilisent la force de pénétration dynamique d'un pic, le Terminator exploite la chute libre d'une masse sur une sorte de pointerolle portée par le bâti. Celui-ci est posé par l'opérateur sur le bloc à fractionner, le plus verticalement possible. L'effort dynamique transmis à la roche par le marteau de 5 t en chute libre sur le marteau, d'une hauteur de plus de 5 m, suffit en général à fractionner en un seul coup le bloc rocheux, même si celui-ci est de dimensions métriques. La remontée de la masse est assurée par un système de vérin hydraulique à démultiplication (figure 8). Le rendement au fractionnement est ainsi très supérieur à celui des brise-roches hydrauliques conventionnels, et, pour l'environnement du chantier, le bruit généré par le Terminator est très inférieur au lancinant "Tacatac" de ceux-là. La frappe puissante et ciblée du Terminator peut être répétée toutes les quatre à huit secondes.

Seule limite au système : le Terminator doit fonctionner le plus verticalement possible. Ce matériel n'est donc pas adapté au dressement de talus rocheux par exemple.

■ RÉSEAU GPS

Un réseau de stations GPS permanentes a pour but d'assurer de façon continue et en temps réel tout besoin de positionnement centimétrique sur l'ensemble d'un chantier, pour la durée des travaux et suivant des précisions adaptées aux différentes activités.

Dans le cas d'un chantier linéaire, ce réseau est composé d'une série de pivots GPS (stations de référence) répartis le long de la trace du projet, en tenant compte de la topographie du site, de la précision recherchée et des contraintes liées au système GPS (figure 9). Ces pivots servent de point de référence aux GPS mobiles utilisés en temps réel sur le chantier (topographie, guidage de machine...) (photo 13).

Après avoir prouvé son efficacité et sa fiabilité sur plusieurs chantiers en métropole, Eiffage TP et Razel ont décidé de mettre en place un tel réseau de positionnement sur leur chantier de la Route des Tamarins.

Le dispositif est constitué de quatre pivots GPS

(deux par TOARC) espacés de 3,5 à 4 km le long de l'axe et positionnés de manière à rendre la couverture parfaitement régulière sur l'ensemble des 14,5 km du chantier. Cette répartition assure une distance maximum de 2 km entre tout point du chantier et la station de référence la plus proche. Tous les travaux de positionnement peuvent donc être réalisés conformément aux tolérances et aux précisions demandées.

Ces pivots sont réalisés en "dur" suivant un dispositif mis au point et éprouvé sur de nombreux chantiers. Les antennes et capteurs GPS les équipant sont de type Leica SR530.

Une fréquence radio propre au chantier a été mise en place afin d'éviter toute perturbation interne et externe sur les transmissions des informations entre les différents capteurs.

L'ensemble des travaux de topographie (polygone secondaire, levés, implantations...) est réalisé par des GPS mobiles du type Leica 1230 universel. Présentant une meilleure fréquence d'actualisation de positionnement que le SR530, ces équipements sont particulièrement bien adaptés à un travail rapide et fiable.

Cette nouvelle génération de capteur GPS mobile est également utilisée comme outil de localisation pour les dispositifs de guidage et d'asservissement D & PS (Driving Positionning System) pour les différentes opérations de réglage par bouteur et niveleuse.

Rappelons que, outre le gain de temps notable, l'utilisation d'un tel réseau présente l'intérêt de garantir l'homogénéité de l'ensemble des mesures topographiques et des besoins de positionnement du chantier, tout en éliminant les risques d'erreur liés au manque de cohérence des références et des techniques utilisées en mode traditionnel par les divers intervenants sur le site.

■ LE SYSTÈME DPS

Le système de guidage et d'asservissement 3D-D & PS est de plus en plus utilisé sur les chantiers de terrassement en métropole : la qualité et la précision des résultats obtenus en matière de réglage par bouteur et par niveleuse n'est plus à prouver.

Rappelons que le guidage 3D repose sur la comparaison en temps réel de la position instantanée de l'outil (lame de l'engin guidé) avec sa position théorique définie par le projet. La position XYZ de l'engin, connue avec précision dans le réseau GPS, est comparée à la modélisation du projet. Un logiciel embarqué permet de calculer les corrections



© Eiffage/Razel

Photo 13
Station de référence fixe GPS (pivot)
Fixed GPS reference station (pivot)



Photo 14
Vue d'une cabine
de niveleuse
équipée DPS

View of a grader
cab equipped
with DPS

© Eiffage/Razel

► de positionnement à apporter à l'outil de réglage (photo 14).

Sur le site de la Route des Tamarins, les différentes couches (arase et couche de forme) seront réglées à l'aide de deux machines équipées en D & PS.

Un premier atelier composé d'un boteur de type D7R équipé d'un système de guidage sera affecté au réglage de l'arase et au réglage de la couche de forme, puis un deuxième échelon comprenant une niveleuse de type 14H asservie assurera le réglage de la couche de forme.

Cependant, la complexité géométrique du projet demande l'utilisation de deux différentes méthodes de calcul pour le réglage des couches.

En premier lieu, les zones du projet à caractère linéaire, à savoir la section courante, les rétablissements des voies de communication, et les voies latérales seront traités de manière classique. Le projet est ici défini par son axe en plan, son profil en long, et ses profils en travers : ces paramètres enregistrés dans l'ordinateur de la machine permettront de calculer les corrections à apporter au positionnement de l'outil.

En second lieu, les zones plus complexes du projet tels que les diffuseurs ou les aires de services seront réalisées par la méthode du modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT consiste en la modélisation surfacique du projet sous forme de triangles 3D : le projet est alors traduit par une succession de surfaces tridimensionnelles. Cette dernière technique permet d'éliminer les contraintes géométriques de raccordement des différentes zones du projet, que ce soit, par exemple, les interfaces de la section courante avec les bretelles d'accès, ou bien celles générées par les plates-formes constituant les aires de services.

ABSTRACT

Route des Tamarins **highway in Reunion.** **Earthworks** **on the mountainside**

Various authors

The economic vitality and strong population growth on Reunion Island led the Reunion Region to prepare a project for 34 km of Route des Tamarins highway joining two two-lane dual-carriageway sections of national highway RN1 on the west coast of the island. A mammoth project clinging to the mountainside, Route des Tamarins includes a large number of linking civil engineering structures, and several exceptional viaducts, to cross through the numerous ravines cutting into the island's columnar base. The earthworks on the mountainside are based on the expertise of industry majors, Eiffage TP and Razel, which describe in these pages, from the earthwork contractor's viewpoint, the organisation and specific features of two of the four contracts, for earthworks, drainage, civil engineering structures and road diversions on Route des Tamarins highway, with project management being performed by Scetauroute.

RESUMEN ESPAÑOL

La Carretera de los **Tamarindos en La Réunion.** **Movimientos de tierras a** **ladera de montaña**

Autores diversos

El dinamismo económico y el importante crecimiento demográfico de la isla de La Réunion han obligado a la Región Réunion iniciar las obras para los 34 km de la Carretera de los Tamarindos, que pone en comunicación con dos tramos de la carretera nacional RN1 de 2 x 2 carriles en la costa Oeste de la Isla. Obra titánica ubicada a ladera de montaña, la Carretera de los Tamarindos incluye un importante número de obras de fábrica no convencionales, así como varios viaductos excepcionales, con objeto de franquear los múltiples barrancos que recortan la capa basáltica de la isla. Los movimientos de tierra por las laderas de montaña han recurrido a los conocimientos técnicos de grandes empresas de este sector, Eiffage TP y Razel, que presentan

en este artículo, con la pericia de una empresa de movimientos de tierra, la organización y las especificidades de dos de los cuatro contratos de movimientos de tierra - saneamiento - obras de fábrica - restablecimiento de comunicación de la Carretera de los Tamarindos, con ejecución de proyecto por Scetauroute.

Les terrassements de l'A24 entre Viseu et Chaves au Portugal

De la conception à la réalisation

C'est en décembre 2000 que l'Etat portugais a attribué à Norscut la concession autoroutière de l'A24 entre Viseu et Chaves.

Ce projet autoroutier est destiné à désenclaver le Nord du Portugal et à relier le centre du pays à l'Espagne dans une zone d'accès difficile.

Sur les 155 km que représente cette concession, 33 km ont déjà été réalisés sous le contrôle de l'Etat portugais et 122 km ont été attribués par Norscut, dans un contrat de conception-construction au groupement franco-portugais Norinter.

La topographie accidentée des secteurs traversés va imposer la construction de 30 viaducs, de 97 ouvrages d'arts courants et des mouvements de terre importants.

En matière de terrassements, l'ampleur des travaux est considérable. Les volumes totaux à excaver sont de l'ordre de 26 millions de m³.

Les terrains rencontrés sont dans leur grande majorité constitués de matériaux rocheux granitiques, à l'exception de la zone située à proximité de Peso Da Regua où des schistes gréseux compacts ont été exploités.

■ INTRODUCTION

C'est en décembre 2000 que l'Etat Portugais a attribué à Norscut la concession autoroutière de l'A24 entre Viseu et Chaves.

Ce projet autoroutier est destiné à désenclaver le Nord du Portugal et à relier le centre du pays à l'Espagne dans une zone d'accès difficile (figure 1).

Sur les 155 km que représente cette concession, 33 km ont déjà été réalisés sous le contrôle de l'Etat portugais et 122 km ont été attribués par Norscut, dans un contrat de conception construction au groupement franco-portugais Norinter.

Tous les tronçons mis en service sont exploités par Operscut.

Depuis le 29 juin 2005, la partie sud de cette autoroute est déjà en exploitation sur près de 87 km entre Viseu et Vila Real.

Pour ce qui concerne la partie restante, l'objectif du constructeur est de livrer les 38 km situés le plus au nord en juin 2006 et d'achever l'ensemble en juin 2007.

La topographie accidentée des secteurs traversés va imposer la construction de 30 viaducs, de 97 ouvrages d'art courants et des mouvements de terre importants.

En matière de terrassements, l'ampleur des travaux est considérable (figure 2). Les volumes totaux à excaver sont de l'ordre de 26 millions de

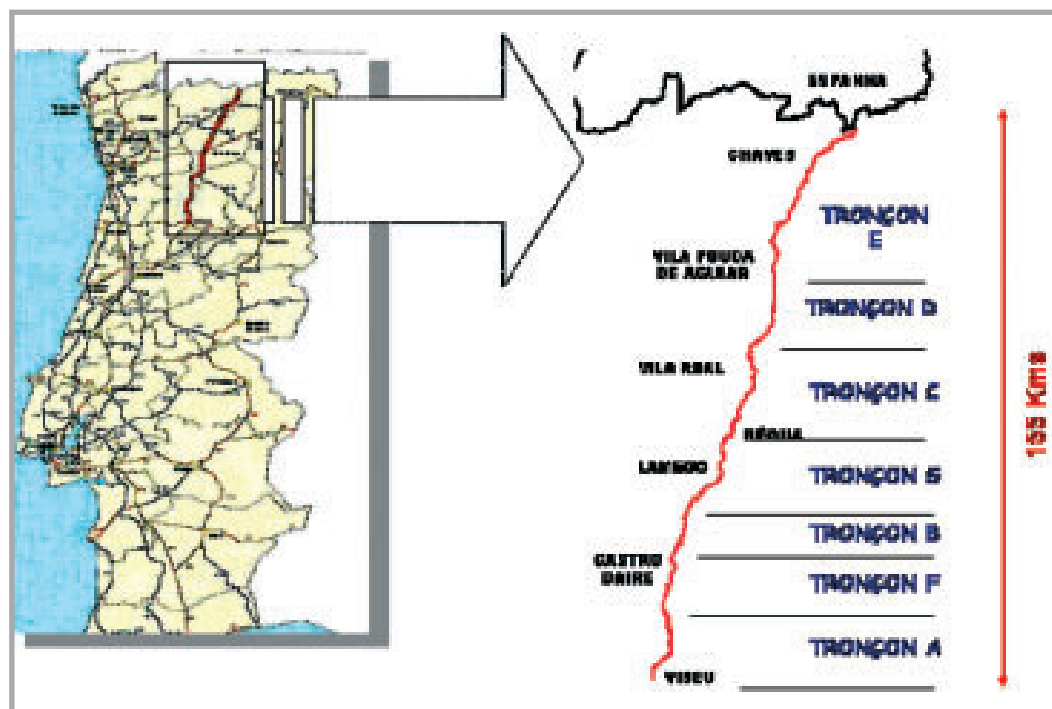


Figure 1
Localisation de l'A24
et découpage en tronçons

*Location of the A24
and breakdown
into sections*

mètres cubes et à fin septembre 2005, 19 millions de mètres cubes ont déjà été déplacés.

Les terrains rencontrés sont dans leur grande majorité constitués de matériaux rocheux granitiques, à l'exception de la zone située à proximité de Peso Da Regua où des schistes gréseux compacts ont été exploités.

Près de 6 années vont être nécessaires pour que Norinter puisse mener à bien ce projet hors du commun.

Jean-Marc Saccone

DIRECTEUR DU PROJET
Norinter



Imed Ben Fredj

DIRECTEUR TECHNIQUE
Norinter



François Legrain

DIRECTEUR TECHNIQUE
ADJOINT
Scetauroute



Figure 2
Répartition
des volumes
de terrassements
en fonction
par tronçons
*Breakdown
of earthworks
volumes by section*

LOT	VOLUMES DE TERRASSEMENT (Milliers de m ³)
A	4 800
B	1 150
C	4 050
D	3 700
E	12 700
TOTAL	26 400

Volumes de terrassement

Choix client BAFO NORICUT	
EFFAGE	50%
CONTACTO	25%
CDC IVE	15%
EGE PROJECTS	10%

Choix client NORINTER	
EFFAGE	70%
SOI	30%

Exploitant OPERSCUT	
TRANSROUTE	70%
EFFAGE	15%
CONTACTO	15%

Les Acteurs



Photo 1
Tronçon C.
Viaduc du Corgo
*Section C.
Corgo viaduct*

■ ÉTUDES

Phase de développement avant la signature du contrat

L'équipe de conception composée d'Eiffage, de Scetauroute avec Jean Muller International pour les viaducs et d'Egis a élaboré les études nécessaires à la préparation des offres des différentes opérations Scut lancées par l'Etat portugais, notamment le Scut Interior Norte. Scut, abréviation de Sem Custo para os Utilizadores, signifie sans coût pour l'utilisateur autrement dit péage virtuel.

Dans le cadre d'un appel d'offres de concession, l'un des objectifs des études est de définir le mieux possible le projet afin d'obtenir des quantités précises et fiables pour assurer le coût de construction qui sera utilisé dans les simulations financières. Deux difficultés sont à intégrer pendant cette phase :

- ◆ des données de base plus ou moins précises (topographie, géotechnique, hydrologie...);
- ◆ des délais serrés compte tenu de l'objectif à atteindre.

Les études sont organisées pour tenir compte de ces difficultés. Elles consistent donc à définir le projet mais également à évaluer, dans les différents domaines, les risques de variation possible

des quantités en fonction de la précision des données et d'autres facteurs comme les aléas météorologiques pour les terrassements.

La BAFO (Best and Final Offer) constitue la version finale de ce travail réalisé en général par les deux candidats retenus à l'issue de l'évaluation des offres et qui permettra à l'autorité concédante de choisir le lauréat. Le projet défini dans ce dossier est intégré au contrat de concession et sert de référence lors de la réalisation du projet. C'est donc un élément essentiel dans la suite des études et ce, d'autant plus que le coût de construction est ferme et non révisable et que l'aléa sur les quantités est de la responsabilité du concepteur-construteur.

Phase de réalisation

Que ce soit en phase d'offres ou après la signature du contrat, l'équipe de conception a pour objectif de rechercher le coût de construction optimisé, c'est-à-dire le coût minimal dans le respect des normes et des règlements et, après signature du contrat, dans le respect des engagements du concessionnaire.

Ce travail doit se faire en lien étroit avec le constructeur afin d'intégrer ses propres contraintes (matériel, méthodes, coût des matériaux, etc.). La réussite du projet nécessite un travail d'équipe où chacun apporte son expérience et son savoir-faire et où les capacités d'écoute et d'ouverture sont des qualités aussi importantes que l'expertise technique. La conception et la construction sont de manière évidente, complémentaires mais les bureaux d'études et les entreprises ont longtemps travaillé, en tout cas dans le domaine autoroutier français, chacun à sa place et doivent aujourd'hui apprendre à collaborer et à s'enrichir chacun de l'expérience de l'autre. Il y a beaucoup à gagner pour la réussite de ce type de projet (photo 1).

L'organisation des études

Pour mener à bien ses missions, Norinter a mis en place une direction technique qui s'est constituée autour de cadres d'Eiffage, de spécialistes de Scetauroute et d'ingénieurs portugais. Elle s'est appuyée sur des partenaires français et portugais qui ont réalisé les études et mis au point les dossiers. Les trois missions principales sont :

- ◆ **la conception du projet** dont la direction technique assure le management, la coordination et le contrôle. Cette mission comporte également le suivi des procédures administratives : soumission et accompagnement des dossiers auprès de l'ingénieur indépendant puis de l'administration ;
- ◆ **l'assistance aux directions de chantier** dans les domaines des terrassements, des ouvrages d'art, de l'assainissement, des chaussées et des équipements. La direction technique participe égale-

ment aux adaptations de projet en cours de chantier ;

◆ **le suivi de la qualité des travaux** qui comporte le contrôle d'exécution dans les différents domaines techniques et le respect des engagements dans le domaine de l'environnement.

Une grande partie de ces études a été réalisée en partenariat avec Scetauroute, au travers de ses différentes implantations en France (études générales, géotechnique, chaussées et ouvrages d'art).

Les viaducs ont été étudiés par Jean Muller International qui a également en charge le contrôle des plans d'exécution établis par les bureaux d'études des entreprises.

Afin de mieux maîtriser les négociations avec les autorités locales, Norinter a associé, au fur et à mesure de l'avancement du projet, des bureaux d'études locaux à la conception. Notamment le bureau d'études Norvia installé à Vila Real, en conception générale, le bureau d'études du Professeur Armando Rito, en particulier pour le viaduc de Vila Pouca de Aguiar et le viaduc du Corgo, les bureaux d'études Ecosistema et Agripro pour les études environnementales.

Les dossiers administratifs

Dans le cadre de la législation portugaise, le contrat de concession prévoit un certain nombre de dossiers à réaliser pour approbation par l'Administration. Il s'agit :

◆ **des "Estudio Previo"** (avant-projet sommaire) : étude préliminaire comprenant un volet environnemental important et qui permet à l'administration de figer une bande d'études de 400 m de large. Cette phase est normalement terminée lors du lancement des appels d'offres de concession.

Dans le cas du Scut Interior Norte ce n'était pas le cas et l'Estudio Previo de plusieurs tronçons, qui n'aurait dû être qu'une formalité, a entraîné un changement de tracé important ;

◆ **des "Projecto Base"** (avant-projet) : il a pour objectif de figer la géométrie du tracé et son approbation permet de lancer les études d'expropriation à la charge du concepteur et réalisées par des bureaux d'études locaux. C'est donc une phase très importante car, compte tenu de l'absence de cadastre au Portugal, l'élaboration des dossiers est un processus long et la libération des emprises qui conditionne le démarrage des travaux, en dépend ;

◆ **des "Projecto de Execucao"** (projet d'exécution) : il définit de manière précise, pour l'administration, le projet qui va être réalisé. Il est découpé en un nombre relativement important de dossiers : un par spécialité, jusqu'au PE 23 (RECAPE) dont l'approbation autorise l'entreprise à démarrer les travaux. Le Rapport de conformité environnemental du projet d'exécution (RECAPE) est donc un dossier stratégique d'autant plus que son approbation est conditionnée par celle du ministère de l'Environ-

nement, dont il a fallu apprendre à connaître les exigences, mais aussi avec lequel une concertation fructueuse a pu s'établir pour trouver des solutions respectueuses de l'environnement même si celles-ci pouvaient être innovantes au Portugal. Afin que les dossiers puissent être approuvés par l'administration, ils doivent préalablement être soumis à l'approbation de l'ingénieur indépendant qui est chargé du contrôle extérieur, mission assurée par le bureau d'études Atkins.

Volet environnemental

Le projet de l'A24 se développe dans une des zones avec une forte sensibilité paysagère et naturelle, impliquant la traversée de zones aussi sensibles que le réseau Natura 2000 (dans Alvão Marão), la région de l'Alto Douro Vinicole (classé comme Patrimoine de l'Humanité par l'Unesco), des zones qui présentent une hydrogéologie avec des emprises du chantier situées dans les zones incluses dans les périmètres de protection élargie de captage des eaux minéro-médicinales (Pedras Salgadas et Vidago), ainsi que des zones avec une grande concentration de vestiges archéologiques surtout dans l'extrémité nord du tracé.

Le changement de la loi d'évaluation de l'impact environnemental au Portugal (citée précédemment) s'est fait sentir dès la réalisation de l'étude préliminaire. En effet, l'Institut de l'Environnement a rejeté la solution du tracé du concours public. La principale raison avancée par cet Institut était que l'exécution du tracé initialement prévu, impliquait de passer une zone occupée par une meute de loups (située à Soutelinho do Mezio).

Un retour d'expérience à valoriser

L'organisation mise en place au démarrage du projet a nécessité des adaptations pour répondre de manière efficace aux besoins du projet. L'expérience acquise depuis 5 ans tant du point de vue du contexte portugais et de la collaboration avec les partenaires français et portugais sera, nous le souhaitons, mise à profit dans d'autres projets au Portugal.

■ SÉCURITÉ

"La première richesse d'un homme est sa santé et la pleine possession de ses capacités physiques et mentales.

Pour cette seule raison, la prévention des accidents est d'abord une exigence morale pour tous avant d'être un dispositif réglementaire ou un ensemble de méthodes et de moyens." (1)

(1) Source : Note d'organisation "Gestion de la prévention des risques professionnels" – Eiffage Construction – 08/10/2001



Photo 2
Tronçon B.
Echangeur
de Bigorne
Section B.
Bigorne interchange

Pelles Hydrauliques				Tombereaux			
Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05	Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05
Caterpillar	235	0	1	Volvo	A25	10	15
Caterpillar	318	1	1	Volvo	A30	0	0
Caterpillar	325	4	5	Volvo	A35	4	4
Caterpillar	330	5	6	Volvo	A40	0	15
Caterpillar	365	1	7	Caterpillar	769D	5	15
Caterpillar	375	2	2				
Caterpillar	385	0	1				
Total		13	23	Total		22	65

Boueurs				Chargeuses			
Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05	Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05
Caterpillar	05R	2	2	Caterpillar	960G	2	2
Caterpillar	06R	2	2	Caterpillar	960G	1	1
Caterpillar	07R	1	1	Caterpillar	960G	1	2
Caterpillar	08R	3	6	Caterpillar	IT25	1	1
				Caterpillar	TH30	1	1
Total		8	11	Total		6	7

Mélangeuses				Compacteurs			
Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05	Marque	Type	Avr. 04	Sept. 05
Caterpillar	GH	2	2	Caterpillar	CS630	5	5
Caterpillar	NH	2	4	Caterpillar	CS563	0	0
				Caterpillar	CS433C	4	5
				Caterpillar	CS224D	4	4
				Caterpillar	PS600		1
				COMICA	CCP91-35		2
Total		4	6	Total		14	17

Figure 3
Evolution
du parc matériel
Norinter
**Evolution of the Norinter
equipment fleet**

► Afin de répondre à cette exigence Norinter n'a pas hésité à importer la culture Prévention Eiffage et les bonnes pratiques instaurées sur nos chantiers français, à commencer par constituer un service Prévention. Ce dernier est composé aujourd'hui par cinq animateurs prévention (un chef de secteur au siège et quatre animateurs répartis sur les différents lots du projet). Les missions de ce service consistent à définir et à maintenir l'organisation prévention mise en place, veiller à l'application et la mise à jour des plans de sécurité et santé, et de conseiller l'encadrement de Norinter, les sous-traitants et les prestataires de services afin de respecter les objectifs fixés par la direction de projet. Nous pourrions exposer différentes actions préventives illustrant les démarches de sécurité intégrée dès la conception, ou des actions de formation innovantes pour le Portugal (vidéo de chantier),

mais nous avons fait le choix de présenter les démarches propres à certaines particularités des chantiers de terrassement.

Au début du chantier, un des premiers défis à relever a été de former des conducteurs d'engins à l'utilisation en sécurité des "monstres" du terrassement. En effet, passer de chauffeur de camion routier à conducteur de dumper (769 D et A 40) n'a pas été sans quelques difficultés. Pour les surmonter nous avons intégré dans nos équipes un formateur Eiffage TP, aidé par des formateurs de Volvo et Caterpillar. Nous avons été les précurseurs dans la mise en place des "autorisations de conduite". Notre exemple s'est vite répandu sur les divers chantiers du Portugal, et cette année, en février 2005, divers textes de loi ont été publiés concernant l'obligation de formation spécifique des chauffeurs d'engins de terrassement.

Notre projet a amené un changement au cœur des autorités administratives responsables des secours. En effet, les chantiers linéaires imposent une organisation des secours passant par une étroite collaboration avec la protection civile, les pompiers et l'entreprise mandataire. Nous avons proposé l'établissement d'un plan de secours avec des points rencontres permettant ainsi d'augmenter l'efficacité et la rapidité des secours en cas d'accident. Nous avons créé un numéro d'urgence spécifique à notre chantier. Enthousiasmée par cette démarche, la Protection civile l'a complètement intégrée et en fait l'apologie lors de ses diverses interventions, ce qui a amené d'autre projet de chantier linéaire à intégrer cette organisation.

La volonté de maintenir et d'améliorer notre collaboration avec les diverses autorités administratives nous a amenés à accueillir des inspecteurs du travail en stage sur notre chantier. Aujourd'hui, notre besoin d'être novateur et exemplaire nous a conduits à mettre en place un partenariat entre le Syndicat des terrassiers de France, le CICCOPN (Centre de formation du BTP du Nord du Portugal) et Eiffage. Cette collaboration donne naissance à un projet d'adaptation d'un référentiel de connaissance sur la conduite en sécurité de 25 machines de terrassement (photo 2).

■ TRAVAUX

Les moyens utilisés

Dès le démarrage des travaux, il avait été envisagé la construction simultanée de plusieurs tronçons. Ainsi, fin 2001 Norinter procédait au démarrage du tronçon : Regua/Vila Real (lot C) alors que le tronçon Reconcos/Bigorne (lot B) débutait durant le premier semestre 2002.

Dans ces conditions, et afin de pouvoir disposer d'un maximum d'adaptabilité, il avait été convenu d'associer aux moyens propres de terrassement

de Norinter le concours de sous-traitants. Les tronçons confiés à la sous-traitance ont toujours été choisis parmi ceux offrant le moins de difficultés techniques et/ou libres de problèmes d'expropriation.

La montée en puissance du potentiel de terrassement s'est faite de manière progressive.

La figure 3 détaille l'évolution de ce potentiel depuis le démarrage des travaux.

Durant les trois premières années du chantier, Norinter disposait de trois ateliers de terrassement répartis sur le tronçon C, et a fait appel à un sous-traitant pour la réalisation des lots B et A.

Ce potentiel est aujourd'hui porté à neuf échelons et Norinter continue de faire appel à la sous-traitance.

Le bassin d'emploi du Nord du Portugal est de qualité et le personnel de conduite a été dans sa grande majorité recruté sur place.

Les consultations d'entreprises de terrassement ont été menées dans la totalité de la péninsule ibérique. Les choix des sous-traitants se sont portés sur des entreprises espagnoles car elles disposent en général d'un potentiel plus important que les entreprises portugaises (Epsa et Explotugal).

La nature des matériaux rencontrés (granites rocheux et schistes compacts) et la topographie accidentée ont imposé le choix des matériels de terrassement.

Les échelons de terrassement sont généralement constitués de pelles hydrauliques de 70 à 80 t accompagnées de tombereaux à essieux rigides de 35 t ou articulés de 25 à 40 t. Des pelles de moindre importance (35 t) sont utilisées pour les travaux spéciaux comme les fouilles des ouvrages et des divers soutènements.

Il est à noter que les sous-traitants espagnols ont une préférence pour l'utilisation des tombereaux à essieux rigides de 50 t.

Les contraintes environnementales et foncières auxquelles se rajoutent la topographie et les difficultés de certains franchissements de cours d'eau, imposent une gestion précise des mouvements des terres. Ceux-ci doivent être équilibrés et les dépôts réduits au maximum. Par chance, la qualité des matériaux rencontrés autorise un réemploi quasi systématique.

Le minage (photos 3 et 4)

Généralités

Le chantier de l'A24 compte 26 millions de mètres cubes d'excavation dont approximativement 70 %, soit 18 millions, sont minés.

Ceux-ci sont composés en majeure partie de granite plus ou moins altéré, et dans une moindre mesure, de schiste porphyrisé très dur (au nord de la vallée du Douro).

Les talus d'excavation préconisés dépendent du degré d'altération de la roche en place et passe de



Photo 3
Déblais rocheux
lot E2 (à proximité
de Vidago)

*Rock excavations
for work section E2
(in the vicinity
of Vidago)*



Photo 4
Terrassements
à proximité de Lago Bom
(lot E1)

*Earthworks in the vicinity
of Lago Bom
(work section E1)*

3H/2V à 1/1 et 1H/3V. Dans ce dernier cas uniquement, nous avons recours au prédécoupage. Ils sont régulièrement adaptés aux conditions en place.

Un traitement ultérieur de consolidation est parfois requis (clous jusque 8 m, grillage, béton projeté). Un surminage de 70 cm est systématiquement demandé au niveau de la PST.

La granulométrie demandée est en général 0-800, mais peut atteindre 0-400 pour la partie supérieure des remblais.

Protection des riverains

Le tracé de l'A24 est en général dessiné dans des zones de faible urbanisation. Cependant, la tra-

Photo 5
Aménagement aval
d'un ouvrage
d'assainissement

*Downstream development
of a drainage structure*



Photo 6
Echangeur
de Vila Verde da Raia
(lot E3)

*Vila Verde de Raia
interchange (work
section E3)*

versée ou l'approche de quelques villages nous oblige à contrôler systématiquement la vibration engendrée sur les bâtiments les plus proches (selon les normes portugaises, elle doit rester inférieure à 10 mm).

Un état des lieux systématique de tout bâtiment situé à moins de 200 m des excavations a été réalisé.

Si quelques plaintes ont été enregistrées pour fissuration de bâtiment, aucun sinistre important n'est à déplorer.

Méthodologie

Le marché de minage a été réparti entre entreprises françaises (Stips/TSM), espagnoles (Explotugal et EPSA) et locales (Eurodrill et Explorte).

Toutes ont utilisé les mêmes types d'explosifs et détonateurs. L'amorçage est réalisé en fonds de trou (D = 76 mm) par détonateur Nonel (cordon détonant interdit) sur une charge de Gelamonite ou de gomme.

La charge de colonne est constituée, selon la pré-

sence ou non d'eau, d'explosif Riogel, Amonite plus ou Anfo.

Le traitement des boules et des blocs de dimension supérieure se fait par pétardage à l'extraction, ou, plus souvent au BRH soit au chargement, soit à la mise en place.

En raison du relief montagneux, nous limitons la hauteur du front de tir à 6-8 m.

Les plus gros problèmes rencontrés lors du minage proviennent du faillage souvent important du massif, ainsi que de la présence de "boules" en surface. Ils ont été résolus en adaptant le maillage au terrain rencontré : en général 2,50 x 2,00 incliné de 80° en zone fracturée.

Déblais et remblais

(photos 5 et 6)

Chaque lot a été étudié de manière à avoir un mouvement de terre autonome, sans avoir recours à un apport de matériaux extérieurs ni à des dépôts définitifs, sauf pour les matériaux impropres à une utilisation en remblai.

L'optimisation a été possible, en jouant sur plusieurs paramètres, dont la ligne rouge, la pente des talus de déblai et de remblai, le remplacement de viaducs par des remblais dans certaines vallées sèches.

Le relief du terrain naturel étant particulièrement tourmenté, puisque l'autoroute traverse une région montagneuse, la réalisation des terrassements s'avère particulièrement difficile et nécessite d'être extrêmement méticuleux.

La mise en œuvre des remblais passe par une préparation du terrain naturel pour assurer une bonne assise aux remblais. Ce travail préparatoire est effectué par des équipes constituées de bulls D8 et de pelles et consiste à évacuer les gros blocs et à créer des redans dans le terrain naturel de manière à appuyer le remblai sur un terrain plat, alors que la pente en travers originelle du terrain naturel sous les remblais atteint fréquemment 10 à 12 %.

L'assainissement transversal est alors mis en place. Là aussi, les dénivelées et les hauteurs de remblai, amènent à construire de véritables ouvrages atteignant des longueurs de 170 m avec des chutes d'eau de 3 m dans des regards borgnes sous le remblai pour briser la vitesse que l'eau pourrait atteindre si l'ouvrage hydraulique suivait la pente naturelle (10 à 12 %). La pente dans chaque segment de buse est ainsi ramenée à 3 %.

Une fois les ouvrages hydrauliques mis en place, la mise en œuvre des remblais par couches de 0,80 m à 1,00 m commence en utilisant le matériau granitique 0/800. La pente des talus de remblai est en règle générale de 3/2 avec une risberme de 3 m de large tous les 12 m de hauteur de remblai.

Cependant, lorsque les conditions l'imposent (équi-

librage du mouvement de terre ou largeur des emprises), la pente des talus est raidie à 1/1 et le maillage des contrôles du laboratoire est alors resserré. Un traitement particulier est en plus apporté à la partie supérieure des terrassements via la mise en place, pour prévenir toute migration des fines, d'un géotextile et la mise en œuvre d'un O/400 pour arriver à la cote de la PST.

Après réglage de la PST, on procède au drainage de surface de la plate-forme. Il consiste en général en un drain placé à l'axe à une profondeur de 0,70 m pour les parties en remblai, auquel s'ajoutent en déblai deux drains latéraux à une profondeur variant de 0,70 m à 1,20 m suivant les circulations d'eau rencontrées.

Les confortements

Les techniques d'ouvrages de soutènement par renforcement de remblai ou de déblai sont très largement employées sur le chantier Scut Interior IP3/A24. Le coût de construction de ces ouvrages reste compétitif si l'on considère les surcoûts qui proviendraient des terrassements et d'expropriations autrement nécessaires, notamment dans des reliefs difficiles.

Parmi toutes les sections du projet, le lanço C Vila Real/Regua, mis en service en décembre 2004, possède probablement la topographie la plus tourmentée (photos 7 et 8), traversant une zone de moyenne montagne au cœur des vignobles avec un souci d'intégration paysagère renforcée. D'autres sections, encore en travaux, font également l'objet de murs exceptionnels, certains dépassant les 30 m (sub-lanço E2, mur de Charneca).

Les différentes techniques

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre, tant en remblais qu'en déblais :

◆ murs en remblais :

- procédé Terre Armée (fourni par Freyssinet-Terra Armada) : écailles cruciformes béton et armatures haute adhérences,

- procédé Terratrel (fourni par Freyssinet-Terra Armada) : parement type treillis métalliques et armatures haute adhérence,

- procédé Terramesh-mixte (fourni par Gabimarão) : parement gabions avec nappe de grillage en arrière de 3,0 m de longueur ainsi que des renforts principaux en géogrilles à haute résistance mécanique,

- procédé Panogrill (fourni par Vivalp) : parement type treillis métallique et armatures métalliques, - mur poids gabions (fournis par Gabimarão).

◆ murs en déblais :

- murs cloués (mis en œuvre par Stips/TSM),

- murs Texsol (mis en œuvre par une filiale d'Eiffage).

Le tableau I présente les quantités de ces différents types de mur par lanço.



Photo 7 Exemples de confortement réalisés sur le tronçon C (Vila Real - Regua)

Examples of consolidation work performed on section C (Vila Real - Regua)



Photo 8 Intégration du tracé au cœur des vignobles du Douro

Integration of the route in the heart of the Douro vineyards

Tableau I Quantités des différents types de mur par lanço

Quantities for the various types of wall by Lanço

Lanços : →	Lanço A	Lanço C	Lanço D0-D1	Lanço E1-E2-E3	Σ
Murs ↓	IP 6 (Viseu) Castro Daire Sul	Vila Real/Regua	Pedras Salgadas-Vila Real	Chaves (Fronteira) Pedras Salgadas	
Murs en remblais					
Nombre total de murs en remblais	1	34	5	5	Σ= 48 (89 500 m ²)
Procédé Terre armée	-	5 (24 000 m ²)	2 (2 100 m ²)	3 (11 150 m ²)	
Procédé Terratrel	-	3 (7 800 m ²)	-	-	
Procédé Terramesh	-	9 (15 800 m ²)	1 (3 000 m ²)	-	
Procédé Panogrill	-	2 (4 200 m ²)	-	-	
Murs Gabions-poids	1 (580 m ²)	14 (14 500 m ²)	2 (2 200 m ²)	3 (4 200 m ²)	
Murs en déblais					
Nombre total de murs en déblai	-	19	-	2	Σ= 21
Murs cloués	-	18 (50 800 m ²)	1 (1 000 m ²)	2 (10 400 m ²)	Σ (61 800 m ²)
Mur Texsol	-	1 (500 m ²)	-	-	

Photo 9
Plate-forme
des terrassements
après mise en œuvre
de la couche de forme

Earthworks platform
after laying the capping
layer



► Ces murs sont mis en œuvre autant en section courante que pour des bretelles, rétablissements, échappatoires et culées d'ouvrages.

Des quantités supplémentaires, notamment de murs cloués pour des fouilles provisoires d'ouvrages n'ont pas été intégrées à ces valeurs. Certains murs cloués de géométrie irrégulière ont également fait l'objet d'utilisation de béton fibré (métallique).

Dimensionnement

Tous ces procédés ont fait l'objet de dimensionnement par des bureaux d'études français ou portugais, validés par la direction technique de Norinter. Selon les procédés, les dimensionnements font intervenir différents référentiels, tels que des normes françaises (NF 6P 94-222 pour les murs en Terre Armée) ou des normes anglaises (BS8006 pour les murs en Terrasmesh).

Retour d'expérience

En ce qui concerne l'aspect financier des différents procédés en remblais, les coûts de fourniture d'éléments préfabriqués sont à relativiser en fonction des spécifications requises pour les matériaux de remblais ainsi que des cadences de pose et des moyens humains/matériels qui sont nécessaires. De plus, il faut prendre en compte les contraintes d'accès, notamment en déblai, mais aussi les contraintes esthétiques requises lors de la traversée de certaines zones sensibles telles que le vignoble du Porto. A noter que pour les murs en remblai du lanço C, l'utilisation de parements minéraux a permis une bonne intégration au site, en ayant recours à la pierre du pays, c'est-à-dire les schistes.

Sur les lanços encore en travaux, notamment les lanços D1 et E1, la géométrie et les types de murs envisagés sont encore susceptibles d'évolution, fonction des propositions des différentes entreprises. En particulier, des types de murs encore non utilisés sur le chantier, tels que des murs en géotextiles sont envisagés.

Les murs de hauteur moyenne à élevée, en général à partir de 10-12 m de hauteur, font l'objet d'un suivi par auscultation topographique et tous les murs seront intégrés dans un plan de surveillance et d'entretien global. Ces dispositions permettront notamment de vérifier le vieillissement (corrosion des armatures, dégradations des gabions...) mais également les tolérances aux déformations (écrasement des gabions...) ainsi que les potentiels de végétalisation.

La plate-forme (photo 9)

Sur le projet de conception-construction de l'autoroute A24, les plates-formes, support des chaussées, sont de classe PF3 au sens du "*Manuel de conception des plates-formes autoroutières*" (Sceauroute, 1998). Cette structure permet de minimiser les épaisseurs des couches de chaussées. L'objectif de portance est donc de 120 MPa. Ceci constitue une nouveauté au Portugal où les plates-formes sont de classe P3 (spécifications portugaises JAE) et sont supposées présenter un module de portance de 100 MPa.

En partie supérieure des terrassements (PST), le sol support des plates-formes a été optimisé. Son épaisseur est de 0,50 à 0,75 m en remblai et en

déblai en sols meubles. Il est constitué de matériaux granitiques 0/400 insensibles à l'eau issus des déblais. L'objectif de portance sur l'arase est de 80 MPa.

La structure des plates-formes, en remblais et en déblais en sols meubles est la suivante :

- ◆ 30 cm de GNT 0/40, lanço A, B, C et E3;
- ◆ 35 cm de couche de forme en grave 0/150 et 10 cm de couche de réglage en GNT 0/40, lanço D0, D1, E1 et E2.

Cette dernière structure permet de minimiser l'utilisation de la GNT 0/40 et de valoriser l'excédent des matériaux des déblais par la production de la grave 0/150.

En déblais rocheux, la structure retenue est 15 cm de GNT 0/40 sur une surprofondeur de minage de 75 à 90 cm.

Ces différentes structures ont été testées en planche d'essais de compactage afin de vérifier les objectifs de portance ($EV2 \geq 120$ MPa), de compacité ($\gamma_s \geq 95$ % OPM) et de topographie ± 2 cm). Un compactage avec un rouleau vibrant de classe VM3 suivi d'un compactage au rouleau à pneus (classe P3) a été retenu. L'utilisation d'un compacteur vibrant de classe VM5 a été rejetée afin de ne pas faire évoluer la GNT 0/40.

Sur les différentes GNT 0/40 utilisées, il a été réalisé des planches d'essais de détermination du module intrinsèque du matériau. Les différents résultats donnent un module de 165 MPa. L'utilisation de ce module dans la formule de Gress confirme la nécessité d'avoir une arase à 80 MPa pour une épaisseur de GNT 0/40 de 30 cm.

Les plates-formes ont été contrôlées en portance (essais à la plaque) avec un point de mesure tous les 25 m par demi-plate-forme. Ceci constitue une nouveauté au Portugal où l'essai à la plaque n'est pas systématique. Seuls sont réalisés la portance CBR (≥ 10 à 98,5 % de l'OPM) mesurée en laboratoire et un contrôle de compacité avec un objectif supérieur à 98,5 % de l'OPM.

Lorsque les objectifs de portance n'ont pas été atteints – essentiellement dus à des problèmes d'arase (évolution des granites) – la plate-forme a été déclassée en PF2+ et la structure de chaussée redimensionnée. Cela se traduit par une augmentation d'épaisseur de la couche de grave bitume.

Les principales caractéristiques géotechniques de la GNT 0/40 sont les suivantes (spécifications portugaises JAE) : le passant à 0,075 mm doit être compris entre 3 et 10 %; les contrôles continus de fabrication montrent des valeurs comprises entre 3,5 et 4,5 %. L'équivalent sable (ES) doit être supérieur à 50; il est entre 60 et 65. Le Los Angelès (LA) mesuré selon la spécification portugaise E 237-1971 (granulométrie A – fraction 9,5/37,5) doit être inférieur à 45; les valeurs trouvées se situent entre 36 et 45.

ABSTRACT

Earthworks on the A24 between Viseu and Chaves in Portugal. From design to construction

J.-M. Saccone, I. Ben Fredj, Fr. Legrain

It was in December 2000 that the Portuguese government awarded Norscut the A24 motorway concession between Viseu and Chaves.

This motorway project is designed to bring northern Portugal out of its isolation and connect the centre of the country to Spain in a region where access is difficult.

Of the 155 km represented by this concession, 33 km have already been constructed under the supervision of the Portuguese government, and 122 km have been awarded by Norscut, under a Design and Build contract, to the French-Portuguese consortium Norinter.

Given the undulating topography of the sectors passed through, construction of 30 viaducts and 97 civil engineering structures along the highway and major earth movements will be required.

With regard to earthworks, the scale of the works is considerable. The total volume to be excavated is approximately 26 million cu. m.

The ground encountered consists, for the greatest part, of granitic rocky materials, except for the region located near Peso Da Regua where compact sandy shales have been worked.

RESUMEN ESPAÑOL

Los movimientos de tierras de la autopista A24 entre Viseu y Chaves en Portugal. Desde el establecimiento del concepto hasta la ejecución

J.-M. Saccone, I. Ben Fredj y Fr. Legrain

La concesión de la autopista A24 entre Viseu y Chaves fue atribuida en diciembre de 2000 por el Estado portugués a la empresa Norscut.

Este proyecto de autopista está destinado a desenclavar el Norte de Portugal y poner en comunicación el centro del país con España en una zona de difícil acceso.

En los 155 km que representa esta concesión, 33 km ya fueron ejecuta-

dos bajo el control del Estado portugués y 122 km se han atribuido por Norscut, en un contrato de diseño construcción a la agrupación franco-portuguesa Norinter.

La topografía accidentada de los sectores atravesados habrá de imponer la construcción de 30 viaductos, 97 obras de fábrica convencionales así como importantes movimientos de tierra.

Por lo que respecta a los movimientos de tierra, la amplitud de los trabajos es considerable. Los volúmenes totales que se tratan de excavar corresponden aproximadamente a 26 millones de m³. Los terrenos encontrados están compuestos, en su inmensa mayoría, por materiales de rocas graníticas, con excepción de la zona ubicada a proximidad de Peso Da Regua en el cual fueron explotados diversos esquistos areniscos compactos.

Maîtrise de l'humidification

L'arroseuse-enfouisseuse est une nouvelle technologie, pour l'ajout d'eau maîtrisé, adaptée à la technique du traitement de sol en place à usage de couche de forme, qui permet "d'injecter" l'eau avec débit et répartition contrôlés. L'utilisation de ce matériel dans la chaîne de traitement de sol permet de maîtriser les objectifs d'humidification et contribue à l'obtention d'une bonne homogénéité du mélange sol - eau après malaxage au pulvimixeur. Ce dispositif d'humidification a été testé, expérimenté et adopté lors de la réalisation de la couche de forme en limon traité chaux - liant sur près de 100 km de chaussée de l'autoroute A28-Alis / Rouen-Alençon avec un objectif atteint de plate-forme PF3 (portance de 120 MPa). Les mesures et contrôles de teneur en eau effectués montrent que cette évolution technologique du matériel d'humidification permet d'obtenir un matériau traité et humidifié de qualité équivalente à celui obtenu avec l'utilisation d'une centrale de traitement.

Cet article a fait l'objet d'une communication au TREMTI 2005.

■ INTRODUCTION

La teneur en eau d'un sol traité est l'un des paramètres ayant une influence majeure sur les caractéristiques mécaniques finales d'un matériau traité. La maîtrise de la teneur en eau objective d'un mélange sol-liant nécessite alors des moyens d'humidification fiables et précis, c'est-à-dire, avec une tolérance qui n'entraîne pas de dispersion sensible sur la résistance mécanique du matériau traité à court et long terme.

Rappel sur les techniques d'ajout d'eau utilisées

Cas des mélanges sol-liant effectués en centrale de traitement de niveau 3

L'ajout d'eau est effectué avec contrôle volumétrique et il est asservi au débit de la centrale.

Dans le cadre d'une utilisation de matériaux fins (passant à 80 microns > 35 %) ou de matériaux granulaires avec un pourcentage de fines élevés (> 12%), l'expérience montre que la variabilité de teneur en eau finale, pour un objectif donné, est proche de 0,5 % en valeur absolue.

Ce degré de variabilité sur la teneur en eau finale n'a donc pas d'incidence sensible sur les caractéristiques mécaniques du matériau traité.

Cas des mélanges sol-liant effectués par traitement en place

L'ajout d'eau est le plus souvent effectué avec les moyens usuels suivants :

- ◆ citerne tractée équipée d'une rampe d'arrosage avec ou sans asservissement primaire lié à la vitesse d'avancement ;
- ◆ injection d'eau sous la cloche d'un pulvimixeur avec asservissement du débit objectif lié à la profondeur de malaxage et la vitesse d'avancement. Ces deux techniques comportent les aléas suivants :
 - ◆ pour la première, une irrégularité de la répartition d'eau liée au ruissellement, aux traces des roues de la citerne et du tracteur ainsi qu'à la technique d'arrosage par rampe ;
 - ◆ pour la seconde, un colmatage fréquent des buses d'injection d'eau, quantité d'ajout d'eau limitée, couplage d'une citerne à eau avec un pulvimixeur entraînant des difficultés d'évolution de ce couple et de ce fait une diminution du rendement du malaxeur ainsi que du dispositif. Ces moyens, dans l'état actuel de leur évolution, ne permettent pas une maîtrise de l'homogénéité de la teneur en eau finale du matériau traité, équivalente à la technique mélange sol-liant d'une centrale. Compte tenu de ces imperfections liées aux techniques usuelles d'humidification et de la volonté d'y palier, nous avons développé dans le cadre du chantier de l'autoroute A28-Alis, un nouvel outil : "l'arroseuse-enfouisseuse", pour la réalisation sur près de 100 km de chaussée, d'une couche de forme en limon traité en place, chaux-liant.

■ DESCRIPTION TECHNIQUE DE L'ARROSEUSE-ENFOUISSEUSE

Composition

Le principe général d'injection de l'arroseuse est issu de la technique agricole pour l'injection des engrais dans le sol.

Le matériel d'origine se compose (photo 1) :

- ◆ d'une citerne de capacité de 15000 l tractée par un tracteur agricole ;
- ◆ d'une pompe à air ;
- ◆ d'un système de régulation des débits ;
- ◆ d'un système d'injection et d'enfouissement de l'eau dans le sol ;
- ◆ d'un module informatique de pilotage et de contrôle situé dans la cabine.



Photo 1
L'arroseuse-enfouisseuse
Landfill sprinkler system

des sols traités en place

Guy Fondain



INGÉNIEUR
GÉOTECHNICIEN
DTP Terrassement au nom
du Syndicat des Terrassiers -
France

Emmanuel Lavallée



INGÉNIEUR
GÉOTECHNICIEN
DTP Terrassement

Adaptations pour le traitement des sols (photo 2)

Trois adaptations principales ont été réalisées afin d'améliorer la capacité maximale d'injection tout en conservant la précision des débits :

- ◆ augmentation du diamètre des circuits d'injection ;
- ◆ installation de vannes sur chaque buse d'injection ;
- ◆ mise en place d'une herse à l'arrière des rampes d'enfouissement.

La première modification permet un apport d'eau jusqu'à 5 % pour une couche de matériaux de 0,30 m d'épaisseur.

La seconde permet de moduler la largeur d'injection de 1 à 3 m et de s'adapter aux différentes largeurs de plate-forme.

La troisième améliore la fermeture du sillon d'injection généré par les socs enfouisseurs, ce qui contribue à limiter davantage les phénomènes de ruissellement et d'évaporation dans le cas d'ajouts d'eau importants.

Fonctionnement

L'arroseuse-enfouisseuse est constituée de différents éléments mécaniques, électromagnétiques, hydrauliques et informatisés (figure 1).

Le système de gestion et d'injection de l'eau est piloté par un module informatisé (photo 3) situé dans la cabine de l'engin. Ce boîtier d'acquisition de données régule les différents organes techniques et mécaniques et permet la maîtrise de l'apport d'eau par un procédé de débit proportionnel à l'avancement de l'engin (principe d'asservissement). Un système de rampe d'injection situé à l'arrière de la citerne assure l'enfouissement de l'eau dans le sol (photo 4).

Photo 3
Module informatisé de contrôle et de gestion des débits

Electronic module for flow control and management



Photo 2
Arroseuse-enfouisseuse en cours d'injection

Landfill sprinkler system during injection

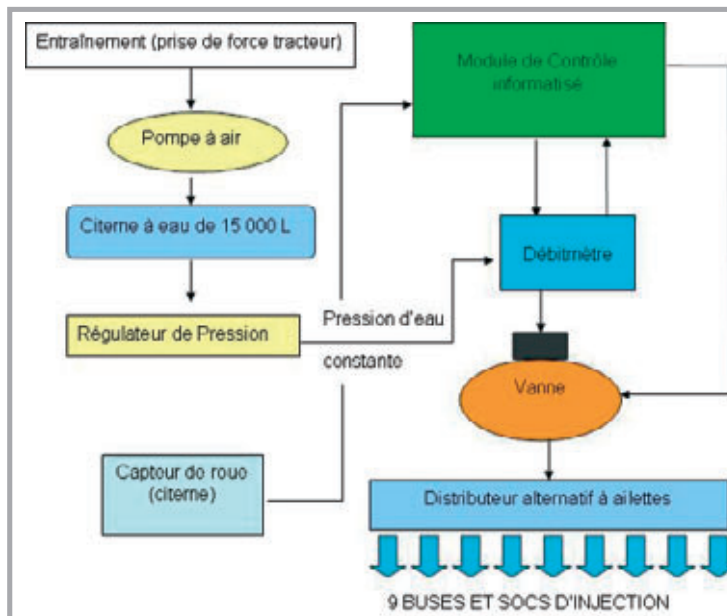


Figure 1
Principe de fonctionnement de l'arroseuse-enfouisseuse

Principle of operation of the landfill sprinkler system



Photo 4
Rampes d'injection, socs enfouisseurs et herse

Injection spray bars, burying blades and harrow

Figure 2
Comparatifs des matériels d'humidification
Comparison of moistening equipment

Chronologie des évolutions →

	Citerne tractée « Queue de Carpe »	Citerne tractée Rampe d'arrimage déportée	Injection sous cloche d'un malaxeur	Arroseuse Enfouisseuse
Capacité réservoir		***	* **avec* (couplé à une citerne)	***
Manœuvre Enroulement		*	* (couplé à une citerne)	***
Approvisionnement (débit proportionnel à l'avancement)	Matériel adapté	**	**/**	***
Capacité d'apportement technique		**	*	***
Largeur d'épandage mobile		néant	néant	***
Dispositif de contrôle volumétrique		néant	***	***
Injection dans le sol (couvercle de roulement)		néant	***	***
Module informatique de contrôle et d'acquisition		néant	adaptable	** (avec imprimante) ***

*** adapté ** acceptable * peu adapté

Photo 5
Malaxage
après injection de l'eau
*Mixing after water
injection*



MAÎTRISE DU PROCÉDÉ

Le module informatisé de pilotage (photo 3) permet outre la gestion des différents organes constituant l'arroseuse-enfouisseuse :

- ◆ la saisie et la visualisation des paramètres d'injection de l'eau (quantité d'eau injectée au mètre carré, surface injectée, volume d'eau dans la citerne, nombre de buses d'injection actives...);
- ◆ la saisie et la visualisation des paramètres de l'engin et la mise en place de seuil d'alerte bas et haut;
- ◆ l'enregistrement des paramètres machines et des données d'injection.

Ce module peut être couplé à une imprimante ou à un disque dur pour la sauvegarde des données. Il peut être aussi raccordé à un système GPS.

Le module dispose d'un système d'alerte de saturation des débits, permettant d'avertir et de remédier aux limites maximales d'injection (alarme digitale et sonore).

Cette technologie avancée conduit à un matériel d'humidification bien plus performant que les dispositifs jusqu'alors plus couramment employés (figure 2).

VALORISATION DE L'ARROSEUSE-ENFOUISSEUSE DANS LA CHAÎNE DE TRAITEMENT EN PLACE

L'arroseuse-enfouisseuse permet de maîtriser l'ajout d'eau au niveau des sillons générés par les socs enfouisseurs. Toutefois, il est nécessaire de compléter son action, afin d'obtenir sur toute l'épaisseur de la couche à humidifier, une teneur en eau homogène, ainsi qu'une répartition hydrique transversale satisfaisante.

Dans le cadre d'un traitement de sol à usage de couche de forme ou de partie supérieure de terrassement (PST), il est alors nécessaire de compléter l'action de l'arroseuse-enfouisseuse par un malaxage au pulvimixeur (photo 5).

PRÉCISION ET PERFORMANCES

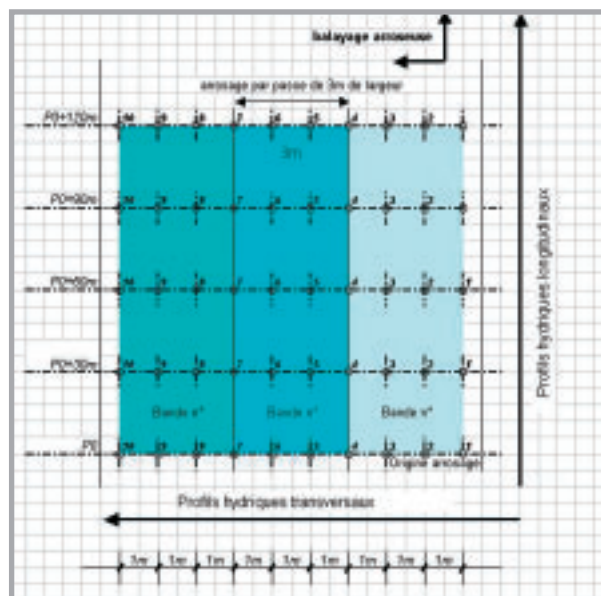
Dans le cadre du chantier A28-Alis et lors de la mise au point de l'arroseuse-enfouisseuse, une planche expérimentale a été réalisée et a permis de mesurer la précision de l'humidification d'un sol (limons de plateau de Normandie).

Dans un contexte d'apport d'eau important à gérer pour le traitement d'une couche de forme en limon traité chaux-liant (épaisseur de 0,30 à 0,35 m), le test a été réalisé avec un volume d'eau objectif de 25 l au mètre carré, c'est-à-dire, un apport d'eau théorique de 4,2 % pour une couche de limon de 0,35 m d'épaisseur.

Figure 3
Synthèse des précisions
Summary of precision values

	PRECISION	COEFFICIENT DE VARIATION	EXACTITUDE
Volume d'eau injecté	2%	0,4%	1,8%
Eau d'apport (W objectif - W naturel)	4%		

Figure 4
Principe de prélèvement
Sampling technique



Précision des volumes d'eau injectés (figure 3)

Le principe de l'essai et des prélèvements représentés sur la figure 4 a permis de réaliser un bouclage surfacique des volumes d'eau injectés unitaires et cumulés.

Le traitement des données des figures 5 et 6 met en évidence : une précision volumétrique d'apport d'eau par injection de 2 %, un coefficient de variation de 0,4 % et une exactitude de 1,8 %.

Précision de l'apport d'eau

La précision de l'apport d'eau a été vérifiée sur planche expérimentale où 150 échantillons représentant à parts égales l'état hydrique des parties supérieures, intermédiaires et inférieures de la couche de sol humidifiée ont été prélevés (figure 4).

Le traitement des données des figures 7 et 8 met en évidence une précision de l'apport d'eau après injection et malaxage de 4 %.

Pour des volumes d'ajout d'eau de moindre importance, les données finales de chantier ont conduit aux mêmes conclusions sur la précision de l'humidification.

De même, cette précision a été constatée dans le cas d'un matériau grenu (calcaire tendre 0/50) traité au liant, en place.

CONCLUSIONS

Cette technique d'humidification à l'arroseuse-enfouisseuse a contribué à la maîtrise globale de la couche de forme traitée en place sur le chantier autoroutier A28-Alis.

Plus de 100 kilomètres de chaussée autoroutière de couche de forme ont pu être réalisés avec succès sur les deux demi-plates-formes autoroutières, tout en satisfaisant les objectifs d'une classe de plate-forme élevée de type PF3 (portance de 120 MPa).

Le rôle de l'arroseuse-enfouisseuse dans la maîtrise de la teneur en eau du matériau traité a été un des éléments importants ayant contribué à l'obtention des résistances mécaniques visées (zone mécanique 3).

En conséquence, les résistances mécaniques atteintes se sont révélées performantes et homogènes et ont contribué après analyse de l'ensemble des données mécaniques sur carotte à une optimisation, dans le cas spécifique d'A28-Alis, de la stratégie de rechargement des chaussées.

Disposant sur ce chantier des deux modes de traitement en place ou en centrale pour un matériau identique (limons de Normandie), nous avons pu procéder à un comparatif qualitatif entre ces deux techniques de traitement.

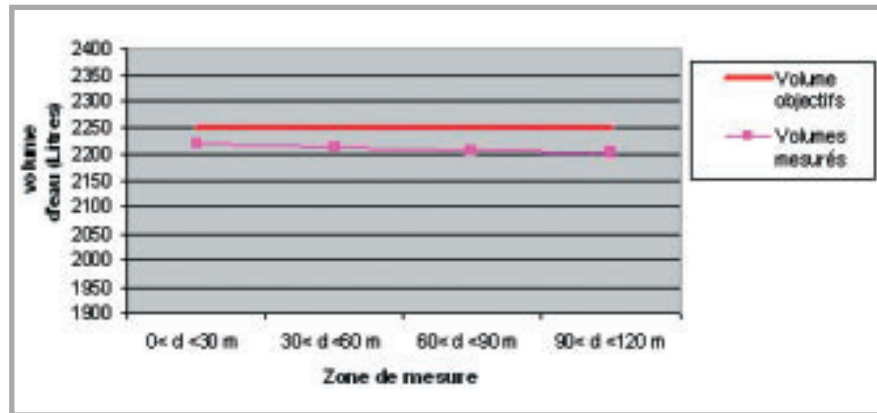


Figure 5
Précision transversale des volumes injectés
Transverse precision of volumes injected

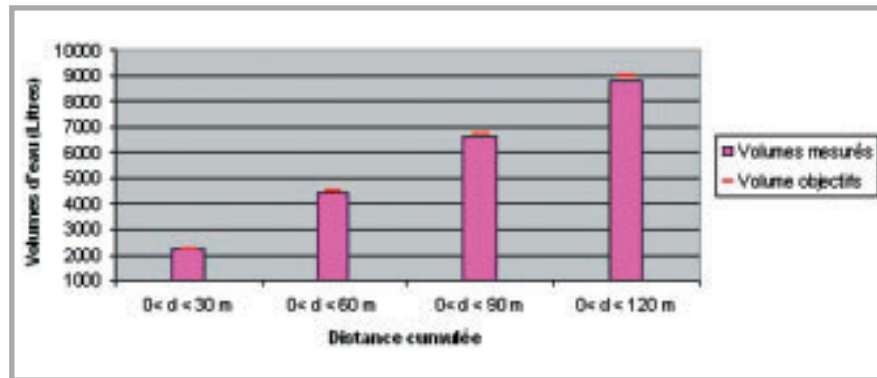


Figure 6
Précision longitudinale des volumes injectés
Longitudinal precision of volumes injected

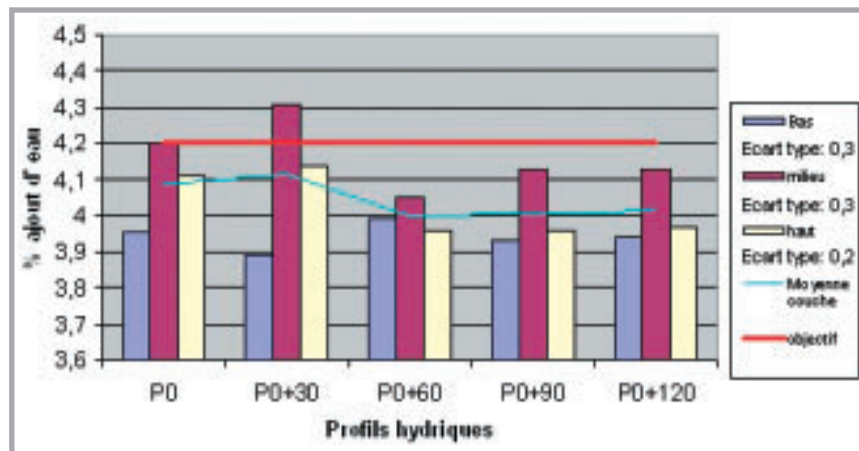
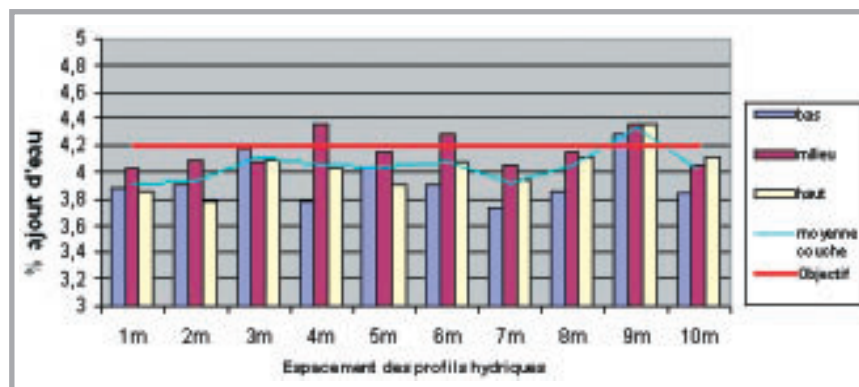


Figure 7
Précision longitudinale des apports d'eau
Longitudinal precision of water applied

Figure 8
Précision transversale des apports d'eau
Transverse precision of water applied



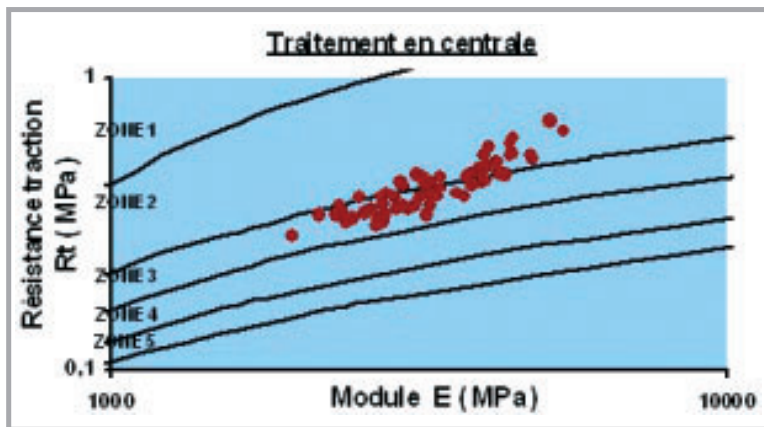


Figure 9
Résistances mécaniques, traitement en centrale
Mechanical strengths, treatment in plant

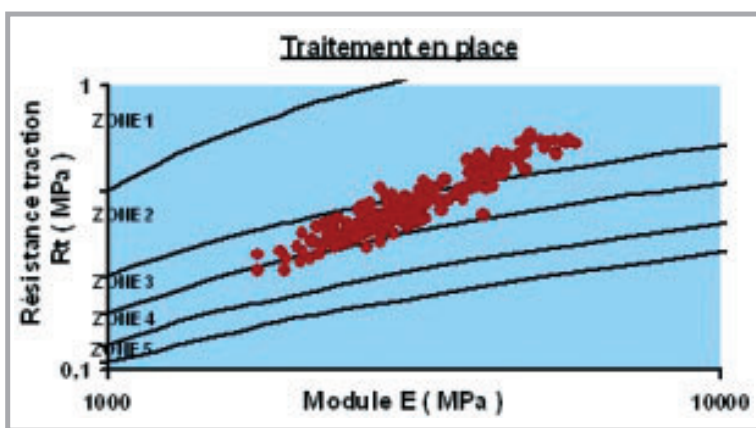


Figure 10
Résistances mécaniques, traitement en place
Mechanical strengths, treatment in situ

Les figures 9 et 10 réalisées à partir de l'ensemble des données de carottage finales mettent en évidence des performances équivalentes entre le traitement en place et le traitement en centrale, c'est-à-dire la vérification d'une zone mécanique 3, pour des taux de compactage et des dosages en liant similaires.

L'importance et la réussite des traitements en place de la couche de forme en limon traité au liant, sur le chantier A28-Alis - Rouen/Alençon, constituent une expérience, une approche maîtrisée des paramètres hydriques et une référence technique d'humidification à performances élevées.

Ainsi, l'arroseuse-enfouisseuse associée aux autres engins de traitement, tels les pulvimixeurs, les épancheurs à liant de dernière génération permet de valoriser la technique de traitement en place et d'égaliser qualitativement celle du traitement en centrale.

ABSTRACT

Controlled moistening of soils treated in situ

G. Fondain, E. Lavallée

The landfill sprinkler system is a new technology for the controlled adding of water, appropriate for the technique of in-situ soil treatment of capping layers, by which water can be "injected" with a controlled flow rate and distribution. The use of this equipment in the soil treatment chain enables control of moistening objectives and helps obtain good homogeneity of the soil-water mixture after mixing in the pulvimixer. This moistening system was tested, experimented and adopted for construction of the lime-binder treated loam capping layer on about 100 km of pavement for the A28-Alis/Rouen-Alençon motorway with an achieved PF3 platform objective (bearing capacity of 120 MPa). The water content measurements and checks performed show that this technological development in moistening equipment makes it possible to obtain a treated and moistened material of quality equivalent to that obtained using a treatment plant.

RESUMEN ESPAÑOL

Control de la humidificación de los suelos tratados in situ

G. Fondain y E. Lavallée

La regadora-enterradora constituye una nueva tecnología, para la incorporación controlada de agua, adaptada a la técnica del tratamiento in situ de suelos para su empleo en explanada mejorada, que permite "inyectar" el agua con un flujo y un reparto controlados. La utilización de este material en la cadena de tratamiento de suelos permite dominar los objetivos de humidificación y contribuye a la obtención de una correcta homogeneidad de la mezcla suelo - agua después del proceso de mezclado con pulvimixer. Este dispositivo de humidificación fue sometido a pruebas, experimentado y adoptado al proceder a la ejecución de la explanada mejorada con limo tratado cal - ligante en cerca de 100 kilómetros de firmes de la autopista A28-Alis/Rouen-Alençon con un objetivo alcanzado de plataforma PF3 (capacidad de carga de 120 MPa). Las medi-

ciones y controles de contenido en agua llevados a cabo permiten demostrar que dicha evolución tecnológica del material de humidificación permite obtener un material tratado y humidificado de calidad equivalente de aquel obtenido con la utilización de una central de tratamiento.

Etude des mécanismes des perturbations de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme : résultats

Le mécanisme de stabilisation des sols par la chaux et les liants hydrauliques a été étudié à l'aide d'une approche multi-échelle : les essais géotechniques classiques ont été complétés par des analyses de laboratoire, donnant accès à des informations sur une échelle spatiale du nanomètre au kilomètre. Cette méthode a permis d'enrichir l'approche mécanique et physique classique par des aspects minéralogiques, structuraux et microstructuraux, chimiques, physico-chimiques et de génie des procédés. Elle a abouti à la proposition d'un modèle structural, chimique et minéralogique permettant d'interpréter tous les phénomènes observés. Le développement de nouveaux essais basés sur nos résultats et leur validation devrait permettre d'obtenir des informations prédictives pour les sols contenant des éléments perturbateurs.

■ INTRODUCTION

Cet article fait suite à l'article publié dans cette même revue en juillet-août 2004 [1], qui annonçait le lancement d'une étude visant à mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme. Plus particulièrement, il s'agissait d'identifier les causes des perturbations parfois observées sur les chantiers et de proposer de nouveaux tests complétant les caractérisations et essais déjà pratiqués au cours d'une étude technique préalable aux travaux [2].

Le présent article vise à faire le point des acquis de ces travaux de recherche [3] sur les différents plans qu'ils ont permis d'aborder. Nous décrirons successivement les résultats de la synthèse bibliographique, la démarche méthodologique adoptée, le déroulement de l'étude expérimentale, les résultats obtenus et les interprétations que nous en avons faites. Nous présenterons le modèle structural issu de nos observations et de nos réflexions : ce modèle permet d'interpréter l'ensemble des données expérimentales et a pu être partiellement validé par le calcul. Nous esquisserons quelques propositions de nouvelles méthodes permettant d'évaluer le risque encouru lors du traitement de certains sols contenant des éléments perturbateurs. Enfin, nous dégagerons quelques perspectives susceptibles de compléter et de conforter ces acquis.

■ ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

Exploitation des données disponibles

Cette étude s'est appuyée sur les articles publiés dans la littérature scientifique ainsi que sur

l'exploitation des données provenant de certains chantiers en cours de 2000 à 2004.

La synthèse des données de la littérature s'est avérée assez difficile du fait de la grande diversité des sols traités et de celle, non moins grande, des traitements appliqués (chaux et/ou ciment), dont la description est très fragmentaire. En particulier, la formulation des liants hydrauliques utilisés est le plus souvent inconnue.

Schématiquement, les auteurs s'accordent sur le rôle de la chaux (floculation des argiles et dessèchement du sol) et sur celui du ciment mais ne présentent aucune donnée quantitative sur leurs rôles respectifs. Le rôle possible de la réaction pouzzolanique dans l'acquisition de propriétés mécaniques à long terme a également été évoqué.

L'influence de la chaux et du ciment sur la fragmentation des sols lors du traitement a très rarement été mentionnée. Il est à noter que l'addition de chaux en grand excès conduit à un "farinage" du sol, c'est-à-dire à des grumeaux de très petite taille. De façon générale, les difficultés constatées sur les chantiers lors de la stabilisation et mettant en cause la présence d'éléments perturbateurs dans les sols sont abordées de façon essentiellement qualitative et très succincte.

Démarche expérimentale

Ce travail s'appuie sur une démarche de recherche - expérimentation et vise à comprendre les phénomènes observés sur le terrain à l'aide des expériences conduites en laboratoire sur les mêmes sols. La démarche de recherche permet de capitaliser les acquis et de les généraliser pour établir un modèle prédictif. Nous avons montré que les sols reconstitués présentaient un comportement très différent des sols naturels et n'étaient donc pas représentatifs : tous les essais ont donc été conduits sur des sols naturels.

Nicolas Cabane¹
INGÉNIEUR GÉOLOGUE
Géo Est

Didier Nectoux
MAÎTRE ASSISTANT - CENTRE
DES MATÉRIAUX DE GRANDE
DIFFUSION
Ecole des Mines d'Alès

Pierre Gaudon
MAÎTRE DE RECHERCHE -
CENTRE DES MATÉRIAUX
DE GRANDE DIFFUSION
Ecole des Mines d'Alès

Mireille Fouletier
PROFESSEUR - DIRECTRICE
DU CENTRE DES MATÉRIAUX
DE GRANDE DIFFUSION
Ecole des Mines d'Alès

1. Nicolas Cabane a effectué son travail de thèse au Centre des matériaux de grande diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès

Sol	% de passant à 80 µm	% de passant à 2 mm	D max (mm)	VBS (g/100g)	Ip
Limon de Meaux	83	96	5	3,4	9
Limon de Normandie	98	100	5	1,3	
Gneiss de Tulle	22	90	5	0,1	
Schiste d'Angers	72	97	5	0,4	
Schiste de la Roche-sur-Yon	65	97	5	0,75	
Marnes noires de Mont-St-Martin	93	100	2	3,4	
Argiles bariolées de Mont-St-Martin	96	100	2	5	
Marnes pyriteuses du Mans	98	100	2	3,5	
Limon de Metz déblai A	65	94	5	2,6	
Limon de Metz déblai B	76	98	5	2,2	
Limon de Metz déblai C	83	100	2	2,2	
Limon de Metz déblai D	85	99	5	2,9	

Tableau I
Tableau récapitulatif de la classification géotechnique des sols, effectuée au laboratoire. Les analyses ont été effectuées sur les sols après passage dans le malaxeur-désagrégateur et tamisage à 6,3 mm

Summary table of the geotechnical classification of soils, performed in laboratory. The analyses were performed on the soils after passing through the mixer/cutter and screening to 6.3 mm

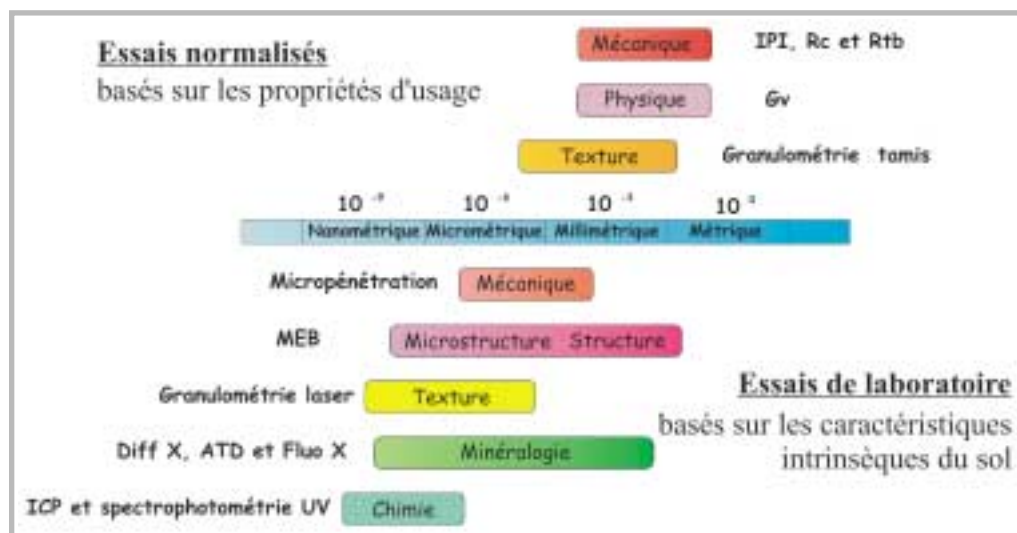


Figure 1
Approche multi-échelle à l'aide d'essais normalisés et d'essais de laboratoire. Cette approche permet une description des phénomènes du nanomètre au kilomètre, soit une douzaine d'ordres de grandeur

Multi-scale approach by means of standardised tests and laboratory tests.

This approach makes it possible to describe phenomena ranging from the nanometre to the kilometre, i.e. of a dozen orders of magnitude



Le choix des sols s'est porté sur deux sols de référence et une dizaine de sols pour lesquels des perturbations ont été observées, le prélèvement d'échantillons était possible et des données de chantier étaient disponibles.

Les sols de référence retenus sont le limon du Bassin Parisien (prélèvement effectué sur la rocade de Meaux en construction), régulièrement utilisé pour la réalisation de chantiers dans la région parisienne et le limon de Normandie (prélèvement effectué sur le chantier de la route de contournement de Montivilliers), connu pour son homogénéité et sa faible argilosité.

De nombreuses altérites de schistes ainsi que des arènes de gneiss ou de granite s'étant révélées inaptées au traitement, nous avons retenu trois altérites :

- ◆ deux altérites de schistes ; le schiste d'Angers (prélevé sur le chantier de rétablissement de la route RD 122) et le schiste de La Roche-sur-Yon (prélevé sur le chantier d'élargissement de la RN 160) ;

- ◆ une altérite de gneiss, le gneiss de Tulle (prélevé sur le chantier de l'autoroute A89 au niveau de la section Saint-Germain-les-Vergnes/Tulle).

Certains sols sédimentaires, riches en soufre, en matière organique et/ou en argile ayant présenté des perturbations de stabilisation imputables à la présence de ces éléments, nous avons choisi :

- ◆ deux marnes dont l'inaptitude au traitement serait due à la présence d'argiles et de soufre : les marnes pyriteuses du Mans (prélèvement sur le chantier de l'autoroute A28) et les marnes noires de Mont-Saint-Martin (prélèvement sur le chantier d'une plate-forme commerciale) ;

- ◆ un sol, pour lequel la présence d'argile et de matières organiques a été incriminée : les argiles bariolées de Mont-Saint-Martin (prélèvement sur le chantier de la même plate-forme) ;

- ◆ quatre limons pour lesquels la présence de soufre et de matière organique a été incriminée : les limons de Metz, ces limons ont été prélevés sur quatre déblais de la rocade de Metz en cours de construction.

Le tableau I présente les résultats des essais de classification géotechnique des sols retenus.

Nous avons également fait le choix d'un traitement de référence, à savoir l'addition de chaux (à raison de 1 %) et de ciment (à raison de 5 %).

Pour tous les sols, nous avons effectué les essais géotechniques tels que préconisés par le GTS [2], guide technique des traitements des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, et avons conduit les essais de laboratoire de la figure 1. L'originalité de la démarche est de combiner de nouvelles approches (minéralogique, structurale, microstructurale, chimique, physico-chimique...) à l'approche mécanique et physique classique, ce qui nous a permis de disposer d'une description des phénomènes sur une échelle spatiale s'étendant sur une douzaine d'ordres de grandeur, du nanomètre au kilomètre.

Un très grand nombre d'essais ont été effectués (plus d'un millier), qui ont mis en œuvre plus de quelque 10 t de sol.

■ RÉSULTATS

Impact du procédé de traitement sur la structuration du sol traité

Très schématiquement, le traitement du sol fait intervenir les étapes suivantes :

- ◆ l'addition de chaux effectuée par malaxage : l'hydratation de la chaux par l'eau interstitielle du sol s'accompagne d'un dégagement de chaleur, provoquant une augmentation de température, qui favorise l'évaporation de l'eau et le dessèchement du sol. Dans le même temps, la chaux provoque la floculation des argiles. Sous l'effet mécanique du cisaillement, le sol se fragmente en grumeaux de taille millimétrique à centimétrique ;

◆ l'addition de ciment est également effectuée par malaxage : le ciment ajouté se colle à la surface des grumeaux. Cette étape ne modifie pas sensiblement la fragmentation du sol, qui peut être estimée à partir de la taille des grumeaux ;

◆ l'étape de compactage permet d'obtenir un matériau solide continu à l'échelle macroscopique, doté de propriétés mécaniques convenables pour l'usage visé.

Ces observations nous ont conduits à retoucher le schéma intuitif proposé au tout début de l'étude et décrit dans l'article précédent [1] et à proposer un modèle structural original.

Proposition d'un modèle structural

Le modèle structural proposé [3] - [4] et qui décrit l'état du sol lors des différentes étapes du procédé est représenté sur la figure 2.

De façon schématique, après l'ajout de chaux et de ciment, les grumeaux de sol chaulé sont enrobés d'une couche de ciment, qui s'hydrate progressivement au contact de l'eau résiduelle contenue dans les grumeaux (figure 2a). Le front d'hydratation progresse depuis l'interface entre le grumeau chaulé et le revêtement de ciment vers l'extérieur du grumeau.

Au cours de l'étape suivante de compactage, figure 2b, les grumeaux et leur enrobage de ciment sont encore malléables et se déforment sous la contrainte appliquée pour former un composite dense. Le ciment qui enrobe les grumeaux et qui est encore à l'état plastique, forme un continuum dont la prise confère au sol traité la rigidité et les propriétés mécaniques voulues.

Comme le montre la figure 3, nous avons pu mettre en évidence expérimentalement que, dans le cas du traitement choisi et pour les sols étudiés, l'épaisseur moyenne de ciment hydraté autour des grumeaux était de l'ordre de 30 microns. Cette valeur a pu être justifiée par le calcul.

Intégration au modèle des aspects chimiques et physico-chimiques

Les principales réactions chimiques sont liées :

- ◆ au rôle de la chaux, décrit précédemment ;
- ◆ à la réaction de prise du ciment, qui donne naissance à des hydrates, dits de "première génération" ;
- ◆ à la réaction pouzzolanique, qui se produit à plus long terme, conduisant à la formation d'hydrates dits de "deuxième génération". La présence de ces hydrates contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques, constatée sur les chantiers, bien après la prise du ciment.

La prise en compte des aspects chimiques du procédé permet de bien comprendre les difficultés rencontrées lorsque les sols à traiter contiennent des matières organiques. Celles-ci, provenant de la dé-

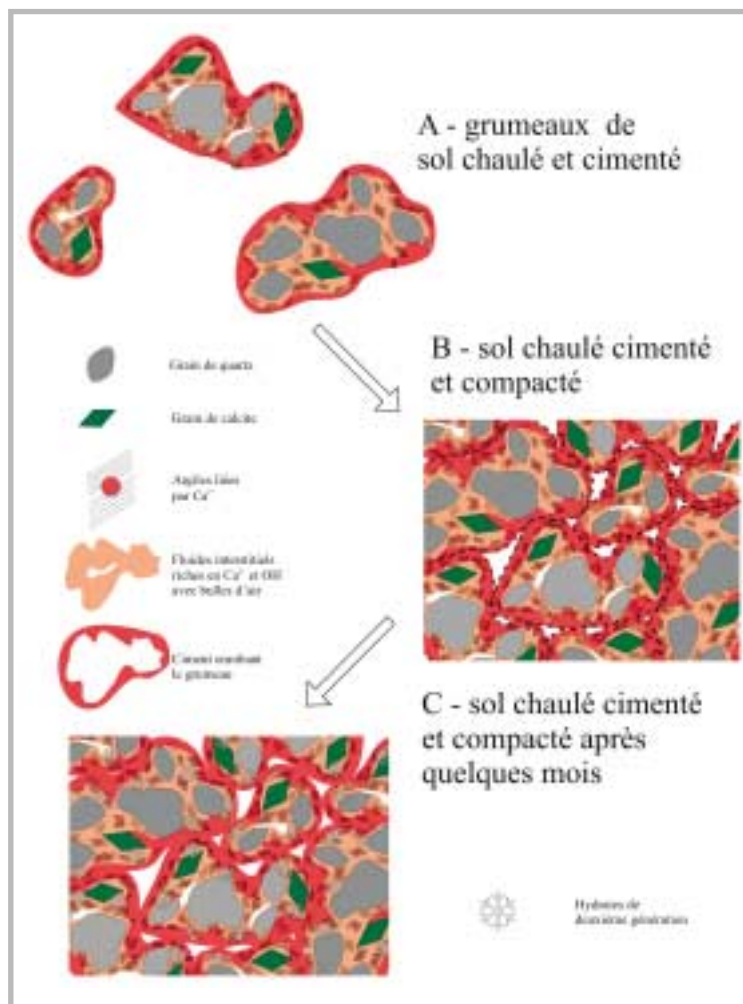


Figure 2
Proposition d'un modèle structural de la stabilisation des sols par traitement à la chaux et au ciment.

2a : après addition de chaux et de ciment, le sol se présente sous forme de grumeaux chaulés, recouverts de poudre de ciment, qui s'hydrate progressivement au contact de l'eau résiduelle contenue dans le grumeau

2b : après compactage, le ciment forme un continuum, qui confère au sol traité la rigidité et les propriétés mécaniques voulues

2c : à long terme, la réaction pouzzolanique conduit à la formation d'hydrates de 2^e génération qui contribuent à l'amélioration des propriétés mécaniques

Proposal of a structural model of soil stabilisation by lime and cement treatment.

2a : After adding lime and cement, the soil appears in the form of limed lumps, covered with cement powder, which is moistened gradually in contact with the residual water contained in the lump

2b : After compaction, the cement forms a continuum, which confers on the treated soil the desired rigidity and mechanical properties

2c : In the long term, pozzolanic reaction leads to the formation of second-generation hydrates which contribute to the improvement of mechanical properties

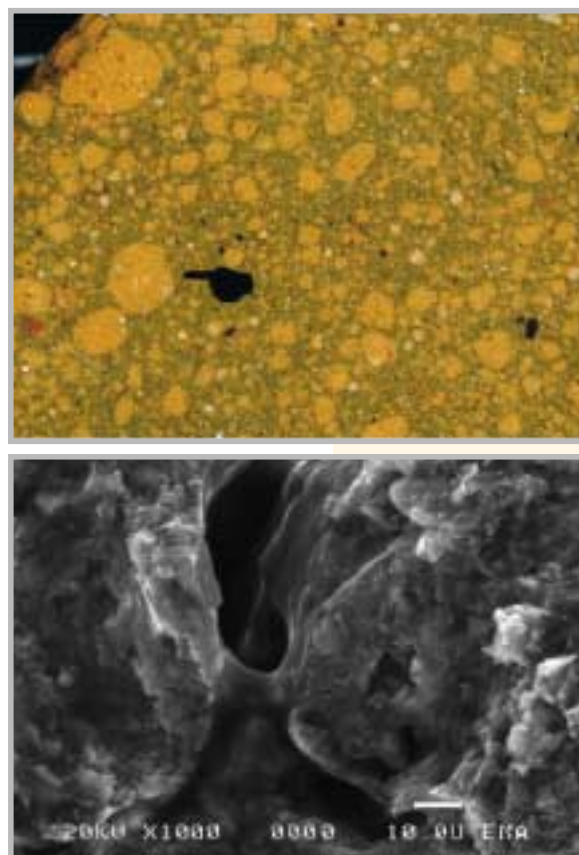


Figure 3
Mise en évidence des grumeaux dans le sol traité, connectés entre eux par une matrice de ciment.
3a : Image en microscopie optique montrant la présence des grumeaux
3b : Image en microscopie électronique à balayage montrant la jonction de ciment hydraté entre deux grumeaux de sol chaulé

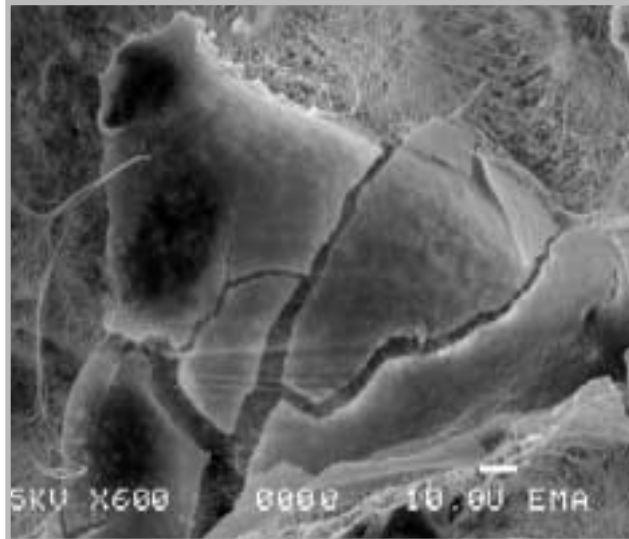
Illustration of lumps in the treated soil, connected together by a cement matrix.

3a : Optical microscopy image showing the presence of lumps
3b : Scanning electron microscopy image showing the hydrated cement junction between two lumps of limed soil

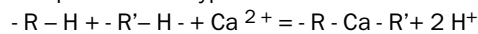
Figure 4

Développement d'ettringite à l'interface entre un grumeau et son enrobage d'hydrate. L'ettringite étant un minéral expansif, son développement à l'interface entre le grumeau et la couche d'hydrate conduit à la rupture de cette couche et donc à l'affaiblissement des propriétés mécaniques du sol traité

Development of ettringite at the interface between a lump and its hydrate coating. Ettringite being an expansive mineral, its development at the interface between the lump and the hydrate layer causes this layer to break and hence weakens the mechanical properties of the treated soil



► composition des matières végétales, sont susceptibles de piéger le calcium apporté par le traitement (chaux et/ou ciment) selon une réaction de complexation du type :



R et R' désignant un radical organique constitutif de la matière organique

Le calcium ainsi piégé ne participe pas à la prise du ciment : il en résulte un retard ou une absence de prise préjudiciable au bon déroulement du chantier. Ces phénomènes ont fait l'objet de nombreuses études dans le cas de la prise des mortiers et des bétons, pour lesquels la présence de matière organique dans les granulats doit être strictement contrôlée.

Les aspects chimiques et physico-chimiques permettent aussi de bien comprendre l'action du soufre contenu dans les sols [5]. Le soufre, sous forme de sulfate soluble, réagit avec les hydrates d'aluminium provenant de l'hydratation du ciment et ceux produits par la réaction pouzzolanique. Comme le montre la figure 4, cette réaction produit de l'ettringite, localisée à l'interface entre le grumeau et les hydrates. Selon la quantité de soufre disponible, la croissance d'ettringite, minéral expansif, provoque la rupture de la coque d'hydrates de 1^{re} génération mais peut aller jusqu'à se substituer complètement aux hydrates. Les conséquences de la formation d'ettringite sont donc doubles, à savoir, la diminution des résistances mécaniques due à la rupture du réseau de ciment et le gonflement des sols traités. Il est à noter que les conditions de cure de l'essai NF P 94-100 favorisent le développement de l'ettringite.

Intégration des aspects minéralogiques

De façon simplifiée, on pourrait considérer qu'un sol traité est analogue à un béton, dont les granulats seraient constitués par les grumeaux de sol chaulé. Cette analogie permet de bien comprendre les difficultés rencontrées lors du traitement de cer-

tains sols. En effet, ces difficultés sont bien connues dans le cas des bétons, pour lesquels les granulats de forme aplatie sont proscrits. En effet, ces faciès favorisent la propagation des fissures, ce qui se traduit par des caractéristiques mécaniques insuffisantes.

La figure 5 donne une vue d'un grumeau d'un sol contenant une proportion importante de micas et de particules de forme aplatie et la représentation schématique correspondante.

Nos observations ont permis d'interpréter les différences de comportement entre les schistes et les gneiss. L'acquisition des propriétés mécaniques est significativement plus rapide pour les gneiss, dont la structure est beaucoup plus isotrope que celle des schistes.

Esquisse de nouveaux outils de diagnostic

Ces nouveaux outils ont été proposés avec l'objectif d'évaluer le risque de perturbation dans deux cas précis, à savoir la présence de particules de morphologie anisotrope dans le sol.

Quantification des particules de morphologie anisotrope [6]

Nous avons montré que des essais simples, basés sur des propriétés d'usage des poudres et des granulats permettaient de caractériser de façon quantitative les particules de forme lamellaire dans un sol donné en prenant comme références d'une part, des sables, de morphologie sphéroïdale et anguleuse, et d'autre part, des micas, qui se présentent sous forme de paillettes :

◆ à partir de la détermination de la densité apparente de la fraction fine des sols (taille > 100 microns), nous avons défini un taux équivalent en mica ;

◆ la mesure de la coulabilité des poudres, qui dépend, entre autres, des interactions entre particules lors de l'écoulement peut être utilisée pour donner une évaluation de la forme des particules. Nous avons proposé une méthode permettant de s'affranchir des autres paramètres d'influence (distribution granulométrique, humidité...) pour effectuer la mesure de coulabilité dans des conditions bien définies, de façon à ce que cette mesure soit représentative uniquement de la forme des particules.

En portant sur un même graphique les valeurs du taux équivalent en micas et de la durée d'écoulement correspondant aux différents sols étudiés, nous avons montré qu'il est possible de distinguer les domaines pour lesquels la stabilisation est possible des autres.

Evaluation de l'influence de la teneur en matière organique [7]

Nous avons adapté l'essai de quantification des matières organiques contenues dans les granulats (norme NF EN 1744-1) au cas des sols. Nous pro-

posons d'extraire les matières organiques solubles du sol par mise en suspension, d'utiliser une fraction du jus ainsi obtenu comme eau de gâchage et de mesurer le temps de début de prise correspondant pour un ciment donné.

Nous avons montré que, pour les sols étudiés, le retard de prise va de quelques minutes à plus d'une heure. Nous avons observé une relation entre le retard de prise ainsi mesuré et les résistances en compression des sols traités, les retards de prise les plus longs correspondant aux sols présentant la plus faible résistance mécanique à long terme.

■ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude effectuée dans le cadre de la thèse de Nicolas Cabane a permis de mettre en lumière les mécanismes de la stabilisation des sols à la chaux et au ciment à court et à long terme et, notamment, de comprendre les effets perturbateurs de la matière organique et des micas. Elle a permis de comprendre les effets conjugués des agents perturbateurs même présents dans le sol à des teneurs individuelles faibles pour chaque agent.

Ce travail a abouti à l'élaboration d'une représentation de tous les phénomènes se produisant au cours du traitement en termes de structure et de microstructure, de mécanismes de réaction et de cinétique chimique en phases homogènes ou hétérogènes. Notre étude a donc contribué à l'enrichissement de la norme NFP 94100 à l'aide de nouveaux contenus scientifiques.

Néanmoins, de nombreux points restent à approfondir et de nombreuses pistes restent à explorer dans une perspective d'amélioration des connaissances et de meilleure conduite technico-économique des procédés.

Nous citerons en particulier :

- ◆ l'étude critique des paramètres du procédé, pour mieux maîtriser les paramètres structuraux, taille des grumeaux et épaisseur de l'enrobage de ciment, qui influencent les propriétés mécaniques du sol traité ;
- ◆ l'établissement du bilan matière du calcium et la détermination quantitative de sa spéciation dans les différentes phases du sol stabilisé, argiles floculées et hydrates de première et de deuxième génération, en vue d'optimiser la formulation des traitements au plan technico-économique ;
- ◆ la modélisation prédictive des propriétés mécaniques à court et à long terme ;
- ◆ l'étude approfondie de l'influence d'autres éléments perturbateurs (nitrates, phosphates, métaux lourds...);
- ◆ l'amélioration des tests proposés et leur validation sur le terrain pouvant conduire, éventuellement, à leur normalisation.

Enfin, il nous paraît indispensable d'aborder l'étu-

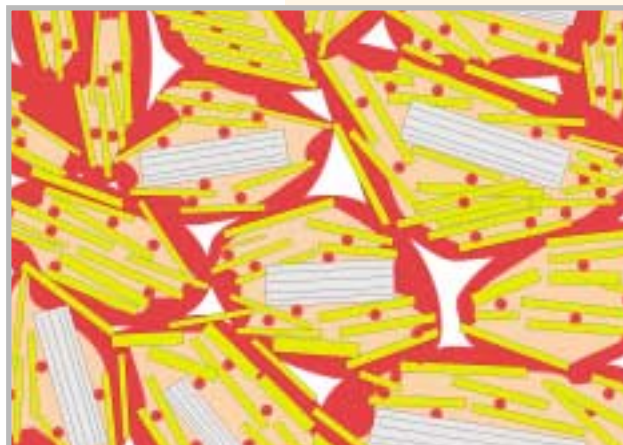
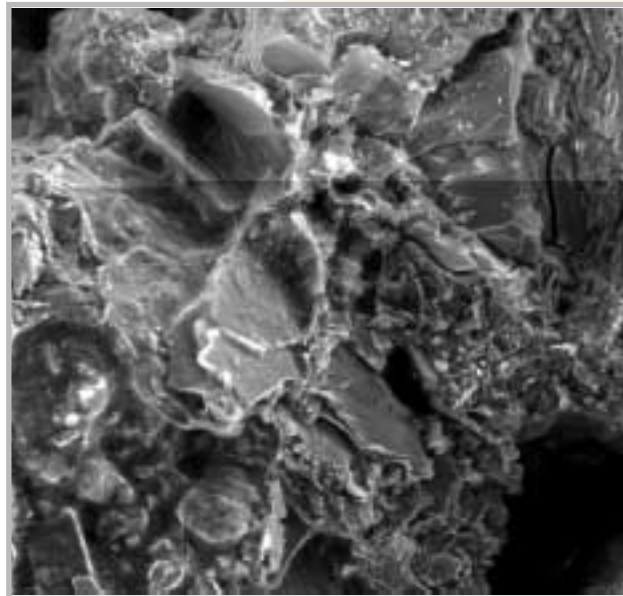


Figure 5
Représentation schématique d'un schiste traité.
5a : Détail d'un grumeau de schiste, vu en microscopie électronique à balayage
5b : Représentation schématique. Le grumeau contient une forte proportion de particules lamellaires, ce qui induit une forte anisotropie du grumeau lui-même

Schematic representation of a treated shale.
5a : Detail of a lump of shale, viewed by scanning electron microscopy
5b : Schematic representation. The lump contains a high proportion of lamellar particles, which leads to high anisotropy of the lump itself

de de la durabilité des sols stabilisés, qui sont des matériaux soumis à de multiples sollicitations du fait de leur environnement (lixiviation, transferts de pollution, gel et dégel...) ou de leur utilisation qui implique de nombreuses sollicitations mécaniques en fatigue, notamment.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leurs plus vifs remerciements à tous ceux qui ont participé à cette étude :

- ◆ à tous les ingénieurs, qui ont participé au déroulement de l'étude et contribué à l'améliorer par leurs remarques et leurs observations et, tout particulièrement, à Jacques Bétoux qui a assuré la coordination du projet ;
- ◆ aux entreprises, qui ont accueilli le doctorant, ont effectué certaines caractérisations géotechniques et ont mis à disposition leurs données de chantier ;
- ◆ aux fédérations professionnelles, le Syndicat professionnel des terrassiers de France, l'ATILH et la Chambre syndicale nationale des fabricants de chaux grasse et magnésienne, qui ont participé à son financement.

Bibliographie

Les informations contenues dans cette publication sont extraites de la thèse de Nicolas Cabane, qu'on pourra aisément consulter : ce document, sous une forme informatique, est à disposition auprès des différentes fédérations professionnelles qui ont pris part à l'étude.

[1] Etude des mécanismes des perturbations de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme. N. Cabane, P. Gaudon et D. Nectoux. *Travaux* n° 810 pages 79 à 84 (2004).

[2] GTS, *Guide technique* "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme". LCPC-Setra (Paris-Bagneux), janvier 2002, 240 p.

[3] Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Nicolas Cabane. *Thèse de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne 2004*.

[4] Mechanism of soils treatment with quicklime and hydraulic binders. N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier. *Communication CO13*, 9 pages, congrès TREMTI 2005, Paris.

[5] Contribution à l'étude des désordres liés au soufre dans les sols traités. N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier. *Communication CO15*, 10 pages, congrès TREMTI 2005, Paris.

[6] Les sols micacés sont-ils inaptes à la stabilisation? N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier. *Communication CO16*, 10 pages, congrès TREMTI 2005, Paris.

[7] Un nouveau test pour évaluer les effets des matières organiques sur le développement des résistances mécaniques dans les sols traités à la chaux et au ciment. N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier. *Communication CO14*, 10 pages, congrès TREMTI 2005, Paris.

ABSTRACT

Study of the mechanism of disturbance of the stabilisation of treated soils in capped layers : results

N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon, M. Fouletier

The mechanism of fine soil stabilisation using lime and hydraulic binders was studied using a multi scale approach : the classical geotechnical tests were complemented with laboratory analysis, giving information in the range from the nanometre to the kilometre scale. This method enabled the classical mechanical and physical approach to be improved by new aspects, namely mineralogical, structural and micro structural, chemical and process engineering aspects. It brought us to propose a structural, chemical and mineralogical model, enabling the interpretation of all the observed phenomena. The development of new tests based on our results and their validation would give predictive information on the stabilisation behaviour of soils containing disturbing elements.

RESUMEN ESPAÑOL

Estudio de los mecanismos de las perturbaciones de la estabilización de los suelos tratados en las explanadas mejoradas : resultados

N. Cabane, D. Nectoux, P. Gaudon y M. Fouletier

El mecanismo de estabilización de los suelos mediante cal y ligantes hidráulicos fue objeto de un estudio mediante un enfoque multiescala : los ensayos geotécnicos convencionales fueron completados por diversos análisis de laboratorio, que permiten acceder a la información en una escala espacial del nanómetro por kilómetro. Este método ha permitido mejorar el modelo mecánico y físico convencional por aspectos mineralógicos, estructurales y microestructurales, químicos, fisicoquímicos y de ingeniería de los procedimientos. Este método ha dado como resultado la propuesta de un modelo estructural, químico y mineralógico que permite interpretar todos los fenómenos observados. El desarrollo de nuevos ensayos fundados en nuestros resultados y su validación debería permitir obtener

diversas informaciones predictivas para los suelos que contienen elementos perturbadores.

Travaux

n° 825

- Aplanir les effets de conjoncture et viser les nouveaux horizons
- Lot 34A dernier TOARC de la LGV Est Européenne
- A28 - Section Rouen/Alençon - Concession Alis
 - Route des Tamarins à la Réunion. Un terrassement à flanc de montagne
- Terrassements de l'A24 entre Viseu et Chaves au Portugal
- Maîtrise de l'humidification des sols traités en place
- Étude des mécanismes des perturbations de la stabilisation des sols traités dans les couches de forme : résultats

Terrassements

