

La revue technique des entreprises de Travaux Publics

Travaux

n° 848
Janvier 2008

TERRASSEMENTS TRAVAUX ROUTIERS

- **LGV Rhin-Rhône :**
lot B1 Chevroz -
Loulans-Verchamps
- **Aménagement
de la RD 438**
à Belverne
- **Élargissement de l'A31**
au niveau
de Langres Sud
- **La section Thenon-
Villac TOARCC 4.2**
de l'A89
- **Terrassements
sur la Route
des Tamarins
à la Réunion**
- **Des enrobés
environnementaux
économiques en énergie**
- **Une centrale
d'enrobage mobile
pour le recyclage
à très fort taux
d'enrobés**

Terrassements Travaux routiers

Pour la réussite d'un grand plan national des infrastructures

Christian Jacob
Ancien ministre
de la Fonction publique.
Député de Seine-et-Marne.
Président de la Délégation
de l'Assemblée nationale
à l'aménagement
et au développement durable
du territoire.



À la suite du Grenelle de l'Environnement, l'association TDIE (Transport, Développement, Intermodalité, Environnement) a évalué à 163 milliards d'euros les besoins de financement pour les infrastructures de transport à l'horizon 2025.

Cela nous impose de mettre en œuvre une véritable concertation nationale qui doit impliquer l'État, les établissements publics, les collectivités territoriales, les opérateurs privés et publics afin de se concentrer sur les priorités essentielles, en évitant les saupoudrages et la dispersion des moyens tout en restant dans le champ du réalisme économique.

À ce titre la route assure 88 % des déplacements de voyageurs en France et 81 % des marchandises. Elle est de toute façon incontournable et cela ne sert à rien d'opposer les modes de transport entre eux. Il faut au contraire jouer l'intégration et la complémentarité avec les autres modes de transport.

En revanche, je pense qu'une sélectivité plus grande devrait être appliquée dans la réalisation des projets d'infrastructures, soient-ils routiers, ferroviaires ou fluviaux.

Pour le réseau routier, par exemple, cela suppose d'abord, de mieux utiliser et de mieux exploiter le réseau routier existant au maximum de ses capacités, en développant certaines méthodes d'exploitation et d'information des usagers.

Ensuite, devraient être réalisés en priorité les projets permettant de remédier aux situations de congestion ou d'encombrement les plus graves, situations qui sont déjà identifiées, ainsi que les projets de contournement de certaines grandes agglomérations.

En ce qui concerne le réseau fluvial, il y a là un défi à relever pour faire face à la croissance du trafic et améliorer la qualité du service. Les efforts devraient se concentrer prioritairement sur le réseau à grand gabarit, qui concerne 88 % du trafic, en agissant en même temps sur l'accroissement de la desserte fluviale des grands ports maritimes, le maillage des ports intérieurs, les infrastructures fluviales et leur exploitation par des mesures d'accompagnement et

d'incitation des acteurs économiques, le développement du transport rail-fleuve en plus du ferroutage.

Un mot enfin sur le réseau ferroviaire : le monde du transport ferroviaire est confronté maintenant à l'ouverture européenne, ce qui implique de reconstruire à partir des bases existantes un modèle dans ses multiples dimensions : géographique, managériale, industrielle. À l'instar de ce qui s'est passé en Allemagne, cette transformation doit être portée de l'extérieur et de l'intérieur et implique également la recherche de solutions nouvelles porteuses d'une véritable dynamique économique qui profitera également aux entreprises françaises du secteur.

Des formules nouvelles peuvent être expérimentées telles que celle des opérateurs ferroviaires de proximité, comme aux États-Unis et en Allemagne, c'est-à-dire de petites entreprises locales qui assurent la desserte et le contact avec l'opérateur ferroviaire national.

Dans un autre cadre, une expérience est menée par Monoprix à Paris : un train amènera tous les jours les produits attendus du sud de Paris à la gare de Lyon, sans embouteillages, et ils seront ensuite distribués dans tout Paris par de petits camions fonctionnant au gaz. Cela montre comment on peut prendre en compte des besoins nouveaux de logistique urbaine.

Par ailleurs, il faut avoir une vision pluriannuelle pour mener à bien les grands projets d'infrastructures qui se développent sur des cycles longs, en moyenne une douzaine d'années, et qui sont financés de manière pluriannuelle. On ne peut pas décider au coup par coup, année après année. Il faut préparer les études, mener les procédures et utiliser rationnellement les moyens budgétaires et humains nécessaires à la réalisation d'un investissement routier.

Il faut donc une loi-cadre, avec une programmation des projets d'infrastructures transparente, pluriannuelle et pluridisciplinaire votée et régulièrement évaluée par le Parlement. Le Grenelle de l'Environnement est une grande chance pour mener enfin à bien un grand projet national des infrastructures : ne la ratons pas !

■ LGV Rhin-Rhône : lot B1

Le lot B1 long de 19,7 km est un maillon de la future ligne à grande vitesse Rhin-Rhône qui contribuera à ancrer davantage la France dans l'Europe qui s'étend progressivement vers l'Est.

Les travaux ont commencé pendant l'été 2006 et 31 mois seront nécessaires pour réaliser, les terrassements, ouvrages d'art, viaducs, drainage et les rétablissements de communications.

Plus d'une centaine de machines représentant une puissance de 30000 CV travaillent aux mouvements des terres.

Cavités, tassements du sol support, matériaux humides et remblais en zones inondables sont les principales caractéristiques d'un chantier techniquement difficile.

■ Présentation du projet

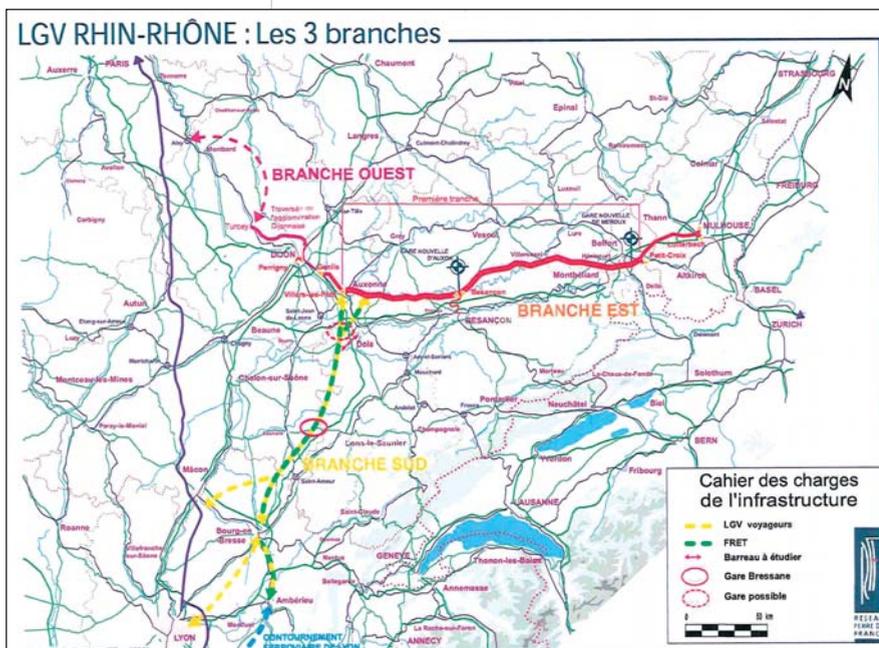
Le lot B1 s'inscrit dans le projet de construction de la LGV Rhin-Rhône. Ce maillon appartient à la branche Est qui reliera Dijon à Mulhouse en une heure environ (contre 2 h 15 aujourd'hui).

Le tracé de la LGV Rhin-Rhône comprend la construction de 190 km de ligne nouvelle entre Genlis (21) et Lutterbach (68) et la création de deux gares nouvelles sur la commune d'Auxon-Dessus près de Besançon (Besançon TGV) ainsi que sur celle de Meroux (Belfort-Montbéliard TGV). La ligne, composée de trois branches (sud, ouest et est) (figure 1),

Figure 1

Les trois branches de la LGV Rhin-Rhône (source RFF)

The three branches of the Rhine-Rhone high-speed train line (source : RFF)



constituera à sa mise en service, début 2012, un maillon essentiel du trafic ferroviaire entre le Nord et le Sud de l'Europe.

Chaque branche est composée de tronçons, eux-mêmes divisés en lots dont le lot B1 remporté par Eiffage TP. Le maître d'ouvrage est Réseau Ferré de France (RFF). La maîtrise d'œuvre est Egis Rail sur le tronçon B.

Trente et un mois de travaux seront nécessaires à la réalisation de ce chantier long de 19,7 km, situé dans le département de la Haute-Saône. Il commence à une dizaine de kilomètres au nord de Besançon, non loin de la commune de Chevroz, longe la RN57 sur les neuf premiers kilomètres et se termine à proximité de Loulans-Verchamps.

Il s'agit d'un TOARC : Terrassements, ouvrages d'art, assainissement et rétablissements de communication (cf. encadré « Les principaux intervenants »).

Le tracé suit une orientation SO-NE sur les dix premiers kilomètres et OSO-ENE à partir de la commune de Rioz sur laquelle sont implantées les installations administratives de l'entreprise et de la maîtrise d'œuvre.

Les travaux ont débuté le 8 août 2006 et la date de livraison est prévue en mars 2009. Dès lors pourront démarrer les travaux d'équipements ferroviaires, la

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Réseau Ferré de France (RFF)

Assistant à la maîtrise d'ouvrage

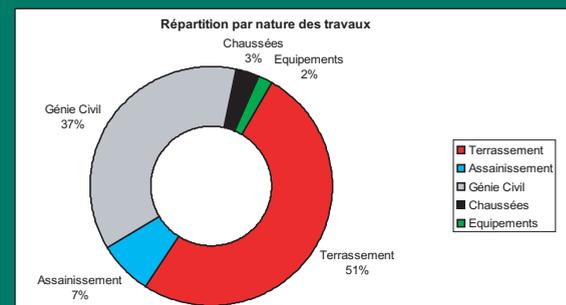
Inexia

Maître d'œuvre

Egis Rail Rhin-Rhône (Scetauroute)

Groupe d'entreprises

- Terrassements : Fougierolle Ballot Terrassements - GTM - Forézienne d'entreprises
- Assainissement : SGTN - Tetra
- Génie civil : Eiffage TP - Matière
- Chaussées : Eurovia - Sacer
- Équipements : Appia Grands travaux



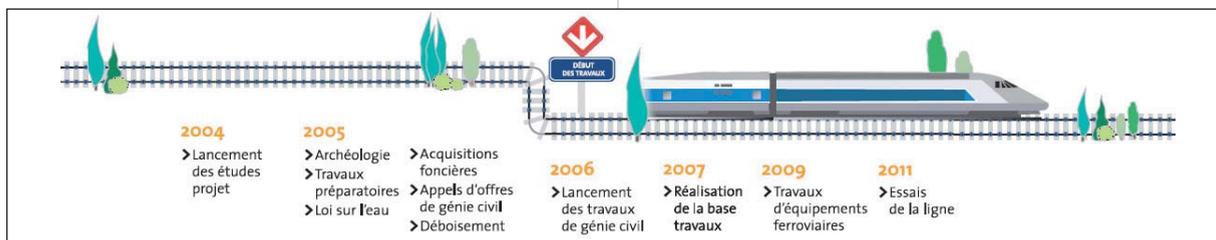
Chevroz – Loulans-Verchamps



Céline Cuchet
Ingénieur
en géotechnique
Fougerolle Ballot
Terrassements



Benoît Klein
Responsable
environnement
sur le lot B1
Fougerolle Ballot
Terrassements



mise en service de la ligne étant prévue pour début 2012 (figure 2).

La découverte de cavités sous de nombreux ouvrages, la présence de sols compressibles sous certains remblais de grandes hauteurs et les intempéries exceptionnelles de l'été dernier sont autant de contraintes qui ont poussé les entreprises à :

- mobiliser des moyens de reconnaissances géotechniques complémentaires importants;
- proposer des solutions techniques appropriées pour les traitements de cavités;
- renforcer les moyens matériels pour préserver la planification des travaux.

Géologie – Géotechnique

Le chantier se situe dans la vallée de l'Ognon constituée de formations géologiques datant du Jurassique supérieur comblées par des alluvions anciennes et actuelles.

Tout le long du tracé le substratum est calcaire. On distingue les formations suivantes :

- les calcaires du Séquanien, sont des calcaires fins de teinte grise;
- les calcaires du Rauracien sont des faciès coralligènes, ce qui explique la grande variation de leur épaisseur;
- les calcaires de l'Argovien présentent une alternance entre bancs calcaires et bancs marneux;
- les argiles à chailles, altération de l'Argovien datant du Tertiaire, sont constituées de nodules siliceux, les « chailles », noyés dans une matrice argileuse;
- une couverture d'altération et d'alluvions d'âge quaternaire.

Les nombreuses failles qui affectent le secteur sont orientées NNE-SSO.

L'ensemble du tracé présente en surface, des couches d'altérations et argiles qui sont des sols meubles, et en profondeur un substratum calcaire. Les argiles à chailles sont le résultat de l'altération des calcaires de l'Argovien sous-jacent; ce phénomène d'altération a rendu très irrégulières et très hétérogènes les interfaces entre ces deux formations ce qui augmente encore les difficultés d'extraction de ces matériaux et limite la valorisation des matériaux rocheux.

Les premières reconnaissances géotechniques engagées

Figure 2

Dates clés de la construction de la ligne (source RFF)

Key dates in construction of the line (source : RFF)

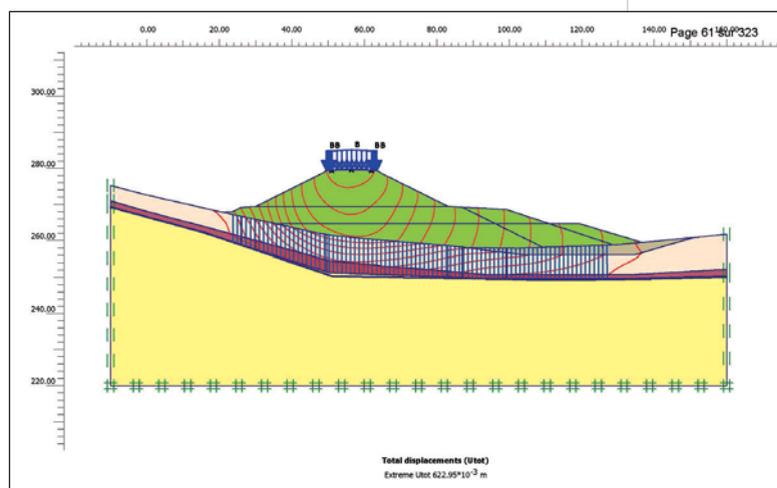


Figure 3

Calcul de stabilité et tassement par le bureau d'études d'Eiffage Travaux publics

Calculation of stability and subsidence by the engineering office of Eiffage Travaux publics

par l'entreprise ont mis à jour, dans certaines zones, des écarts notables avec la maquette géotechnique du marché. Ces points sensibles ont nécessité une attention toute particulière de l'entreprise avec des investigations complémentaires adaptées à chaque problème rencontré :

- pénétromètres statiques avec mesure de la pression interstitielle pour les sols supposés compressibles;
- sondages destructifs avec enregistrement des paramètres pour déterminer les vides, ou terrains décomprimés;
- tomographie sismique sous ouvrages d'art pour vérifier la limite calcaire sain-calcaire altéré, détecter et circonscrire les zones de cavités.

Les résultats de ces reconnaissances ont très souvent entraîné une adaptation des dispositions constructives. De nombreux calculs de stabilité et de tassements ont été réalisés par le bureau d'études géotechnique d'Eiffage Travaux Publics pour valider la géométrie des différents ouvrages et confirmer la nature et l'importance des dispositifs constructifs (figure 3).

LGV Rhin-Rhône : lot B1 Chevroz – Loulans-Verchamps

Photo 1
Échelon
de décapeuses
Fleet of scrapers



■ Travaux

Terrassements - Moyens matériels

Pour réaliser l'ensemble des travaux prévus au marché (cf. encadré « Les principales quantités ») les moyens matériels de grands terrassements mobilisés sont conséquents. Plus d'une centaine de machines travaillent simultanément sur ce chantier, ce qui représente une puissance de 30000 CV. Les trois plus gros échelons sont constitués de pelles de 85 t travaillant en double poste.

L'utilisation de tombereaux articulés a été nécessaire du fait des contraintes de traficabilité liées à la sensibilité à l'eau des argiles à chailles, des terrains situés en zones inondables (vallées de l'Ognon, de la Buthiers et du Dournon).

Des moyens de traitement (charrue ou pulvimixeur), ont été mobilisés pour assurer la réutilisation et la bonne mise en œuvre des argiles humides.

Un échelon de décapeuses (photo 1) renforce ces moyens, pour les déblais sur la partie Est du chantier. Une installation de concassage a été mise en place dans le seul déblai valorisable (D94) (photo 2), en partie centrale du chantier, pour l'élaboration des matériaux granulaires destinés aux substitutions, blocs techniques, partie supérieure des terrassements et couche de forme.

Pour réaliser l'approvisionnement du chantier avec ces matériaux granulaires et compte tenu des distances de transport, une vingtaine de camions 8 x 8 a été utilisée empruntant alternativement les pistes de chantier et la voirie locale (RN57) (photo 3).

Assainissements

Sur le lot B1, les ouvrages de traversée sont de deux sortes :

- des ouvrages d'art à fonction hydraulique. Le dimensionnement de leur structure relève de la conception des ouvrages d'art;
- des petits ouvrages constitués d'un conduit, de têtes d'extrémité avec un lit de pose et un remblai contigu au conduit.

Photo 2
Vue aérienne
du D94
Aerial view
of D 94



Photo 3
Pont-route
13B210
qui rétablira
la RN57 sur la
droite et D94
en arrière-plan
Road bridge
13B210 on
national
highway RN57
on the right,
and D94 in the
background



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 4 360 000 m³ de déblais (18 déblais)
- 4 030 000 m³ de remblais (19 remblais)
- 9 ponts-routes
- 16 ponts-rails dont quatre ouvrages hydrauliques
- 3 600 ml de buses
- 2 viaducs de type bipoutre à ossature mixte

Le lot B1 compte plus de 120 buses (3600 ml). Elles sont implantées dans les points bas repérés sur les levés topographiques ou en des points spécifiques liés à leur fonction (ouvrages de traversée des drainages longitudinaux). Elles sont situées sous la trace de la LGV, mais aussi sous les rétablissements routiers ou les merlons.

La plupart des buses de traversée positionnées en fond de vallon sur sols compressibles ont nécessité une pose avec une contre-flèche pour reprendre les tassements estimés dans les notes de calculs du bureau d'études.

Cavités

Le réseau hydrographique aux alentours du tracé couplé à des circulations d'eaux souterraines et un substratum calcaire sont propices à un important réseau karstique.

Le zonage du risque cavité a été établi en trois catégories : risque faible, moyen ou fort selon une combinaison de trois critères :

- la nature des terrains;
- la présence de failles;
- la présence d'indices karstiques.

Pour les remblais, dans le cas de cavités non détectées lors des études, si après recherche visuelle, un indice cavité est supposé, une campagne de reconnaissance par sondages destructifs est engagée pour valider et préciser le type de cavité repérée.

Pour chaque ouvrage d'art, une reconnaissance par sondages destructifs est réalisée afin de vérifier l'absence de cavité ou au contraire d'en confirmer la présence et l'extension. Le nombre de sondages réalisés et leur implantation dépendent du risque cavité identifié et du type de fondation de l'ouvrage.

Le marché différencie trois types de cavités pour lesquels sont associés des traitements :

- cavités franches, traitées par injection de comblement;
- cavités remplies d'argiles, traitées par purge ou jet grouting;
- dolines, traitées par jet grouting.

Au droit des ouvrages où il est envisagé des renforcements de sol par jet grouting, une reconnaissance géophysique par tomographie sismique (sondages destructifs avec diagraphies instantanées et panneaux de tomographies) a été réalisée afin de localiser la présence d'altérations, de décompressions et éventuellement de cavités. Ce qui permet une bonne visualisation de la limite calcaire altéré-calcaire sain (figure 4).

De nombreuses cavités, non attendues car en zone de risque faible, détectées sous les ouvrages d'art ont nécessité des campagnes de reconnaissance complémentaires lourdes.

Ces reconnaissances et les traitements spécifiques des assises d'ouvrages d'art ont concentré la planification des travaux de génie civil.

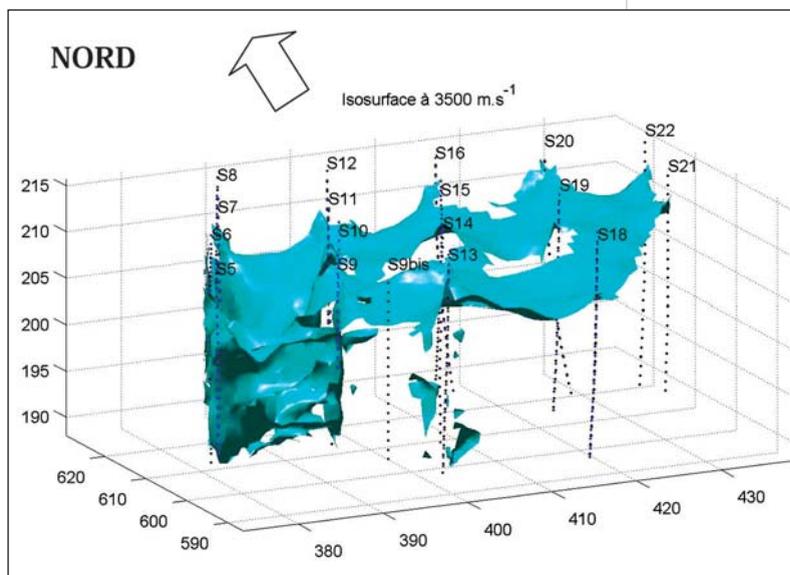


Figure 4
Résultats de tomographie sismique sous un ouvrage dans le R7
Results of seismic tomography under a structure in R7

Techniques spécifiques sous les ouvrages d'art

Jet grouting

Le calcaire plus ou moins karstifié, présente une limite non tabulaire entre le substratum et les argiles compressibles sus-jacentes. Pour éviter les problèmes liés au soutirage des fines, certains ouvrages d'art présentant des risques de cavités ont nécessité la mise en œuvre de colonnes de jet grouting avec des longueurs adaptées, ancrées dans le substratum calcaire par un tube métallique dont le rôle est de pallier les efforts de flexion pouvant être générés par des tassements différentiels entre la zone traitée par jet grouting et la zone non traitée ou par un soutirage de fines.

Ces colonnes associées à un matelas de répartition en matériaux granulaires, jouent un rôle d'inclusions édifiées à travers une couche de sol meuble jusqu'à un substratum de meilleure portance.

Le matelas de répartition permet un report des charges par la mobilisation d'un effet de voûte.

Cette technique permet d'éviter le problème de tassements et de la stabilité de l'ouvrage, sans remplacement du sol en place.

Injection

Deux types d'injections ont été réalisés :

- pour les vides francs, une injection par comblement gravitaire a été réalisée, cette technique consiste à injecter un mortier de sable, puis à faire une injection de clavage avec un coulis de ciment;

LGV Rhin-Rhône : lot B1 Chevroz – Loulans-Verchamps

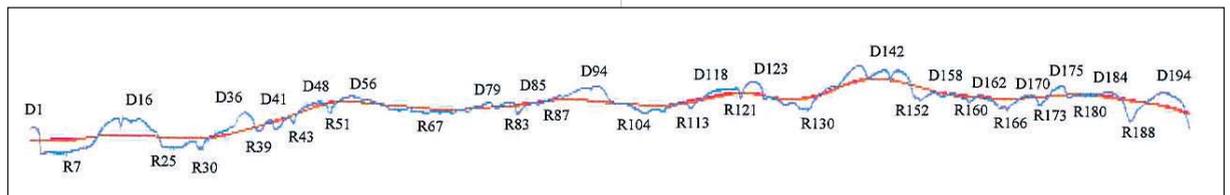


Figure 5

Profil en long du lot B1

Longitudinal profile of work section B1



Photo 4

Vue du R7 avec la culée C4 du viaduc de l'Ognon au premier plan

View of R7 with abutment C4 of the Ognon viaduct in the foreground



Photo 5

R188 - Mise en place des CPI

R188 - Installing pore pressure meters



- pour les vides remplis d'argile, une injection de traitement sous pression au moyen de tubes à manchettes a été proposée, cette technique adaptée aux zones où la proportion de matériaux rocheux reste encore importante a permis de compléter la palette des solutions prévues initialement.

Préchargement

Les ouvrages d'art implantés sur une couche d'argile pouvant être compressible en sol support ont été préchargés à la cote projet + 2 m (pour simuler la surcharge due aux structures d'assises et au matériel roulant) pendant 3 mois, au droit de l'ouvrage et des blocs techniques. Une instrumentation au moyen de profilomètres a été installée sous chaque ouvrage pour vérifier l'amplitude des tassements et leurs stabilisations.

Points techniques particuliers du chantier

Remblais sur sols compressibles

Les couvertures d'altérations et alluvionnaires (alluvions argileuses et alluvions sablo-graveleuses) en bordure de l'Ognon dans le R7 (figure 5) et de la Buthiers dans le R25 sont compressibles, et ont été mises en évidence par les reconnaissances géotechniques préliminaires et confirmées par les reconnaissances complémentaires.

Le remblai R7 dont la hauteur varie entre 11 m et 14 m, et long de 1 km a été segmenté en tronçons pour adapter les dispositions constructives à l'hétérogénéité du sol support. Une purge de la couche compressible plus ou moins profonde suivant les zones a été réalisée pour rester dans une durée de consolidation compatible avec le délai de réalisation des travaux.

Ce remblai situé en zone inondable a nécessité le terrassement des argiles à l'abri d'un rideau de palplanches en bordure de l'Ognon (photo 4).

Sous le R25, haut de 8 à 11 m, la totalité de la couche compressible constituée d'alluvions argileuses a été purgée jusqu'au substratum calcaire.

Remblais de grandes hauteurs sur argiles d'altération

Les remblais R188 et R152 présentent une hauteur pouvant atteindre 19 m à l'axe. L'assise de ces remblais est constituée d'un substratum calcaire (Argovien) karstifié surmonté d'argiles à chailles de l'ordre de 5 m à 10 m suivant les endroits.

Les particularités du sol support de ces remblais résident par l'absence de l'effet de la profondeur sur l'état de consolidation, par la présence de zones molles en surface pouvant affecter toute la hauteur de couverture et par la présence d'une zone molle ($q_c < 1$ MPa) au contact du substratum calcaire.

Les risques associés sont liés à d'éventuels tassements immédiats ou différés, et à l'apparition d'une surface de rupture à l'interface argile-calcaire.

Les dispositions constructives adoptées pour le R152 et le R188 ont été les suivantes :

- purge sous remblai, pour éviter tout problème de poinçonnement;
- drains verticaux et surcharge pour accélérer les tassements;
- banquette latérale accolée pour assurer la stabilité vis-à-vis des coefficients de sécurité requis.

Un suivi durant toute la montée et la stabilisation de ces remblais sera mené à l'aide d'un important dispositif d'instrumentation comprenant des profilomètres, inclinomètres et cellules de mesure de pression interstitielle (photo 5).

Protection et respect de l'environnement

Le tracé du lot B1 traverse une mosaïque de milieux sensibles sur le plan environnemental tels que des zones humides, protégées pour leur diversité écologique tant sur le plan de la flore que celui de la faune, des zones de culture ainsi que des grands massifs forestiers abritant une vaste faune et flore diversifiée.

Les contraintes environnementales sont intégrées dans la réalisation des travaux dans un but de transparence totale vis-à-vis du milieu naturel, au travers des thèmes suivants :

- l'eau (superficielle et souterraine);
- l'air;
- la faune;
- la flore;
- les milieux aquatiques;
- le milieu humain...

Un des enjeux majeur du tronçon concerne une réserve naturelle protégée, traversée sur environ 1 km par le chantier.

L'action sur le terrain se traduit par l'adaptation de l'organisation et des méthodes de travail à la sensibi-



Photo 6
Filtre à paille
Straw filter



Photo 7
Bassin de décantation
Settling pond

lité des milieux et de la prévention des risques de pollution :

- décantation et filtration des eaux de ruissellement avant rejet (photo 6);
- barrières à batraciens;
- pêches de sauvegarde dans les rivières dérivées;
- déplacement de la faune sédentarisée sur le tracé du chantier tel que les blaireaux;
- zones aménagées et réglementées pour le stockage de produits polluants et l'entretien des engins;
- arrosage des pistes de chantier pour limiter l'envol des poussières...

LGV Rhin-Rhône : lot B1 Chevroz – Loulans-Verchamps

► L'assainissement provisoire de chantier est une des contraintes majeures d'un grand chantier comme celui du lot B1, où le milieu récepteur présente une forte vulnérabilité aux dépôts de matières en suspension, notamment pour la flore inféodée aux milieux humides.

Le terrassement de 16000 m² de bassins de décantation a été nécessaire pour garantir la maîtrise des écoulements des eaux de ruissellement provenant du chantier et de la qualité des rejets vis-à-vis du milieu environnant (photo 7). ■

ABSTRACT

Rhine-Rhone High-Speed Train Line : Work section B1, Chevroz – Loulans-Verchamps

C. Cuchet, B. Klein

The lot B1 long of 19,7 km is a part of the future East portion of the High speed rail Rhin-Rhône which will contribute to anchor more France into Europe.

Works began in summer 2006 and the forecast schedule of 31 months work includes : earthworks, civil works (bridges and viaducts) drainage and roadworks.

More than 100 plants representing a total of 30000 horsepower performs the earthworks.

Karsts, settlements of support ground, wet materials, and embankment in flood plains are some of the main characteristics of the technically difficult construction site.

RESUMEN ESPAÑOL

Línea de Alta Velocidad Rin-Ródano : Lote B1 Chevroz – Loulans-Verchamps

C. Cuchet y B. Klein

El lote B1 de una longitud de 19,7 km constituye un eslabón de la futura línea de alta velocidad Rin-Ródano que habrá de contribuir en anclar más a Francia en la Europa que se extiende progresivamente hacia el Este.

Los trabajos dieron comienzo durante el verano de 2006 y 31 meses habrán sido necesarios para ejecutar, los movimientos de tierra, obras de fábrica, viaductos, dragados y los restablecimientos de comunicación.

Más de un centenar de máquinas que representan una potencia de han obrado para los movimientos de tierra.

Cavidades, asentamientos del suelo soporte, materiales húmedos y terraplenados en zonas inundables constituyen las principales características de una obra técnicamente difícil.

Aménagement de la RD 438 à Belverne – Des ouvrages en terre de hauteur exceptionnelle

Stéphane Roques
Directeur de chantier
Razel

Xavier Lejay
Chef du Service Routes
et Infrastructures
Conseil général
de la Haute-Saône

Nicolas Deutscher
Ingénieur géotechnicien
Razel

Les terrassements de la section 3.1 de la mise à 2 x 2 voies de la RD 438 en Haute-Saône sont réalisés par Razel pour le compte du Conseil général 70.

Il s'agit d'un chantier d'ampleur, de 5,5 km de section courante, représentant un terrassement de 2 millions de m³ dans des matériaux peu courants, très sensibles à l'eau bien que se présentant avec une matrice rocheuse compacte.

Ce chantier est composé d'une succession de déblais imposants – jusqu'à 36 m de profondeur – et de remblais exceptionnels de près de 30 m ayant nécessité pour leur construction une sélection rigoureuse des matériaux à l'extraction puis une adaptation des procédures et des ateliers de compactage pour obtenir 98 % de l'OPN lors de la mise en œuvre en grande hauteur.

et présentant une emprise au sol entre « entrées en terre » de l'ordre de 200 m (figure 1).

Le maître d'ouvrage – le Conseil général de la Haute-Saône – travaille sur le projet de mise à 2 x 2 voies de la RD 438 entre Lure et Héricourt (aménagement sur 25 km découpés en cinq sections d'étude) depuis une dizaine d'années, l'itinéraire ayant fait antérieurement l'objet de travaux d'aménagements dans le cadre des contrats de plan État-Région-Département. En effet, cet équipement – structurant pour le département puisqu'il permet de relier les bassins d'emplois de Vesoul, Lure et Luxeuil-les-Bains (via la RD 64) à l'aire urbaine de Belfort-Montbéliard-Sochaux-Héricourt, mais également à l'A36 (accès à la Suisse et à l'Allemagne) –, devenait impératif au vu du trafic croissant (plus de 15 000 véhicules/jour dont de nombreux poids lourds) et de son corollaire apparu ces dernières années, la recrudescence des accidents de la circulation. Le fruit

À Belverne, village pittoresque de Haute-Saône, l'entreprise Razel réalise pour le compte du Conseil général de la Haute-Saône (au nord de la région Franche-Comté) les terrassements de la mise à 2 x 2 voies de la RD 438 sur un linéaire de 5,5 km.

Il s'agit d'un chantier de terrassement de grande ampleur ce que ne laisse pas forcément présager son linéaire somme toute moyen. En effet, il s'agit de créer le passage du futur aménagement au droit d'une topographie tourmentée située entre Vosges et Jura en zones entièrement boisées à l'origine.

Ainsi, plus de 2 millions de m³ de matériaux divers auront été excavés sur le site à terme. De tels volumes sur un linéaire de 5,5 km laissent alors présager des géométries d'ouvrages en terre hors du commun : des déblais importants présentant des hauteurs d'excavation pouvant aller jusqu'à 36 m de profondeur et des remblais exceptionnels de quasiment 30 m de hauteur



© Razel/Kristen Pettillon

Photo 1

Mise en œuvre de terre végétale sur talus terrassé au moyen d'un boueur

Operation of putting top soil on embankment excavated by a bulldozer

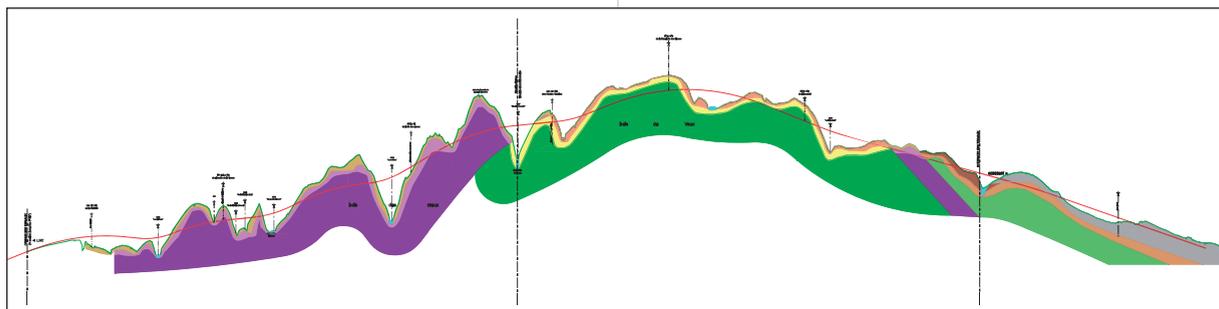


Figure 1

Profil en long géotechnique de la section 3.1 de la RD 438 en Haute-Saône

Longitudinal geotechnical profile of section 3.1 of county road RD 438 in the Haute-Saône region

Aménagement de la RD 438 à Belverne – Des ouvrages en terre de hauteur exceptionnelle

de ce travail s'est alors traduit à ce jour par la mise en service d'environ 10 km de Lure à Belverne (sections 1 et 2), des 5 km représentant le contournement de l'agglomération d'Héricourt (section 5) puis a permis, en 2006, de lancer les terrassements de la section 3.1 Belverne – Couthenans avec pour objectif une ouverture à la circulation courant 2009.



© Nicolas Vercellino

Photo 2

5,5 km de terrassements exceptionnels, soumis à une météorologie peu clémente

5,5 km of exceptional earthworks, subjected to bad weather

L'opération de la RD 438 initiée par le Conseil général de la Haute-Saône s'inscrit dans un programme plus vaste dénommé « contrat de plan État-Région volet spécial RN 19 » décidé par le Comité interministériel de l'aménagement et du développement du territoire du 23 juillet 1999 et qui prévoit alors l'aménagement en route express 2 x 2 voies de la liaison allant de l'autoroute A31 à Langres dans la Haute-Marne, jusqu'à la frontière suisse sur la commune de Delle située dans le Territoire de Belfort. L'État, qui a retenu un tracé empruntant, pour la RN 19 aménagée à terme, le parcours de l'actuelle RD 438 entre Lure et Héricourt, assure une large part du financement (75 %) des travaux engagés sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil général et qu'il récupérera ultérieurement à son patrimoine en tant que gestionnaire de l'ensemble de la RN 19. La région Franche-Comté et le département de la Haute-Saône participent également au financement de l'infrastructure à hauteur de 12,5 % chacun.

■ Des travaux ambitieux

À l'été 2006, le Conseil général de la Haute-Saône décide – à l'issue de l'appel d'offres – de confier les travaux de terrassement de la section 3.1 à l'entreprise Razel.

Ces travaux comprennent – outre les terrassements généraux sur 5,5 km de section courante –, les travaux d'assainissement, de couches de forme ainsi que la réalisation de deux ouvrages d'art type PI (passage inférieur) et de sept ouvrages hydrauliques de type dalots de section conséquente concernant un linéaire développé d'ouvrage d'environ 800 m. Le diffuseur de Belverne avec ses deux giratoires et les quatre bretelles d'accès à la future 2 x 2 voies fait également partie du projet.

Pour des raisons de délais d'acquisitions foncières et d'organisation des dégagements des emprises boisées en saison appropriée, le Conseil général a organisé les travaux en deux phases : une première phase de 2,7 km de Belverne à Luze dès l'été 2006, et une deuxième phase de 2,8 km de Luze à Couthenans à compter du printemps 2007.

La première tranche de travaux concerne environ 1,3 million de m³ de terrassement dans un site très escarpé, les travaux complets du diffuseur de Belverne, les deux ouvrages d'art ainsi que cinq ouvrages hydrauliques en fond de thalwegs concernant un linéaire de 570 m.

La deuxième tranche, démarrée en mars 2007, concerne quant à elle, environ 700 000 m³ de terrassement et deux ouvrages hydrauliques.

Les études d'exécution des ouvrages en terre ayant été préalablement finalisées par les services techniques du Conseil général, l'entreprise Razel a pu se mobiliser très rapidement, début août 2006, afin de profiter des meilleurs jours possibles de la saison estivale. Ainsi, un échelon de motorscrapers CAT 631 avec un pousseur CAT D10N, ainsi qu'un échelon de dumpers CAT 769 chargés par une pelle de 75 t CAT 375, se sont activés sur le site entre fin août et début septembre 2006.

L'objectif était alors doublement ambitieux.

CHANTIER RD 438 SECTION 3.1

Montant du marché

16,6 millions d'euros HT

Maître d'ouvrage

Conseil général de la Haute-Saône

Maître d'œuvre

Conseil général de la Haute-Saône – Service des routes et des infrastructures

Entreprise titulaire du marché

Razel – Département Terrassement

Principaux sous-traitants

- SNCTP (ouvrages d'art et ouvrages hydrauliques)
- STPI (assainissement – réseaux secs)
- Bonnefoy (mandataire) et Roger Martin (chaussées des rétablissements)
- Centre Est Dynamite (minage)

Un premier objectif consistait en effet à mettre en service, d'ici la fin de l'année 2006, le giratoire nord du futur diffuseur de Belverne permettant de dévier l'ensemble du trafic de la RD 438. Cette mise en service était de fait impérative pour permettre la réalisation des travaux dont les emprises étaient situées au droit de la route existante initialement en circulation : l'ouvrage d'art du diffuseur de Belverne (OA 12 : type PRAD – pont à poutrelles béton préfabriquées – s'appuyant sur culées porteuses en terre renforcée), la démolition de l'ancien ouvrage permettant dans la configuration initiale le franchissement de la RD 299 (liaison Belverne-Courmont) et les travaux de terrassement du raccordement du projet à la 2 x 2 voies existante côté Lure.

Un deuxième objectif devait assurer dans les plus brefs délais la stabilisation des sols saturés et compressibles présents en fond de thalwegs, afin de réaliser les assises nécessaires et compatibles avec la construction des ouvrages hydrauliques en béton armé. Il convenait également parallèlement d'assurer les différents accès permettant d'assurer l'approvisionnement des constituants desdits ouvrages en phase travaux. En effet, ces ouvrages particuliers, tous situés en fond de thalwegs au cœur de la forêt haute-saônoise devaient bien entendu être réalisés préalablement aux travaux de mise en remblais.

■ Des matériaux surprenants

Situé au piémont des Vosges le tracé recoupe les formations sédimentaires du Permien (grès et argilites) et des formations volcano-sédimentaires du Dévono-Dinantien (grauwackes, schistes, andésites et rhyolites entre autres). Des grès du Trias sont rencontrés ponctuellement en extrémité sud du tracé. La séparation entre les deux principaux étages géologiques rencontrés (Permien - Dévono-Dinantien) se trouve de façon surprenante à la limite géométrique des deux phases organisées contractuellement par le Conseil général. Sur l'ensemble du tracé, l'altération a joué un rôle primordial dans la géomorphologie d'un site au relief très accidenté; une importante couverture d'arènes et d'argiles sableuses recouvrent les formations du Permien et une couche importante d'argiles à cailloutis celles du Dévono-Dinantien.

Ainsi, au niveau de la première tranche de travaux, les matériaux rencontrés, bien connus des habitants de la région présentent un faciès d'une couleur rouge très caractéristique et s'apparentant à des grès. Ils sont très difficiles à travailler pour le terrassier. En effet, au cœur des déblais, ces matériaux sont très durs et ne peuvent pas être extraits par les pelles très puissantes de 70 et 80 t présentes sur le chantier. Il fallait impérativement



Photo 3

Extraction après abattage à l'explosif au moyen d'un échelon pelle de 75 t / dumpers des matériaux rocheux gréseux. On observe bien la couleur rouge caractéristique de ces matériaux

Extraction of rocky sandstone material after blasting with explosives by means of an echelon of 75 ton power shovel/dumpers. Note the characteristic red colour of this material

Photo 4

Des ouvrages impressionnants : un remblai de 27 m de hauteur à l'aplomb d'un déblai d'une trentaine de mètres de profondeur

Impressive structures : an embankment 27 metres high directly above an excavation of a depth of about thirty metres



Aménagement de la RD 438 à Belverne – Des ouvrages en terre de hauteur exceptionnelle

Figure 2

Profil en travers de la section courante du remblai R7 au droit de l'OH n° 6

Cross section of the continuous section of embankment R7 at the level of hydraulic structure No. 6



recourir au préalable à des opérations d'extraction au moyen d'un ripper (bull D8T et pelle CAT 375 équipée d'une dent) ou à l'explosif. En revanche, une fois extraits, ces matériaux sous l'effet mécanique des boteurs de régilage et des compacteurs devenaient sableux et fins à la mise en œuvre, avec un caractère hydrique très sec nécessitant régulièrement le recours à un arrosage pour leur mise en remblai, en particulier dans les faciès gréseux.

Et pourtant, malgré cela, la plus grande difficulté rencontrée avec ces matériaux provient de leur extrême sensibilité à l'eau. En effet, la moindre précipitation atmosphérique affecte en surface ces matériaux, les rend boueux et transforme chaque mètre carré de pistes en patinoire, ce qui contraint à chaque fois l'entreprise à arrêter les travaux pour des raisons de trafabilité et de sécurité. Ces problèmes étaient d'ailleurs accentués par les dénivelés des pistes de transit, notamment en début des phases de grands terrassements. C'est pourquoi les précipitations, quasi incessantes sur le site entre les mois d'août 2006 et août 2007 – à l'exception d'un mois d'avril très sec –, couplées avec des

températures clémentes tout l'hiver, ont rendu les terrassements extrêmement compliqués : impossibilité d'assurer une activité continue, nombreuses reprises et ravinement des ouvrages, conséquences de certains épisodes pluvieux soutenus de l'été 2007, « écrémage » important des terrassements par les niveleuses d'entretien avec mise en dépôt des matériaux...

Devant les retards accumulés, l'entreprise a dû alors renforcer ces moyens de production sur le site avec la mobilisation d'une pelle de 85 t CAT 385 supplémentaire accompagnée d'un échelon de quatre dumpers CAT 769. Par ailleurs, les horaires de travail à poste ont dû être allongés et maintenus ainsi jusqu'à la mi-novembre 2007, ce qui est plutôt inhabituel. Ces dispositions prises par l'entreprise, conjuguées avec de très clémentes conditions météorologiques au cours des mois de septembre et d'octobre 2007, ont permis, malgré les difficultés rencontrées, la quasi-finition des terrassements généraux vers la mi-novembre.

Contrairement aux matériaux rencontrés sur la première phase qui étaient certes délicats à exploiter mais qui étaient relativement homogènes, ceux extraits dans le cadre de la deuxième phase présentaient des caractéristiques très hétérogènes aussi bien dans leur nature géologique que dans leurs aptitudes mécaniques contraignant l'entreprise à adapter en permanence le mouvement des terres et les moyens d'extraction, parfois entre deux profils consécutifs.

Ainsi, les horizons rocheux francs succédant à des parties plus meubles exploitables avec l'échelon de motorscrapers ont rendu les travaux complexes à organiser au jour le jour en nécessitant de nombreux transferts internes et échanges d'échelons pour s'adapter aux difficultés d'extraction et aux modifications de destination liées à la nature des matériaux. De plus, lors de leur déroctage au ripper ou à l'explosif, ces matériaux ont nécessité une plus grande attention afin d'obtenir une granulométrie compatible avec leur mise en remblai. Ainsi, les premiers tirs de mine ont mis en évidence ces difficultés avec l'obtention de blocs métriques dont l'évacuation sur les zones de dépôts s'est avérée impérative. En outre malgré leur dureté apparente, la majeure partie des matériaux rocheux extraits sur cette deuxième tranche de travaux présente un caractère fragmentable lors de la mise en œuvre et dégradé en présence d'eau. D'où, à nouveau, une

PRINCIPAUX ÉCHELONS DE TERRASSEMENT SUR LE CHANTIER

Sur l'ensemble des deux tranches :

• **1 échelon de motorscrapers comprenant :**

- > 1 pousseur CAT D10N
- > 6 décapeuses CAT MS 631
- > 1 boteur D8T équipé d'un ripper
- > 1 boteur D6R
- > 2 à 3 compacteurs V5

• **2 échelons de pelles de fortes puissances comprenant :**

- > 1 pelle CAT 385 LME
- > 1 pelle CAT 375 LME
- > 10 dumpers CAT 769D
- > 1 boteur D7R
- > 1 boteur D7H
- > 3 à 4 compacteurs V5

• **2 échelons de pelles de 50 t comprenant :**

- > 2 pelles Komatsu PC 450
- > 9 tombereaux articulés de 30 à 35 t
- > 2 boteurs D6R LGP
- > 2 compacteurs V5

• **1 échelon de traitement comprenant :**

- > 1 épandeur à liant Panien PR 165-17
- > 1 pulvimixer Wirtgen 2500



Photo 5

RD 438 : 2 millions de m³
à terrasser sur un site escarpé
RD 438 : 2 million m³ to be
made into embankments
on a steep site

attention également soutenue sur les procédures de compactage de ces matériaux lors de leur mise en œuvre en remblais.

■ Des ouvrages en terre exceptionnels

Une des principales difficultés du chantier pour le terrassier fut alors la gestion des accès et des pistes de chantier. Il fallait en effet, par endroits, réussir à inscrire une infrastructure présentant 60 m de dénivelé entre deux points distants à l'axe de 200 m, le tout dans une topographie tourmentée et dans des matériaux très sensibles aux intempéries. La réalisation d'une telle infrastructure, permettant de traverser le chantier de part en part et présentant des pentes acceptables, ne put être menée à terme qu'au milieu de l'été 2007, les intempéries importantes du printemps et du début de l'été 2007 ayant très fortement ralenti la progression des travaux.

La deuxième difficulté majeure était inhérente à la géométrie du projet sur certains remblais de grande hauteur. Du fait des matériaux rencontrés sur le site et de la hauteur des ouvrages, les services techniques du Conseil général ont prévu des talus à 2h/1v sur l'ensemble des remblais avec intercalation de risbermes de 4 m de largeur, par paliers de 10 m de hauteur. Cette géométrie de principe a également été adoptée dans les zones en déblai à l'exception des « fronts de taille » dans les matériaux rocheux pour lesquels les calculs de stabilité ont montré que des pentes de 3h/2v étaient admissibles (figure 2).

En outre, les calculs de stabilité générale conduits par les services techniques du maître d'œuvre et confirmés par les spécialistes en géotechnique de Razel impliquaient la prise en compte de matériaux de caractéristiques intrinsèques particulières pour la constitution des remblais supérieurs à 15 m à savoir des matériaux classés C1B5 au sens du GTR (Guide des terrassements routiers). En phase travaux cela a contraint l'entreprise à adapter le mouvement des terres en fonction de ces impératifs. En effet, et comme bien souvent dans ces cas-là, les matériaux présentant de telles caractéristiques et devant être mis en œuvre en base des remblais se trouvaient au cœur des déblais. Il a donc fallu organiser les terrassements en ayant pour objectif la découverte de ces matériaux dans la continuité des terrassements, en « jonglant » entre les phases de mise en dépôt et de mise en remblai. De plus, afin de s'affranchir au maximum de tout risque dans la mise en œuvre des matériaux en remblais de grande hauteur, l'entreprise – en liaison avec les services techniques du maître d'œuvre – a pris le parti d'atteindre

des objectifs de compactage supérieurs à ceux qui étaient jusqu'alors envisagés. Il fut en effet décidé d'atteindre des objectifs de compactage fixés à 98 % de l'OPN contre 95 % imaginés à l'origine. Les moyens et les fréquences de compactage ont alors été définis lors de planches d'essais spécifiques. Ainsi, avec les matériaux mis en œuvre dans les remblais de hauteur supérieure à 10 m, le nombre de passes de compacteur V5 a été porté à dix pour atteindre l'objectif contre sept en compactage traditionnel. Ce compactage intense s'est traduit sur le terrain par l'ajout d'un compacteur V5 supplémentaire dans l'atelier de mise en œuvre, aussi bien avec l'échelon de motorscrapers qu'avec les échelons de pelles-dumpers.



Photo 6

Mise en place d'un éperon drainant pour gérer les venues d'eau existantes rencontrées dans le terrain naturel
Putting a drainage spur in place to manage existing water inflow encountered on natural terrain

Une autre caractéristique de ce chantier a été la gestion des eaux. En effet, de nombreuses arrivées d'eau ont été découvertes à l'avancement dans quasiment tous les sites d'extraction avec, à chaque fois, la problématique d'assurer la canalisation de ces écoulements et d'organiser leur exutoire vers le milieu naturel en dehors des ouvrages en terre du projet. Plus délicat a été la découverte et la gestion de résurgences éparées au niveau des zones de transitions déblais-remblais dans le sens du projet.

L'entreprise en liaison avec les services techniques du Conseil général a dû ainsi recourir à un recouvrement quasi total des talus situés à l'interface déblai-remblai du remblai R7, au moyen d'un géocomposite drainant pour s'assurer d'un bon captage des eaux de ruissellement rencontrées à cet endroit et ainsi prendre les précautions nécessaires pour prévenir un risque de désordre ultérieur sur cet ouvrage exceptionnel de 27 m de hauteur.

Aménagement de la RD 438 à Belverne – Des ouvrages en terre de hauteur exceptionnelle

► ■ **Des mesures sociales d'accompagnement**

Dans la mise au point du marché, le Conseil général de la Haute-Saône avait clairement affiché sa volonté à l'occasion des travaux d'aménagement de la RD 438 de favoriser la réinsertion de personnes en grande difficulté et tenus à l'écart de l'emploi. Ainsi, une clause d'insertion a été introduite et imposait à l'entreprise de réserver 7000 heures de travail sur le chantier à ces personnes en difficulté.

Razel a, dès le mois d'août 2006, pris la mesure de cet objectif important. Avec l'aide dynamique des services sociaux du département de la Haute-Saône qui lui ont présenté un contingent de candidats adaptés aux postes à pourvoir, l'entreprise a pu procéder dès la fin août 2006 au recrutement de trois personnes – toujours présentes sur le chantier fin 2007. Par la suite, une dizaine d'autres emplois ont pu être ainsi pourvus. Ce travail et cet effort particulier de tous les acteurs concernés ont été payants et ont permis de dépasser les objectifs. Ainsi, à la fin du mois d'octobre 2007, le « compteur » de suivi des heures de travail entrant dans la clause d'insertion affichait sur le chantier un fier 16000 heures.

Par ailleurs, certaines de ces personnes particulièrement volontaires ont pu être formées par Razel à la conduite d'engins de travaux publics (passage des CACES correspondants), au maniement des appareils topographiques et aux essais usuels pratiqués par le laboratoire de chantier leur donnant ainsi un socle de connaissances intéressant et une expérience valorisante pour la poursuite de leur carrière professionnelle. ■

PRINCIPALES QUANTITÉS DU MARCHÉ

Sur l'ensemble des deux tranches :

- Décapage : 600 000 m²
- Déblais meubles : 1 300 000 m³
- Déblais rocheux : 645 000 m³
- Remblais : 1 150 000 m³
- Couche de forme en matériaux traités : 52 000 m³
- Ouvrages hydrauliques dalot : 810 ml

ABSTRACT

Construction of the RD438 at Belverne – Earth structures of exceptional height

S. Roques, X. Lejay, N. Deutscher

The earthworks in section 3.1 making the RD 438 in Haute-Saône into a dual carriageway are being carried out by Razel on behalf of Council 70.

It is a building site of 5,5 km standard section representing earthworks of 2 million m³ of uncommon materials, that are very sensitive to water although they have a compact rocky matrix.

This building site is composed of a succession of imposing excavations, up to 36 metres in depth, and exceptional embankments of nearly 30 metres, which required a strict selection of materials to be extracted for their construction and then adaptation of procedures and compacting workshops in order to obtain 98 % of normal proctor optimum while building up the embankments to a great height.

RESUMEN ESPAÑOL
Ordenación de la carretera nacional RD438 en Belverne – Diversas obras de tierra de altura excepcional

S. Roques, X. Lejay y N. Deutscher

Los movimientos de tierra del tramo 3.1 de la puesta a 2 x 2 carriles de la carretera nacional RD438 en el departamento de Haute-Saône se llevan a cabo por parte de Razel por cuenta de la diputación provincial 70.

Se trata de una obra de gran envergadura, de 5,5 km de tramo normal, que representan movimientos de tierra de 2 millones de m³ con diversos materiales poco frecuentes, sumamente sensibles al agua, pese a que se presentan con una matriz de roca compacta.

Esta obra esta formada por una sucesión de desmontes de gran dimensión – hasta 36 m de profundidad – y de terraplenados excepcionales de cerca de 30 m que han precisado para su construcción una selección rigurosa de los materiales en el momento de la extracción, y a continuación una adaptación de los procedimientos y de los talleres de compactación para obtener el 98 % de la OPN durante la puesta en aplicación a gran altura.

Élargissement de l'A31 au niveau de Langres Sud

Sylvain Charrier
Directeur de Travaux
Valérian

La mise à 2 x 3 voies de cette section de 20 km, située au sud de la bifurcation entre l'A5 et l'A31, se déroule dans des terrains hétérogènes constitués principalement de calcaires très durs. Cette géologie difficile, qui a nécessité la mise en œuvre de moyens de terrassements particuliers, combinée à une météo pénalisante, induit des cadences d'avancement assez lentes.

L' autoroute A31 représente, entre Beaune (21) et Nancy (54), un des axes routiers principaux du Nord-Est de la France, le tronçon situé entre Beaune et Langres constituant un trait d'union entre les réseaux autoroutiers du sud de la vallée du Rhône et du nord-est de l'Hexagone, en provenance ou à destination de l'Allemagne, du Benelux et de la Lorraine. Le flot de véhicules quotidien, qui varie de 30 000 à 35 000 véhicules sur ce tracé, comporte une forte proportion de poids lourds (20 à 26 %) et peut monter jusqu'à 50 000 véhicules/jours durant la période estivale. Dès lors, la cohabitation du trafic de transit avec les déplacements domicile-travail conduit à des perturbations régulières.

■ Travaux lourds sous circulation

Eu égard aux prévisions, qui tablent sur une croissance continue du trafic à moyen et long terme, il était donc nécessaire de commencer l'élargissement avant que les seuils critiques de circulation sous chantier ne soient atteints, et ce afin de réaliser les travaux dans de bonnes conditions. Dans la pratique, la mise à 2 x 3 voies de l'autoroute A31 consiste à ajouter une troisième voie de circulation à chacune des deux chaussées, par l'extérieur, en adaptant les bretelles des nœuds autoroutiers, des diffuseurs et des différentes aires.

Les travaux se situent entre Beaune et Langres (Haute-Marne), sur 98 km, la section entre Dijon Sud (A311) et Crimolois (A39), où le trafic est sensiblement moins élevé (25 000 véhicules/jour), n'étant pas impactée. Ils sont programmés sur une durée réduite à trois années, hors période hivernale de mi-novembre à mi-mars, avec mise en service provisoire des troisièmes voies au fur et à mesure de leur achèvement.

Une des principales difficultés de notre chantier, qui s'étend sur les 20 km au sud de la bifurcation entre l'A5 et l'A31, réside dans l'objectif clair de minimiser la gêne aux riverains et aux usagers. D'où l'obligation d'effectuer tous les travaux lourds sous circulation en

maintenant, en permanence, deux voies de circulation réduites. Un contexte très pénalisant vu le caractère confiné du chantier dans un espace ne dépassant pas 6 à 7 m de large, et la forte co-activité qui y règne (jusqu'à 15 sous-traitants en période de forte activité).

Autre difficulté pratique : l'accessibilité. Le seul point d'entrée est celui de l'échangeur de Langres Sud. Dernier gros problème : la météo. Avec l'été 2007 particulièrement pluvieux qui a sévi, nous avons recensé plus de trente jours d'intempéries entre le printemps et la fin octobre.



■ Calcaires durs avec présence de karsts

Ce contexte météorologique pénalisant a également fortement interféré dans l'enchaînement des tâches, le temps souvent humide entraînant parfois beaucoup de retard au niveau des postes de mise en peinture et de grenailage. Côté terrassements, nous sommes dans une morphologie très chahutée, environnement dont nous n'avons pris la réelle mesure qu'une fois terminés les travaux de déboisement. C'est ainsi que les hauteurs de terrassement ont pu atteindre 15 m dans certaines zones, alors que nous avons été parfois emmenés à remblayer jusqu'à 17 m de hauteur sur des parties très courtes.

Ces particularités s'expliquent, une fois encore, par les fortes déclivités découlant de l'implantation géographique, et elles se retrouvent dans les chiffres. Les 600 000 m³ de déblais que totalise cette section de 20 km représentent un volume assez important, surtout avec le type de matériaux rencontrés.

La géologie, constituée principalement de calcaires très durs, est apparue comme l'une des contraintes techniques majeures. Le terrain est en effet très hété-

Photo 1

Les 600 000 m³ de déblais que totalise cette section de 20 km représentent un volume assez important pour ce type d'opération, eu égard à la nature des matériaux rencontrés

The total 600,000 cu. m of earth cuts for this 20 km section represent a rather large volume for this type of project, given the type of materials encountered

Élargissement de l'A31 au niveau de Langres Sud



Photo 2

Les travaux de déboisement ont révélé une morphologie très chahutée, le tracé se situant dans la descente du plateau de Langres

The deforestation works revealed a very irregular morphology, with the route being located in the descent from the Langres plateau

Photo 3

La forte co-activité qui règne sur le chantier constitue l'une des difficultés principales, l'ensemble des travaux s'effectuant sous circulation dans un espace confiné

The large amount of concurrent work performed on the site is one of the main difficulties, with all the work being performed under traffic in a confined space



Photo 4

La mise à 2 x 3 voies de cette section de 20 km, située au sud de la bifurcation entre l'A5 et l'A31, se déroule dans des terrains hétérogènes constitués principalement de calcaires très durs

The creation of a three-lane dual-carriageway road on this 20 km section, located south of the junction between the A5 and A31 motorways, is taking place on heterogeneous ground consisting mainly of very hard limestones



rogène, la découverte de karsts au fur et à mesure de l'avancement, nécessitant la mise en œuvre d'un géotextile haute résistance dans certaines zones particulières.

Les travaux de terrassement, réalisés sous circulation, interdisaient bien entendu toute possibilité de recourir aux explosifs. L'utilisation d'une dent de déroctage, montée sur une pelle de 50 t, ne s'étant pas révélée performante, nous avons basculé sur une méthode combinant l'emploi de BRH de forte capacité (jusqu'à six en période de pointe) et d'une raboteuse minière, une machine de 50 t louée pour l'occasion. Corollaire pratique : des cadences réduites.

■ Mise à niveau environnemental

Dans la pratique la chaussée est constituée d'une couche de forme de 30 à 70 cm d'épaisseur en 0/80 suivie d'une couche de réglage de 10 cm en 0/20 et de 2 x 7 cm d'enrobés à module élevé; une couche de 7 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME) venant compléter l'ensemble. La structure de la bande d'arrêt d'urgence (BAU) ne comporte qu'une seule couche de BBME sur une couche de réglage de 24 cm.

En période de pointe, le parc matériels recensait une dizaine de pelles de 20 à 40 t, le transport et l'évacuation des matériaux s'effectuant par tombereaux articulés (Volvo A25), 6 x 4 et 8 x 4.

Le projet prévoit également la création d'une vingtaine de bassins de rétention d'eau, l'ensemble de ces travaux hydrauliques représentant 400 000 m³ de terrassements supplémentaires. L'élargissement de l'A31 s'accompagne en effet d'une amélioration notable de la prise en compte des considérations environnementales. Le système d'assainissement des eaux de ruissellement est entièrement refait à neuf, la plate-forme autoroutière « reliftée » devenant ainsi totalement transparente vis-à-vis du milieu naturel. L'ensemble des bassins de récupération permettra, en effet, de traiter l'ensemble des eaux pluviales, issues de la chaussée, mais aussi de bloquer les pollutions éventuelles en cas d'accident.



Photo 5

Le projet prévoit également la création d'une vingtaine de bassins de rétention d'eau, l'ensemble de ces travaux hydrauliques représentant 400 000 m³ de terrassements supplémentaires

The project also provides for the creation of about twenty water retention basins, with all these hydraulic works representing 400,000 cu. m of additional earthworks

Ce programme hydraulique nécessite la réalisation de nombreuses traversées sous chaussée. Ces travaux sous circulation, effectués par la société Zyta associée à l'entreprise allemande Andress, font appel à une technique spécifique utilisant une tarière de couple très important, les forages de 300 à 600 mm de diamètre étant chemisés à l'avancement.

Dernière précision technico-logistique : les barrières de protection (Variogard) mises en œuvre sont des éléments métalliques de 4 m de longueur présentant un profil légèrement différent des structures béton classiques. Ces structures peuvent être « prémontées » par barre de 12 m de longueur, avantage qui, combiné à leur plus grande légèreté, autorise des cadences de pose beaucoup plus élevées au regard des plots béton. ■

FICHE TECHNIQUE

Maître d'ouvrage
APRR

Maître d'œuvre
Egis Route

Coordonnateur SPS
PMM

Entreprises
Groupement Valérian (mandataire) – Le Foll – Socafil – Demathieu & Bard – Spie batignolles TPCI – Spie batignolles Est

Durée du chantier
33 mois (y compris 2 mois de travaux de préparation)

Montant du marché
45 millions d'euros

ABSTRACT Widening of the A31 motorway south of Langres

S. Charrier

Widening works have been undertaken on the A31 motorway between Beaune and Langres, a major road artery in northeastern France, over a total length of 98 km.

The project involves bringing a third traffic lane into service on either side of the motorway for each direction of traffic, and maintaining traffic while these works are performed. The project is justified by the very dense traffic flow, of between 30,000 and 35,000 vehicles per day (including 20 % to 26 % of commercial vehicles), causing major slowdowns every day.

Given the presence of very hard limestones, which are tough to work, special earthworks machinery had to be used. And capricious weather conditions somewhat slowed the pace of work progress.

Numerous steps were taken to protect the surrounding environment, such as the construction of a new runoff water drainage system, measures to attenuate noise pollution, and inter alia the construction of bird houses for long-eared owls and bat shelters.

RESUMEN ESPAÑOL Ampliación de la autopista A31 en las cercanías de Langres Sur

S. Charrier

Diversos trabajos de ampliación fueron emprendidos en la autopista A31 entre Beaune y Langres, importante eje vial del Noreste de Francia, sobre una longitud total de 98 km.

El proyecto incluye la puesta en servicio de un tercer carril de tráfico en ambos lados de la autopista para cada sentido de circulación, y el mantenimiento del tráfico durante la ejecución de estos trabajos. Obra que se explica por un flujo de tráfico sumamente denso, de 30 000 a 35 000 vehículos diarios (entre los cuales un 20 a un 26 % de camiones pesados), que provocan todos los días importantes atascos.

La presencia de calcios difíciles de trabajar, ya que sumamente duros, ha precisado el empleo de medios de movimientos de tierra particulares y, los caprichos de la meteorología dieron lugar a algunas perturbaciones de cadencia en el avance de los trabajos.

Numerosas acciones fueron implementadas con objeto de preservar el medio ambiente circundante, como por ejemplo, la construcción de un nuevo sistema de saneamiento de las aguas de escorrentía, la realización de mediciones necesarias para la reducción de contaminaciones acústicas, la fabricación de cajas nidos para duques medios y albergues para murciélagos, entre otros.

La section Thenon-Villac un concentré de techniques

Début 2008, les 18 km du maillon manquant de l'A89 (Bordeaux/Clermont-Ferrand) seront mis en circulation entre Thenon et Terrasson. La section autoroutière de 6,5 km comprise entre Thenon (La Bachellerie) et Villac (Beauregard-de-Terrasson) a été confiée par ASF à un groupement d'entreprises mené par Guintoli (mandataire) pour réaliser les TOARCC (terrassements, ouvrages d'art, rétablissements de communications et chaussées) sur cette section.

Des mouvements de terre aux volumes exceptionnels, sur un linéaire relativement court et dans un planning serré. Autant d'ingrédients pour un chantier qui requiert savoir-faire, imagination et organisation.

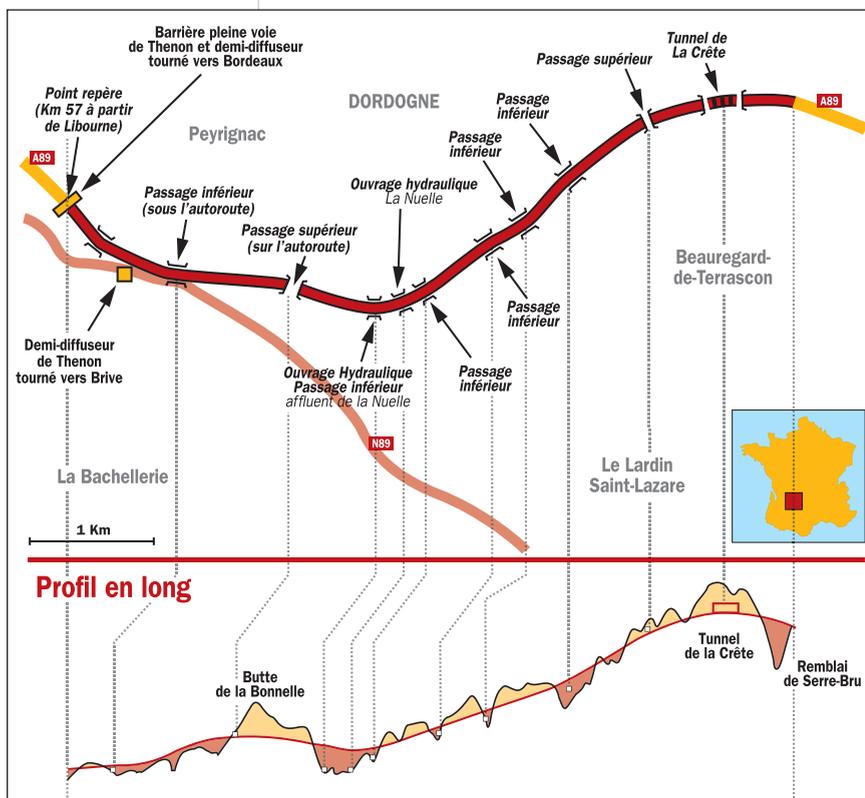
■ Un tracé accidenté à la géologie capricieuse

Serpentant entre buttes élevées et vaux boisés à forts dénivelés, la section Thenon-Villac traverse quatre communes limitrophes s'étalant au cœur de la Dordogne respectivement de l'Ouest vers l'Est : La Bachellerie, Peyrignac, Le Lardin Saint-Lazare et Beauregard-de-Terrasson (figure 1).

Figure 1

Tracé du tronçon autoroutier Thenon-Villac de l'A89

Layout of the Thenon-Villac section of the A89 motorway



© Pascal Le Doaré / Guintoli

Photo 1

Le ruban de la section autoroutière Thenon-Villac se déroule sur 6,5 km dans la Dordogne. Au centre, vue sur le tunnel bitube de la Crête en construction sur la commune de Beauregard-de-Terrasson (Guintoli). En arrière-plan, on distingue les piliers du viaduc de l'Elle (Demathieu & Bard)

The Thenon-Villac motorway section unfurls over 6,5 km in the Dordogne region. In the centre, view over the Crête double-tube tunnel undergoing construction in the district of Beauregard-de-Terrasson (Guintoli). In the background can be seen the piers of the Elle viaduct (Demathieu & Bard)

Le tracé est ponctué d'ouvrages marquants. Le premier gros déblai à l'ouest du tracé appelé Butte de la Bonnelle, correspond à un volume de 1 000 000 m³. Le niveau supérieur est constitué de 500 000 m³ de matériaux très hétérogènes : argile, marne, sable argileux, calcaire, argile marneuse avec inclusions rocheuses. Quant au niveau inférieur, il représente près de 500 000 m³ de sables grésifiés dont l'extraction a requis un minage préalable.

Autre déblai important, celui du tunnel de la Crête (650 000 m³) situé à l'extrémité Est du tronçon autoroutier. Une partie importante de ces déblais à dominante schisteuse (420 000 m³) a été déplacée encore

TOARCC 4.2 de l'A89 : de génie civil



Denis Labouèbe
Directeur de travaux
Guintoli

Jean-Marc Tauran
Responsable contrôle
externe
Valérien

Mona Mottot
Revue Travaux - FNTF



Photo 2

Confortement provisoire (clouage + béton projeté) avant construction du local technique du tunnel faisant face à l'atelier de préfabrication des armatures des voûtes

Temporary reinforcement (nailing + shotcreting) before construction of the equipment room of the tunnel facing the workshop for prefabrication of arch reinforcements

plus loin vers l'Est pour constituer, après sélection des matériaux rocheux, le remblai de Serre-Bru qui atteint 40 m de hauteur !

Quant aux 230 000 m³ restants, ils ont été provisoirement stockés avant d'être réutilisés pour constituer la couverture du tunnel de la Crête, ouvrage de génie civil majeur de ce chantier, situé sur la commune de Beauregard-de-Terrasson (photos 1 et 2).

■ Des moyens humains et matériels conséquents

La diversité des types d'ouvrages à réaliser et l'importance des mouvements de terres à modeler, sur le délai global relativement court de 28 mois (chaussées comprises), ont conduit Guintoli (mandataire) à s'entourer des compétences nécessaires. Ce chantier a été en effet l'occasion de mobiliser plusieurs filiales du

groupe NGE : Guintoli bien sûr pour les terrassements et les ouvrages d'art courants, GTS (co-traitant confortement et drainages subhorizontaux), EHTP (assainissement), Serfotex (minage), Agilis (bétons extrudés), SATS (murs de soutènement). Mais aussi des entreprises extérieures partenaires telles que Valérien et Deschiron (terrassements), Demathieu & Bard et Dodin (ouvrages d'art), Malet (chaussées)...

Les moyens matériels sont tout aussi importants. En raison des forts dénivelés sur le parcours, les gros matériels de production ne pouvaient être mobilisés en tout début de chantier. L'entreprise a dû donc recourir à des engins moins puissants mais plus mobiles sur les terrains accidentés, notamment pendant les travaux préparatoires. Des pistes ont dû être tracées pour faciliter la circulation des plus gros engins. Présentant des pentes pouvant atteindre jusqu'à 12 %, ces pistes ont été difficilement taillées, souvent à flanc de colline, afin que deux gros engins de production – tombereaux rigides de 5 m de large chacun – puissent se croiser sans

LES PRINCIPAUX ACTEURS

Maître d'ouvrage

Autoroutes du Sud de la France

Maître d'œuvre

Setec TPI

Entreprises :

- Terrassements, tunnel de la Crête : Guintoli (mandataire), GTS et Valérien (co-traitants)
- Ouvrages d'art courants : Guintoli/NGE Génie Civil
- Rétablissements de communications : Malet - Guintoli
- Chaussées : Malet - Guintoli

Principaux sous-traitants

- Terrassements : Deschiron
- Ouvrages d'art : Demathieu & Bard, Dodin
- Filiales spécialisées de NGE :
 - > EHTP (assainissement)
 - > Serfotex (minage)
 - > Agilis (bétons extrudés)
 - > SATS (murs de soutènement)

CHIFFRES CLÉS

- 6,5 km de section autoroutière
- 3,3 millions de m³ de déblais
- 2,4 millions de m³ de remblais
- 1 tunnel bitube de 355 m
- 2 ouvrages hydrauliques
- 2 passages supérieurs
- 6 passages inférieurs
- 250 personnes
- 70 engins de terrassements
- Montant du marché : 65 M€

La section Thenon-Villac TOARCC 4.2 de l'A89 : un concentré de techniques de génie civil

Photo 3

Traitement des matériaux argileux à la chaux au déblai
Treatment of clayey materials with lime during excavation



Photo 4

Malaxage à la charrue lors du traitement à la chaux
Mixing by plough during lime treatment



encombre. De même, des purges ont dû être réalisées sur 5 à 6 mètres de profondeur dans les fonds des talwegs (lignes de collecte des eaux).

En phase de production, des machines puissantes sont utilisées, telles la pelle Liebherr 984 C de 120 tonnes et 5 dumpers Caterpillar 773 et la Caterpillar 385 accompagnée de 5 dumpers Caterpillar 769... L'enjeu est de taille : 3,3 millions de m³ de déblais et 2,4 millions de m³ de remblais sont à réaliser, dans des délais courts, et sur un parcours relativement réduit (6,5 km). Ce qui représente en moyenne pas moins de 500 000 m³ de mouvements de terre au kilomètre ! (photos 3 et 4).

DES MOYENS MATÉRIELS CONSÉQUENTS

- 1 échelon de 6 motor scrapers Caterpillar 631 G et d'un bulldozer équipé d'une grande lame frontale
- 3 échelons de pelles de production : une Liebherr 984 C de 120 tonnes et 5 dumpers Caterpillar 773, une Caterpillar 385 et une Liebherr 964 accompagnée de 5 dumpers Caterpillar 769
- 5 échelons de pelles moyennes avec 15 tombereaux articulés Volvo A25 et A35
- 2 grues Liebherr
- Matériels d'accompagnement : bulls, niveleuses, engins de traitement de sols, compacteurs...

■ Des investigations poussées

Les investigations complémentaires aux campagnes de reconnaissances géotechniques permettent de localiser et d'affiner le potentiel de matériaux exploitables à un niveau précis de terrassement d'un déblai.

Certains déblais du chantier A89 T4.2, notamment celui de la Butte de la Bonnelle, sont constitués par des matériaux issus de formations géologiques dont les couches et horizons sont très hétérogènes. Les campa-

Critères de tris sélectifs relatifs à la granulométrie et la dureté des matériaux Opérations à réaliser

• Blocs

Les blocs de meulière doivent être extraits de la matrice argileuse ou marneuse avant exploitation (dans ces matériaux le traitement est impossible).

• Galets

En présence de galets un traitement au moyen d'un pulvérisateur est à exclure (le traitement à la charrue reste possible).

• Sables

Pas de prescriptions particulières liées à la granulométrie.

• Marnes consolidées

Extraction par ripage au moyen d'un boteur D10 et refragmentation au moment de la mise en œuvre.

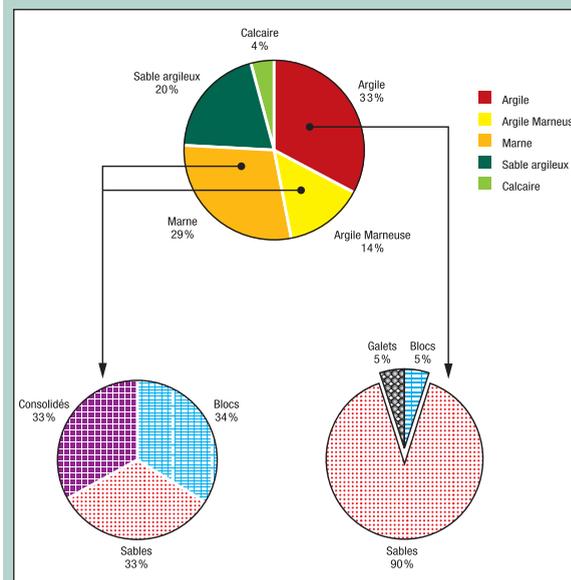


Figure 2

Répartition statistique par nature des matériaux du déblai de la Butte de la Bonnelle

Statistical breakdown of the material excavated from Butte de la Bonnelle by type of material

Méthodologie de vérification d'une étude de stabilité d'ouvrage et application des dispositions constructives prévues

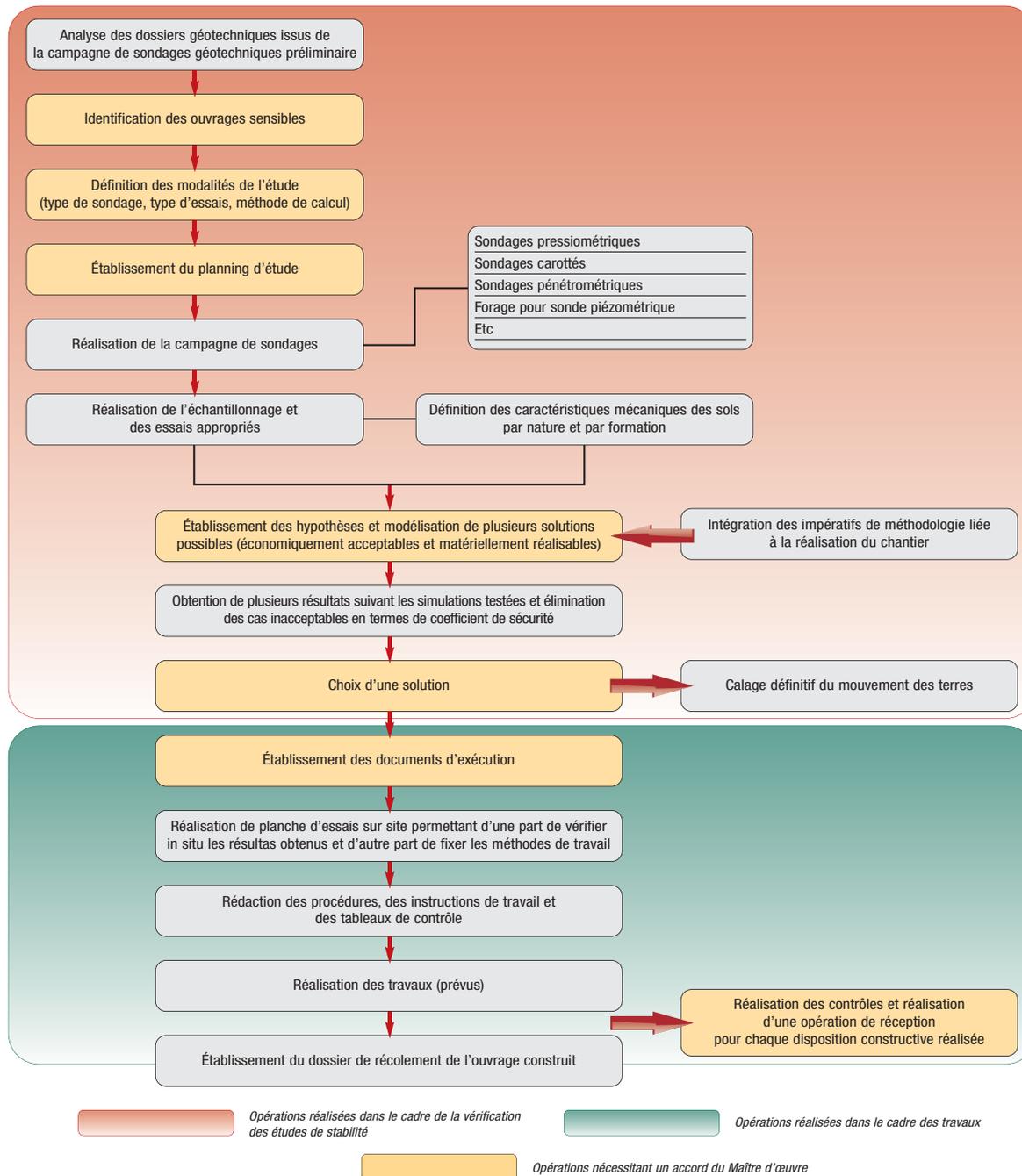


Figure 3

Synoptique d'une étude de stabilité d'ouvrage
Block diagram of a structural stability study

gnes de sondages préliminaires et complémentaires permettent de définir les grandes familles de matériaux et d'établir des schémas de répartition grossière au sein de la butte.

Au moment de l'exploitation de la butte, les données géotechniques issues de ces sondages sont insuffisantes et nécessitent des investigations régulières plus poussées qui permettront de statuer sur les quantités et sur la répartition des zones exploitables pour construire les ouvrages. Ces investigations permettent aussi d'anticiper :

- les conditions de réemploi des matériaux (type de traitement, dosage de liants pour le retraitement des matériaux, humidification, modalités de mise en œuvre et de compactage) et les techniques d'extraction;
- les conditions d'extraction (type d'engin d'extrac-

tion, réalisation de tri, minage, évacuation des eaux, etc.);

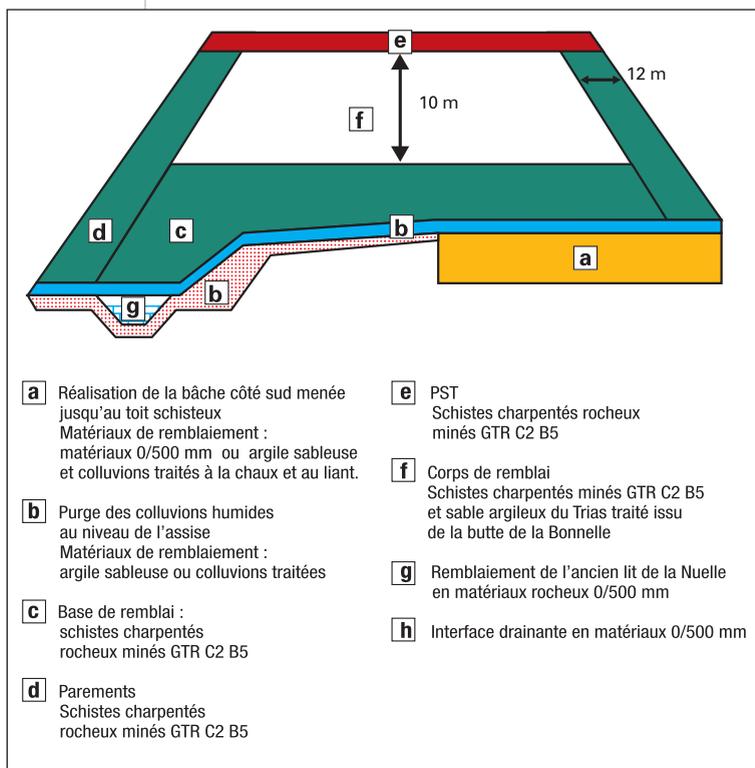
- le planning et le mouvement des terres suivant les matériaux rencontrés et les besoins pour construire les ouvrages (figure 2).

■ Techniques de stabilisation des ouvrages de terrassement (figure 3)

La construction de certains ouvrages de terrassement nécessite la réalisation d'aménagements spécifiques pour permettre d'assurer leur stabilité à long terme. Parois clouées, béton projeté, grillage ancré... autant de techniques qui permettent de renforcer certains déblais.

La section Thenon-Villac TOARCC 4.2 de l'A89 : un concentré de techniques de génie civil

Figure 4
Dispositions de stabilisation appliquées au remblai de la Bonnelle
Stabilisation measures applied to the Bonnelle embankment



Afin de stabiliser les buttes importantes, les matériaux sont sélectionnés avec soin avant de rejoindre leur emplacement final, désigné après études préalables (figure 4).

Les aménagements réalisés dépendent des caractéristiques géométriques de l'ouvrage (hauteur et pente des talus par exemple), des caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs du sol support de l'assise du futur ouvrage, de la présence ou non de nappes d'eau, et enfin des caractéristiques géotechniques des maté-

(suite page 50)

Le tunnel de la Crête : un ouvrage majeur de génie civil

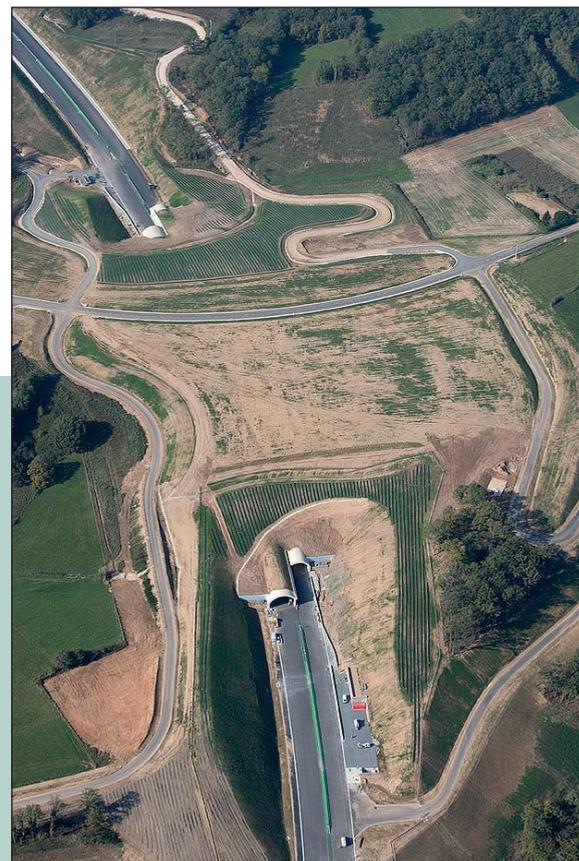
Également appelé par les opérationnels « le chemin critique du chantier », la construction du tunnel de la Crête a représenté un challenge à la fois technique et logistique. La libération des 650 000 m³ de déblais, essentiellement des schistes, conditionnait en effet le délai global des travaux. La date butoir d'achèvement des gros terrassements était fixée au 1^{er} juin 2006 afin que la construction de l'ouvrage puisse commencer dans les délais. En conséquence, le nombre d'engins de terrassements a été surdimensionné et les effectifs multipliés par deux. Quelques surprises étaient au rendez-vous : sur la butte, les opérateurs ont dû faire face à des couches dures en profondeur mais très altérées par failles en surface, les obligeant à déplacer du matériel supplémentaire et à réaliser des opérations de minage adaptées.

Le tunnel de la Crête, c'est aussi :

- 2 tubes de 355 m de long ;
- une structure composée de 21 500 m³ de béton et 2 700 t d'armatures en acier ;
- 3 voies dans le sens Bordeaux-Brive et 2 voies dans le sens opposé ;
- 2 niches de sécurité en tunnel et 6 bornes d'incendie.

Photos 5 et 6

Évolution de la construction du tunnel de la Crête entre 2006 et 2007. Le rétablissement de la colline au-dessus du tunnel favorisera la continuité des habitats naturels de la faune et de la flore
Progress on construction of the Crête tunnel between 2006 and 2007. Restoration of the hill above the tunnel will contribute to continuity of the natural habitats of the fauna and flora



Sur le chantier de l'A89, les études de stabilité relatives aux ouvrages en remblai ont conduit à mettre en œuvre les dispositions constructives et aménagements spécifiques suivants :

• Réalisation de purges :

Une purge nécessite l'évacuation par des moyens mécaniques des matériaux ne présentant pas des caractéristiques mécaniques suffisantes pour constituer l'assise d'un ouvrage (matériaux pollués, trop argileux ou trop humides, matériaux compressibles). La réalisation d'une purge doit être menée suivant un phasage bien précis dans la mesure où les sols à évacuer présentent des indices de portance très faibles rendant difficile l'évolution des engins de chantier. De plus, les fonds de vallon sont des zones d'accumulations alluvionnaires où on rencontre d'importantes résurgences aquifères. Les travaux de purges sont donc à mener en même temps que ceux qui consistent à drainer les eaux (photo 7).



Photo 7

Réalisation d'une purge en assise de remblai
Execution of drainage at the base of the embankment

• Réalisation de bèches :

Une bêche consiste à substituer une épaisseur du sol d'assise au pied du talus du remblai et d'ancrer ainsi l'ouvrage dans le sol support, en profitant des caractéristiques mécaniques supérieures apportées par le matériau de substitution (traité ou rocheux) (photo 8).



Photo 8

Bêche de pied du remblai R 405 en bordure de la RN 89
Cutoff wall at the base of embankment R405 on the edge of highway RN 89

• Réalisation de tranchées drainantes :

Une tranchée drainante est la réalisation sous le terrain naturel décapé d'une « saignée » équipée d'un drain de type PVC recouvert par des matériaux fortement drainants. Le complexe drain/matériaux drainants est enveloppé par un géotextile anti-contaminant (photo 9).



Photo 9

Tranchée drainante
Drainage trench

• Réalisation de parements :

Un parement consiste à réaliser sur une certaine largeur les talus d'un remblai avec des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques précises. On obtient ainsi tout autour de l'ouvrage une enveloppe permettant d'accroître sa stabilité (photo 10).



Photo 10

Parement en matériaux charpentés sur le remblai de Serre Bru
Cladding with timber materials on the Serre Bru embankment

• Réalisation de bases drainantes :

Cette opération requiert la mise en œuvre sur le terrain naturel décapé d'une certaine épaisseur de matériaux drainants. Cette couche permet de faire circuler et d'évacuer hors de l'assise du remblai les résurgences aquifères. Sans utilisation d'un tel dispositif les eaux qui resteraient prisonnières sous l'assise de l'ouvrage pourraient développer des pressions interstitielles préjudiciables à la stabilité de l'ouvrage ou amoindrir les caractéristiques de portances des sols d'assise par phénomène d'hydratation (photo 11).



Photo 11

Base drainante
Draining base



La section Thenon-Villac TOARCC 4.2 de l'A89 : un concentré de techniques de génie civil

► riaux exploitables rencontrés sur le site pour construire l'ouvrage (qualité et quantité).

Chaque aménagement entrant dans la construction d'un ouvrage fait l'objet de calculs de stabilité. Les résultats obtenus sont issus de modélisations mathématiques appliquées à la mécanique des sols. Les hypothèses prises en compte pour réaliser les calculs sont fondamentales, elles sont issues de l'exploitation de plusieurs sondages spécifiques. En effet, après réalisation d'une campagne de sondages, les matériaux prélevés sont échantillonnés de la manière la plus représentative possible pour être analysés dans un laboratoire. Les résultats obtenus permettent ainsi, pour chaque nature de sol et chaque formation géologique, de statuer sur leurs caractéristiques mécaniques.

Les calculs de stabilité doivent toujours être réalisés dans une logique intégrant les quantités de matériaux exploitables, les impératifs de phasage, la rationalisation du mouvement des terres et des distances de transport. L'étude purement technique doit donc être menée de manière à optimiser au maximum le réemploi des matériaux (mouvement des terres optimisé) tout en garantissant un degré de sécurité acceptable. ■

ABSTRACT

The Thenon-Villac section, project phase 4.2 of the A89 motorway : a great variety of civil engineering techniques

D. Labouèbe, J.-M. Tauran, M. Mottot

The last 18 km of the A89 motorway linking Bordeaux to Clermont-Ferrand will be open to motorists in early 2008, between Thenon and Terrasson.

The earthworks for the 6,5 km linking La Bachellerie (Thenon) and Beauregard-de-Terrasson (Villac) were performed by Guintoli (NGE Group) and its partners. Three million cubic metres were excavated in a basin of geologically very heterogeneous ground. And two million cubic metres were moved to build embankments of an exceptional height.

RESUMEN ESPAÑOL
El tramo Thenon-Villac TOARCC 4.2 de la A89 : un concentrado de técnicas de ingeniería civil

D. Labouèbe, J.-M. Tauran y M. Mottot

Los últimos 18 km de la autopista A89 que pone en comunicación Burdeos con Clermont-Ferrand estarán abiertos a los automovilistas a principios de 2008, entre Thenon y Terrasson.

Los movimientos de tierra de los 6,5 km que pone en comunicación La Bachellerie (Thenon) con Beauregard-de-Terrasson (Villac) fueron ejecutados por Guintoli (Grupo NGE) y sus asociados. Tres millones de m³ excavados en un terreno encajonado y geológicamente muy heterogéneo, y 2 millones de m³ desplazados para construir terraplenes de altura excepcional.

Terrassements sur la Route des Tamarins à la Réunion.

Le pari du minage

Le groupement Eiffage TP - Razel - Matière est arrivé sur la Route des Tamarins sur l'île de la Réunion en 2004 pour réaliser plusieurs marchés dont les deux TOARC 1 et 2 de la section 2. Ces deux projets de 7 km de long chacun ont nécessité d'adapter les méthodes d'extraction en faisant abstraction des méthodes locales. La société Stips, partenaire en tant que sous-traitant désigné était chargée de réaliser le minage, pari que le groupement a pris lors de l'étude d'appel d'offres. L'article montre la pertinence du choix même si l'hétérogénéité des matériaux a conduit à adapter les méthodes de minage tant en maillage, profondeur et dosage d'explosif. Il s'agit d'un retour d'expérience faisant office de bilan suite à la réalisation complète du chantier.

À la veille de l'achèvement des travaux de terrassement des TOARC 1 et 2 de la Route des Tamarins, et après une trentaine de mois de travaux, une gamme variée de moyens d'extraction a été mise en œuvre pour s'adapter au plus juste à la variété géologique des terrains à extraire.

Les moyens de terrassement ont été choisis en fonction des caractéristiques des matériaux :

- matériaux meubles des terrains de couverture extraits à la pelle mécanique ;
- matériaux rocheux basaltiques indurés, massifs traités au moyen d'explosifs ;
- matériaux hétérogènes, alternances de basaltes et de zones scoriacées, traitées par minage ou par moyens mécaniques : dents de déroctage et brise-roches hydrauliques.

Pour chaque déblai et pour chaque type de matériau à extraire, une analyse de l'adéquation entre moyens techniques, rendements et pertinence économique, a dicté le choix de la méthode mise en œuvre.

■ Contexte géologique

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. Mais l'activité volcanique reste intense avec le Piton de la Fournaise (2632 m), l'un des volcans les plus actifs du monde, situé au sud de l'île.

Le contexte géologique des travaux de la Route des Tamarins se présente donc avec des matériaux à extraire constitués de faciès lithologiques très hétéro-

gènes, 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 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, 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 des matériaux

Les matériaux de déblais ont été répertoriés 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, 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).

■ Maîtrise de la connaissance des matériaux

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 terrain. 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 réfraction notamment).

En parallèle, des appareillages d'enregistrement de paramètres de foration ont été installés sur les foreuses de minage. Les enregistrements captés lors de la foration des trous d'abattage pour la réalisation du minage, donnent avec précision la nature des terrains traités.

Les systèmes installés sur les foreuses (Titon 400 et

Imed Ben Fredj
Directeur de projet
Eiffage Travaux Publics

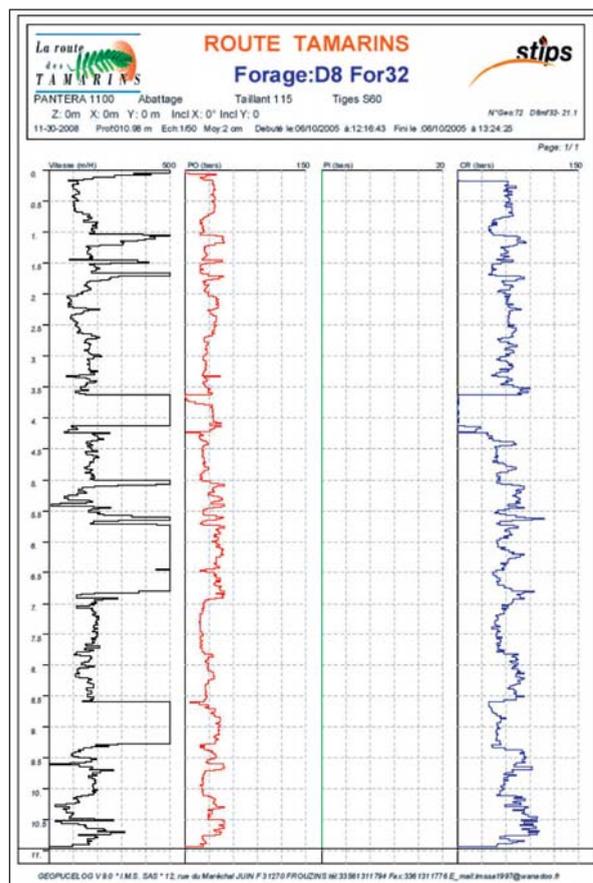
Hervé Bertrand
Conducteur de travaux
Stips

Stéphane Querne
Adjoint directeur
de projet
Razel

Terrassements sur la Route des Tamarins à la Réunion. Le pari du minage



Figure 1
TOARC 1- D8.
Enregistrement des paramètres
de foration
TOARC project phase 1- D8.
Recording of drilling
parameters



Pantera 1100) permettent d'enregistrer lors de la foration, la vitesse d'avancement en m/h, la pression exercée sur l'outil PO en bars, la pression du fluide PI en bars dans le cas d'utilisation de fluide de forage, et enfin le couple de rotation CR en bars.

■ Hétérogénéité des matériaux

L'examen des enregistrements des paramètres de foration met en évidence l'extrême hétérogénéité des terrains traversés; ceci est illustré par les importantes et rapides variations des paramètres, de vitesses et de couples de rotation en particulier.

Des successions brusques et fréquentes de zones induites basaltiques de faible vitesse d'avancement, et de zones de vitesses rapides, supérieures à 500 m/h instantanées, correspondant à des zones de scories lâches, sans tenue et cohérence, reflètent l'alternance de zones basaltiques, plus ou moins saines ou fracturées, et de zones de scories très lâches. On observe également la présence fréquente de vides francs, caractérisés par une forte et brutale augmentation de la vitesse, associée à une chute du couple de rotation.

À titre d'illustration, l'enregistrement présenté figure 1 correspond à un forage du TOARC 1, déblai D8.

Photo 1
TOARC 1 - D8.
Aire de la Saline
TOARC project phase 1-
D8. La Saline area





Photo 2

Les machines Atlas L6 et Tamrock Titon 405 en action
Atlas L6 and Tamrock Titon 405 machines in action

Description de l'enregistrement

Les données enregistrées peuvent s'interpréter comme suit :

- de 0 à 3,5 m : on observe une alternance de zones indurées basaltiques et de zones de scories lâches, en particulier au niveau des trois « pics » de brusques augmentations de vitesse (> 500 ml/h) associées à une chute de couple de rotation CR et augmentations ponctuelles de PO, du fait des pertes d'air qui réduisent la remontée de cuttings;
- de 3,5 à 4,20 m : la foration traverse une cavité, ce vide franc se caractérise par une nette augmentation de vitesse, une chute brusque de la pression sur l'outil Po et une chute totale du couple de rotation CR;
- de 4,20 à 5,70 m : on observe une transition d'une zone de basaltes fracturés vers une zone de scories à 5,70;
- de 5,70 à 6,80 m : zone de scories lâches, vitesse de d'avancement très importante, pas de tenue du trou;
- entre 6,80 et 10,98 : on retrouve cette alternance de faciès basaltiques fracturés (épaisseur 1,5 à 2,50 m) et de zones de scories lâches, d'épaisseur métrique.

L'enregistrement illustre donc l'extrême hétérogénéité des matériaux rencontrés pour un même forage. En outre, l'analyse de forages d'une même zone de déblai, sur un même tir, avec des trous voisins, voire contigus permet de mettre en évidence le fait que l'hétérogénéité rencontrée verticalement est tout aussi importante horizontalement d'un forage à l'autre, ceci à l'échelle de 2 à 3 m, d'un forage voisin à l'autre. Il n'y a aucune continuité entre les caractéristiques des matériaux sur un trou et les caractéristiques du ou des trous directement adjacents (photo 1).

■ Adaptation des moyens de foration et minage

Foration

L'hétérogénéité des matériaux forés, a pour conséquence d'importantes difficultés de foration. En effet, les zones scoriacées engendrent un rebouchage des trous au retrait des tiges de foration, les pertes d'air dans ces mêmes zones, et de surcroît dans les zones de cavités et de vides francs, ne permettent par la remontée des « cuttings » de foration, ce qui occasionne des coincements de barres et d'outil.

En conséquence, l'entreprise Stips a choisi de mettre en place des ateliers de foration fond de trou, de gros diamètres équipés de compresseurs haute pression et haut débit :

- Ingersoll Rand ECM 695;
- Tamrock Titon 400;
- Tamrock Titon 405;
- Tamrock Pantera 1100;
- Atlas Copco I6.

La dernière foreuse est une machine hors du trou munie d'un compresseur de 14 m³ à 14 bars et d'un marteau hydraulique parmi les plus puissants du marché : Tamroc Panthera 1100.

Toutefois, en dépit de la puissance des machines mises en œuvre et de leurs compresseurs en particulier, les vitesses de foration sont variables et globalement faibles (12 ml/h dans certaines zones et moins de 14 ml/h en moyenne) (photo 2).

Minage

Le chargement

les zones scoriacées et les zones de cavités constituent des zones de déperditions d'énergie explosive lors du tir qui réduisent le rendement de l'explosif et donc son efficacité. Pour compenser ces déperditions, l'entreprise a dû augmenter de manière significative la charge mise en œuvre. De plus, vides et zones de scories, engendrent un effet de « pochage » lors du char-

Terrassements sur la Route des Tamarins à la Réunion. Le pari du minage

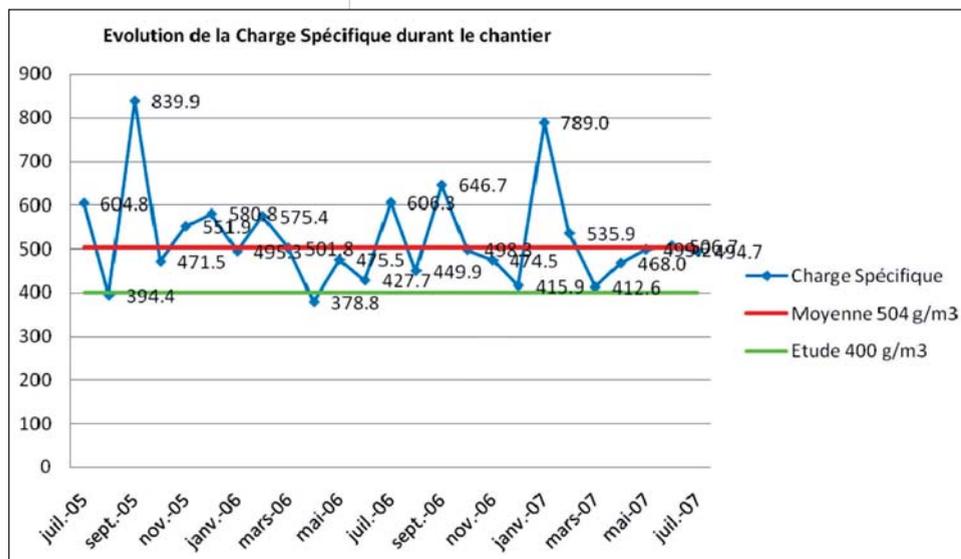


Figure 2

TOARC 2. Évolution de charges spécifiques
TOARC project phase 2.
Evolution of specific charges



gement entraînant d'importantes surconsommations d'explosifs.

Ainsi sur le TOARC 1, la charge spécifique moyenne est de 560 g/m³, tandis que sur le TOARC 2, elle est de 505 g/m³. Ceci pour des profondeurs de foration moyennes de 5 à 6 m et des mailles de foration de 8 à 12 m².

L'analyse des enregistrements des paramètres de forage des trous de mines a permis d'adapter la charge spécifique de déblai en déblai en fonction de l'hétérogénéité et de la dureté de chaque déblai ou de chaque partie de déblai.

À titre d'exemple, le diagramme (figure 2) illustre, pour le TOARC 2, l'adaptation des paramètres de

minage, et en particulier la charge spécifique, pour répondre au plus juste aux contraintes d'extraction imposées par le type et la qualité des matériaux à extraire.

Les importantes variations de charges spécifiques au fur et à mesure de l'avancement du chantier reflètent parfaitement l'importante hétérogénéité des matériaux rencontrés au moment de la mise en extraction des déblais successifs.

■ Pertinence du choix du minage

Sur les TOARC 1 et 2 de la Route des Tamarins, 2 400 000 m³ ont été terrassés. La proportion traitée par minage varie de 40 à 45 % du volume, le reste des matériaux rocheux ayant été dérocté par des moyens mécaniques (dent de ripage ou BRH).

À l'issue du chantier, l'analyse de l'extraction dans les différents déblais met en évidence les résultats suivants :

- les rendements d'extraction sont affectés quelle que soit la méthodologie de déroctage. Cependant on constate une nette augmentation des cadences dans les matériaux minés (environ 30 %) et ce malgré la présence de blocs importants issus de la zone de bourrage des tirs;
- le déroctage mécanique trouve ses limites dans les zones les plus dures notamment dans les bancs de basaltes très peu fracturés plurimétriques. Les outils d'attaque au sol s'usent anormalement et l'hydraulique des pelles BRH chauffe constamment. Mécaniquement le matériel souffre et de nombreuses pannes et casses sont à déplorer immobilisant le reste de l'atelier de terrassement;
- le déroctage mécanique est inconstant du fait de l'hétérogénéité des matériaux. L'alimentation de pelles à forte cadence est liée à la nature des matériaux rencontrés au jour le jour et la mise en adéquation de l'atelier de déroctage avec la pelle de production est incertaine;
- l'optimisation du placement de la pelle de production (front de 2 à 3 m) devient difficile pour des matériaux déroctés mécaniquement sauf en cas de mise en place d'un bouteur type D10 pour gerber les matériaux.

L'emploi des explosifs a permis aux échelons de terrassement de maintenir tout au long du chantier des rendements d'extraction acceptables, malgré les difficultés inhérentes à la géologie complexe des terrains de la Réunion. Il ne permet pas toutefois de supprimer toutes les pelles BRH (réduction des gros blocs issus du bourrage des tirs, réglage des talus) mais il en limite le nombre.

L'emploi d'explosifs n'a pas pour autant été systéma-

Photo 3

Extraction de matériaux minés
Extraction of blasted materials



tisé notamment dans les secteurs présentant de fortes épaisseurs de scories ou de limon et pour lesquels le minage est alors inutile. Le déroctage mécanique a également été privilégié dans la mesure du possible sur les secteurs situés à proximité des zones d'habitations. En définitive, la mise en œuvre de moyens d'extraction par minage et par moyens mécaniques a apporté la flexibilité nécessaire pour s'adapter au plus juste aux différentes contraintes du chantier de la Route des Tamarins.

Cette combinaison, ainsi que le pari du minage sur une île où le mode d'extraction de matériaux rocheux s'est toujours, jusqu'à présent, confronté à une omniprésente culture d'emploi du BRH, s'est avérée être un choix pertinent et une solution économique gagnante (photo 3). ■

ABSTRACT
***Earthworks on the Route
des Tamarins highway
in Reunion. A wager
on blasting***

I. Ben Fredj, H. Bertrand, S. Querne

The consortium formed by Eiffage TP, Razel and Matière arrived on the Route des Tamarins highway on Reunion Island in 2004 to perform several contracts, including the two earthworks, engineering works and restoral of communications ("TOARC") project phases 1 and 2 for section 2. For these two projects, each 7 km long, the excavation methods had to be adapted, putting aside local methods. The Stips company, a designated subcontractor partner, was responsible for performing blasting, a wager taken by the consortium at the tender design stage. The article shows the appropriateness of this choice, although, given the heterogeneity of the materials, the blasting methods had to be adapted with regard to both the meshing, depth and proportioning of explosive. This experience feedback enabled an evaluation to be performed following completion of the project.

RESUMEN ESPAÑOL
***Movimientos de tierra
en la Carretera de los
Tamarindos en la Reunión.
La apuesta por el trabajo
con explosivos***

I. Ben Fredj, H. Bertrand y S. Querne

La agrupación Eiffage TP - Razel - Matière ha llegado en la Carretera de los Tamarindos en la isla de la Reunión en 2004 para llevar a cabo varios contratos entre los cuales, los dos TOARC 1 y 2 del tramo 2. Ambos proyectos de 7 km de longitud han precisado adaptarse a los métodos de extracción haciendo abstracción de los métodos locales. La empresa Stips, asociada a título de subcontratista nombrada tenía como cargo la ejecución de las labores mineras, apuesta que la agrupación ha aceptado en el momento del estudio de la licitación. El presente artículo permite demostrar la pertinencia de la opción incluso si la heterogeneidad de los materiales ha conducido en adaptar los métodos de trabajo con explosivos tanto en la disposición en malla, profundidad y dosificación de explosivo. Se trata de una recuperación de experiencia que hace las veces de balance a raíz de la realización completa de la obra.

Des enrobés économiques en

Une tendance marquée dans la construction routière est la prise en compte de manière plus systématique de l'influence de l'activité sur l'environnement mais également sur les collaborateurs, les usagers et les riverains.

Engagée dans une démarche volontaire de développement durable, le groupe Colas a étendu ses réflexions en mettant au point la fabrication d'enrobés appelés communément tièdes. L'objectif est la diminution de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre, mais également des émissions de fumées, qui peuvent présenter une gêne pour les usagers, les riverains et le personnel d'application.

Cette démarche s'est déroulée dans un cadre strict avec de fortes contraintes sur les résultats visés, et notamment une réduction de 40 °C de la température de production et de mise en œuvre des enrobés.

Pour parvenir à ces résultats, parmi les nombreuses voies technologiques existantes, l'entreprise n'en a conservé que deux, garantissant la production d'enrobés environnementaux et économiques en énergie. Toutes les deux sont basées sur la maîtrise de la rhéologie du liant. La première est axée principalement sur la viscosité du liant et l'autre sur le procédé de fabrication.

Par le choix d'une température finale des mélanges supérieure à 100 °C, l'élimination complète de l'eau, garantit un niveau de performances des enrobés « tièdes » ainsi produits strictement équivalent à celui des solutions traditionnelles.

Par ailleurs, ces solutions sont directement applicables avec l'outil industriel existant, ce qui limite l'investissement et facilite leur développement.

La mise en œuvre de ces enrobés se déroule également avec les moyens classiques en conservant la maniabilité.

Ces solutions ont été testées depuis 3 ans avec succès dans toutes les configurations de chantier et sous trafic poids lourds intense. Elles sont suivies par les services techniques publics et le comportement est tout fait satisfaisant. Les émissions de fumées sont notablement réduites à la grande satisfaction de tous et les mesures de consommations énergétiques confirment les estimations établies dans le cadre d'analyse partielle du cycle de vie des produits. Elles démontrent une diminution de l'énergie consommée à la fabrication de 18 % au moins, et une réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre.

■ Construire durablement

La construction et l'entretien des routes ont un impact direct sur le milieu qui environne les sites de production et d'application des matériaux routiers. Dans le cas particulier des enrobés hydrocarbonés, cet impact est en partie lié à leur température. En effet, ils sont le plus souvent fabriqués aux environs de 160 à 180 °C pour produire deux effets : réduire la viscosité du bitume et éliminer l'eau de la surface des granulats. Le premier rend l'enrobé applicable, le second durable.

De plus, au cours des dernières années, en France en tout cas, on constate que les enrobés sont de plus en plus performants pour répondre aux exigences accrues des contraintes du trafic, or ils sont confectionnés avec des bitumes durs ou des bitumes polymères, liants dont la viscosité requiert une température de manipulation plus élevée.

Du point de vue environnemental, travailler à température élevée présente plusieurs inconvénients : consommation d'énergie pour chauffer granulats et bitume, émission de poussières sur le site de fabrication, émission de gaz à effet de serre sur les sites de fabrication et d'application. Ces trois indicateurs sont liés à la température et augmentent avec elle.

Depuis plusieurs années, des recherches ont été menées pour réduire la température de fabrication des enrobés bitumineux en centrale. Elles ont abouti à la mise au point de différents procédés qui autorisent un abaissement des températures d'usage d'environ 40 °C, tout en conservant la maniabilité des enrobés, ce qui assure l'uni de l'application et l'efficacité du compactage. On a déjà pu enregistrer une réduction de la quantité d'énergie nécessaire à la production des enrobés. On en attend également une réduction des émanations gazeuses.

En effet, on trouve couramment dans la littérature qu'une baisse de la température de travail de 10° à 12 °C s'accompagne d'une division par un facteur 1,5 à 2 de la production des émanations [1]. On a voulu vérifier cette affirmation en réalisant une série de mesures *in situ* afin de quantifier ce gain environnemental. Ce sont les résultats de ces études qui vont être présentés ci-après.

À cette fin, des suivis détaillés de chantiers ont été effectués. Ils incluent des contrôles de fabrication et de mise en œuvre, des relevés précis de température aux cours des différentes phases de réalisation du chantier, des vérifications des performances physico-mécaniques des enrobés et de leurs qualités d'usage. Les services techniques de l'État ont réalisé le suivi technique très poussé du chantier expérimental de la RN 157. Pour le volet environnemental, des suivis de consommation d'énergie ont été effectués. Des analyses qualitatives et quantitatives des gaz en sortie de centrale d'enrobage

environnementaux énergie

Xavier Carbonneau
Chef du service Enrobés
CST Colas

Jean-Pierre Henrat
Direction technique
Colas France

Francis Létaudin
Direction technique
Sacer

Jean-Éric Poirier
Directeur scientifique
CST Colas

ont également été réalisées. Enfin, les émissions gazeuses à la mise en œuvre ont également été évaluées afin d'apprécier le niveau d'exposition du personnel et du voisinage du chantier.

Enfin, comme ces gains environnementaux doivent être réalisés à performances techniques identiques pour les enrobés – ce sont en tout cas les contraintes implicites du marché en France –, il paraissait important de rappeler que cette réduction de la température ne pénalisait pas ces dernières [2].

■ Sécher ou ne pas sécher les granulats

Cette question se pose quand on réalise qu'une grande part de l'énergie nécessaire pour chauffer les granulats au-delà de 100 °C est consommée par la vaporisation de l'eau. Laisser 2 à 3 % d'eau dans le squelette granulaire économise certainement de l'énergie, et favorise de temps en temps la maniabilité de l'enrobé. Cependant l'utilisation de granulats encore partiellement humides a été totalement exclue des procédés décrits plus avant, car le risque encouru paraît trop important pour la qualité de l'enrobage et la durabilité de la performance des enrobés.

Par ailleurs, le gain de maniabilité apporté par l'eau résiduelle est un artifice dont la maîtrise est trop délicate eu égard aux aléas d'organisation d'un chantier ordinaire.

■ Évaluation de l'impact environnemental

Les méthodes

Pour évaluer l'impact environnemental d'un procédé, on peut mettre en œuvre trois types de méthodes. Chacune présente des avantages et des inconvénients. À ce jour aucune ne s'impose de façon évidente; à notre avis, elles doivent être considérées comme complémentaires.

L'analyse du cycle de vie

Le procédé est décomposé en unités élémentaires. La contribution de chacune d'elle est calculée à partir de données extraites d'une base commune à une profession donnée. Cette approche a l'avantage de prendre en compte la globalité du procédé, ce que l'on résume par « du berceau à la tombe » et surtout de poser comme point de départ de l'évaluation, une unité fonctionnelle à partir de laquelle des comparaisons seront possibles. Elle est normalisée, ce qui facilite l'analyse des résultats.

L'inconvénient majeur réside dans la disponibilité des données, leur fiabilité mais également leur pertinence par rapport au procédé considéré.

Cette méthode a été mise en œuvre sous une forme simplifiée. L'attention est focalisée sur la consommation d'énergie et la production des gaz à effet de serre, [3]. L'impact environnemental du chantier de la RN 157 et principalement le gain apporté par ce procédé de fabrication a été estimé à l'aide d'un logiciel interne de simulation et de calcul d'évaluation partielle du cycle de vie (EPCV). Jugés les plus importants, deux impacts environnementaux sont pris en compte : l'émission de gaz à effet de serre et la consommation énergétique. Il est en effet actuellement difficile de quantifier précisément les économies d'énergie par mesures directes au niveau de la centrale d'enrobage, compte tenu de leur configuration.

En considérant les différents paramètres du chantier, notamment les caractéristiques de la formule mise en place et les distances entre la centrale et les lieux de production des composants, on peut évaluer les gains en faveur des enrobés économes en énergie entre 16 et 20 % pour les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre au regard de la fabrication des mélanges.

Mesures en laboratoire

À partir d'une expérience dont le mode opératoire est choisi par convention, des mesures sont réalisées en laboratoire selon un protocole qui fixe les conditions de mesures. Les grandeurs mesurées sont également choisies en fonction du type d'impact à évaluer. On peut alors évaluer l'influence d'un changement de composition ou d'un changement de valeur de certains paramètres, comme la température par exemple, sur les grandeurs retenues comme pertinentes par rapport à l'impact environnemental en question.

Les paramètres opératoires maîtrisés caractérisent l'avantage de cette approche. La répétabilité des mesures peut donc être évaluée.

L'inconvénient réside dans le fait que le protocole choisi ne représente que de loin le procédé industriel. Il n'y a donc pas de protocole qui fasse aujourd'hui autorité.

De plus, exploiter les données acquises dans l'expérience conventionnelle pour les transposer au cas industriel nécessiterait de connaître toutes les lois physico-chimiques à l'œuvre dans l'un et dans l'autre, en un mot de les modéliser de façon prédictive.

Dans d'autres disciplines des méthodes ont été élaborées et mises en œuvre qui permettent ce passage du laboratoire au cas industriel. On pense au génie de procédés et au génie chimique. Il ne fait pas de doute que l'application de cette démarche au problème posé ici porterait ses fruits.

Des enrobés environnementaux économes en énergie

Photos 1 et 2

Réduire la température des enrobés c'est également réduire la gêne des riverains. L'absence de fumées, la réduction des odeurs, attestées par les fenêtres qui restent ouvertes sont des arguments de poids lorsque le chantier se déroule en ville

Reducing the asphalt temperature also means reducing nuisances for frontage residents. The absence of fumes and the attenuation of smells, as attested by windows that stay open, are important factors when projects are performed in town



Des mesures ont été réalisées selon un protocole conventionnel [4]. Elles mettent en évidence la très forte réduction de la quantité de HAP et COV émis au cours de l'essai quand on réduit la température de l'expérience. En revanche, on ne peut que comparer des bitumes entre eux sans pouvoir inférer des valeurs issues de l'expérience des données exploitables de façon quantitatives pour les chantiers. Par contre, elles ont permis de savoir quels types de molécules étaient produites par les bitumes; et ce sont ces molécules qui ont été recherchées dans les essais *in situ*.

Mesures *in situ*

Cette méthode consiste à instrumenter un chantier en prélevant des échantillons de l'air ambiant au cours d'une application réelle. On dose ensuite différentes espèces chimiques en particulier les composés polycycliques hydrocarbonés (HAP). Son principal avantage est de donner des informations sur un cas réel. Son inconvénient majeur est que les paramètres de l'expérimentation ne sont pas tous maîtrisables. L'exploitation des données recueillies peut être rendue impossible à la suite d'un simple changement des

conditions météorologiques – vent par exemple. Elle suppose également que l'on choisisse a priori les éléments à mesurer.

Le caractère aléatoire du résultat peut être pris en compte par une répétition de l'expérimentation, un nombre de fois suffisant pour qu'une approche statistique devienne fondée. Un tel programme est très lourd à mettre en œuvre, en particulier parce qu'il implique une grande discipline pour l'équipe d'application, en particulier pour les fumeurs. Les applicateurs se retrouvent transformés en technicien de laboratoire, ce qui n'est pas leur mission première. À notre connaissance une telle campagne statistique n'a pas encore été mise en œuvre.

Malgré ces difficultés c'est cette approche qui a été retenue pour six chantiers.

Résultats et discussion

Mesures à l'application

L'effet immédiat de la réduction de température des enrobés est déjà une amélioration significative de l'environnement de travail pour le personnel d'application, avec une réduction de la température ambiante au niveau du chantier et moins de fumées visibles lors de l'application. Ceci se traduit également par un impact limité sur les riverains, qui reprochent souvent à notre activité son caractère bruyant et l'odeur particulière de l'enrobé à chaud. Ainsi, les enrobés économes en énergie permettent une application sans que les fenêtres des logements à proximité du chantier ne se ferment (photos 1 et 2).

Les points de prélèvements sont les suivants : derrière la table du finisseur, au niveau du conducteur du finisseur, et sur le personnel d'application (photos 3 et 4). Malgré tout le soin apporté à cette opération, les quantités de gaz détectées sont excessivement faibles. Elles sont souvent très en deçà des seuils de détection des moyens d'analyse actuellement disponibles, y compris pour l'enrobé témoin mis en œuvre à température traditionnelle.

Pour les poussières inhalables, les niveaux sont également très inférieurs aux valeurs moyennes d'exposition professionnelle en vigueur en France, à savoir 5 mg/m³ pour 8 heures d'exposition et même au seuil de 0,5 mg/m³ recommandé par l'Association Conference Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) américaine. Pour les enrobés économes en énergie, les émissions gazeuses sont encore plus faibles et deviennent très difficilement détectables.

Pour les six chantiers expérimentés, la quantité de HAP totale est systématiquement divisée par deux. Sur les 27 composés analysés, huit seulement présentent des concentrations supérieures au seuil de quantification. Parmi ceux-ci aucun ne dépasse la valeur



Photos 3 et 4

Points de mesures des fumées et poussières inhalables et enregistrement des conditions météorologiques. À la différence du laboratoire, la situation d'un chantier réel est remplie d'aléas qui viennent complexifier l'analyse des résultats de mesures

Inhalable fume and dust measuring stations and recording of weather conditions. Unlike the laboratory, the situation of a real-world construction site entails numerous contingencies which render analysis of the measurement results more complex

limite d'exposition, la concentration trouvée est de l'ordre d'un millième de cette valeur limite.

Enfin, pour illustrer la difficulté d'interprétation de ces mesures, on notera que pour deux d'entre eux qui représentent plus de la moitié des HAP mesurés, aucun n'est produit dans une expérience conduite en laboratoire sur des enrobés au bitume pur ou modifié. Par contre, ils sont systématiquement présents dès que l'on analyse les gaz produits par l'échappement des véhicules, ceux du chantier ou ceux des usagers proches du chantier.

Mesures à la production

Des quantifications des émissions gazeuses au niveau de la centrale d'enrobage ont été réalisées sur quatre chantiers. Ces mesures sont plus classiques et elles correspondent à celles réglementaires et nécessaires pour exploiter les installations industrielles.

Elles ont été effectuées sur quatre centrales d'enrobage discontinues différentes utilisant les deux procédés de fabrication des enrobés économes en énergie. Les gaz émis sont prélevés au niveau de la cheminée du poste (photo 5).

Il est important de rappeler que pour être exploitables, ces mesures impliquent de vérifier un certain nombre de conditions :

- conditions météorologiques stables;
- combustible et régime de production identiques;
- humidité équivalente des granulats des enrobés témoin et enrobés économes en énergie.

La comparaison des résultats est alors réalisée sur la fabrication du même mélange bitumineux. Une campagne de mesures satisfaisant parfaitement à tous ces critères est donc une opération lourde et délicate.

Pour le chantier de la RN 157 décrit plus haut au paragraphe « Les méthodes », les mesures ont été menées pendant trois jours. Le sécheur a utilisé du fioul lourd. Sur le deuxième cas de chantier, les enrobés ont été fabriqués par une centrale avec sécheur fonctionnant au gaz. Les cadences de production étaient de 180 t/h pour le béton bitumineux témoin et de 175 t/h pour l'enrobé économe en énergie, avec une durée d'enregistrement supérieure à 2 heures de production.

Pour le troisième cas de chantier, le sécheur de la centrale a fonctionné au fioul à très basse teneur en soufre (TBTS) et les cadences de production ont été respectivement de 193 t/h pour le témoin et de 195 t/h pour l'enrobé économe en énergie. Des intempéries n'ont pas permis d'effectuer les mesures le même jour pour ce chantier entraînant une variation de la teneur en eau des granulats.

Enfin, dans le quatrième cas de chantier, le sécheur de la centrale a fonctionné au fioul TBTS. Les mesures ont été réalisées sur deux jours différents pour les enrobés classiques et pour les enrobés économes en énergie. Les cadences de production ont été respectivement de 90 et 110 t/h pour des formulations strictement identiques au liant près.

Ces premiers résultats mettent en évidence la faible



Photo 5

Localisation de la zone de prélèvements pour les analyses de fumées sur les centrales. Instrumentation de la cheminée du poste d'enrobage. Réduire la température de production des enrobés impose de s'intéresser aux phénomènes mis en jeu au cours des étapes de séchage et d'enrobage des granulats

Location of the sampling area for analysis of fumes on the coating plants. Instrumentation of the coating station fume stack. To reduce the asphalt production temperature, the phenomena involved in the stages of aggregate drying and coating must be investigated

Des enrobés environnementaux économes en énergie



Photo 6
Chantier en enrobés 3E réalisé à proximité du circuit automobile du Mans
Low-energy environmentally friendly asphalts project carried out near Le Mans race track

RN 157		Planche Témoin BBSG 0/10		BB économes en énergie					
				Enrobés 1		Enrobés 2		Enrobés 3	
		sens +	sens -	sens +	sens -	sens +	sens -	sens +	Sens -
P.O.	Moyenne avant travaux	7	6	8	7	5	7	6	5
	Moyenne après travaux	9	9	9	8	8	8	9	8
	Valeur mini avant travaux	5	3	6	6	3	3	5	2
	Valeur mini après travaux	8	8	7	5	6	6	8	6
	Moyenne avant / Moyenne après	7/9	6/9	8/9	7/8	5/8	7/8	6/9	5/8

Tableau II
Notes d'uni en petites longueurs d'onde avant et après travaux
Evenness scores in short wavelengths before and after works

influence des deux techniques retenues sur les gaz émis en centrale d'enrobage. La comparaison des variations relatives d'émissions de CO₂ au niveau de la cheminée de la centrale montre la réduction effective de ce gaz à effet de serre. Le tableau I détaille les variations mesurées sur les quatre centrales instrumentées. Malgré une dispersion assez importante dans les variations relatives mesurées, une réduction des émissions de CO₂ est effectivement observée avec une légère augmentation des émissions d'oxygène.

Gaz	Variation relative des émissions
CO ₂	de - 5 à -30 %
O ₂	de 0 à +14 %

Tableau I
Variations relatives de composition des gaz de cheminée des centrales d'enrobage entre enrobés témoins et enrobés économes en énergie
Relative variations in the composition of coating plant stack gases between reference asphalts and low-energy asphalts

Économie d'énergie

Sur deux des chantiers précédents, la consommation énergétique a également été enregistrée avec les matériels existant sur les centrales, qui ne sont pas encore suffisamment précis. En conséquence, ces premiers résultats sont donnés à titre indicatif mais ils montrent la nette tendance à la réduction d'énergie consommée avec ces nouveaux types d'enrobé.

Dans le cas du sécheur au gaz, pour une réduction de température de 30 °C, les consommations moyennes enregistrées ont été de 5,4 m³/h pour l'enrobé témoin et de 4,5 m³/h pour l'enrobé économe en énergie, avec des durées d'enregistrement supérieures à 2 heures et à des débits de production identiques de 180 t/h. Une réduction de la consommation de gaz de 0,9 m³/t, soit 16,5 % est mise clairement en évidence.

Dans le second cas, la consommation de fuel lourd TBTS a également été enregistrée. Une intempérie a conduit à un décalage important de teneur en eau des granulats de 1,9 % pour l'enrobé témoin et de 3,2 % pour l'enrobé économe en énergie. La cadence de production a été de 195 t/h et les mesures ont été effectuées sur la durée de production d'un tonnage sensiblement équivalent pour les deux enrobés de 230 t. Une consommation de 5,91 l/t de fioul a été relevée pour le témoin et de 5,87 l/t pour l'enrobé tiède fabriqué avec des granulats nettement plus humides.

Par une approche thermodynamique plus précise, l'estimation de l'économie de fuel lourd est de 0,7 l/t d'enrobés pour une réduction de 1 % de teneur en eau des granulats. Cette valeur permet d'estimer la consommation à teneur en eau identique au témoin de 4,96 l/t, soit une réduction de l'ordre de 16 %. De la même manière, il est possible d'estimer l'économie d'énergie liée à une réduction de 30 °C de la température de fabrication. Elle est de l'ordre de 0,7 l de fuel lourd par tonne d'enrobés.

Ces essais montrent clairement la tendance, mais également qu'il est nécessaire d'évaluer par le calcul les économies d'énergie engendrées par ces procédés de fabrication des enrobés économes en énergie.

■ Propriétés d'usage des enrobés économes en énergie

Apporter une amélioration environnementale ne peut pas se faire aujourd'hui au détriment de la qualité technique des enrobés. Il est donc important de rappeler les performances de ces enrobés environnementaux économes en énergie.

À partir des granulats de la carrière de Voutré, une formule de béton bitumineux semi-grenu 0/10 a été étudiée selon les normes en vigueur avec un bitume 35/50 et les liants des différents procédés.

L'enrobage est toujours satisfaisant. Les résultats montrent que :

- la maniabilité des enrobés est conservée à une température en laboratoire de 110 °C;
- les caractéristiques physico-mécaniques des enrobés sont équivalentes à celles d'enrobés de même formule mais fabriqués traditionnellement; en particulier on observe qu'il n'y a pas de dégradation de la résistance au désenrobage ni de celle à l'orniérage.

Par ailleurs, les mesures du module complexe et du comportement en fatigue en flexion alternée ont démontré un comportement analogue à celui des enrobés traditionnels.

■ Validation technique sur chantier (photo 6)

RN 157

La RN157 relie Le Mans à Orléans. C'est une chaussée bidirectionnelle, au profil rectiligne, comportant quelques rampes prononcées et exposées est-ouest. En 2004, elle supportait près de 7800 véhicules par jour, dont 25 % de poids lourds, soit un trafic très élevé de classe T0.

Les différents procédés et le témoin en béton bitumineux semi-grenu 0/10 ont été mis en œuvre sur une largeur moyenne de chaussée de 7,60 m et sur une longueur d'environ 500 m pour chaque procédé. L'épaisseur d'enrobé est de 6 cm, soit 140 kg/m².

L'enrobé témoin au bitume 35/50 utilise les granulats de la carrière Voutré. Il présente les propriétés rapportées dans le tableau I. Les enrobés économes en énergie ont été fabriqués suivant cette formule avec les mêmes granulats et leur liant spécifique.

Dans les vis du finisseur, les températures des enrobés économes en énergie sont inférieures de 40 à 45 °C à celles des enrobés témoins. La température de ces enrobés est de l'ordre de 120 °C. La maniabilité est conservée et le compactage est satisfaisant; en effet on constate que les teneurs en vides, de l'ordre de 6 % sont identiques, voire plus faibles, que celles mesurées

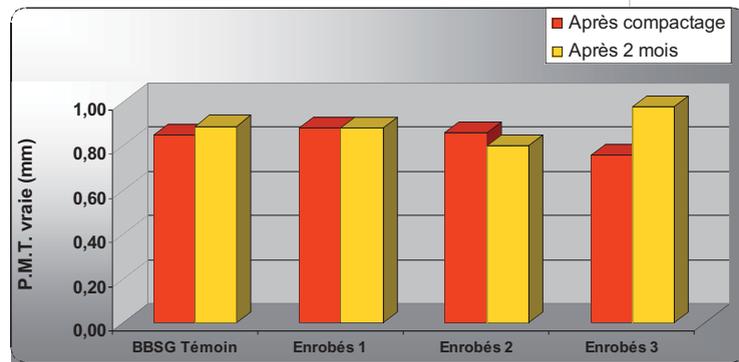


Figure 1

Évolution de la PMT (profondeur moyenne de texture) vraie (en millimètres) pour les trois procédés testés

Evolution of the real MTD (mean texture depth) (in millimetres) for the three processes tested

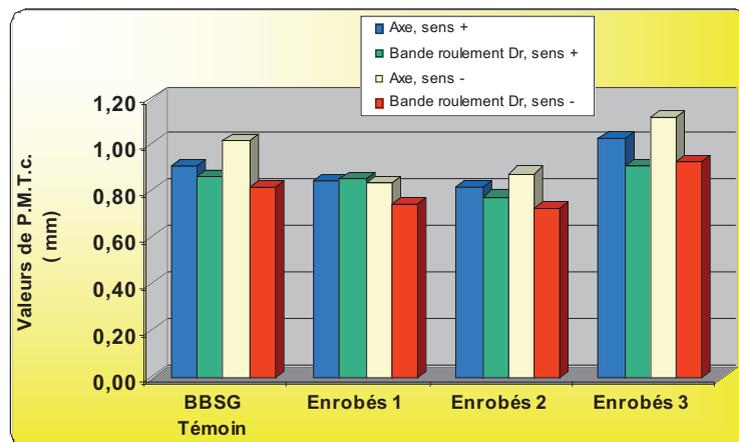


Figure 2

Valeur de PMTc après 2 mois pour les différents enrobés testés

Value of MTDc after 2 months for the various asphalts tested

sur le témoin. Cette facilité de mise en œuvre est confirmée par le bon niveau de l'uni longitudinal, comme l'indiquent les notes du tableau II, uni évalué par l'analyseur de profil en long (APL NBO) du LRPC d'Angers.

Caractéristiques de la macrotexture, les mesures de profondeur moyenne de texture (PMT vraie) sont données en fonction du temps (figure 1). Le niveau de macrotexture est élevé pour ce type de formule d'enrobés et il est identique quel que soit l'enrobé considéré. L'évolution entre la fin du compactage et après deux mois de trafic est peu sensible.

Calculées à partir des mesures du rugo-laser, les valeurs de PMTc confirment un niveau élevé et surtout une bonne homogénéité de la macrotexture quels que soient le sens de circulation et la position de la mesure (axe ou bande de roulement) et quelle que soit la section (figure 2).

Des enrobés environnementaux économes en énergie

Figure 3

CFL (coefficient de frottement longitudinal) après 17 mois de trafic (moyenne des deux sens)
 BFC (braking force coefficient) after 17 months of traffic (mean of both directions)

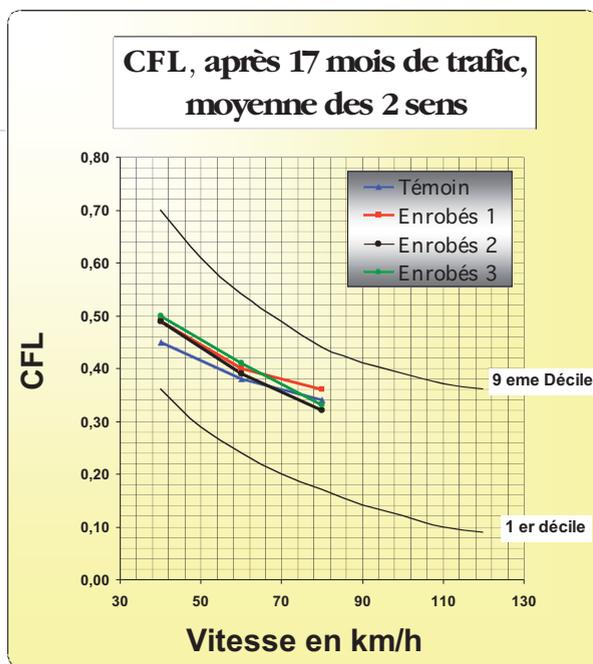


Photo 7

La qualité technique des enrobés 3E est identique à celle des enrobés fabriqués conventionnellement. Le gain environnemental ne peut pas encore s'accompagner d'une réduction des propriétés d'usage. Le client souhaite être satisfait sur les deux aspects de la prestation

The technical quality of low-energy environmentally friendly asphalts is identical to that of conventionally produced asphalts. The environmental gain cannot yet be accompanied by a reduction in properties of use. The customer wants to be satisfied regarding both aspects of the process



Mesurés sur l'ensemble du chantier après 17 mois de circulation lourde, les coefficients de frottement longitudinal (CFL) se situent dans le milieu du fuseau national tous revêtements, représentatifs des bétons bitumineux semi-grenus 0/10. À faible vitesse, les enrobés économes en énergie présentent la même valeur, un peu supérieure à celle de l'enrobé témoin (figure 3). À 80 km/h, ils possèdent les CFL les plus élevés.

Le niveau d'adhérence est donc satisfaisant pour ce type d'enrobés, largement équivalent au témoin sous trafic élevé.

À noter également l'absence de toute déformation du profil en travers, après deux étés chauds et malgré un profil en long présentant de fortes rampes exposées au soleil et soumises à un trafic poids lourds intense.

Pour ce bon comportement d'ensemble et au vu des caractéristiques des enrobés économes en énergie identiques (voire supérieures à celles d'un enrobé

témoin), et de leur pérennité après plus de 17 mois de circulation intense, le Sétra a attribué un certificat de reconnaissance de l'innovation pour le compte de la Direction générale des routes.

Autres cas d'applications

Le recyclage d'agrégats dans les enrobés économes en énergie a été mis en œuvre aux États-Unis. Environ 1000 t d'enrobés économes en énergie composés de 20 % d'agrégats d'enrobés ont été fabriquées à 115 °C, appliqués sur une section de la Route 80, et compactées entre 80 et 110 °C sans difficulté. Dans ce cas, les effets liés à l'économie de la ressource en granulats et en bitume sont cumulés avec celui de la réduction de l'énergie résultant du procédé de fabrication.

Plusieurs chantiers d'enrobés en couche mince ou très mince ont été réalisés avec succès en 2006 à Paris, en particulier pour revêtir des couloirs de bus.

Pour ces dernières réalisations, les liants modifiés ont été formulés pour assurer la fabrication et la mise en œuvre à température réduite à environ 125 °C. La surface des revêtements représente plus de 15000 m². Ils confirment ainsi la possibilité d'étendre le procédé à des formulations à base de liants modifiés par des élastomères.

Toutes les études menées en laboratoire et l'ensemble des caractéristiques mesurées sur site démontrent systématiquement l'équivalence de performances entre les enrobés témoins et les enrobés économes en énergie (photo 7).

Conclusion

Basés sur la maîtrise de la rhéologie du liant utilisé et du processus de fabrication d'enrobage, en respectant les règles de l'art, les procédés mis au point ont conduit à une réduction importante et effective de 40 à 45 °C des températures de fabrication et de mise en œuvre des enrobés (photo 8). Les performances physico-mécaniques et les caractéristiques d'usage des enrobés dit tièdes, mais en réalité économes en énergie, sont équivalentes à celles des enrobés traditionnels, voire même souvent améliorées.

Le suivi détaillé du chantier de la RN157 a montré clairement ces gains de température pour les différents procédés testés. Le niveau de compacité atteint, l'uni et l'adhérence de ces enrobés sous fort trafic poids lourds et après deux étés chauds prouvent que ces procédés conduisent à l'usage attendu.

Ils sont applicables aux enrobés économes en énergie avec recyclage d'agrégats mais également aux différents types d'enrobés minces et très minces aux liants modifiés avec les mêmes avantages et succès de réalisation.



Photo 8

Sans commentaires !

No comment !

Au niveau de l'aspect environnemental, l'emploi de ces enrobés entraîne une forte diminution des émissions gazeuses et notamment des gaz à effet de serre de l'ordre de 18 à 20 %, en raison de la baisse de consommation énergétique prouvée.

Sur tous les chantiers d'application de ces enrobés, les émissions gazeuses sont également abaissées au point de devenir pratiquement imperceptibles et sous la limite de détection des appareils de mesure.

La pertinence du choix de ces techniques d'enrobés économes en énergie est une nouvelle fois démontrée, tant au niveau écologique global par la diminution de l'énergie et de production des gaz à effet de serre, qu'environnemental proche en améliorant davantage les conditions de travail et de sécurité des personnels et des usagers. ■

Références

- [1] H.-C. Bran, P.-C. de Groot « A laboratory rig for studying aspects of workers exposure to bitumen fumes », *American Industrial Hygiene Association Journal*, n° 60 (1999) pages 182-190.
- [2] X. Carbonneau, J.-P. Henrat, F. Létaudin, « Enrobés 3E de Colas, une réponse sûre à la problématique des enrobés dits « tièdes » », *RGRA* n° 849, juin 2006, pages 70-75.
- [3] M. Chappat, J. Bilal, « La route écologique du futur, analyse du cycle de vie ». Septembre 2003.
- [4] J.-T. Kurek, A.-J. Kriech, H.-L. Wissel, L.-V. Osborn and G.-R. Blackburn : Laboratory generation and Evaluation of paving asphalt fumes, *T.R.R.*, 1661, 35-40, 1999.

ABSTRACT Low-energy environmentally friendly asphalts

X. Carbonneau, J.-P. Henrat, Fr. Létaudin,
J.-E. Poirier

As part of a proactive sustainable development policy, the firm Colas has developed the production of asphalts commonly called warm mix asphalts. The objective is to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions, but also fume emissions. This procedure was carried out within a strict framework, with major constraints regarding the targeted results, and in particular a 40 °C reduction in the asphalt production and application temperature. Of the numerous existing technological processes, the firm kept only two, both based on control of the binder rheology. The first focuses primarily on the binder's viscosity, and the other on the production process.

Over the last three years, these solutions have been tested successfully in all project configurations and under intense commercial vehicle traffic. They are monitored by the public engineering departments and their performance is thoroughly satisfactory. Fume emissions are also greatly reduced.

These experiments show a reduction of at least 18 % in energy consumed for manufacture and a 20 % reduction in greenhouse gas emissions.

RESUMEN ESPAÑOL Aglomerados medio-ambientales que permiten ahorrar energía

X. Carbonneau, J.-P. Henrat, Fr. Létaudin
y J.-E. Poirier

Comprometida en un enfoque voluntario de desarrollo sostenible, la empresa Colas ha elaborado la fabricación de aglomerados, que reciben la denominación común de templados. El objetivo consiste en la reducción del consumo energético y de las emisiones de gas de efecto invernadero, así como también la emisión de humo. Este enfoque se ha desarrollado en un marco estricto con importantes imperativos sobre los resultados vislumbrados y, fundamentalmente, una disminución de 40 °C de la temperatura de producción y de puesta en aplicación de los aglomerados. Entre las numerosas vías tecnológicas existentes, la empresa únicamente ha conservado dos soluciones, que se fundan cada una sobre el dominio de la reología del ligante y la segunda en el procedimiento de fabricación.

Estas soluciones fueron sometidas a prueba durante 3 años con éxito en todas las configuraciones de obra y bajo tráfico intenso de camiones pesados. Estas soluciones van controladas por parte de los servicios técnicos públicos y el comportamiento es totalmente satisfactorio. Las emisiones de humo también se reducen de forma significativa.

Estas experiencias vienen a demostrar una disminución de la energía consumida para la fabricación de un 18 % como mínimo y una reducción del 20 % de las emisiones de gas de efecto invernadero.

Une centrale d'enrobage à très fort taux d'enrobés

La prise en compte de nouvelles stratégies d'entretien des chaussées sur le réseau autoroutier français utilisant des agrégats d'enrobés issus de la déconstruction a conduit le groupe Eiffage Travaux Publics à concevoir un nouveau matériel adapté, tout en respectant les règles environnementales. Un nouveau concept de poste d'enrobage hypermobile capable de recycler des agrégats d'enrobés à très fort taux a été construit en partenariat avec la société Bennighoven GmbH. La première expérience chantier a été réalisée sur le réseau Sanef, sur une section de l'autoroute A2 à Arras (62). Les travaux ont consisté à reconstruire la voie lente de la chaussée en enrobé à module élevé (EME) à 50 % recyclé par substitution de l'enrobé bitumineux en place.

Les nouvelles stratégies d'entretien des revêtements bitumineux des chaussées routières et autoroutières intègrent des pratiques qui favorisent l'utilisation des matériaux recyclés pour économiser les ressources naturelles.

L'emploi des agrégats d'enrobés en technique routière est conditionné par le respect d'exigences techniques et environnementales. Leur utilisation nécessite une caractérisation physique, chimique et environnementale complétée par une connaissance exacte de la provenance et des quantités disponibles d'agrégats. Dans les techniques de réutilisation des matériaux enrobés, on distingue le recyclage dans un cycle de fabrication à chaud et le retraitement dans le cas de réutilisation à froid.

Dans cet article, il sera développé uniquement la technique de recyclage en centrale à chaud qui recherchera à concilier les caractéristiques générales des agrégats d'enrobés¹ avec celles exigées dans les produits fabriqués destinés aux couches de chaussées pour tous les trafics.

L'ensemble du réseau routier actuel représente un gisement potentiel d'agrégats d'enrobés estimé à plusieurs millions de tonnes. Selon l'enquête lancée par l'Union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF), le tonnage actuel des agrégats d'enrobés issus du fraisage

1. Les agrégats d'enrobés sont des matériaux granulaires provenant du fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux ainsi que des surplus de centrales d'enrobage, susceptibles d'être recyclés en centrale au sein d'enrobés de recyclage à chaud.



Photo 1

Vue d'ensemble de la centrale mobile HPR
General view of the HPR mobile coating plant

des couches de chaussées dus aux politiques d'entretien est valorisé à 50 % par recyclage et retraitement. Dans le cas du réseau autoroutier, les sociétés concessionnaires sont très sensibles à cette démarche et ont adopté une politique d'entretien préventif de leurs chaussées, différente de la solution classique de rechargement sur toute la largeur. Leur choix de la technique d'entretien est établi à partir d'auscultations périodiques et se traduit par un renforcement structurel ciblé de la voie lente qui est la plus dégradée. La solution retenue consiste à raboter la voie lente sur une épaisseur définie par le dimensionnement et à substituer cette épaisseur de matériaux par un enrobé à module élevé (EME). Pour certaines sociétés d'autoroutes, comme Sanef où cette démarche est inscrite dans sa politique d'entretien des chaussées, la technique va plus loin et est innovante dans le fait où l'EME est formulé avec une quantité importante d'enrobés recyclés issus de la déconstruction de la voie lente.

Cette technique de recyclage à fort taux nécessite une caractérisation très précise de l'agrégat d'enrobés, du liant résiduel et des performances du mélange recomposé de granulats neufs, de fraisats et de liant d'apport adopté.

Dans cette technique d'entretien retenue, on se situe dans une configuration de chantier en circuit fermé où l'enrobé fraisé est recyclé sur le site même, garantissant ainsi la provenance et les caractéristiques de l'agrégat permettant d'envisager un recyclage à très fort taux (> ou égal à 50 %).

Le recyclage à très fort taux nécessite un processus de fabrication spécifique et se différencie du recyclage à faible taux réalisé dans les centrales d'enrobage classiques où l'apport d'agrégats est réchauffé au contact d'un granulats neuf surchauffé. Dans ce cas, la température de surchauffe peut s'élever à plus de 50 °C par rap-

mobile pour le recyclage

Claude Le Noan
Direction Matériel
Eiffage Travaux Publics

Christian Alvarez
Direction Technique
Grands Travaux
Eiffage Travaux Publics

Dominique Bonneau
Direction Technique
Eiffage Travaux Publics

Alain Sainton
Expert Chaussées
Groupe Sanef

port à la température habituelle d'un granulat naturel occasionnant, de ce fait, un second choc thermique sur le liant résiduel vieilli dont les effets sur la modification chimique sont encore mal connus.

Un process de fabrication spécifique pour le recyclage à très fort taux est recherché pour optimiser l'enrobage de l'agrégat en maîtrisant les températures de chauffe des composants, de manière à ne pas dégrader les caractéristiques du liant.

Par ailleurs, sur le plan environnemental, la fabrication d'enrobés avec des agrégats d'enrobés peut constituer une source de pollution à la réutilisation à chaud en centrale lorsque les agrégats d'enrobés sont exposés à des températures trop élevées.

Partant de ce constat, en tenant compte de l'évolution des techniques recherchées par les maîtres d'ouvrage et en respectant la réglementation environnementale, l'entreprise a mené une réflexion sur un nouveau poste d'enrobage, d'une grande mobilité, permettant d'atteindre des objectifs ambitieux pour répondre à des enjeux précédemment identifiés. Le principe d'enrobage a été complètement repensé afin d'optimiser les caractéristiques respectives de chaque composant et le potentiel énergétique de l'agrégat d'enrobés.

■ Nouveau prototype de poste mobile d'enrobage à recyclage à très fort taux

L'ensemble des postes présents sur le territoire français, en dehors des postes particuliers comme le poste Astec du groupe Eiffage Travaux Publics, capable de recycler

des agrégats d'enrobés, utilise le principe d'introduction à froid des agrégats dans un malaxeur (technique discontinue) ou dans un tambour enrobeur (technique continue). Ces procédés ont une limite en terme de taux de recyclage qui se situe à 50 % des composants d'une formule d'enrobés, du fait que les calories nécessaires à la production d'un enrobé chaud sont apportées uniquement par les granulats neufs.

L'originalité du procédé de fabrication élaboré par Eiffage Travaux Publics, en partenariat avec le constructeur allemand Benninghoven GmbH, consiste à chauffer les granulats par un tambour sécheur et, en parallèle, d'ajouter un second tambour sécheur, dédié au chauffage des agrégats d'enrobés. Cette technique est connue en Europe du Nord (Pays-Bas, Allemagne) sur des postes d'enrobage discontinu.

C'est la première fois qu'un outil de production continu et ultra-mobile est conçu en utilisant le procédé de chauffage des agrégats d'enrobés à travers un tambour dédié (photo 1).

Description

Étape 1 : séchage des matériaux

Les granulats sont chargés dans des doseurs (repère Mat, figure 1) et transitent à travers un tambour de séchage à contre-courant.

Les agrégats d'enrobés (repère RAP) effectuent un premier passage au travers d'un décohesionneur pour homogénéiser et réduire la granulométrie, permettant ainsi d'optimiser l'échange thermique; ils transitent ensuite au travers d'un tambour de séchage en flux parallèle.

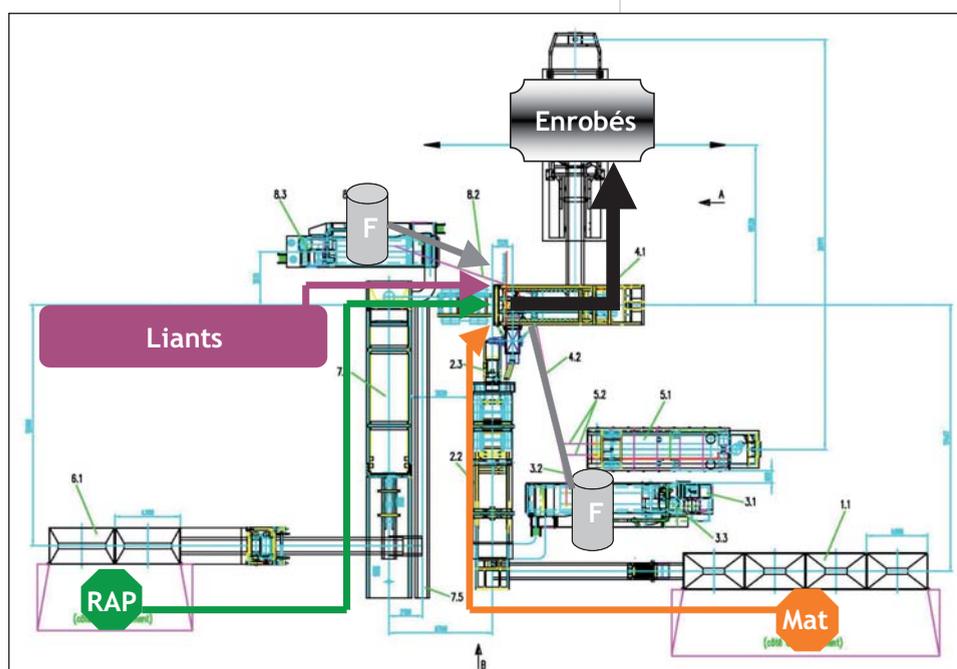


Figure 1
Principe de fonctionnement du poste HPR
Operating principle of the HPR station

Une centrale d'enrobage mobile pour le recyclage à très fort taux d'enrobés



Étape 2 : Enrobage

Les deux circuits de séchage déversent les matériaux chauds dans le malaxeur continu (malaxeur à deux arbres parallèles).

Le bitume (repère *Liants*) et les fillers (repère *F*) sont injectés dans le malaxeur.

Photo 2

Vue des deux tambours sécheurs
View of the two dryer drums



Photo 3

Vue des deux ensembles de trémies de granulats et d'agrégats
View of the two sets of aggregate bins



Fonctionnement et performances

La technique de séchage d'agrégats d'enrobés, avec une température maîtrisée entre 120 °C et 130 °C, permet :

- d'atténuer le choc thermique lors du mélange avec les granulats;
- d'apporter les calories nécessaires au bilan thermique du mélange granulaire.

Cette configuration permet alors de fabriquer des enrobés à très fort taux pouvant envisager un taux supérieur à 65 % de recyclés.

La puissance du malaxeur et sa taille exceptionnelle associées aux deux tambours assurant chacun 200 t/h ont permis d'atteindre les débits suivants :

- 400 t/h sur des formules à 50 % d'agrégats de recyclés;
- 300 t/h sur des formules à 65 %.

La conception originale de ce poste, fondée sur deux tambours sécheurs raccordés sur deux filtres distincts permet d'optimiser la mobilité du poste (filtres au gabarit routier) et surtout d'améliorer le pilotage du poste d'enrobage.

Paradoxalement, ces deux ensembles de séchage séparés, et pilotés par le même logiciel de production, présentent une plus grande facilité et flexibilité de conduite. Par ailleurs, le taux d'humidité des granulats neufs ou des agrégats n'a pas d'influence directe sur le fonctionnement de l'un sur l'autre et vice versa (photos 2 et 3).

Ces détails cumulés permettent de mieux maîtriser les échanges thermiques et, de ce fait, de gagner encore un peu plus sur la régularité de la température et de l'homogénéité de l'enrobé.

■ Première expérience chantier : fabrication d'un EME à 50 % et à 65 % de recyclés sur l'A26

Présentation des travaux

Dans le cadre des travaux d'entretien de la chaussée de l'autoroute A26 à Arras (62) sur le réseau Sanef, programmés sur les districts d'Arras et du Haut de l'Artois, dans les deux sens entre les PR 93 et PR 109, les travaux suivants ont été exécutés à partir de juillet 2007 :

- réfection de la voie lente en EME 0/20 par substitution sur une épaisseur de 12 cm et une largeur de 3,80 m;
- réalisation en pleine largeur de la couche de roulement en BTM 0/6 sur une épaisseur de 2,5 cm.

Pour la formulation de l'EME 0/20 la variante proposée par l'entreprise – recyclage à très fort taux (50 %) des matériaux issus du rabotage de la voie lente – a été retenue par le maître d'ouvrage.

En complément, une expérimentation avec un taux de recyclage à 65 % a été convenue entre les différents partis.

Les études de formulation

La procédure d'identification des matériaux détaillée dans le préambule a été appliquée et pendant la période de préparation, des prélèvements par rabotage ont été faits dans l'emprise du chantier sur la voie lente.

Les différentes caractérisations des matériaux et du liant des agrégats d'enrobés ont été réalisées par le Laboratoire central de Ciry Salsogne.

Elles ont conduit au choix pour les matériaux d'apport

N° d'échantillon	PY-07-0168
Teneur en liant (ppc)	6.00 ppc (ou 5.66 %)
Pénétrabilité à 25 °C	21
Point de ramollissement (°C)	61,6
% de passant à :	
6.3 mm	75%
2 mm	44,6%
0.063 mm	11,1%

Tableau I

Caractéristiques de l'agrégat d'enrobé BBSG, référencé P2
Characteristics of the semi-coarse asphaltic concrete aggregate, referenced P2

Pénétrabilité à 25 °C	19.5	15-25
Point de ramollissement (°C)	66.1	64-72

Tableau II

Caractéristiques du liant global (15/25 apport + recyclé) de l'EME, avec le bitume résiduel de l'agrégat BBSG P2 recyclé à hauteur de 50 % dans le mélange

Characteristics of the total binder (15/25 filler + recycled) of the high modulus asphalt, with the residual asphalt of the P2 semi-coarse asphaltic concrete aggregate 50 % recycled in the mix

de granulats calcaires en provenance de la carrière CCB et pour le liant d'un bitume de grade 15/25 fourni par la raffinerie de Dunkerque.

L'agrégat d'enrobé BBSG, référencé P2, a été fourni par le demandeur et provient du site de l'autoroute A26. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau I.

Les caractéristiques du liant global (15/25 apport + recyclé) de l'EME, avec le bitume résiduel de l'agrégat BBSG P2 sont reportées dans le tableau II pour un taux de recyclage de 50 % et dans le tableau III pour un taux de 65 %.

Ces valeurs sont caractéristiques d'un liant de grade 15/25.

Les études de formulation de niveau 3 ont été menées pour les deux formules retenues : les résultats obtenus sont conformes aux spécifications du marché.

Les tableaux IV et V présentent les principaux résultats des études.

Organisation du chantier avec l'emploi des agrégats d'enrobés

La qualité des matériaux fabriqués est directement liée à la maîtrise de la fourniture de l'agrégat d'enrobés. Pour assurer une conformité de la granulométrie et de la teneur en liant du mélange, une procédure particulière d'identification a été mise en place :

Pénétrabilité à 25 °C	20.0	15-25
Point de ramollissement (°C)	64.5	64-72

Tableau III

Caractéristiques du liant global (15/25 apport + recyclé) de l'EME, avec le bitume résiduel de l'agrégat BBSG P2 recyclé à hauteur de 65 % dans le mélange

Characteristics of the total binder (15/25 filler + recycled) of the high modulus asphalt, with the residual asphalt of the P2 semi-coarse asphaltic concrete aggregate 65 % recycled in the mix

	Formule E07.053 : EME 0/20 – classe 2			Spécifications NF P 98-140
Composition de la formule	10/20 CCB	29,0 %	Norme EN	28,3 %
	6/10 CCB	13,0 %		12,7 %
	0/4 CCB	7,0 %		6,8 %
	0/10 Agrégat BBSG P2	50,0 %		48,7 %
	filler Haut-Lieu	1,0 %		1,0 %
	Bitume 15/25 Exxon Mobil	2,65 ppc		2,6 %
Liant total dans le mélange	5,65 ppc		5,35%	
Recomposition granulométrique	Passant à 6,3 mm	48,8 %		
	Passant à 2 mm	29,3 %		
	Passant à 0,063 mm	7,5 %		
	Module de richesse K	3,49		≥ 3,4
	MVRg	2,725 Mg/m ³		-
	ρ _m	2,503 Mg/m ³		-
Maniabilité PCG (NF EN 12697-31)	10 girations	15,2 % de vides		- < 6,0 %
	120 girations	3,8 % de vides		
Essai Duriez (NF P 98-251-1)	Rapport r/R	0,87		≥ 0,75
Orniérage (NF EN 12697-22)	Ornière à 30 000 cycles (60 °C)	3,80%		≤ 7,5%
Module (NF EN 12697-26)	Module sécant (15 °C et 0,02 s)	14 100 MPa		≥ 14 000 MPa

- constitution de lots par zone de rabotage et par jour de réutilisation ;
- homogénéisation par brassage du stock ;
- caractérisation de la granulométrie et de la teneur en bitume résiduel, toutes les 600 t, avec ajustement en fonction des résultats des pourcentages de matériaux d'apport et de la quantité de liant.

La synthèse des contrôles respecte les spécifications détaillées dans la norme XP P 98-135 de décembre 2001 relative à la caractérisation des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale.

Le chantier

Après les essais préalables de mise en route du poste Benninghoven HPR, réalisés par les équipes des Grands Travaux d'Eiffage Travaux Publics, 18000 t de matériaux enrobés type EME 0/20 à 50 % d'agrégats

Tableau IV

Formule EME à 50 % d'agrégats d'enrobés
High modulus asphalt mix design with 50 % asphalt aggregates

Une centrale d'enrobage mobile pour le recyclage à très fort taux d'enrobés

Tableau V
Formule EME à 65 %
d'agrégats d'enrobés
*High modulus asphalt mix
design with 65 % asphalt
aggregates*

	Formule E07.100 : EME 0/20 – classe 2			Spécifications NF P 98-140
Composition de la formule	10/20 CCB 6/10 CCB 0/10 Agrégat BBSG P2 Bitume 15/25 Exxon Mobil Liant total dans le mélange	29,0 % 6,0 % 65,0 % 1,70 ppc 5,60 ppc	Norme EN 28,5 % 5,9 % 63,9 % 1,7 % 5,30 %	
Recomposition granulométrique	Passant à 6,3 mm Passant à 2 mm Passant à 0,063 mm	50,7 % 29,5 % 7,5 %		
	Module de richesse K	3,48		≥ 3,4
	MVRg	2,741 Mg/m ²		-
	ρ _m	2,517 Mg/m ²		-
Maniabilité PCG (NF EN 12697-31)	10 girations 120 girations	14,0 % de vides 3,1 % de vides		< 6,0 %
Essai Duriez (NF P 98-251-1)	Rapport r/R	0,87		≥ 0,75
Orniérage (NF EN 12697-22)	Ornière à 30 000 cycles (60 °C)	3,50 %		≤ 7,5 %



Photo 4
Vue de l'atelier de mise
en œuvre
*View of the processing
equipment*



d'enrobés, et 2600 t d'EME à 65 % d'agrégats d'enrobés ont été fabriquées à une cadence moyenne supérieure à 250 t/h sur l'aire de Vitry-en-Artois.

La mise en œuvre a été assurée par un finisseur Vögele 2500 et le compactage des enrobés par deux Hamm HD 130 avec les modalités suivantes : quatre passes vibrées et quatre passes en lisse (photos 4 et 5).

Les contrôles suivants ont été effectués :

- contrôle de fabrication : 46 analyses granulométriques et de teneurs en liant ont été réalisées et sont conformes aux spécifications du CCTP;
- caractérisation du liant résiduel sur prélèvement

chantier : les résultats (Péné/TBA) obtenus sur le liant résiduel du mélange final ont été conformes à l'approche de l'étude;

- contrôles de mise en œuvre :
 - > % de vides : 169 mesures ont été relevées; les résultats montrent que 90 % des points sont compris entre 3 et 6 % avec une moyenne de 3,9 %, conformes aux spécifications du CCTP,
 - > macrotexture : la PMT moyenne est de 0,98 pour 298 mesures sur l'EME. Cette exigence spécifique a été demandée dans le cadre de ce marché afin de garantir une macrotexture suffisante de manière à assurer une circulation provisoire avant réalisation du BBTM.

■ Conclusion

Cette première production d'EME à très fort taux de recyclage sur chantier autoroutier valide l'outil de fabrication et le nouveau concept d'enrobage à double circuit de séchage dans une centrale hypermobile.

Les résultats obtenus sur les premières fabrications sont satisfaisants et encourageants pour les chantiers futurs et à venir. Les perspectives, en terme de recyclage avec ce nouveau poste, sont multiples et permettent à l'entreprise d'envisager de nouvelles propositions techniques à très fort taux de recyclage à chaud pour l'entretien des couches de chaussées pour tous les trafics.

Sur le plan écologique, ce nouveau poste d'enrobage permet une meilleure maîtrise de la température des granulats neufs et des agrégats d'enrobés contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz polluant l'atmosphère.



Photo 5

Vue de l'atelier de compactage de l'EME en voie lente
View of the equipment for high modulus asphalt compacting in the slow lane

Enfin, cette démarche répond parfaitement aux attentes du maître d'ouvrage, Sanef, visant à recycler et valoriser au maximum les matériaux de chaussées existants en minimisant d'une part, l'apport de composants neufs (granulats de carrières et bitumes de raffineries), et en réduisant d'autre part le délai d'exécution des chantiers d'entretien de chaussées sous circulation et la gêne occasionnée aux clients pendant les travaux. ■

ABSTRACT

Mobile asphalt plant for recycling with a very high asphalt content

Cl. Le Noan, Ch. Alvarez, D. Bonneau,
A. Sainton

To allow for new strategies for pavement maintenance on the French motorway network using asphalt aggregates coming from deconstruction, the Eiffage Travaux Publics group has designed appropriate new equipment, while complying with environmental rules. A new hypermobile coating station concept capable of recycling aggregates with a very high asphalt content has been built in partnership with Bennighoven GmbH.

The first construction site experiment was carried out on the Sanef network, on a section of the A2 motorway at Arras. The work involved restoring the slow lane of the roadway with high modulus asphalt 50 % recycled by substitution with the asphalt mix in place.

RESUMEN ESPAÑOL

Central de revestimiento móvil para al reciclaje con muy elevado porcentaje de aglomerados

Cl. Le Noan, Ch. Alvarez, D. Bonneau
y A. Sainton

La integración de nuevas estrategias de conservación de los pavimentos en la red de autopistas de Francia que utilizan diversos agregados de aglomerados procedentes de la deconstrucción ha conducido el grupo Eiffage Travaux Publics en diseñar un nuevo material adaptado, al mismo tiempo que respeta las reglas medioambientales. Un nuevo concepto de terminal de revestimiento hipermóvil capaz de reciclar agregados de aglomerados con un elevado porcentaje fue construido en colaboración con la empresa Bennighoven GmbH.

La primera experiencia obra se ha realizado en la red Sanef, en un tramo de la autopista A2 en Arras (62). Los trabajos han consistido en reconstruir el carril lento del pavimento con aglomerado de modulo elevado (EME) a 50 % reciclado por sustitución del aglomerado bituminoso existente.