

Routes

Ciments • Liants hydrauliques routiers • Bétons
Travaux et équipements routiers - Terrassements - Aménagements urbains - Aéroports



DOCUMENTATION TECHNIQUE

Le béton dans les travaux
souterrains

LE POINT SUR

Structures et revêtements
pour tramways : état
des lieux

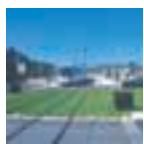
CHANTIER

Villeurbanne : moquette
BHP, premier chantier test

Sommaire

2 EDITORIAL

3-5 LE POINT SUR



Structures et revêtements pour tramways : état des lieux

6 SCIENCES ET TECHNIQUES



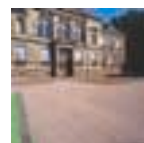
La remise en circulation des chaussées en béton

7-14 DOCUMENTATION TECHNIQUE



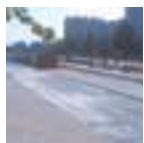
Le béton dans les travaux souterrains

15 REFERENCE



Bouxwiller Pavés rustiques en béton

16-17 CHANTIER



Ville de Reims Égayer un quartier défavorisé

18-19 CHANTIER



Villeurbanne Moquette BHP, premier chantier test

20 LE SAVIEZ-VOUS ?

En couverture : la plateforme du tramway de Strasbourg, revêtue de dalles en béton conçues spécifiquement pour l'opération.

Editorial

Le Congrès Mondial de la Route

Le XXII^e Congrès Mondial de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route "AIPCR", qui a eu lieu du 19 au 25 octobre 2003 à Durban (Afrique du sud), a été le premier à se tenir en Afrique Australe.

Faisant suite à celui de Kuala Lumpur (Malaisie, 1999), ce Congrès a rassemblé environ 2 500 participants et a été l'occasion de rencontres au plus haut niveau et d'échanges dans les domaines de la route et du transport routier.

L'ensemble des travaux présentés à Durban a été préparé par vingt Comités Techniques qui, durant quatre années, ont œuvré dans le cadre d'un plan mis en place en l'an 2000 et comprenant cinq thèmes stratégiques.

La session des Ministres, axée sur le thème du Développement Durable, a abordé les questions

de la gouvernance ("Qu'est ce qu'une bonne gouvernance ?") et de l'investissement des projets d'infrastructures ("Comment mobiliser le secteur privé qui détient les ressources et les compétences ?").

Pour sa part, le ministre français de l'Équipement, Monsieur Gilles de ROBIEN, a saisi l'occasion pour promouvoir l'expérience française en matière de concession d'autoroutes à péage, avec toutes les variantes possibles (public, privé). Il a souligné, en outre, que compte tenu des délais octroyés (50 à 70 ans), ce genre de concession nécessite l'existence d'un cadre juridique et politique stable.

Il a enfin annoncé que le XXIII^e Congrès Mondial de la Route se tiendra à Paris en 2007, pour célébrer le Centenaire, sur le lieu où s'est déroulée la première édition.

Joseph ABDO

CIM *Béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS



7, Place de la Défense
92974 Paris-la-Défense cedex

Tél. : 01 55 23 01 00
Fax : 01 55 23 01 10

Email : centrinfo@cim beton.net
Site Internet : www.infociments.fr

Pour tous renseignements concernant les articles de la revue, contacter Cimbéton.

Directeur de la publication : Anne Bernard-Gély
Directeur de la rédaction, coordinateur des reportages et rédacteur de la rubrique *Sciences et techniques* : Joseph Abdo - Reportages, rédaction et photos : Romualda Holak, Jacques Mandorla, Gilles Nilsen - Yann Kerveno - Documentation technique : Patrick Guiraud - Réalisation : Ilot Trésor, 83 rue Chardon Lagache, 75016 Paris - Email : mandorla@club-internet.fr - Conception maquette : Dorothee Picard - Dépôt légal : 4^e trimestre 2003 - ISSN 1161 - 2053 1994

Le giratoire Schœlcher à Nantes : une association de béton balayé et de béton désactivé, ainsi que des joints de dilatation en résine polyuréthane autolissante, une innovation de SCE, maître d'œuvre général.



Structures et revêtements pour tramways : état des lieux

Esthétique, durable, résistant, le béton accompagne depuis l'origine le renouveau des tramways, grâce à une palette de solutions répondant aux contraintes spécifiques de ce transport collectif d'avenir.

Bordeaux, Clermont-Ferrand, Caen, Grenoble, Lille, Lyon, Marseille, Montpellier, Nancy, Nantes, Nice, Orléans, Paris, Rouen, Saint Etienne, Strasbourg... Quelle agglomération n'a pas développé son réseau de tramway ou projeté de le faire prochainement ? Emblématique du renouveau urbain de collectivités souhaitant tourner la page du tout-voiture, ce mode de transport collectif est chaleureusement accueilli par les usagers, une fois dissipés les tracas inhérents au chantier (nuisances des travaux, déviations, embouteillages...). Cette solution quasi-ancestrale a été bannie des pavés à partir de la Deuxième Guerre mondiale. Formidable vecteur de projets urbains, le tramway doit aussi sa renaissance et son développement à d'importants

progrès réalisés sur le matériel roulant et à des déclinaisons qui le rendent accessible à davantage de collectivités. *“Pour les grosses agglomérations de 600 000 à un million d'habitants, la solution du tramway automatique, comme le VAL de Toulouse ou de Paris à Orly, est compatible avec le niveau d'investissement consacré au transport public, explique Jean-René Oury, chef du service études sur l'espace public à la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Entre 500 000 et 250 000 habitants, le tram classique sur rails représente un bon compromis économique. Les agglomérations de 200 000 habitants et moins sont plutôt attirées par le tramway sur pneus, qui nécessite un investissement moindre en infrastructures”.* Une solution apparue

récemment, choisie à Nancy, à Caen et à Clermont-Ferrand, qui répond également à des contraintes topographiques fortes, le rail ne tolérant pas des pentes supérieures à 6 ou 8 %. Autre avantage : la possibilité de rouler en mode autonome, en quittant le rail de guidage, comme un trolleybus.

■ Problèmes d'interface

Mais la réapparition des tramways sur la voirie n'est pas sans poser de questions techniques. *“On constate des difficultés à prendre en compte les problèmes d'interface entre le rail et les matériaux de voirie, explique Jean-Pierre Christory. La raison première en est simple : les bureaux d'études spécialisés dans le rail sont diffé-*

rents de ceux compétents en matière de voirie. Ces deux univers ne se côtoient pas spontanément, si bien que chacun raisonne avec sa logique propre, avec des incohérences ou des incompatibilités". À ces problèmes de conception des revêtements, parfois sous-dimensionnés faute d'avoir fait l'inventaire de toutes les sollicitations, même passagères (passage momentané d'engins ou de bus, par exemple) s'ajoute une différence dans l'approche de la maintenance. "Les spécialistes de la voirie savent qu'une amorce de dégradation doit être réparée rapidement, faute de quoi le problème risque de s'aggraver rapidement, reprend le directeur adjoint du LROP. Les exploitants de plateforme de tramway, qui s'attachent en priorité aux problèmes des rails, ont moins cette culture".

Ce constat dédouanerait-il pour autant les premiers de toute responsabilité sur le plan de l'entretien ? "Non, répond Jean-Pierre Christory, prenant l'exemple des revêtements en pavés, choisis pour des raisons tout à fait légitimes d'intégration esthétique. On a encore trop tendance à croire qu'à partir du moment où sont mis en œuvre de bons produits, l'entretien n'est pas nécessaire : les joints doivent être contrôlés et

refaits, les pavés fendus remplacés. Nous devons développer une culture de la précision : un réseau ferré inséré dans l'espace public, c'est de la haute-couture".

L'analyse du LROP repose sur un recensement des pathologies relevées dans le cadre d'une étude portant sur les matériaux modulaires. Les résultats seront repris dans un "Guide de conception" publié par le CERTU au cours du premier semestre 2004. Reste que de nombreuses réalisations ont su anticiper cette analyse grâce à la rigueur des études de conception.

■ Revêtements pavés : drainage et épaisseur

À Strasbourg par exemple, l'expertise a été déployée sur trois fronts complémentaires. "La durabilité d'un pavage dépend d'abord du lit de pose et de son drainage" souligne Jean-René Oury. La solution imaginée par la CUS a été d'utiliser, au-dessus de la plateforme constituée de trois couches de béton dense et de résistance croissante (du béton de propreté jusqu'au B35 en partie supérieure), une assise drainante. Les enrobés poreux, utilisés en carrefours, cèdent la place à une grave perméable entre les rails, en raison de la très faible épaisseur (5 à 7 cm), voire à l'avenir à un microbéton poreux. Objectif de ces dispositifs : éviter toute stagnation d'eau. La stabilité du lit de pose, formulé spécifiquement avec deux granulométries, est maintenue dans le temps par la présence d'un géotextile évitant la migration des fines et l'utilisation d'un produit à base de bitume très performant pour les joints. Ce mastic breveté par la CUS et commercia-



Strasbourg : une plateforme constituée de trois couches de béton dense.



Jean-René Oury
chef du Service études sur l'espace public à la Communauté Urbaine de Strasbourg (C.U.S.)

Porter attention au drainage, à la stabilité du lit de pose, et dimensionner suffisamment les dalles et pavés en béton

lisé par Shell Bitumes s'est d'ailleurs très bien comporté pendant la canicule. "Le bon dimensionnement du revêtement modulaire est également important, poursuit Jean-René Oury. Pour maintenir une épaisseur de revêtement de 10 cm au lieu des 8 cm observés habituellement sur les autres réseaux, nous avons dessiné une dalle qui comporte des réservations au niveau des attaches des rails". Une dalle en forme de pentagone qui, avec trois modèles présentant un positionnement différent de l'engravure, s'adapte à toutes les configurations de distance entre les écrous.

■ Coulé en place : l'atout des solutions non compactées

Contrairement à une voirie classique, l'inclusion dans la chaussée de rails classiques ou de rails de guidage pour un tramway sur pneus peut compromettre la qualité du compactage des matériaux souples, faute de matériel permettant de travailler en faible largeur. L'exemple du tramway de Lyon illustre cette problématique : "Nous avons des inquiétudes sur la pérennité des enrobés entre rails, surtout avec des épaisseurs importantes" rappelle Frédéric Leygues, directeur de travaux du groupement Eurovia-SCR. Le groupement a alors proposé, en partenariat avec l'entreprise Sols, la solution du béton désactivé, appliqué en épaisseurs atteignant 17 cm pour les carrefours. Ces ouvrages très techniques supportent d'importants niveaux de sollicitations, grâce à la présence de goujons pour le transfert de charge au droit des joints de retrait, d'armatures, et une formulation faisant appel à des granulats en basalte de grande résistance.

■ CONCEPTION DES REVÊTEMENTS : LE PROJET INDUIT

L'étude du LROP sur les revêtements modulaires va être élargie à tous les revêtements suite à un appel à propositions du PREDIT, le "Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres". Le projet INDUIT, pour "INfrastructure DURable Intégrée pour Transports collectifs de surface", vise à proposer des remèdes aux pathologies constatées sur les plateformes multimodales et engendrées par la répétitivité des sollicitations et le phénomène de vieillissement accéléré des matériaux et de leur interface avec les zones voisines. Mené par dix-sept partenaires publics et privés, dont la DDE d'Ile-de-France, la RATP, le LROP, l'Association des ingénieurs territoriaux de France (AITF), Cimbéton, des bureaux d'études et des entreprises, ce projet résolument transversal s'appuie sur les expertises déjà réalisées sur de nombreux réseaux.



Lyon - Saint Priest : une déclinaison de bétons désactivés pour répondre aux contraintes de trafic.

Les zones en site propre, en revanche, sont revêtus d'un béton désactivé plus classique. C'est également le cas à Montpellier, où l'entreprise avait déployé un procédé de mécanisation original – un cylindre tournant à vive allure, en lieu et place de la traditionnelle règle – afin d'augmenter la productivité (300 m² réalisés par jour).

■ Tramway sur pneus : éviter l'orniérage

Le béton a également un rôle important à jouer en l'absence d'infrastructure ferroviaire, afin de répondre aux sollicitations inédites engendrées par le trafic très canalisé des tramways sur pneus, du fait du guidage par rail central. *“Dans les stations où les efforts de freinage et d'accélération sont les plus importants, nous constatons un phénomène d'orniérage des revêtements en enrobés à module élevé ou armés avec une structure métallique en nid d'abeille”* explique Raymond Colin. Un phénomène également constaté à Caen dans six stations, ce qui nécessitera une réfection : *“Un tramway sur pneus doit respecter une tolérance altimétrique très rigoureuse – 5 mm – du fait de la précision requise par le guidage galet / rail”* explique Olivier Colin, directeur opérationnel chez Spie-Batignoles-TPCI. Si le phénomène ne se manifeste pas sur les parties courantes, la section réalisée en béton armé continu de 30 cm d'épaisseur sur 2 km, ne risque pas d'être affectée par ce problème, le béton étant par nature rigide, donc anti-orniérant.

■ Esthétique et différenciation

“Le choix du BAC répondait à des impératifs architecturaux, reprend Olivier Colin. Un revêtement clair s'intégrant mieux en



Caen : 10 000 m² de béton armé continu désactivé pour favoriser l'intégration en centre-ville.

centre-ville”. Un béton dont les granulats ont été rendus apparents sur la totalité de la plateforme (6 m) avec un désactivant, pour lui conférer une dimension qualitative.

À Nantes, en revanche, où circule le premier tramway sur rail (1986), l'agence d'architectes et d'urbanistes AUP, associée au bureau d'études SCE, a choisi pour l'extension sud de 2,2 km de la ligne 2 un traitement plus sobre, à base de béton balayé pour la plateforme (4 500 m²) soulignée par des bordures en granit clair, et une piste cyclable qui chemine parallèlement aux voies (3 000 m²). En revanche, les abords (voirie et espaces piétonniers) ont été traités avec un béton désactivé de granulats foncés (19 200 m²). *“On constate, de la part des maîtres d'ouvrage, une sensibilité très aiguisée et une demande de diversification des couleurs de revêtement afin de bien identifier les fonctions des espaces”* explique Luc Davy, chef de projet au sein de l'agence. Le principe de base étant d'attribuer des couleurs foncées aux zones accessibles aux véhicules, et de réserver les teintes claires pour le reste : la plateforme, la piste cyclable et les espaces purement piétonniers.

Un principe décliné à Lyon, grâce à plusieurs combinaisons de granulats (calcaire blanc, silico calcaire et basalte), une plage



Montpellier : 50 000 m² bétons désactivés et dalles sur une plateforme en béton compacté.

de granulométrie étendue (jusqu'au 8/14) et plusieurs traitements (désactivation et sablage dans certaines zones) qui confèrent aux espaces des dominantes allant du gris clair au gris foncé, en passant par les ocres. À Montpellier, un béton désactivé, formulé avec un porphyre rouge, permet de marquer les intersections de la plateforme et de la voirie. Un autre exemple de l'adéquation du béton aux contraintes des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et exploitants, tant en termes d'impératifs architecturaux, de signalisation des fonctions ou de durabilité, les plateformes étant conçues – faut-il le souligner ? – pour durer de nombreuses années. ●

■ DES SOLUTIONS BÉTON POUR CHAQUE PROBLÉMATIQUE

● Tramway sur rails

Généralement réalisée avec du béton classique (Strasbourg, Grenoble...), la plateforme peut également faire appel à la technique du béton compacté, employée à Montpellier. Les revêtements peuvent être modulaires (pavés, dalles) ou coulés en place, avec une grande variété de finitions (désactivation, balayage, bouchardage, sablage), en veillant à bien les découpler des rails par des joints adaptés. En zone péri-urbaine, les concepteurs optent volontiers pour l'engazonnement.

● Tramway sur pneus

Le trafic ultra-canalé du matériel roulant demande des solutions anti-orniérantes, notamment pour des questions de tolérance vis-à-vis du rail de guidage, ancré sur une longrine en béton scellée dans la chaussée. La rigidité de la chaussée béton répond à cette exigence, qu'il s'agisse du BAC utilisé à Caen ou du BCMC (béton de ciment mince collé sur enrobé), une solution d'avenir, notamment pour l'entretien des chaussées déformées.

● Traitement des abords

Les concepteurs disposent d'une palette extrêmement large de solutions en béton modulaire ou coulés en place, couramment utilisées en aménagement urbain pour les espaces piétons et les parcs de stationnement.

La remise en circulation des chaussées en béton

Les chaussées en béton continuent de susciter bien des interrogations, voire des préjugés défavorables, le plus souvent en complète contradiction avec la réalité des techniques actuelles. Ainsi, une idée reçue à balayer à jamais des esprits de tous : attendre 28 jours pour circuler sur du béton.

Une question revient régulièrement dans le choix des structures de chaussées : pour circuler sur du béton, faut-il attendre 28 jours ? La réponse est non. En effet, cela ne s'évalue pas en jours, mais en termes de résistance atteinte par le béton, cette résistance en place dépendant de la formulation et de la maturité du béton (température).

On peut rétablir une circulation de véhicules lourds lorsque le béton a atteint 90 % de sa résistance caractéristique. Dans des conditions de températures normales, cela correspond à :

- environ 3 à 4 jours pour les bétons traditionnels : la circulation pour les véhicules légers peut alors être autorisée à 24 heures ;
 - environ 12 heures pour les bétons accélérés (et 6 heures pour les véhicules légers).
- Avec des bétons spéciaux (par exemple à base de ciment alumineux ou à base de ciment prompt), la circulation globale peut être rétablie au bout de 2 heures. Enfin, les bétons secs compactés, du fait de leur stabilité immédiate, peuvent être remis en circulation dès la fin du compactage.

■ Réparation de voies d'autoroutes en béton de ciment alumineux fondu

Le béton de ciment alumineux fondu est une excellente réponse technique aux contraintes de délai et de remise en circulation rapide. Ainsi, pour réfectionner certaines dalles californiennes en béton sur 63 km de voies de l'autoroute A26, s'étalant de la hauteur de Châlons-en-Champagne jusqu'aux environs de Troyes, la solution retenue a été celle d'un béton de ciment alumineux fondu.

Ce choix est parfaitement justifié. D'abord, cette solution a permis de répondre aux exigences de l'exploitant dont le cahier des charges imposait, pour la remise en service, une résistance minimale à la compression de 20 MPa à 4 heures. Le béton de



ciment alumineux fondu apporte, en effet, une réponse technique aux contraintes de délai et permet un durcissement rapide, l'obtention de résistances au jeune âge élevées et un séchage rapide avec un matériau durable. Ensuite, cette solution apporte une grande souplesse d'utilisation, par sa rapidité de mise en œuvre grâce à l'ouvrabilité du matériau, par l'obtention d'une bonne planéité par un lissage à la règle vibrante et par le pompage possible du matériau.

Ainsi, les travaux ont pu être réalisés de jour, la circulation étant détournée sur la voie opposée. Ils ont consisté à décaisser les dalles démolies, préparer le support, couler le béton de ciment alumineux fondu, mettre à niveau à la règle vibrante et balayer la couche de surface. Pour des raisons de sécurité, chaque soir avant 20 heures, la voie était ensuite rendue à la circulation. ●



■ LE CHANTIER EN BREF

- **Lieu :** Autoroute A26 entre Châlons-en-Champagne et Troyes
- **Maître d'ouvrage :** SANEF
- **Maître d'œuvre :** SANEF - Direction d'exploitation de l'Est - Site de Reims
- **Entreprise :** Appia Équipement de la Route
- **Fournisseur de béton :** Béton Chantiers Bourgogne
- **Objectifs des travaux :** réfection - Réparation de dalles californiennes en béton de format 4 m par 3,50 sur 0,40 m d'épaisseur - Remise en service et rendu à la circulation avant 20 heures chaque soir
- **Description des travaux :** démolition, décaissement, préparation, coulage et mise à niveau des dalles au béton de ciment fondu
- **Surface et linéaire réalisés en béton :** sur 63 km de voies, environ 2 200 m² de dalles réfectionnées pour un total de 800 m³ de béton mis en œuvre - Rendement : 40 m³ /jour - Cahier des charges pour la remise en service : 20 MPa à 4 heures

Le béton dans les travaux souterrains

Les travaux souterrains permettent de réaliser, sous terre, des ouvrages destinés à la circulation des personnes, des véhicules et des marchandises (tunnels routiers et autoroutiers, tunnels ferroviaires, réseau de transport collectif urbain, métro-RER, voiries urbaines souterraines) ou des fluides (galeries et collecteurs d'adduction d'assainissement ou d'évacuation d'eau). Ils concernent aussi les ouvrages de stockage des véhicules (parcs de stationnement souterrains) et d'eau (tunnels réservoir, bassin de stockage d'eaux pluviales), d'exploitation de mines (galeries), de production d'énergie (galerie souterraine d'usines hydroélectriques, galeries hydrauliques, conduites forcées) ainsi que de nombreux autres ouvrages (zones commerciales et gares ferroviaires souterraines, laboratoires souterrains de recherche, stockage industriel souterrain, puits de grande profondeur, etc.).



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en voussoirs préfabriqués en béton.

Les ouvrages souterrains constituent la solution la mieux adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses. En zone urbaine, le sous-sol devient une alternative quasi incontournable aux problèmes d'occupation et d'encombrement de surface. La réalisation des travaux en souterrain per-

met de s'affranchir des obstacles, d'utiliser au maximum l'espace souterrain quasi illimité et de libérer la surface au sol. En zone montagneuse, le développement de moyens de transports ferroviaires à grande vitesse et des réseaux de communication autoroutiers qui ne peuvent épouser le relief (tracé nécessitant de grands rayons de courbure en plan et

en profil en long, et de faibles pentes) impose la réalisation de tunnels.

Les techniques à base de **coulis**, de **mortiers** ou de **bétons** contribuent à la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages souterrains. Elles sont utilisées soit pour permettre ou faciliter la réalisation des ouvrages (injection, soutènement en béton projeté, prévoûte en béton, calage de voussoirs en béton, etc.), soit pour constituer le revêtement définitif des tunnels et des galeries.

■ Les différentes méthodes d'exécution des tunnels

Quatre principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées. Le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique).

• Tunnel dans le rocher :

- méthode traditionnelle à l'explosif ;
- méthode par attaque ponctuelle.

• Tunnel en terrain difficile :

- méthode par prédécoupage mécanique ;
- méthode de creusement au tunnelier.

Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain.

● La méthode traditionnelle à l'explosif

Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. L'abattage à l'explosif nécessite la perforation préalable de trous de mine (constituant la volée) à l'aide de marteaux perforateurs (robots de foration assistés par ordinateur permettant une automatisation intégrale des opérations). Le plan de tir doit être adapté aux caractéristiques du terrain afin d'assurer un découpage soigné de l'excavation et de limiter les ébranlements. Après excavation, la voûte est généralement renforcée par un soutènement, provisoire dans un premier temps à l'avancement des travaux, puis définitif lorsque l'ouvrage est entièrement creusé.



Le choix du soutènement provisoire est fonction de l'état des parois, suite aux dégradations provoquées par les tirs d'explosifs et aux déformations liées aux phénomènes de décompression du terrain.

Divers types de soutènement provisoire sont utilisés :

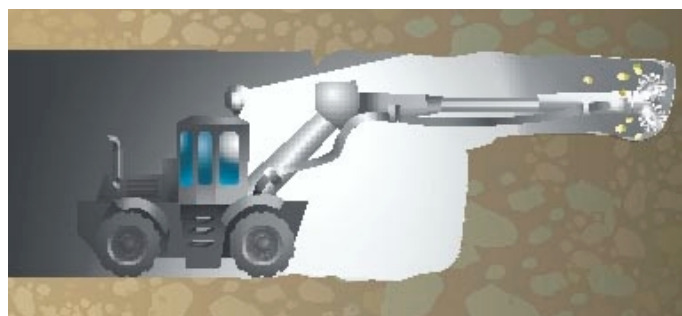
- boulonnage d'ancrage ;
- boulonnage associé à un treillis métallique ;
- boulonnage associé à une faible épaisseur de béton projeté (5 cm) renforcé par un treillis ;
- boulonnage associé à la mise en place d'un béton projeté jusqu'à 20 cm d'épaisseur ;
- mise en place de cintres métalliques.

La pose de soutènement est très souvent assurée par des robots. Le béton projeté à fibres métalliques se substitue, de plus en plus, au béton projeté associé au treillis soudé.

Le revêtement définitif est, en général, constitué par une voûte en béton armé, coulée en place sur un coffrage métallique.

● La méthode par attaque ponctuelle

Si la roche est friable, l'excavation est exécutée par une machine qui attaque ponctuellement et progressivement le sol (machine à attaque ponctuelle).



Ces machines automotrices sur pneus ou chenilles sont équipées de bras orientables, à l'extrémité desquels est placé l'appareil d'attaque (godet excavateur, brise-roche, tête de havage à axe longitudinal ou transversal). Les déblais sont évacués vers l'arrière. La paroi est équipée à l'avancement d'un soutènement provisoire. Cette technique est adaptée à tous les profils d'excavation.

● La méthode par prédécoupage mécanique

Cette méthode consiste à réaliser une succession de saignées d'épaisseur 15 à 30 cm et de 3 à 5 m de longueur dont le tracé suit le profil théorique de l'extrados de la voûte à réaliser, à l'aide d'une haveuse (machine de prédécoupage constituée d'un bâti support rigide auquel est fixé un chariot mobile pouvant se déplacer sur le contour de la section à excaver et équipé d'une scie spéciale).

La saignée est remplie de béton à prise rapide, mis en place par projection (béton projeté par voie sèche et éventuelle-



ment armé de fibres métalliques), afin de constituer une voûte porteuse dans le massif encaissant. Après durcissement, cette prévoûte en béton assure le soutènement de la cavité dont le terrassement peut-être entrepris en pleine section. Elle permet d'assurer, pendant les travaux, la sécurité des ouvriers.

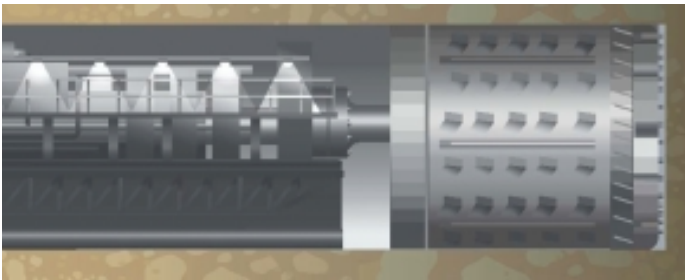
Chaque prévoûte à une forme légèrement tronconique pour permettre la réalisation de la prévoûte suivante (recouvrement entre voûtes successives : 0,50 m à 2 m).

Nota : cette méthode est développée par l'entreprise BEC PERFOREX (système breveté : prédécoupage du terrain avec mise en place de prévoûtes en béton performant).

Le béton utilisé est un béton à très haute résistance à court terme. Ces performances sont de l'ordre de 8 MPa à 4 heures et de 24 MPa à 24 heures.

● La méthode de creusement du tunnelier

Le creusement mécanisé des tunnels a connu des développements importants durant les vingt dernières années, en particulier grâce à l'apparition et aux évolutions technologiques des tunneliers. Ils ont permis d'élargir le domaine de réalisation des tunnels dans des conditions géologiques délicates, pour une grande gamme de diamètres et de terrains (sols meubles, roches tendres, argiles molles, terrains instables ou aquifères, etc.) en améliorant considérablement la productivité des chantiers.



Le tunnelier est une machine complexe qui assure en continu les fonctions suivantes :

- excavation du terrain ;
- stabilisation et soutènement du front de taille ;
- soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement ;
- évacuation des déblais ;
- mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement définitif ;
- guidage selon l'axe théorique prévu ;
- avancement automatique à l'aide de vérins.

Il permet de creuser des tunnels de diamètre compris entre 2 et 15 mètres. Il est particulièrement adapté pour le creusement de terrains meubles sur de grandes longueurs (du fait de son coût d'investissement). Sa vitesse d'avancement est de l'ordre de 10 à 50 mètres par jour.

On distingue trois types de tunneliers, qui sont choisis en fonction de la nature du terrain à creuser.

- **Tunneliers avec machine d'attaque ponctuelle ou d'attaque globale** (tunneliers à appui radial, aléseur). Ils sont utilisés dans le cas de terrain de tenue suffisante ne nécessitant pas



Partie avant du tunnelier.

de soutènement immédiat.

- **Tunnelier à boucliers classiques** (à front ouvert, boucliers mécanisés à appui radial, à appui longitudinal, à appui mixte) qui assurent simultanément les fonctions d'excavation et de soutènement latéral du terrain. Ils comportent une structure cylindrique rigide (jupe) qui progresse au fur et à mesure du creusement et assure la stabilité du tunnel. Ils sont utilisés pour le creusement des terrains meubles.
- **Tunneliers à confinement** (ou à front pressurisé). Ces machines assurent simultanément un soutènement latéral et frontal du terrain. Elles sont utilisées dans les terrains alluvionnaires en présence d'eau (terrain meuble et aquifère). La partie avant du tunnelier (chambre d'abattage) peut être mise sous pression afin d'assurer la stabilité du front de taille. À l'intérieur de la chambre, une roue de coupe munie de dents au carbure de tungstène grignote le terrain. Les déblais sont évacués par marinage hydraulique à l'aide de conduite de marinage et de pompes. Selon le type de terrain, le confinement peut être assuré par de l'air comprimé, par pression de terre ou généralement par une boue bentonique (la boue est formulée en fonction de la granulométrie et de la perméabilité du terrain). Le soutènement de



Vue générale d'un tunnelier.

© NFM - Technologies



Voussoir préfabriqué en béton, en cours de pose (vue du tunnelier).

l'excavation est exécuté par le tunnelier, soit par coulage de béton en place, entre le terrain et un coffrage intégré, soit plus fréquemment par la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton. Le tunnelier avance en prenant appui sur la zone bétonnée réalisée à l'avancement.

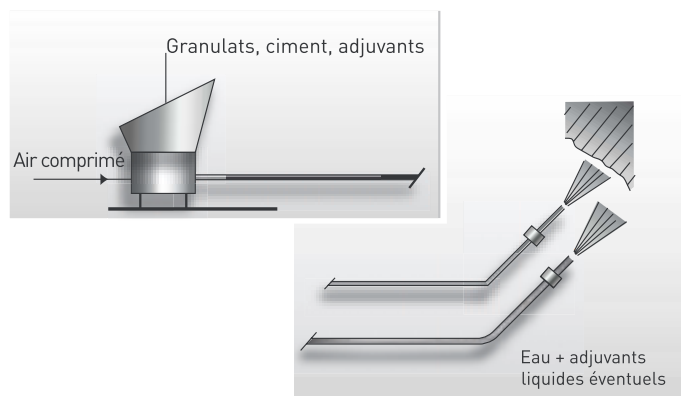
Le béton projeté

Le **béton projeté** est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie humide. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors de la fabrication du béton, soit lors de l'application du béton).

Projection par voie sèche : le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateurs de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur. Il est propulsé par de l'air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive, séparément à la lance, en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange, juste au moment de la projection sur la paroi. Cette technique est utilisée, en particulier, pour des chantiers de faible importance

Projection par voie sèche

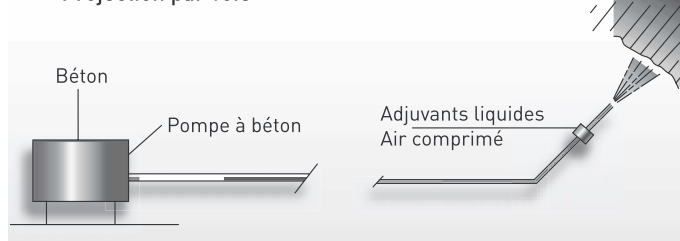


ou nécessitant des arrêts fréquents, ou lorsque la distance de transport entre la machine confectionnant le mélange et la lance de projection est importante.

Projection par voie humide : le mélange granulats-ciment-eau est malaxé dans une centrale puis stocké dans une trémie. Il est ensuite pompé le long d'une tuyauterie jusqu'à la lance de projection. La projection est assurée par de l'air comprimé, éventuellement associé à des adjuvants liquides. Cette technique est utilisée, en général, pour des chantiers nécessitant des rendements importants. Ce type de béton doit présenter une grande cohésion.

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de faibles épaisseurs, adhérentes au support, qui épousent parfaitement le profil de l'excavation. Elle est particulièrement adaptée à la réalisation d'ouvrages de sections variables ou d'intersections d'ouvrages et des chantiers sur lesquels il est difficile d'amener un outil coffrant.

Projection par voie humide



Les applications du béton projeté

La technique du **béton projeté** est utilisée en travaux souterrains comme :

- **soutènement de parois de galeries ou de puits :** ce soutènement est mis en œuvre immédiatement après excavation du front de taille ou ultérieurement si le terrain est stable ;
- **soutènement provisoire du front de taille de tunnels en cours de creusement :** le béton projeté est, en général, utilisé en association avec des boulons, des cintres ou des treillis. Le béton peut, dans certains cas, être fibré.

Le béton projeté est utilisé en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcement de structures).

Les principaux modes de fonctionnement du béton projeté

Selon la nature du terrain et les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, la technique du **béton projeté** peut assurer trois principaux types de soutènement.

- **Peau protectrice :** dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains suffisamment résistants, le soutènement est constitué d'une faible épaisseur de béton projeté, mis en place à la surface de l'excavation et pouvant être renforcé par un treillis soudé ou des fibres. Cette "peau protectrice" de 2 à 5 cm d'épaisseur ne joue pas de rôle structurant. La stabilité de l'excavation est assurée par le terrain seul, par un boulonnage du terrain ou par une coque plus épaisse en béton projeté mis en place ultérieurement. La peau protectrice a pour rôle de protéger les terrains en place contre une altération super-

ficielle (dessiccation du sol, migration d'eau interstitielle, etc.) en assurant le jointoiment des grains du sol. Les exigences de résistances mécaniques de ce type de béton sont faibles, mais il est indispensable que le béton présente une bonne adhérence au support et supporte son poids propre.

- **Peau résistante** : le béton projeté permet un renforcement local du terrain, dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains peu résistants. Le béton s'oppose, dans ce cas, aux ruptures et déplacements locaux éventuels. Le soutènement est constitué d'une peau de béton projeté, associé à un treillis soudé, un boulonnage ou des cintres. Sa résistance mécanique à court terme doit être importante (de l'ordre de 10 MPa à 24 heures). Ces résistances élevées à court terme sont obtenues par utilisation d'accélérateur de prise au moment de la projection.
- **Anneau de structure** : le soutènement est constitué d'une coque épaisse en béton projeté. Cette coque joue un rôle structurel, participe à la stabilité d'ensemble de l'excavation. Le béton projeté est armé, fibré ou non armé. L'épaisseur minimale de l'anneau est fonction des contraintes d'exécution (hors profil, défauts d'excavation, etc.). La capacité de fluage du béton projeté au jeune âge lui permet de s'adapter aux déformations du terrain, en maintenant l'excavation en place.

● Les constituants du béton projeté

Le béton projeté est constitué d'un mélange :

- **de ciment** : le ciment conforme à la norme NF EN 197-1 est choisi en fonction de l'agressivité de l'environnement dans lequel est situé l'ouvrage. Les dosages courants sont compris entre 350 et 450 kg/m³.
- **de granulats** : le sable doit contenir le moins possible de grains plats. Le diamètre des plus gros granulats est limité à 15 mm.
- **d'eau** : le rapport E/C est, en général, compris entre 0,40 et 0,45.
- **d'adjuvants** : on utilise des adjuvants pour béton (super plastifiants) et des accélérateurs de prise ou des "raidisseurs" (silicate de soude) qui permettent d'assurer l'adhérence du béton sur le support, dès sa projection, et d'obtenir des résistances initiales élevées.
- **de fibres** : les fibres utilisées sont essentiellement métalliques (parfois synthétiques). Elles permettent, en particulier, d'améliorer la cohésion, la ductilité, la résistance et la tenue du béton projeté sur son support. Le dosage est de l'ordre de 35 à 50 kg/m³.
- **d'additions** : des fumées de silice sont parfois utilisées pour améliorer les performances du béton et faciliter la projection en rendant le béton plus collant.

La formulation du béton doit prendre en compte les pertes de matériau par "rebond" lors de la projection et être optimisée pour offrir une bonne aptitude à la projection. Il est préconisé d'augmenter, par rapport à la formulation théorique, le dosage en ciment de 10 à 20 % et pour les granulats, la proportion d'éléments fins.

Les performances, en général, spécifiées sont de l'ordre de 25 MPa pour la résistance à la compression à 28 jours.



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en voussoirs préfabriqués en béton armé.

● La préparation du support

La préparation est fonction du type de support.

- **Projection sur le terrain** : il convient de décapier l'excavation des éléments instables et de projeter le béton le plus rapidement possible après l'excavation.
- **Projection sur béton projeté jeune** : la nouvelle projection doit être effectuée dans les 72 heures après la fin de la prise de la couche précédente.
- **Projection sur support existant en béton ou en maçonnerie** : la préparation consiste à repiquer le support afin d'éliminer les éléments instables puis à le nettoyer par projection d'eau à haute pression.

Dans tous les cas, il convient de mouiller le support juste avant la projection pour éviter qu'il n'absorbe une partie de l'eau du béton frais.

■ Les techniques de présoutènement

Les techniques de **présoutènement** permettent de traverser des zones difficiles, dans des terrains de faible cohésion.

Le **présoutènement** est un soutènement mis en place à la périphérie de la section à excaver en avant du front de taille. On distingue trois types de présoutènement.

- **La voûte parapluie** : c'est une voûte constituée de tubes métalliques disposés en couronne suivant le contour de la section à excaver et prenant appui sur des cintres.
- **La prévoûte** : c'est une voûte réalisée dans le terrain en avant du front de taille. Elle est constituée soit de béton mis en œuvre dans une saignée réalisée par prédécoupage mécanique, soit de colonnes de "jet grouting" juxtaposées.
- **L'anneau renforcé** : la technique consiste à renforcer un anneau de terrain, en avant de l'excavation, par des boulons injectés de coulis de ciment.



Revêtement d'un tunnel en béton coffré.

■ Les techniques de soutènement

Le creusement d'un tunnel peut nécessiter, selon la technique utilisée, la nature du terrain et les dimensions de l'ouvrage, la réalisation d'un soutènement de l'excavation.

Ce soutènement permet d'assurer la sécurité des ouvriers intervenant sur l'ouvrage, de limiter les déformations du terrain, de stabiliser les parois pendant la réalisation des travaux et de renforcer la stabilité définitive de l'excavation.

Les techniques les plus couramment utilisées sont :

- **des soutènements métalliques** : cintres métalliques, blindage, boulons ;
- **des soutènements en béton** : béton projeté, prévoûte en béton ;
- **des soutènements mixtes** : cintres réticulés associés à du béton projeté. Le cintre permet de suppléer la faiblesse de résistance du béton aux jeunes âges.

Une nouvelle méthode de soutènement s'est développée ces dernières années. Elle permet de garantir la stabilité de l'excavation en créant un anneau porteur mais déformable de terrain armé. L'excavation est réalisée en pleine section ou en demi-section. Le soutènement, mis en place immédiatement après le creusement, est constitué de boulons armant le terrain et d'une coque mince en béton projeté, armée d'un treillis soudé ou de fibres métalliques, et éventuellement de cintres. Ce soutènement léger présente une souplesse suffisante pour accepter les déformations du terrain.

Le revêtement de l'ouvrage est mis en œuvre ultérieurement par plots successifs.

■ Les revêtements en béton des tunnels

Le **revêtement d'un tunnel** ou d'un ouvrage souterrain est la structure résistante placée au contact de l'excavation. Il permet d'assurer la stabilité mécanique à long terme de l'ouvrage et de contribuer à son étanchéité (protection contre les venues d'eau dans le cas d'ouvrage réalisé dans des terrains aquifères). Il peut être visible de l'intérieur de l'ouvrage ou protégé par un habillage.

On distingue deux principales techniques de réalisation des

revêtements selon le procédé d'excavation utilisé :

- **Revêtement en béton coffré non armé.**
- **Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé.**

Le profil en travers type d'un revêtement est, en général, de forme circulaire (ce qui permet de résister le mieux possible en compression aux efforts exercés par le terrain).

Dans le cas d'un terrain présentant de bonnes caractéristiques mécaniques, d'autres types de sections sont possibles (section constituée d'une voûte, de piédroits et d'un radier).

● Revêtement en béton coffré non armé

Après excavation du terrain par la méthode traditionnelle à l'explosif, par attaque ponctuelle ou par prédécoupage mécanique, le revêtement est, en général, constitué d'une voûte en béton coulée en place.

Ce revêtement est généralement non armé (sauf éventuellement dans les zones particulièrement sollicitées : jonction radier piédroit). L'épaisseur du revêtement, fonction du type du terrain excavé, varie entre 30 et 45 cm.

Le béton a, en général, une résistance en compression de l'ordre de 30 MPa. Le bétonnage est réalisé par plots d'une dizaine de mètres de longueur après mise en place, au contact de l'excavation, d'un complexe d'étanchéité.

Les principales spécifications du béton portent sur la maniabilité à l'état frais, afin de garantir un parfait remplissage du coffrage et sur la compacité, afin de résister à l'agressivité du milieu ambiant. Ces performances mécaniques doivent permettre la réalisation d'un plot par jour (ordre de grandeur des résistances requises : 10 MPa à 24 heures).

La réalisation d'ouvrages à gabarit limité, d'accès difficile ou de géométries complexes, nécessite la mise en œuvre du béton par pompage. Dans ce cas, les critères de formulation du béton doivent prendre en compte sa pompabilité, son homogénéité et l'absence de ségrégation en extrémité de conduite ainsi que la durée pratique d'utilisation en fonction de la distance de pompage.

On utilise aussi, de plus en plus, des **bétons autoplaçants** qui facilitent la mise en œuvre du béton et permettent d'obtenir, sans vibration, un parfait remplissage des coffrages.

● Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé

Le revêtement de tunnel, foré à l'aide d'un tunnelier, est composé d'une succession d'anneaux juxtaposés mis en place à l'arrière du bouclier pour assurer immédiatement la stabilisation des terres. Chaque anneau est constitué d'un assemblage d'éléments appelés **voussoirs préfabriqués en béton armé**, d'épaisseur courante de 20 à 30 cm.

Les anneaux, d'une longueur de 0,60 à 2 m ont des faces transversales parallèles (anneaux droits) ou non parallèles (anneaux universels). Les anneaux universels permettent, par rotation de la position d'un anneau par rapport au précédent, de suivre toutes les variations de tracé de l'excavation.

Les anneaux sont constitués de 5 à 10 voussoirs courants, de deux voussoirs de contre-clé et d'un voussoir de clé (de forme trapézoïdale). L'étanchéité entre voussoir est, en général, assurée par des profilés compressibles ou hydrogonflants.



© NFM - Technologies

Aire de stockage de voussoirs préfabriqués en béton.

Les voussoirs sont équipés de réservations qui permettent leur assemblage entre eux et aux anneaux adjacents par des boulons ou par des tire-fonds.

Les voussoirs préfabriqués peuvent être réalisés en bétons renforcés de fibres métalliques. Ce type de béton permet, en particulier, d'améliorer la résistance au choc et le comportement vis-à-vis de la corrosion des voussoirs, et de simplifier le processus de fabrication industrielle des voussoirs (simplification voire suppression des ateliers de façonnage et d'assemblage des armatures).

Pour des voussoirs de grande taille et soumis à des sollicitations élevées, les voussoirs peuvent être armés par une solution mixte (association de fibres métalliques et d'armatures traditionnelles).

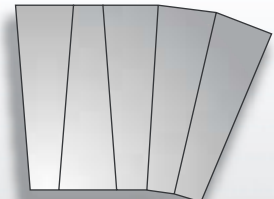
Des essais réalisés sur des bétons armés avec des fibres polypropylènes (à des dosages de 1,5 à 2 kg/m³) ont démontré l'efficacité de ces fibres pour diminuer les risques d'éclatement du béton lorsqu'il est soumis à des températures élevées.

Les ciments utilisés pour la confection des bétons des voussoirs sont, de préférence, de type CEM I. Dans le cas de tunnels réalisés dans les milieux agressifs, des ciments de caractéristiques complémentaires PM et ES sont conseillés. Le vide annulaire, situé entre l'extrados de l'anneau du revêtement et l'excavation, doit être soigneusement rempli par un produit de bourrage. Ce produit est destiné, à court terme, à caler le revêtement et à éviter les déplacements des voussoirs et le mouvement éventuel du terrain excavé. À long terme, il permet de répartir uniformément les efforts engendrés sur le revêtement par le terrain.

Cette opération s'effectue par **injection d'un coulis de ciment** (parfois associé à de la bentonite) simultanément à l'avancement du bouclier et à la mise en place des voussoirs. Ce coulis de bourrage est injecté au travers d'orifices localisés dans les voussoirs. Il doit être suffisamment fluide lors de la mise en œuvre pour remplir parfaitement le vide et sa cinétique de prise doit être adaptée aux conditions de chantier.

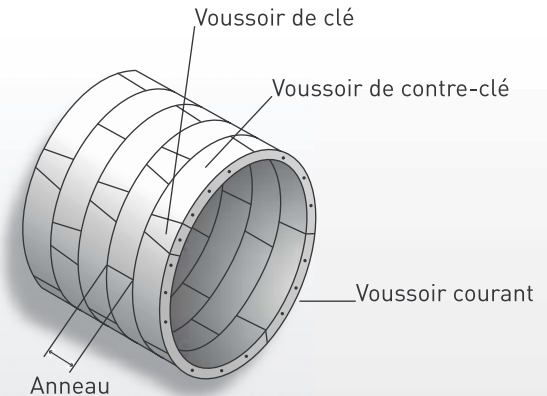


Anneau universel



Vue en plan

Succession d'anneaux universels.



Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé : schéma de principe d'assemblage.

■ Les habillages des tunnels à l'aide de coque mince en béton

Les "habillages" des tunnels sont des structures légères destinées :

- **dans le cas des tunnels non revêtus** : à assurer la sécurité des usagers contre les chutes éventuelles de blocs du terrain ;
- **dans le cas de tunnels revêtus** : à améliorer l'esthétique de l'ouvrage et le confort des usagers, et à faciliter le nettoyage des parois.

Cet habillage peut être réalisé, en travaux neufs ou en travaux de réfection, à l'aide d'une coque mince en béton qui est, soit accrochée à la voûte, soit auto-stable et reposant sur des piédroits en béton.

Les traitements architectoniques du béton de la coque permettent d'améliorer l'ambiance intérieure de l'ouvrage.

■ Les techniques de réparation des tunnels

Il existe de nombreuses techniques pour réaliser les travaux de réparation ou d'entretien des tunnels. Le choix de la technique est fonction du type d'ouvrage et de l'importance des dégradations.

- **Les injections** : pour la réhabilitation des ouvrages (l'étanchement des revêtements).
- **Le boulonnage** : pour l'amélioration par des armatures des caractéristiques du terrain.

- **Le béton projeté** : pour le renforcement des revêtements (béton projeté de fibres métalliques ou associé à un treillis soudé).
- **Le renforcement par anneaux séparés** : par la mise en place d'anneaux de voussoirs en béton armé dans les zones dégradées.
- **La reconstruction du revêtement** : par la mise en place d'un nouveau revêtement en béton coulé en place.
- **Le chemisage du revêtement** : par la mise en place de coques préfabriquées de faible épaisseur (liaison avec l'ancien revêtement à l'aide d'un coulis de ciment injecté).

■ Les perspectives de développement des travaux souterrains

Les travaux souterrains devraient, dans les prochaines décennies, se développer en France, en particulier pour répondre aux besoins considérables en équipement en matière **d'eau et assainissement** pour la réalisation :

- de stations d'épuration souterraines en site urbain ;
- de réseaux d'adduction et de collecte des eaux ;
- de tunnels réservoir ou de bassins d'eaux pluviales (pour lutter contre les inondations et retenir les pollutions dues aux matières en suspension, en cas d'orages).

L'urbanisation croissante, l'augmentation de la densité du tissu urbain et de la valeur de l'espace en zone urbaine, la raréfaction des espaces disponibles, le souci de réduire les nuisances des riverains lors des travaux, la sensibilité de la population à l'environnement vont imposer le développement de réseaux routiers urbains, de parkings et d'infrastructures de transports en souterrain.

Le recours aux techniques des travaux souterrains va s'imposer pour des raisons écologiques. D'abord par volonté de ne pas surcharger l'espace urbain, de supprimer les impacts sur l'environnement et de préserver les paysages naturels. Ensuite par souci de protection de l'environnement en surface, de réduction des nuisances en cours de travaux et de préservation des espaces verts.

Ces techniques permettent de répondre aux problèmes de plus en plus complexes posés par l'insertion d'ouvrages dans l'espace des grandes agglomérations urbaines, en uti-



L'une des deux gares souterraines du RER E.

lisant la protection naturelle (mécanique, thermique, hydraulique) apportée par le sol et en concevant, sans aucun obstacle physique, des ouvrages en trois dimensions.

Les techniques de reconnaissances géotechniques préalables, de suivi en cours de chantier et le développement des outils d'analyses mathématiques, permettent de limiter désormais les risques lors de la réalisation des ouvrages, de diminuer les incertitudes sur les coûts et de mieux maîtriser les aléas de chantier.

Les évolutions des techniques et des matériels de creusement (en particulier des tunneliers) permettent d'envisager le creusement de tunnels de plus en plus longs dans des conditions géologiques de plus en plus délicates (terrain hétérogène, sol meuble et aquifère, etc.) avec des cadences d'excavation de plus en plus élevées, une plus grande fiabilité et une plus grande sécurité pour les ouvriers. ●

Documents de référence - Sources d'information
Dossier pilote des tunnels (CETU - Juillet 1998)
Recommandations de l'AFTES : Tunnels et ouvrages souterrains



7, Place de la Défense 92974 Paris-la-Défense cedex - Tél. : 01 55 23 01 00 - Fax : 01 55 23 01 10
Email : centrinfo@cimbeton.net - Site Internet : www.infociments.fr

Pavés rustiques en béton à Bouxwiller (Bas-Rhin)

Pour Danielle Buchi, maire de Bouxwiller : “Il nous fallait réagir car le centre urbain se dégradait de plus en plus. Nous avons poursuivi la politique initiée dans les années 1990 où les pavés avaient remplacé les enrobés en mauvais état, en rénovant le centre-ville par 5 300 m² de pavés dans la Grand-Rue. Bouxwiller possédant de nombreux édifices et monuments historiques classés, nous avons pavé 10 000 m² supplémentaires en pavés rustiques en béton. Par leur forme, leurs arêtes irrégulières et leurs coins arrondis, les pavés accentuent le caractère rustique et sont parfaitement adaptés à l’environnement ancien. Autre avantage : durant les travaux, les pavés limitent la gêne occasionnée aux riverains car leur mise en œuvre est souple et permet un phasage par petits tronçons. Ils résistent aussi aux contraintes, offrent un confort de marche bien supérieur aux pavés naturels et permettent de réaliser des finitions qui donnent la touche finale : filets

de pavés le long des façades, pavés encadrant des soupiraux ou des escaliers...”

Pour Nathalie Larché, architecte DPLG à Strasbourg : “Nous avons souhaité que la Grand-Rue devienne un espace urbain à priorité piétons, où l’aménagement proposé révèle l’architecture et l’histoire de la ville. Pour accentuer les transitions de la circulation et du stationnement se répartissant de part et d’autre du caniveau central de la chaussée en V, le revêtement de la voie débute par un traitement mixte classique (voie en enrobés, trottoirs en pavés), se poursuit par une chaussée mixte (moitié en enrobés pour la voie, moitié pavée pour les trottoirs) et se termine par une chaussée tout en pavés. Le calepinage des pavés a permis d’accentuer l’élargissement visuel déjà obtenu grâce à la suppression des trottoirs. Les coloris des pavés – jaune pastel et brun clair – spécialement élaborés, rappellent la couleur dominante des façades et accrochent la lumière, tout en restant relativement neutres”.

- **Lieu :** Bouxwiller (Bas-Rhin)
- **Maître d’ouvrage :** Mairie de Bouxwiller
- **Maître d’œuvre :** Nathalie Larché, architecte DPLG (Strasbourg) et la Subdivision de l’Équipement de Bouxwiller
- **Entreprise :** Adam TP (Bouxwiller)
- **Fournisseur des produits :** une entreprise membre du GIE Créa-Pav
- **Objectifs des travaux :** Limiter le trafic de transit – Ralentir la vitesse des véhicules – Faciliter la circulation piétonne et l’accès aux commerces – Conserver les disponibilités de stationnement – Améliorer la sécurité, le confort et la convivialité des lieux – Respecter et faire revivre le caractère historique du vieux Bouxwiller.
- **Description des travaux :** Réalisation de 5 300 m² de pavés en béton sur la Grand-Rue et de 10 000 m² sur l’ensemble de la commune.



Centre commercial de l'hippodrome : le mail piéton en béton désactivé s'étend sur 200 mètres de long et 9 de large.

Ville de Reims : égayer un quartier défavorisé

Élément structurant du renouvellement urbain du quartier de la Croix Rouge, l'aménagement des abords du centre commercial de l'hippodrome s'articule autour d'un mail piéton. L'ouvrage est réalisé avec un béton désactivé aux tonalités chaleureuses.

Situé en périphérie ouest de la ville de Reims, le quartier de la Croix-Rouge est un bon exemple des excès productivistes de l'architecture des années 1970. Formé de grands ensembles concentrant 22 000 habitants dans un contexte social difficile, le site constitue un enjeu important d'intervention du politique. Le projet de requalification urbaine élaboré par la ville associe, à la création d'un centre commercial, un rééquilibrage de la voirie principale en faveur des transports en communs (dans un premier temps, des bus en site propre et,

à terme peut-être, un tramway).

“Pour faire le lien entre la voirie et le parking du centre commercial, notre service d'urbanisme a opté pour la création d'un mail piéton très ouvert, explique le chef de projet Michel Guillou, de la Direction des espaces urbains de la ville. La vocation de cet espace bordé d'arbres, de 200 m de long sur 9 m de large, est d'offrir un lieu de partage et de convivialité”. À cet objectif social s'ajoute une nécessité fonctionnelle : l'aménagement d'un espace piéton pour structurer les flux de déplacements vers le centre commercial, le centre social, l'hippodrome et la Faculté de Droit.

naturellement arrivés au choix du béton désactivé, poursuit Michel Guillou, évoquant les qualités esthétiques et la résistance du matériau. Mais nous souhaitions trancher avec les aménagements déjà réalisés à l'aide de granulats produits en Champagne, qui confèrent au matériau une teinte jaune pâle, ce qui ne convenait pas à l'ambiance recherchée, à la fois plus dynamique et chaleureuse”.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre : Ville de Reims
- Entreprise titulaire : SCREG
- Sous-traitant béton : RMTP
- Fournisseur BPE : Béton Silvex (Trinqueux)

■ Une dominante rosée

Aux contraintes de confort de marche et de nécessaire différenciation des espaces s'ajoute celle d'offrir un site d'accueil pour un ancien marché forain que la municipalité souhaite relancer. “Nous sommes assez



L'implantation de profilés en PVC permet de positionner les joints de retrait selon une trame de 3 m par 4.



Le béton, acheminé par camion toupie, est réparti, réglé et taloché afin d'offrir un uni régulier.

Solution : la ville, après quelques recherches, a opté pour des granulats alluvionnaires à dominante rosée, provenant de Moselle, déjà employés pour la réalisation d'une place en béton désactivé. "Nous utilisons souvent ce granulat pour nos bétons d'aménagement, explique José Rodrigues, PDG de Béton Silvex à Trinquieux, fournisseur du béton prêt à l'emploi. Cette formulation permet d'obtenir de très beaux résultats pour les aménagements particulièrement qualitatifs".

■ Huit mois de chantier

"Dans un souci de satisfaction du client, tant en terme de qualité que de rapidité d'exécution, nous avons préféré sous-traiter à une entreprise spécialisée la mise en œuvre des revêtements en béton, explique Pascal Sibileau, responsable d'exploitation de l'agence de Reims chez SCREG. Ce lot comprend le béton désactivé et la pose de pavages bétons d'une allée piétonne desservant le parking du centre commercial". Mené d'octobre 2002 à mai 2003, le chantier comprenait la réalisation d'un parking pour le personnel du centre commercial et du centre social, et un parc de stationnement pour les clients. Confié à l'entreprise RMTP de Villiers-sur-Marne, l'ouvrage a été réalisé à la main par une équipe de cinq personnes en moyenne, sur un fond de forme en grave-ciment recouvert d'une émulsion à des fins de propreté. Appliqué sur une épaisseur de 15 cm, le béton amené par camion-toupie était renforcé par des fibres synthétiques afin de réduire la microfissuration. "Nous avons utilisé des profilés

en PVC pour matérialiser les joints de retrait, selon une trame de 3 mètres par 4", explique Manuel Rodrigues, gérant de l'entreprise. Le béton, réparti au râteau et réglé manuellement, a été traité par l'application d'un désactivant, que nous avons laissé agir 24 heures, avant de laver la surface au karcher".

■ Un bon résultat

Si la mairie est satisfaite du résultat, elle relève néanmoins quelques problèmes d'homogénéité de traitement, qui ne nuisent cependant pas à l'ambiance des lieux. "Il est difficile de traiter de façon uniforme une aussi grande surface, surtout quand le chantier est morcelé en opérations successives, analyse Michel Guillou. Un autre point à reconsidérer est le système de joints : si l'occasion se présente, j'opterai pour des joints sciés, plus discrets, et qui facilitent le traitement des intersections".

Un autre élément, plus difficile à maîtriser qu'un choix ou un geste technique, a été la dure réalité des problèmes sociaux du quartier. "La ville avait à cœur d'éviter au maximum les gênes du chantier aux riverains, reprend Pascal Sibileau. Nous avons donc scindé les opérations en plusieurs phases, ce qui permettait aussi de mieux maîtriser les zones traitées". Malgré la vigilance des ouvriers et les protections de chantiers déployées, la municipalité a dû faire face à des dégradations volontaires, notamment des empreintes de pas dans le béton frais. "Nous avons été contraints de refaire plusieurs dizaines de mètres carrés, reprend



Le lavage révèle la couleur rosée du granulat.

Michel Guillou. Mais l'attitude de certains riverains n'est pas seule en cause : nous avons constaté des fissures, probablement dues au passage prématuré de véhicules de chantier pour l'implantation des espaces verts ou des candélabres".

■ Lieu de convivialité

La structure est aujourd'hui parfaitement apte à supporter un trafic occasionnel, dans la perspective de l'accueil du marché forain. "Nous avons intégré des bornes d'alimentation en eau et en électricité, ainsi que des bornes d'accès amovibles, ajoute Michel Guillou. Le parti pris d'un espace totalement dégagé favorise la tenue de ce type de manifestations. Il n'en demeure pas moins qu'une esplanade libre de tout obstacle était de nature à favoriser les échanges et les rencontres".

Pour le responsable, la réussite de l'opération l'encourage à réitérer l'utilisation du béton désactivé à Reims, peut-être en association avec un chaînage de pavés ou de bordures, pour scinder les surfaces en petites unités. "Les aménagements en béton désactivé sont de plus en plus demandés, conclut Pascal Sibileau. Les collectivités voient en ce matériau une solution qualitative qui conjugue des qualités esthétiques et de durabilité". ●

■ LE CHANTIER EN BREF

- **Lieu :** Centre Commercial Hippodrome de Reims
- **Projet :** restructuration du quartier de la Croix-Rouge avec un mail piéton
- **Contraintes :** obtenir une structure pérenne, à l'esthétique contemporaine
- **Solution :** un aménagement en béton désactivé
- **Surface de béton :** 1 800 m²
- **Durée des travaux :** 8 mois
- **Coût du projet :** 450 000 € HT (dont 49 000 pour le béton désactivé)

Centrale BPE Vicat de Villeurbanne : élément clé du procédé, le treillis soudé à mailles fines est nécessaire pour maîtriser la fissuration et conférer à la structure sa cohésion.

Moquette BHP : premier chantier test

Véritable saut technologique, l'utilisation de BHP en couche de roulement est une voie prometteuse pour la conception de chaussées innovantes et économiques, tant en construction neuve qu'en réhabilitation. Mais encore faut-il l'inscrire dans une logique industrielle.

Hormis quelques rares applications isolées, le BHP restait à l'écart des solutions de chaussée. "Etant issu du domaine des ouvrages d'art, je connais l'avantage des BHP en terme de résistance aux ambiances agressives et à l'abrasion, explique François de Larrard, chef de la Division Technologies du Génie Civil et Environnement au LCPC de Nantes. Mais en matière de chaussées, le BHP est pénalisé par un surcoût que ne parvient pas à équilibrer l'économie réalisée en épaisseur". Sans une remise en cause des approches classiques de conception, l'avenir de ce matériau était donc compromis, malgré son évident potentiel.

"L'idée nous est venue suite à une visite, en Australie, d'un atelier de préfabrication de citernes en mortier fortement dosé en ciment, poursuit le concepteur. Les parois armées, de 2 ou 3 cm d'épaisseur, sont coulées à plat, puis cintrées sur 360°, procédé qui fonctionne très bien. Nous avons

donc acquis la conviction que l'on pouvait couler une couche de chaussée en BHP dans une très faible épaisseur, ce qui permettrait d'en amortir le surcoût". Ainsi est né le concept de "moquette" BHP, étudié dans le cadre de l'opération "Matériaux hydrauliques pour la route", menée de 1999 à 2003 par le LCPC.

■ Couche de roulement désolidarisée

L'originalité du procédé repose sur une séparation des fonctions. "La résistance et la durabilité du BHP sont mises à profit, là où elles sont nécessaires, dans la couche de roulement. La fonction structurelle est assurée par une structure porteuse réalisée avec des matériaux moins nobles et performants, ajoute François de Larrard. Il suffit juste de découpler les deux couches en interposant un film polyane et un géotextile, afin d'éviter la remontée de fissures de la fondation

en béton ou en grave hydraulique dans la couche en BHP". Avantage : la "moquette" pourrait permettre de réhabiliter des structures fissurées ou présentant des déformations de l'uni par une simple application de ce tapis à hautes performances.

"Aujourd'hui, on réhabilite ces chaussées en les fragmentant et en reconstruisant par-dessus, ce qui les relègue au simple rôle de plateforme, procédé coûteux et peu efficace sur le plan de la gestion des maté-



Le BHP se prête facilement à une mise en œuvre à la machine à coffrage glissant.



Le treillis est ancré par des poutres aux extrémités et assujéti au béton maigre par des attaches pour éviter tout mouvement.

riaux” ajoute François de Larrard. La moquette BHP, en revanche, mobilise peu de granulats et permet de limiter l’impact sur les ressources naturelles, bien qu’étant fortement dosée en ciment (près de 500 kg). La solution est donc parfaitement en phase avec les exigences d’un développement durable. Sur le plan économique, la solution présente un avantage sensible tant en réhabilitation qu’en construction neuve (BAC ou grave-bitume).

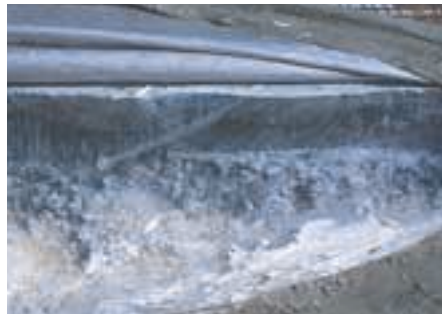
■ Chantier : un essai transformé

Validé expérimentalement par l’étude du comportement d’une planche d’essais, le principe demandait à être confronté à des conditions réelles de chantier. Le Groupe Vicat s’est volontiers proposé en offrant l’un de ses sites : la centrale BPE de Villeurbanne, comme il l’avait déjà fait, à deux reprises, pour le BCMC (terminal de Chelles et usine de Xeuilley).

“La voie d’accès de la centrale dessert aussi un dépôt de matériaux et un centre de recyclage, explique Jean-Marc Potier, responsable France des marchés de travaux publics chez Vicat. Elle supporte donc un trafic élevé, entre 150 et 200

■ LE CHANTIER EN BREF

- **Lieu :** Centrale BPE Vicat de Villeurbanne
- **Projet :** tester une solution mince en BHP désactivé
- **Contraintes :** rhéologie du béton et implantation du treillis soudé
- **Linéaire réalisé :** 120 m
- **Largeur réalisée :** 5 m
- **Durée des travaux :** 4 jours, dont une journée pour le BHP



La pose d’un polyane et d’un géotextile, entre le BHP et la couche support en béton maigre, permet de stopper une éventuelle remontée de fissuration.

poids lourds par jour, ce qui est un bon test pour évaluer le comportement de la moquette BHP en conditions réelles”. De plus, la longueur de la chaussée (120 m) est suffisante pour s’assurer de la validité d’une mise en œuvre mécanisée à la machine à coffrage glissant.

Mené en l’espace de quatre jours au mois de juillet 2003 par l’entreprise Appia Equipement de la Route, le chantier a consisté en la mise en œuvre d’une couche support en béton maigre de 15 cm sur la structure béton existante afin de disposer d’une assise régulière, la pose d’un polyane et d’un géotextile, et l’application du BHP sur une épaisseur de 6 cm. “Cette valeur est dictée par le bon enrobage du treillis soudé pour prévenir les risques de corrosion, 2 cm de BHP devant suffire pour prévenir la corrosion de l’armature sur la durée de vie espérée de 20 ans” précise François de Larrard.

■ Armatures et rhéologie

Si la mise en œuvre du BHP à la machine a été appréhendée par l’entreprise de façon tout à fait similaire à un béton classique, la fabrication et le positionnement du treillis soudé à mailles fines (5 cm) demanderait une industrialisation du procédé pour rendre son implantation compatible avec les exigences de productivité. “Le treillis a été posé sur des cales en béton de 3 cm et fixé au support pour éviter qu’il ne se cabre lors du coulage” relève Jean-Marc Potier. Cette armature a également été tendue en l’ancrant aux deux extrémités par des poutres d’about afin d’empêcher le retrait du béton.

Autre contrainte, le BHP nécessite une plus grande vigilance sur le plan de la rhéologie, ce qui oblige à parer les éventuels aléas de transport et d’application, et justi-

■ PRINCIPAUX INTERVENANTS

- **Maîtrise d’ouvrage et maîtrise d’œuvre :** Groupe Vicat
- **Etudes et contrôle :** LCPC
- **Fournisseur BPE :** Centrale Béton Rhône-Alpes de Meyzieu
- **Entreprise :** Appia Equipement de la Route

fié l’ajout d’un retardateur de prise. Le matériau exige aussi un temps de malaxage plus important et une protection soignée pendant la cure, compte tenu de la forte propension des BHP au retrait plastique, engendrant un risque de fissuration. Dans le cas présent, l’application du désactivant a été complétée par la pose d’un géotextile humidifié limitant l’évaporation, suivi le lendemain d’un lavage sous pression et d’une pulvérisation d’un enduit de cure pour parfaire l’hydratation de surface. Reste que les conditions de mise en œuvre étaient exceptionnelles, l’opération ayant été menée en pleine canicule. ●

■ COMME UNE COTE DE MAILLE

Pour illustrer le comportement de la couche de roulement en BHP, qui combine des qualités de dureté et de souplesse, François de Larrard utilise l’image de la cote de maille : “Les écailles sont dures, mais le vêtement suit les mouvements. Grâce au maillage obtenu par le treillis soudé, la couche de roulement en BHP se “fractionne” en une multitude de cellules, sans altérer ses qualités de résistance en traction et en compression. L’utilisation de granulats de petite taille permet aussi de limiter le bruit de roulement”.



La moquette BHP est désactivée et protégée par un géotextile imprégné d’eau pour éviter dessiccation précoce et fissuration.



Remue-méninges

Voici, pour vous détendre... ou pour vous irriter, une énigme à résoudre. Réponse dans le prochain numéro de *Routes*.

■ Mélange étonnant

Vous disposez de deux solutions d'eau oxygénée : l'une à 30 % et l'autre à 3 %. Dans quelle proportion devez-vous les mélanger pour obtenir une solution d'eau oxygénée à 12 % ?



Solution du Remue-méninges de Routes n°85 : Travaux de pavage

Rappel du problème posé : Une équipe de paveurs doit paver deux rues, dont l'une a une superficie double de l'autre. Durant la moitié de la première journée, l'équipe entière pave une partie de la grande rue. Puis, elle se scinde en deux groupes égaux. Le premier groupe continue de paver la grande rue et la termine le soir même. Le deuxième groupe, de son côté, pave la petite rue jusqu'au soir, mais sans la terminer. Un paveur la terminera le lendemain, en une journée de travail.

Question : combien de paveurs y a-t-il dans l'équipe ?

Solution

En plus de l'inconnue principale, le nombre de paveurs que nous désignons par "X", il est commode d'introduire une inconnue auxiliaire "Y" qui représente la surface pavée par un paveur en un jour. Bien qu'on ne demande pas de déterminer cette inconnue "Y", celle-ci nous aidera à trouver l'inconnue principale "X".
Exprimons l'aire de la grande rue à l'aide de "X" et de "Y" :

- "X" paveurs, ayant travaillé sur la grande rue pendant une moitié de la journée, ont pavé : $1/2 XY$,
- "X/2" paveurs, ayant poursuivi le travail sur la grande rue pendant la seconde moitié de la journée, ont pavé : $1/2 (X/2) Y$, soit $1/4 XY$.
- Puisque, à la fin de la journée, la grande rue était entièrement pavée, son aire est donc : $1/2 XY + 1/4 XY = 3/4 XY$
- Exprimons maintenant l'aire de la petite rue à l'aide de "X" et de "Y" :
- "X/2" paveurs, ayant travaillé sur la petite rue pendant la seconde moitié de la journée, ont pavé : $1/2 (X/2) Y$, soit $1/4 XY$,
- "1" paveur, ayant terminé le pavage de la petite rue en une journée entière, a pavé : $1 \cdot Y$, soit Y
- L'aire de la petite rue est donc : $1/4 XY + Y = 1/4 (XY + 4Y)$

Il ne reste plus qu'à traduire, en langage algébrique, la phrase de l'énoncé "la grande rue est deux fois plus grande que la petite rue", et l'équation devient : $3/4 XY = 2 \cdot 1/4 (XY + 4Y)$.

En simplifiant par "Y" les deux membres de l'égalité, l'inconnue auxiliaire est ainsi éliminée et l'équation prend la forme : $3/4 X = 2 \cdot 1/4 (X + 4)$.

D'où : $X = 8$

L'équipe est donc composée de 8 paveurs.



AGENDA

Réunions Ouvrages d'art

Cimbéton organise, au cours de l'année 2004, des réunions consacrées aux ouvrages d'art. Sont déjà programmées :

- Lyon (mars)
- Rouen (juin)
- Paris (novembre)

Pour en savoir plus :

Patrick Guiraud (Cimbéton)

Tél. : 01 55 23 01 00

Fax : 01 55 23 01 10

Email : p.guiraud@cimbeton.net

Prix de l'Innovation 2005

Le Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Travaux Publics de France et d'Outre-Mer va décerner des prix d'un montant total de 30 000 euros destinés à récompenser une invention originale susceptible de contribuer à l'amélioration des performances et de la productivité dans le domaine des Travaux Publics. Cette invention pourra concerner une innovation relative à la conception des ouvrages ou aux procédés d'exécution.

Elle ne devra pas être spécifique des matériaux de construction, ni être consacrée à un aspect purement technologique du matériel. Les participants sont toutes personnes physiques de nationalité française ou des étrangers exerçant en France. Date limite de dépôt des dossiers : 30 juin 2004.

Règlement envoyé sur simple demande adressée à :

Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Travaux Publics de France et d'Outre-Mer
Commission technique
3 rue de Berri, 75008 Paris.

Tél. : 01 44 13 31 83

Fax : 01 44 13 32 73

Email : thonierh@fnntp.fr