

Routes

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



DOCUMENTATION TECHNIQUE

Les coulis et les bétons
pour les fondations
spéciales

LE POINT SUR

Eure : traitement des sols
et recyclage des chaussées
à la chaux et au ciment

CHANTIER

Toulouse : un chantier
phénoménal pour l'A380

2 EDITORIAL

3-5 LE POINT SUR



Eure :
traitement des sols
et recyclage des chaussées
à la chaux et au ciment

6 SCIENCES ET TECHNIQUES



Les cristaux (2^e partie)

7-14 DOCUMENTATION TECHNIQUE



Les coulis et les bétons
pour les fondations spéciales

15-17 CHANTIER



Toulouse :
un chantier phénoménal
pour le futur Airbus A380

18-19 CHANTIER



Chambéry :
le BCMC au service
de giratoires très sollicités

20 LE SAVIEZ-VOUS ?

En couverture : l'un des deux
giratoires en BCMC (béton de ciment
mince collé) de la ville de Chambéry

Entretien des routes secondaires : reconstruction, renforcement... ou recyclage ?

Le choix d'une technique de réfection de chaussées résulte d'un compromis entre les exigences techniques, les contraintes économiques et les exigences d'ordre écologique et environnemental. À une époque où les budgets des collectivités locales font l'objet d'arbitrages douloureux, où l'on cherche à optimiser les investissements et à préserver l'environnement, il peut paraître surprenant que l'on n'ait pas davantage recours, pour la réfection structurelle des routes secondaires, à une solution logique, économique et écologique comme le retraitement en place au ciment.

Ce procédé performant utilise la stabilité résiduelle de la fondation et recycle les matériaux de la structure existante pour la reconstituer de façon homogène et adaptée au trafic à supporter. Cette technique, inaugurée aux Etats-Unis dans les années cinquante et adoptée à une échelle limitée en France, après l'hiver

rigoureux de 1962-1963, pour la remise en état des chaussées dégradées par le gel, est utilisée aujourd'hui pour retraiter, chaque année, environ deux millions de mètres carrés.

Si cette technique rencontre un intérêt croissant, c'est que l'on dispose aujourd'hui de malaxeurs puissants et que l'on connaît mieux les performances techniques des matériaux traités au ciment, ainsi que le comportement des structures semi-rigides. Il n'en reste pas moins que le retraitement en place au ciment reste largement sous-utilisé, malgré des avantages économiques et écologiques indéniables.

Le département de l'Eure fait figure d'exception. Depuis 1990, plusieurs centaines de kilomètres de routes ont été retraités au ciment, comme le montre la monographie ci-après.

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@cimbeton.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 - Documentation technique : Patrick Guiraud - Réalisation : Ilot Trésor, 83 rue Chardon Lagache, 75016 Paris - Email : mandorla@club-internet.fr - Conception maquette : Dorothee Picard - Dépôt légal : 3^e trimestre 2003 - ISSN 1161 - 2053 1994



Département de l'Eure : plusieurs centaines de kilomètres font appel aux techniques du traitement de sol et du recyclage des chaussées à la chaux et au ciment.

Le traitement des sols et le recyclage des chaussées à la chaux et au ciment

Grâce à une politique d'encouragement de l'innovation, le Conseil Général de l'Eure a su résoudre la problématique de raréfaction des ressources en matériaux. À moindre coût et avec un impact moindre sur l'environnement.

Malgré un déficit d'image, sans doute lié à l'absence de grande agglomération facilitant son identification, l'Eure dispose de nombreux atouts, à commencer par une situation géographique privilégiée. Situé à mi-chemin entre l'Île-de-France et les ports normands, ce département, qui associe ruralité et tradition industrielle, affiche un réel dynamisme économique. Fort de plus de 550 000 habitants, dont une population de jeunes supérieure à la moyenne nationale lui assurant sa dynamique démographique, l'Eure parvient à maintenir son

taux de chômage en dessous des statistiques du pays.

Les raisons ? Une politique d'encouragement de la formation et des possibilités très attractives d'accueil des acteurs économiques, le département bénéficiant d'espace et d'un réseau routier bien entretenu et non congestionné. Conséquence : une grande diversité d'entreprises a fait le choix de s'y implanter. On citera, pour mémoire, des fleurons comme la Snecma qui produit les propulseurs de la fusée Ariane à Vernon ainsi que Renault et son centre d'essais à Aubevoye.



Les limons et les argiles présents dans l'Eure sont adaptés au traitement avec des liants hydrauliques.

■ DEUX TECHNIQUES POUR TOUS LES CAS DE FIGURE

Deux approches sont possibles pour valoriser les matériaux, présents sur le site, en les mélangeant à des liants hydrauliques :

- La réalisation de la couche de forme de nouvelles chaussées, d'échangeurs, de carrefours ou de giratoires, fait appel au traitement de sol en place (limons, sables, argiles...). Cette structure peut ensuite accueillir une chaussée traditionnelle ou une chaussée béton ;
- La même technique peut être déclinée à une route endommagée. Dans ce cas, c'est le corps de chaussée qui est lui-même reconditionné, sur lequel il suffira d'appliquer une couche de roulement (BBTM par exemple). Quand c'est possible, les services du Conseil Général de l'Eure préconisent la stabilisation des accotements en apportant préalablement des matériaux pour renforcer la bordure de la voirie (poutres longitudinales). Le traitement est alors réalisé sur deux couches de 30 cm au lieu d'une. Seule la couche supérieure est malaxée sur la totalité de l'emprise.

Le traitement et le recyclage peuvent être mis en œuvre par :

- une intervention en postes séparés (ripper, épandeur, pulvimixeur, niveleuse et compacteur) ;
- un atelier de reconditionnement comme l'ARC 700, développé par Appia et très utilisé dans l'Eure pour ses qualités d'homogénéité, de puissance et de productivité (jusqu'à 1 000 m linéaire par jour), qui réalise toutes les opérations de fraisage, épandage, arrosage et malaxage, à l'exception du compactage, exécuté dans la foulée.

■ Pénurie de granulats

Ce dynamisme reflète bien l'engagement du Conseil Général, qui a su tirer parti des spécificités du territoire, quand bien même elles étaient des handicaps. *"Nous sommes confrontés à une pénurie de granulats, qui renchérit le coût de l'entretien et de l'évolution de notre réseau routier, un phénomène aggravé par la croissance du trafic et des sollicitations,* explique Jean-Marie Masson, directeur général adjoint des services du département. *Nous nous sommes donc tournés vers des techniques alternatives permettant de mettre en œuvre de nouvelles assises ou couches de chaussée à partir des matériaux présents sur le site".* Comme les fraisats d'enrobés pour régénérer les couches superficielles de roulement, en association au traitement des sols en terrassement et au retraitement des corps de chaussées à l'aide de liants hydrauliques (chaux et ciment).

Entreprise depuis plus de dix années, cette politique née d'une volonté de bonne gestion de l'argent public s'inscrit aussi dans le droit fil du développement durable, eu égard à la nécessité croissante de préserver l'environnement et les ressources naturelles, même si ce concept était à l'époque peu médiatisé.

■ Traitement chaux-ciment : plusieurs centaines de kilomètres déjà réalisés

La démarche de précurseur de Jean-Marie Masson, relayée efficacement par Franck Peyron, directeur-adjoint de la délégation aux investissements à la Direction des routes et de l'aménagement, a permis au département d'acquiescer une véritable expertise grâce à l'enseignement des nombreux chantiers réalisés, vu l'absence de corpus à l'époque (pas de recommanda-



L'ARC 700 (Atelier de Reconditionnement de Chaussées) imaginé par Appia.



Le retraitement d'une chaussée gagne à être étendu aux accotements pour les stabiliser et accroître la sécurité des usagers.

tions ni de guide sur lesquels s'appuyer). *"Depuis 1992, le département a réalisé plusieurs centaines de kilomètres faisant appel aux solutions de traitement et de retraitement à la chaux et au ciment,* explique Franck Peyron, soulignant la valeur statistique de ses observations. *Ce qui nous frappe le plus, c'est l'exceptionnelle régularité des résultats obtenus : nous n'avons à déplorer aucune contre-référence."*

Ces résultats sont aussi à mettre à l'actif d'un bon encadrement technique. À com-

■ QUELQUES RÉFÉRENCES

- BRETEUIL-SUR-ITON : remise à niveau de la RD
- ETREPAGNY : remise à niveau de la RD 14 bis (1992)
- CHARLEVAL : renforcement d'un giratoire (2001)
- GASNY : remise à niveau de la RD 1 (2002)
- LE CHESNE : remise à niveau de la RD 840 (1995)
- LIEUREY : remise à niveau de la RD 28 (2003)
- PREY : réalisation d'une déviation (1998)
- QUITTEBEUF : calibrage et renforcement de la RD 39 (2000)
- ST AUBIN D'ECROSVILLE : calibrage et renforcement de la RD 135 (1998)
- ST OUVEN-DE-PONTCHEUIL : réalisation d'un tourne à gauche (1998)
- VERNEUIL-SUR-AVRE : aménagement d'un carrefour (2003)



À l'exception des sites urbains, le retraitement permet de remettre à niveau tout type d'ouvrage : ici, le giratoire de Dieu l'Acroisse.

mencer par l'analyse des offres, les entreprises devant joindre un mémoire technique, validé par le Conseil Général avec l'aide du CETE.

“Sur chantier, nous mobilisons davantage de contrôleurs, ajoute Franck Peyron. Mais il faut dire aussi que la technique a fait de gros progrès : les machines ont gagné en puissance et en précision d'exécution, de sorte que les modes de mise en œuvre ont pu être optimisés et les dosages de liants être abaissés en moyenne à 2-2,5 % pour la chaux et à 5-7 % pour le ciment”.

■ 15 à 20 % d'économie

“Ces techniques présentent bien quelques inconvénients, mais on peut s'en affranchir, poursuit le responsable. Nous devons seulement être plus attentifs à la météorologie, l'épandage étant difficile en cas de grand vent et le traitement impossible sous une pluie battante. Et la présence de réseaux interdit son utilisation en milieu urbain”.

Ces réserves étant faites, force est de constater que le traitement de sol et le retraitement de corps de chaussées offrent de nombreux avantages. L'économie réalisée sur les terrassements et les transports de matériaux se traduit, outre la limitation des nuisances, par un gain financier de 15 % pour le retraitement de chaussées et 20 % pour le traitement de couches de formes et terrassement. Sans compter un contexte fiscal favorable, la TVA de ces travaux d'investissement pouvant être récupérée, à l'inverse des marchés d'entretien. “La durée des travaux est aussi diminuée de 20 à 30 %, malgré la nécessité de laisser reposer la structure une semaine avant de la remettre en service, reprend Franck Peyron. Les entreprises en profitent pour réaliser des travaux de bordures et de caniveaux”.



Grâce au retraitement à la chaux et au ciment, la RD 840 supporte sans dégradation une circulation de 9 000 véhicules par jour.

■ Durabilité accrue

Autre facteur d'économie pour la collectivité : la stabilité à long terme de la couche traitée. “Généralement, nous intervenons pour refaire les enrobés dans des délais de cinq à sept ans, selon le trafic, pour corriger des problèmes de déformation tels que l'orniérage et la fissuration, explique Franck Peyron. Aujourd'hui, le recul dont nous disposons et les projections que nous pouvons faire nous permettent de tabler sur une absence de pathologies pendant quinze ans.” Une durabilité liée à la plus grande cohésion de la structure, qui la rend moins sensible à l'eau et aux risques d'infiltration. “Une couche de grave-bitume de classe 4, plus souple, constitue un excellent écran contre la remontée des fissures dues au retrait” souligne l'ingénieur.

■ Impliquer les entreprises

Si aujourd'hui un guide, édité par le Comité Français pour les Techniques Routières sur le retraitement à froid des chaussées, est sur le point de voir le jour au niveau national, la profession le doit aux efforts déployés en leur temps par la région Normandie et, en particulier, par les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime. “Le renchérissement des matériaux, l'encadrement réglementaire de plus en plus restrictif des mises en décharges et l'évolution générale de la société en faveur d'un développement durable ne peuvent qu'inciter les maîtres d'ouvrage à opter pour ces solutions alternatives, concluent Jean-Marie Masson et Franck Peyron. C'est pourquoi nous mettons tout en œuvre pour convaincre les entreprises de nous suivre, car même si la tendance est clairement tracée sur le long terme, leur aptitude à s'adapter à cette évolution conditionnera l'essor de ces solutions pour les années à venir”. ●



Franck Peyron
Directeur-adjoint de la délégation aux investissements à la Direction des routes et de l'aménagement

“ Ces techniques offrent aux collectivités de nombreux avantages ! ”

■ UNE DÉMARCHE TOURNÉE VERS LA QUALITÉ

“Dans le département, 40 % des réponses aux appels d'offres vont à des variantes, assure Jean-Marie Masson, toujours à l'affût de solutions innovantes, dès lors qu'elles respectent les critères du mieux-disant. Nous ne sommes pas opposés à des surcoûts si nous bénéficions d'une plus grande durabilité apportant des gains sur le long terme”. Ce précepte éclaire mieux l'engagement du directeur-adjoint des services du département au sein de l'APAQ, l'Association pour la Promotion et l'Amélioration de la Qualité domiciliée au CETE de Normandie. Fondée il y a seize ans, cette organisation regroupe tous les acteurs qui interviennent sur le domaine routier, des donneurs d'ordres aux entreprises, en passant par les architectes, bureaux d'études et autres maîtres d'œuvre. Très active, l'APAQ Normandie se veut un lieu d'échange, de réflexion, de formation et de proposition. Autre volet important : l'édition de nombreux ouvrages (PAQ, Matériaux de substitution, Préparation des chantiers, Contrôles...) ainsi que l'organisation de journées techniques à l'attention des conseillers généraux membres des commissions techniques et d'appel d'offres.

Les cristaux (2^e partie)

Les cristaux sont de différentes sortes. Il en existe des simples, formés à partir d'atomes d'une seule espèce, comme le diamant qui est un carbone pur. Et des composés, tels les cristaux du sel de cuisine, formés d'ions de deux sortes : le sodium et le chlore. Mais, il existe des cristaux plus complexes, dont les molécules sont constituées d'atomes de plusieurs espèces.

Le plus petit groupe d'atomes répétitifs, qu'on peut isoler dans un cristal, s'appelle la "maille cristalline". Dans le cas d'un cristal simple, il s'agira d'un atome. Les dimensions de la maille cristalline peuvent être des plus variées. Les plus petites distances entre nœuds voisins (sommets des mailles) se rencontrent chez les cristaux les plus simples, constitués d'atomes d'une même espèce. Les plus grandes chez les cristaux complexes. Ces dimensions varient de 2 à 3 angströms à quelques centaines d'angströms. À l'heure actuelle, on connaît des centaines de structures cristallines. Les trois réseaux (figures 1A, 1B et 1C) correspondent à des cristaux simples, les plus répandus. Les ronds représentent les centres des atomes. Les lignes qui les réunissent n'ont pas de sens réel et ont été tracées pour mieux faire comprendre la disposition spatiale des atomes.

Les dessins 1 A et 1B représentent des réseaux cubiques. Pour mieux vous les représenter, imaginez d'empiler, arête contre arête, face à face, des cubes d'enfants, puis de placer mentalement des points aux sommets et au centre des cubes : vous obtenez le réseau cubique représenté sur le premier dessin et appelé "réseau cubique centré".

Si vous placez des points aux sommets des cubes et aux centres de leurs faces, vous avez le réseau cubique représenté sur le deuxième dessin et appelé "réseau cubique à faces centrées".

Le troisième réseau (dessin 1C) est appelé "hexagonal compact".



Figure 2

Pour comprendre l'origine de ce terme et mieux se représenter la disposition à laquelle il donne lieu, prenons des boules de billard et disposons-les aussi serrées que possible, en triangle, comme au commencement d'une partie de billard (figure 2).

La boule à l'intérieur du triangle a six voisines avec lesquelles elle est en contact et forme un hexagone. En empilant les boules de la couche suivante directement au-dessus des boules de la première couche, l'assemblage n'est pas compact. Pour empiler dans le même volume un maximum de boules, il faut placer celles de la deuxième couche dans le creux de la première, celles de la troisième couche dans le creux de la deuxième, et ainsi de suite. Dans l'assemblage hexagonal compact, les centres des boules de la troisième couche se trouvent au-dessus des centres des boules de la première. Les centres des atomes d'un réseau hexagonal compact sont disposés exactement de la même façon. Une multitude

d'éléments cristallisent dans l'un des trois systèmes décrits.

Les structures cristallines complexes sont aussi d'une variété infinie. Elles se présentent sous forme d'assemblages très compacts de molécules. Toutes les substances organiques donnent des cristaux moléculaires. Les molécules organiques comportent couramment des dizaines ou des centaines d'atomes et pour certaines des milliers et des dizaines de milliers d'atomes. ●

■ CIMENT ET CRISTAUX

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (abréviation : C_3S) ; le silicate bicalcique $2 \text{ CaO}, \text{ SiO}_2$ (abréviation : C_2S) ; l'aluminate tricalcique $3 \text{ CaO}, \text{ Al}_2 \text{ O}_3$ (abréviation C_3A) ; l'aluminoferrite tétracalcique $4 \text{ CaO}, \text{ Al}_2 \text{ O}_3, \text{ Fe}_2 \text{ O}_3$ (abréviation : C_4AF). Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates, des aluminates de calcium hydratés et de la chaux hydratée dite Portlandite, formant un gel micro-cristallin, à l'origine du phénomène dit de "prise". Le développement et la multiplication de ces micro-cristaux expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable "roche artificielle" qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.

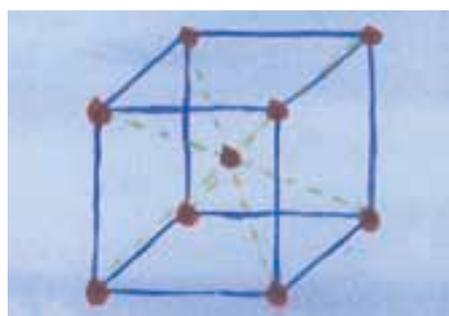


Figure 1A : réseau cubique centré

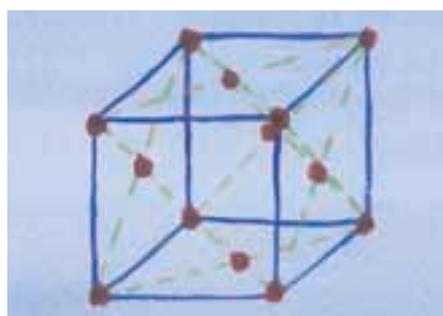


Figure 1B : réseau cubique à faces centrées

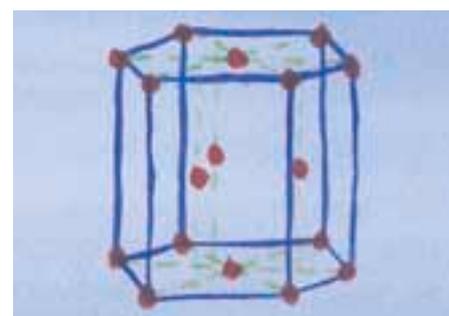


Figure 1C : réseau hexagonal compact

Les coulis et les bétons pour les fondations spéciales

Les travaux de fondations spéciales regroupent de nombreuses techniques et procédés destinés à la réalisation de fondations d'ouvrages de génie civil et d'infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires, d'excavation, de soutènement et de consolidation de sol et d'aménagements de toutes natures en site urbain.



Creusement d'un écran étanche avec une benne à câble.

Les techniques de fondations spéciales, exécutées par des entreprises spécialisées, ont fait l'objet, ces dernières années, de très nombreuses innovations et évolutions catalysées par le développement et l'optimisation des formulations de nouveaux coulis et de nouveaux bétons, par le perfectionnement des techniques de mise en œuvre, ainsi que par l'automatisation et l'amélioration de la fiabilité et de la précision des matériels de chantier.

Toutes ces évolutions ont été accompagnées par un souci constant des fournisseurs de matériaux et de matériels, des entreprises, des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage, d'une prise en compte de plus en plus importante du respect de l'environnement et de l'amélioration de la sécurité des ouvriers sur les chantiers.

La plupart des techniques de fondations spéciales nécessitent l'utilisation de matériaux à base de ciment, en particulier

sous forme de coulis ou de bétons. Elles peuvent être regroupées en cinq principales familles :

- les fondations profondes ;
- les parois moulées ;
- les écrans étanches ;
- le "jet grouting" ;
- les injections de sols.

■ Les fondations profondes

De nombreuses techniques de fondations profondes sont disponibles pour réaliser les fondations de structures de génie civil, telles que par exemple des fondations de piles ou de culées d'ouvrages d'art. Elles se présentent sous forme de pieux, de barrettes, de puits ou de micro pieux. Les pieux sont

en général forés. On distingue plusieurs types, selon la technique utilisée pour les réaliser.

- **Les pieux forés simples** : ces pieux sont réalisés par mise en œuvre du béton à l'aide d'une colonne de bétonnage, après mise en place d'une cage d'armatures dans un forage exécuté sans soutènement des parois.
- **Les pieux forés tubés** : le maintien des parois est assuré par un tubage métallique provisoire.
- **Les pieux forés boue** : le maintien des parois est dans ce cas assuré, pendant le forage, par une boue thixotropique à base de bentonite. L'outil de forage, appelé "bucket", est de section circulaire. Après descente dans le forage d'une cage d'armature, l'excavation est remplie de béton à l'aide d'une colonne de bétonnage.
- **Les pieux forés à la tarière creuse** : l'exécution est réalisée à l'aide d'une tarière. Le béton est mis en place au fur et à mesure de l'extraction du sol par la tarière. Les pieux peuvent être aussi façonnés à l'avance sous forme d'éléments préfabriqués en béton armé, mis en place par battage ou vibro forage.
- **Les barrettes** : leur exécution reprend exactement le principe de celui des pieux forés boue, mais s'en distingue par l'utilisation d'un outil de forage de forme différente, dite benne à câble, benne hydraulique, ou "fraise", qui confère à la fondation une section rectangulaire. Le creusement des puits est, en général, effectué par des moyens manuels ou de petits matériels d'excavation. Les parois sont soutenues, au fur et à mesure du creusement, par des blindages. Après creusement, la fondation est bétonnée à sec.
- **Les micropieux** : ce sont des pieux de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est, en général, équipé d'armatures et rempli d'un mortier ou d'un coulis de ciment par gravité, au moyen d'un tube plongeur ou par injection. Si la nature du sol le permet, des micropieux en béton façonnés à l'avance

peuvent être mis en place par battage ou fonçage.

Pour toutes ces techniques de fondations, lorsque le niveau d'agressivité du sol est inconnu, on privilégie par précaution des ciments de caractéristiques complémentaires ES.

■ Les parois moulées

Les parois moulées sont des ouvrages de fondations en béton armé utilisées à titre de structure définitive pour la réalisation de nombreux ouvrages. Ancrées dans une couche résistante étanche, elles permettent d'excaver en toute sécurité sous la nappe phréatique. Les parois moulées sont résistantes et étanches. Elles assurent simultanément trois fonctions : soutènement, portance et étanchéité.

La technique se prête à la réalisation d'une grande diversité d'ouvrages dans des sites et des conditions géotechniques très variées. Elle permet de réaliser des ouvrages de formes et de dimensions diverses jusqu'à des profondeurs très importantes.

- Parois de soutènement pour murs latéraux de tranchées couvertes, de parkings souterrains, de murs de quai.
- Parois circulaires pour la réalisation de bassins d'orage, de puits de ventilation de tunnels.
- Grandes fouilles en site urbain en présence ou en absence de nappe phréatique.
- Puits et enceintes cylindriques de grand diamètre à forte profondeur.
- Tranchées en site urbain à l'air libre ou enterrées : voies autoroutières ou routières, voies ferrées ou collecteurs.
- Gares souterraines.
- Fondations profondes et porteuses.
- Bassins de rétention d'eaux pluviales (paroi circulaire ancrée dans une substructure étanche).

■ LA BENTONITE

La bentonite est une variété particulière d'argile (de la famille des smectites) qui se présente sous forme de poudre fine. Les particules de bentonite sont constituées d'assemblages de feuillets parallèles. En présence d'eau, et notamment en suspension, les molécules d'eau se fixent entre les plaques des feuillets chargés électriquement et séparés par un cation métallique ce qui provoque, en particulier, le gonflement important du grain de bentonite.

Les suspensions de bentonite présentent des propriétés particulières :

- aptitude à développer de la viscosité ;
- aptitude à former, de manière réversible, un "gel" (thixotropie) ;
- aptitude à constituer un seuil d'écoulement ;
- propriétés colmatantes (aptitude à former un cake par filtration) ;
- propriétés liantes et agglomérantes.

Il existe plusieurs variétés de Bentonite régulièrement employées pour la réalisation de nombreuses techniques

de fondations spéciales (forage de pieux ou de barrettes, exécution de parois moulées ou d'écrans étanches, creusement de tunnel, injection de consolidation de sol...), sous forme de fluide de perforation, fluide de forage ou en mélange avec du ciment.

Pour le creusement d'une tranchée ou le forage d'un pieu, la stabilité du terrain est assurée par une boue de bentonite. La poussée hydrostatique de cette boue compense la poussée des terrains et des eaux de la nappe phréatique. L'application de cette poussée sur le terrain est rendue possible grâce à la formation sur la paroi de l'excavation d'un film étanche (le "cake") constitué soit par les particules de bentonite accumulées par le phénomène de filtration (cas des sols peu perméables), soit par une frange de sol imprégnée de boue bentonitique (cas des sols perméables).

Lorsqu'on colmate un sol avec un coulis de bentonite, on obtient un matériau souple, plastique et présentant une très faible perméabilité.



Cages d'armatures.

La technique de réalisation de la paroi moulée comprend plusieurs phases :

- la réalisation d'une prétranchée (protégée par une "murette" guide de 1 m à 1,50 m de hauteur) qui garantit le nivellement de la paroi, assure la stabilité des terres en surface et sert de guide à l'outil de perforation.
- la perforation du sol sous boue bentonitique à l'aide de bennes suspendues à un câble ou à un "kelly" où l'hydraulique joue un rôle croissant, ou bien à l'aide de fraises hydrauliques.



Creusement de la tranchée avec une benne à câble.

Les dimensions des panneaux vont de 0,5 m à 1,50 m d'épaisseur, quelques mètres de largeur (3 à 7 m) et de 10 à 100 m de profondeur. La boue ou fluide de forage (suspension à base de bentonite et d'eau) est produite par une centrale de fabrication installée sur le chantier. Elle est déversée en permanence dans l'excavation au fur et à mesure de son avancement pour en assurer la stabilité. On opère généralement par panneaux juxtaposés, en alternant



Station de fabrication du coulis de bentonite.

panneau primaire et secondaire (panneau primaire perforé en terrain vierge, panneau secondaire perforé entre deux panneaux primaires déjà perforés).

- le curage du panneau par dessablage de la boue en circulation.
 - la mise en place des cages d'armatures et des dispositifs de joint (joint waterstop). Les cages d'armatures sont mises en place par éléments de 12 à 14 mètres de longueur.
 - le bétonnage par tube plongeur : le béton est mis en place à l'aide d'un tube plongeur ou de colonnes de bétonnage (en continu sans interruption) à partir du fond de la tranchée. Le tube plongeur est remonté au fur et à mesure du remplissage. La boue est simultanément extraite par pompage et recyclée.
- Les matériels modernes de réalisation des parois moulées permettent de contrôler en continu l'épaisseur, la verticalité et le déplacement latéral de la tranchée en cours d'excavation. Des précisions de verticalité de 0,25 % sont aujourd'hui atteintes.

La réalisation de parois moulées dans le sol implique un bétonnage au tube plongeur sous la boue, ce qui entraîne un certain nombre de contraintes :

- la densité des armatures ne doit pas être trop élevée, de manière à garantir un bon enrobage des armatures ;
- le béton doit être ouvrable pendant toute la durée du bétonnage ;

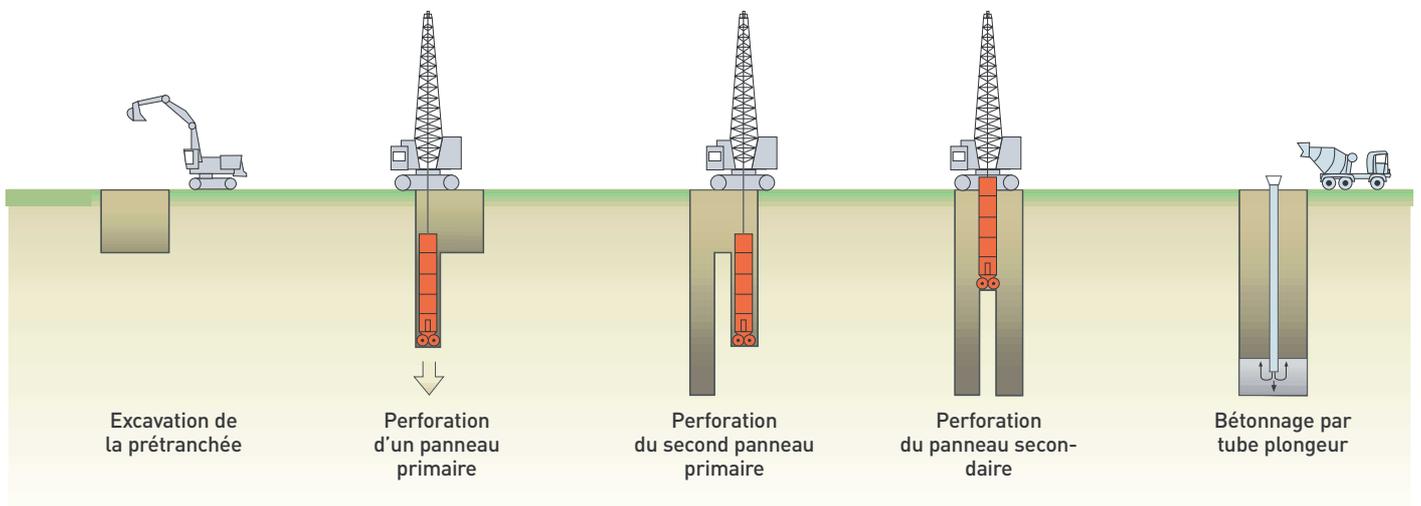


Schéma de réalisation d'une paroi moulée en béton.



Cages d'armatures mises en place dans la tranchée.



Creusement de la tranchée.

- il est recommandé d'utiliser un dosage en ciment supérieur ou égal à 350 kg/m^3 pour conférer au béton une meilleure rétention d'eau.

Lorsque la paroi ne doit pas assurer un rôle structurel mais plutôt une fonction d'étanchéité, le béton utilisé est un béton plastique obtenu par incorporation de bentonite (dosage courant en ciment 100 à 200 kg/m^3 et en bentonite 25 à 100 kg/m^3). La bentonite permet de produire un béton déformable (plastique), sans ségrégation, avec des coefficients de perméabilité suffisants (inférieur à 10^{-8} m/s).

■ Les écrans étanches

Les écrans étanches sont des structures enterrées destinées à réduire, empêcher ou détourner des écoulements souterrains ou établir une coupure imperméable pour isoler un site. Ils sont utilisés à titre provisoire et définitif pour réaliser soit des ouvrages hydrauliques soit des ouvrages de protection de l'environnement.

Ils sont réalisés à l'aide de coulis autodurcissables à base de bentonite et de ciment, dans des terrains généralement alluvionnaires (sols meubles de faible compacité, hétérogènes, perméables) en présence d'une nappe aquifère. Ils peuvent être linéaires (pour réaliser l'étanchéité de barrage ou de cours d'eau) ou circulaires (pour réaliser, par exemple, des enceintes fermées destinées à mettre hors d'eau une fouille ou isoler une zone polluée). Ils doivent être étanches, résistants tout en étant déformables (afin de suivre les mouvements de terrain sans se fissurer) et pérennes sous l'action de l'eau de la nappe phréatique. La technique consiste à réaliser une tranchée en continu en utilisant comme fluide de perforation, le coulis bentonite-ciment qui en se substituant au sol formera après durcissement l'écran définitif.

Les écrans étanches (d'épaisseur courante $0,50 \text{ cm}$) sont mis en place principalement pour deux types d'application : la réalisation de barrières étanches à la migration des eaux souterraines ou d'enceintes de confinement de zones polluées. Leur profondeur peut atteindre jusqu'à 100 mètres.

Les barrières étanches sont utilisées pour la construction de tranchées couvertes, de parkings, de stations de métro, de piles de pont, de quais ou d'écluses. Dans ce cas, elles assurent un rôle provisoire en permettant la réalisation des ouvrages à l'abri de la nappe phréatique. Elles peuvent être utilisées à titre définitif pour assurer l'étanchéité de digues, de rivières, de canaux ou de barrages. L'étanchéité complète de l'écran est garantie en le prolongeant et en assurant un ancrage dans une couche inférieure imperméable.

Les enceintes de confinement servent à protéger une zone polluée telle que des décharges ou des sites industriels. Ancrées dans un substratum naturellement étanche ou rendu étanche, elles ceinturent la zone en stoppant la migration et la dispersion des polluants vers les sols ou les eaux souterraines avoisinantes. Les coulis autodurcissables destinés à la réalisation d'écrans étanches sont constitués d'un mélange de ciment (en général de type CEM III), de bentonite spécialement adaptée pour la stabilisation de suspension comportant du ciment et d'eau avec ajouts éventuels d'adjuvants (afin d'adapter le coulis aux conditions particulières de chantiers, fluidification, retard de prise, réduction de l'essorage, etc.). Les ciments de type CEM III présentent une bonne résistance aux agressions éventuelles des eaux et du sol, et un développement de résistance relativement lent adapté aux contraintes d'exécution de la technique.

La composition du coulis bentonite/ciment doit être optimisée en fonction de type d'écran à réaliser (spécifications relatives à la perméabilité et la résistance), des caractéristiques des terrains traversés et des contraintes de mise en œuvre sur chantier. Le principe de formulation vise à optimiser les proportions relatives des constituants et la concentration du mélange de liant dans le coulis afin d'obtenir le meilleur com-



Muret-guide en béton.



Creusement de l'écran avec une benne à câble.



Tranchée remplie de coulis bentonite-ciment.

promis entre ouvrabilité, résistance, perméabilité et déformabilité. La nature et le dosage en ciment sont déterminés par des exigences de résistance et de déformabilité. La viscosité et le pouvoir anti-essorant du coulis à l'état frais sont ajustés en optimisant le dosage en bentonite.

L'augmentation du dosage en ciment améliore la résistance du coulis à l'état durci au détriment de l'ouvrabilité de la suspension lors de l'excavation. L'augmentation du dosage en bentonite améliore la perméabilité de l'écran et réduit la sédimentation et la ségrégation du coulis en phase liquide. Une teneur insuffisante en bentonite conduit à une suspension instable, une teneur trop élevée à une mauvaise ouvrabilité. Des fillers ou des cendres volantes sont parfois utilisés afin d'augmenter la masse volumique du coulis ou améliorer sa rhéologie à l'état frais.

Les dosages courants sont compris pour le ciment entre 150 et 300 kg/m³ de coulis et pour la bentonite (de type sodique) entre 20 et 50 kg/m³ de coulis.

Le coulis autodurcissable joue un double rôle :

- un rôle de boue stabilisatrice à l'état frais assurant la stabilité de la tranchée pendant son creusement ;
- un rôle de matériau rigide et peu perméable constituant la paroi après la prise de ciment.

Le coulis à l'état frais doit être fluide, stable, homogène, ne présenter aucune sédimentation ou ségrégation et équilibrer les pressions exercées par le sol. Ces propriétés sont obtenues grâce aux caractéristiques rhéologiques offertes par la bentonite. Elle maintient en suspension les grains de ciment et garantit la cohésion du mélange.

Le coulis doit conserver ses caractéristiques pendant les phases de fabrication, de stockage, de circulation dans les conduites d'alimentation et d'injection dans la tranchée.

À l'état durci, le coulis doit présenter des performances mécaniques suffisantes pour garantir la résistance de l'écran mais pas trop importantes pour que l'écran présente un module d'élasticité et des caractéristiques de déformations voisines de celui du sol et puisse se déformer sous des éventuels mouvements du terrain (des résistances mécaniques de l'ordre de ou de quelques MPa sont, en général, spécifiées).

Ces performances mécaniques ainsi que la pérennité et la non érodabilité de l'écran, et la résistance aux agressions éventuelles du sol sont obtenues en optimisant le type de ciment et



Balance à boue.

son dosage. Mais l'écran doit être aussi étanche (perméabilité inférieure à 10⁻⁹ m/s), cette propriété étant assurée en particulier par les caractéristiques spécifiques de la bentonite.

Pour la détermination de la composition pondérale du coulis (poids des constituants pour réaliser un m³ de coulis) les masses spécifiques à prendre en compte sont de l'ordre de 2,9 pour le ciment et 2,3 pour la bentonite.

Les coulis sont fabriqués dans des centrales spécifiques de chantier composées de silos de stockage du ciment et de la bentonite, de cuves de malaxage et de stockage des boues et des systèmes d'injection.

La fabrication est réalisée en deux étapes. La première consiste à préparer la boue primaire (mélange de bentonite et d'eau) par malaxage (la mise en suspension des particules fines de bentonite exige un malaxage à cisaillement élevé) puis par stockage dans des cuves pendant une durée comprise entre 6 et 24 heures afin de permettre le "mûrissement" de la bentonite. La deuxième étape consiste à incorporer le ciment dans la boue primaire par malaxage. Le coulis obtenu est maintenu ensuite en agitation dans une cuve d'attente avant d'être pompée vers la tranchée.

Les caractéristiques du coulis à l'état frais sont évaluées à l'aide de quatre principaux essais. La viscosité est contrôlée au moyen d'un cône de Marsh en mesurant le temps nécessaire à l'écoulement d'un litre de coulis à travers un ajutage de dimension déterminée (les valeurs courantes sont de l'ordre de 35 à 45 secondes). La tendance à l'essorage est mesurée à

l'aide d'un filtre presse. La masse volumique est déterminée à l'aide d'une balance à boue, la stabilité par mesure du volume d'eau "surnageante" obtenu par décantation de l'échantillon dans une éprouvette graduée.

La tranchée est creusée à l'aide de matériels utilisés en travaux de fondations spéciales (benne à câble ou fraise hydraulique). L'excavation peut être réalisée soit par tronçons alternés (écrans constitués de panneaux creusés alternativement) soit en continu (panneaux creusés les uns à la suite

des autres). Elle descend en général jusqu'à un substratum imperméable (par exemple une couche argileuse). Le coulis est introduit par déversement gravitaire dans la tranchée simultanément à l'excavation (en se substituant au sol prélevé). Cette technique permet d'obtenir une continuité parfaite de l'écran et donc de l'étanchéité.

Les écrans étanches n'ont pas un rôle structurel. Leur résistance mécanique doit être suffisante pour supporter le poids propre, résister aux contraintes du sol en profondeur et à des écoulements sous fort gradient. Une résistance en compression simple inférieure à 1 MPa permet de conserver une déformabilité satisfaisante de la paroi.

L'étanchéité des écrans est caractérisée par le coefficient de perméabilité K , en m/s (K correspond à la quantité d'eau traversant l'unité de section pendant l'unité de temps sous un gradient hydraulique défini). Les spécifications courantes sont fonctions de la nature de l'écran (K compris entre 10^{-7} et 10^{-9} m/s pour les ouvrages hydrauliques et K compris entre 10^{-8} et 10^{-10} m/s pour les ouvrages de protection de l'environnement). Le coefficient de perméabilité est mesuré sur un échantillon de matériau prélevé soit à la centrale de fabrication du coulis, soit par carottage au sein de l'écran après durcissement (il est déterminé à l'aide d'une cellule d'étanchéité triaxiale en mesurant le volume d'eau de percolation à travers l'échantillon).

La perméabilité globale de l'écran peut être mesurée *in situ* par des différences de niveau piézométrique de part et d'autre de l'écran ou par des essais de pompage.

Il est possible de diminuer considérablement la perméabilité d'un tel écran par introduction dans le coulis, en fin d'excavation, avant sa prise, de feuilles de PEHD (polyéthylène à haute densité). De telles feuilles, d'une épaisseur de quelques millimètres, de 1 à 2 m de largeur et de longueur correspondant à la profondeur de l'écran, permettent d'obtenir un écran présentant une très faible perméabilité et une très bonne résistance aux agressions chimiques, en particulier aux hydrocarbures et aux acides. La continuité entre les feuilles est assurée par la mise en place, dans une clef prévue à cet effet, d'un cordon hydrogonflant.

Dans certaines conditions, un écran étanche peut être réalisé avec la technique dite de l'"écran mince". Cette technique consiste à foncer, à l'aide d'une vibrofonçeuse, un profilé métallique (IPN de 50 à 80 cm de largeur et de 10 à 25 m de longueur) jusqu'à la profondeur voulue, puis à injecter sous pression le coulis autodurcissable à base de bentonite-ciment en remontant progressivement le profilé. La stabilité de l'excavation est assurée par le profilé à l'enfoncement et par le coulis à l'extraction. La machine est ensuite avancée de la largeur du profilé pour une deuxième passe. L'empreinte laissée dans le sol sert de guide pour le fonçage suivant. La répétition des fonçages permet d'obtenir un voile continu par remplissage de la saignée laissée par le profilé à la remontée et également par l'imprégnation par le coulis d'une zone proche du voile. Cette imprégnation, dont l'importance varie avec la compacité du sol, permet d'améliorer la continuité du voile, donc son efficacité. La bonne exécution de l'écran est conditionnée par la vitesse de remontée du vibreur, le débit et la composition du coulis.

■ LES MATÉRIELS DE PERFORATION

Divers matériels de perforation sont utilisés en fonction de la nature du terrain, de la technique et du projet à réaliser. Ces dernières années, sous la pression de contraintes environnementales et économiques, ces matériels ont particulièrement évolué, devenant plus fiables, plus compacts, plus précis et moins bruyants avec des rendements supérieurs. Ils sont informatisés et robotisés, et équipés de système de correction automatique de trajectoire et d'appareils de contrôle permettant d'enregistrer en continu les paramètres d'exécution.

● **Tarière** : matériel utilisé pour la réalisation de pieux.



● **Benne preneuse à câbles** : matériel constitué par des grappins mécaniques ou hydrauliques suspendus à des câbles et montés sur une grue (ou une pelle) à chenille.

● **Benne Kelly** : matériel constitué par une benne preneuse fixée à l'extrémité d'une tige télescopique de 20 à 50 m de profondeur, maintenue en position verticale par un guide. L'ensemble est porté par une grue à chenille.



● **Fraise hydraulique** : machine (à descente continue contrairement aux bennes qui sont à descente et remontée alternée) portée par une pelle sur chenille, constituée d'un bâti rigide (guide) équipé à son extrémité de deux tambours (fraise) tournant en sens inverse (les pics équipant les tambours permettent de désagréger le terrain). Une pompe située juste au-dessus des tambours assure l'évacuation des déblais (mis en suspension dans la boue de forage circulant en sens inverse). La boue de forage, criblée et filtrée en continu dans une station de traitement, alimente la saignée en surface. Elle permet, en maintenant le terrain, la mise en place des armatures et le bétonnage dès la fin de la perforation. Cette machine est utilisée pour forer des barrettes ou des éléments de paroi moulée à de très grandes profondeurs (jusqu'à 125 mètres) dans une vaste gamme de terrain (des sols pulvérulents aux roches dures).

Cette technique par fonçage est particulièrement adaptée compte tenu de sa facilité de mise en œuvre et sa rapidité d'exécution à des problèmes de pollution nécessitant l'isolation rapide d'un site. Elle est réalisée sans extraction de sol. En revanche, son domaine d'utilisation est limité aux sols formés d'alluvions à faible compacité et ne contenant pas d'élément supérieur à 50-100 mm. La profondeur est, dans l'état actuel des capacités des matériels de chantiers, limitée à 20-25 m. L'écran de faible épaisseur n'a pas de résistance mécanique importante mais il s'oppose aux déformations naturelles du terrain et aux pressions hydrostatiques.

■ Le "jet grouting"

Le "jet grouting" est un procédé de consolidation des sols qui consiste au traitement du sol dans la masse par injection sous haute pression d'un jet de coulis à base de ciment, réalisant *in situ* un mélange sol-ciment. Cette technique, apparue dans les années 1960, est actuellement couramment utilisée sur de nombreux chantiers de fondations spéciales.

La technique de réalisation se décompose en deux étapes principales :

- la réalisation d'un forage dans le sol (de diamètre de l'ordre de 120 à 150 mm) sur la hauteur du terrain à consolider et la mise en place dans le forage d'un train de tiges creuses (de diamètre 60 à 90 mm) équipé en pied, de buses d'injection et en partie haute d'une tête d'alimentation rotative ;
- l'injection du coulis sous haute pression au travers de buses de petits diamètres (jusqu'à 450 bars) par remontée et rotation simultanée du train de tige.

Le jet de coulis détruit le terrain par l'effet dynamique généré par sa grande vitesse et grâce au mouvement combiné de rotation et de remontée, le coulis se mélange intimement au terrain en place et crée, du bas vers le haut, une colonne de sol ciment. Cette colonne de forme cylindrique peut atteindre jusqu'à 2 m de diamètre.

Les performances de ce "béton de sol" dépendent des caractéristiques et de la nature du terrain en place et des paramètres de traitement.

Il existe trois types de procédés de "jet grouting". Le jet simple qui utilise un seul jet de coulis de ciment. Le jet double pour lequel le jet de coulis de ciment est associé simultanément à



Ateliers de forage de "jet grouting".

un jet d'air, ce qui permet d'augmenter le rayon d'action et l'effet de destruction et de malaxage du sol. Le jet triple, quant à lui, combine un jet d'eau qui détruit le sol à un jet d'air pour en améliorer l'efficacité, puis à un jet de coulis de ciment apportant la quantité de liant nécessaire à la réalisation du mélange sol-ciment.

Le type de technique est choisi en fonction des caractéristiques du terrain à consolider, du diamètre des colonnes à réaliser (de 80 cm à 200 cm) et des performances souhaitées. Ce procédé de traitement hydro-dynamique des sols s'applique à des terrains meubles, pas ou difficilement injectables par des procédés classiques d'injection tels que les sols fins (limons et argiles sableuses) ou injectables tels que les sables, les alluvions grossières. Il permet de réaliser des colonnes de fondation (de bâtiments ou des structures de génie civil), des massifs de fondation (renforcement d'un massif de sol dans la masse), des parois continues ou des écrans ou des puits (par juxtaposition de colonnes de jet co-pénétrantes).

Ce procédé est d'une grande souplesse d'utilisation. Il peut être utilisé à partir de forages verticaux ou inclinés de petits diamètres pour des applications particulières, telles que, par exemple, le pré-soutènement par voûtes parapluies lors du

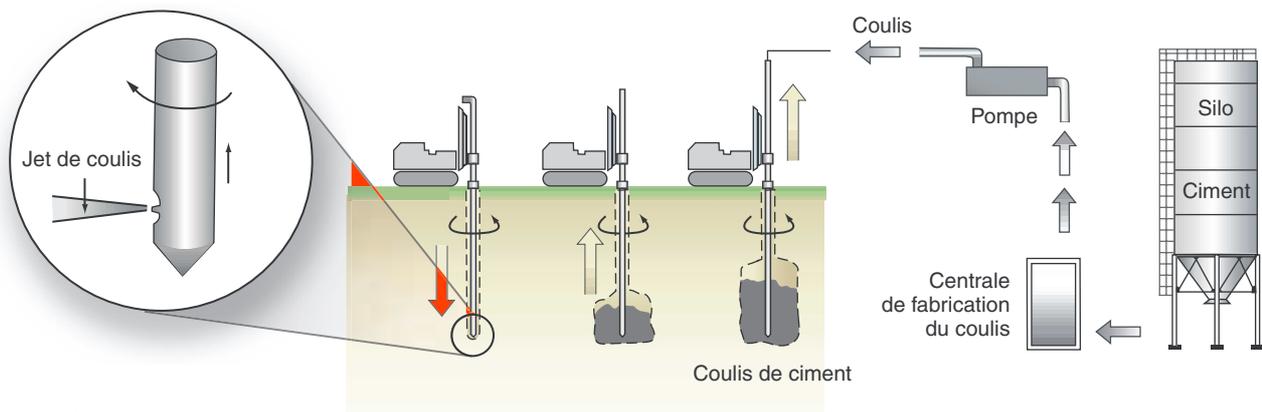


Schéma de réalisation d'une colonne.

creusement de galeries ou de tunnels, la fermeture de fenêtres localisées dans des rideaux de palplanches ou des parois moulées, la réalisation de mur de soutènement en présence d'obstacles enterrés, la consolidation de terrain derrière des ouvrages existants fragiles ou instables, la confection de butée en pied de parois moulées ou de palplanches fichées dans un terrain médiocre, la reprise de bâtiment en sous œuvre, le soutènement de talus, la stabilisation de mur de quai.

Les spécificités de cette technique nécessitent, en général, l'utilisation d'un ciment à forte teneur en laitier offrant une faible chaleur d'hydratation, une cinétique de prise lente et une bonne résistance aux agressions éventuelles des eaux pures et des eaux sulfatées.

L'atelier de "jet grouting" se compose d'une centrale de fabrication du coulis, comprenant les silos de stockage de ciment et les systèmes de malaxage et de pompage. La centrale est reliée par une conduite à une foreuse mobile, montée en général sur chenilles.

Le diamètre et la résistance mécanique de la colonne de "sol-ciment" obtenue sont fonction de la méthode de jet (simple, double ou triple), des paramètres de traitement (débit des jets, vitesse de rotation et de translation des tiges, énergie de jet...), de la nature et des caractéristiques géométriques du terrain (granulométrie, compacité, cohésion...), du dosage en ciment du coulis d'apport.

Il est indispensable de réaliser, avant le démarrage des travaux, des colonnes d'essais qui permettent d'apprécier la faisabilité du traitement, le diamètre des colonnes et la résistance mécanique du "sol-ciment". Après réalisation des colonnes, des carottages et des forages permettent de contrôler la géométrie du traitement réalisé et les résistances mécaniques.

■ Les injections de sols

Les techniques d'injection de sols consistent à remplir les vides d'un terrain avec un coulis de caractéristiques rhéologiques adaptées, à base de ciment, afin d'en améliorer principalement les caractéristiques mécaniques et la cohésion, et d'en diminuer la perméabilité. Le coulis est envoyé dans le milieu à traiter à partir de la surface ou à partir d'ouvrages auxiliaires tels que, par exemple, des galeries ou des puits.

Selon le type de problèmes rencontrés dans le sol, l'injection aura pour objectifs la consolidation, l'étanchement, le scellement, le remplissage ou la compensation.

● La consolidation

Cette technique permet d'améliorer la résistance mécanique d'un terrain, pour faciliter les excavations ou la traversée des zones de franchissements difficiles lors du creusement de galeries ou augmenter la portance générale d'un massif de fondation. Elle permet aussi de consolider les fondations d'ouvrages mitoyens qui peuvent être destabilisées par l'excavation d'une fouille à proximité.

● L'étanchement

L'objectif est de créer des écrans (verticaux ou horizontaux), limitant les circulations d'eau dans le terrain (exemple : écran étanche sous un barrage) ou des fonds étanches (lorsque le substratum étanche naturel est trop profond).

● Le scellement

Ce type d'injection consiste à sceller au sol, sous pression, une armature métallique (barre, câble de précontrainte, tube, profilé...) pour obtenir une haute capacité d'arrachement ou de chargement sur cette armature.

● Le remplissage

Il est destiné, par exemple, à combler les cavités naturelles du terrain (exemple : le remplissage de carrières souterraines) ou artificielles telles des vides annulaires.

● La compensation

La compensation permet, lors du creusement par exemple de tunnels, en injectant le sol situé au-dessus de l'ouvrage, de limiter et de compenser les tassements résultant du déconfinement du terrain.

On distingue trois modes d'injection :

- l'injection par imprégnation des vides existants par un coulis fluide ;
- l'injection par claquage du massif et remplissage par un coulis fluide. C'est l'injection sous pression qui provoque l'ouverture des fissures dans lesquelles se place le coulis ;
- l'injection par serrage d'un coulis épais.

La composition du coulis à utiliser est fonction de la nature et de la porosité du terrain et du type d'injection. Les principaux coulis utilisés sont à base de ciment ou de mélange ciment et bentonite.

L'injection est réalisée à l'aide de matériels spécifiques comprenant une centrale de préparation du coulis, les centrales et pompes d'injection et les tubes d'injection (à obturateur simple, à manchettes, etc.). Les opérations d'injection sont précédées d'un forage préalable du terrain. ●

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@cimbeton.net - Site Internet : www.infociments.fr



Le hangar S34 : un dallage en béton de 10 000 m² et de 2,40 m d'épaisseur pour supporter les essais destructifs de l'Airbus A380.

Un chantier phénoménal pour le futur Airbus A380

En moins d'une année, près de 100 000 m² de dallage en béton ont été mis en œuvre dans le cadre de la construction des hangars du site de production du futur Airbus A380 à Toulouse (Haute-Garonne). Une opération exceptionnelle par sa complexité et son gigantisme.

Dès 2004, le premier exemplaire de l'A380 sortira des chaînes de montage du site Jean-Luc Lagardère à Blagnac, où l'engin sera assemblé à partir des éléments provenant des différents sites de fabrication européens. Fleuron d'Airbus, cet avion gros porteur du futur entrera en service en 2006. Capable d'emporter plus de 550 passagers avec un rayon d'action de 15 000 km, ce "super-jumbo" de 560 tonnes, plus de 70 m de longueur et 80 m d'envergure, constitue un véritable défi technologique.

Pour l'équipe de maîtrise d'œuvre chargée de la réalisation des infrastructures destinées aux essais et au montage de ce géant des airs, le pari est pour le moins ambitieux : en l'espace de seulement deux années, un ensemble de huit hangars totalisant près de 100 000 m² auront été édi-

fiés. Un délai qui intègre l'installation des différents équipements nécessaires aux tests de l'avion zéro et à la production des 129 appareils déjà commandés par plusieurs compagnies aériennes.

■ Contraintes exceptionnelles

"Nous avons décidé d'ériger les hangars avant de réaliser les plateformes pour permettre un coulage des dallages dans des conditions optimales, confie Eric Escande, architecte chez ADPi et chef de projet pour le bâtiment S34, dédié aux essais statiques de l'avion zéro. De plus, le cahier des charges des équipements n'était pas totalement finalisé lors de l'appel d'offres en novembre 2002 : les outillages de test et de montage nécessitent de nombreux ancrages

■ LE CHANTIER EN BREF

- **Lieu :** site Jean-Luc Lagardère, à Blagnac, près de Toulouse
- **Projet :** réaliser des hangars d'essais et de montage de l'Airbus A 380
- **Contraintes :** exécuter, dans des délais très courts, des plateformes très résistantes, intégrant de nombreux réseaux
- **Solution :** des radiers et dallages en béton très épais et fortement armés
- **Surface totale de béton :** 95 000 m², soit 60 000 m³
- **Coût des travaux :** 360 millions d'euros HT dont 12,3 millions pour le lot "Terrassement et dallages"



Les plateformes des hangars sont réalisées par traitement du sol à la chaux et au ciment.

et réseaux qui doivent être intégrés aux dalles”. Ces derniers doivent aussi répondre à des contraintes exceptionnelles de résistance à la compression, mais surtout à la traction : “Le bâtiment S34 sera équipé d’un gigantesque portique de 700 tonnes épousant la forme de l’appareil, explique Jacques Morel, d’ADPi, spécialiste des structures béton du chantier. De multiples vérins exerceront des efforts sur toute la structure de l’avion jusqu’à la limite de la rupture, sous la surveillance de nombreux capteurs couplés à des systèmes d’enregistrement et d’analyse des données”.

■ S34 : jusqu’à 2 000 tonnes de traction

Les efforts transmis par le portique varient entre 10 et 2 000 tonnes ! Ils doivent pouvoir être repris dans la plateforme en béton, dans lequel il est arrimé, sans qu’elle se déforme afin de ne pas compromettre la précision des mesures. “La structure béton varie entre 90 cm et 2,40 m d’épaisseur, soit un volume total de 5 500 m³, avec une densité moyenne d’armatures de 170 kg/m³, ce qui est exceptionnel, relève Jacques Morel. De plus, la surface doit être parfaitement lisse et présenter des écarts de planimétrie inférieurs à cinq millimètres et des désaffleurs d’un millimètre au maximum”. Et sur une surface carrée de 100 mètres de côté, adaptée au gabarit de l’A380, soit un hectare !

■ Association d’un radier et d’un dallage

Pour le groupement d’entreprises SOGEA, Dodin, DV Construction et Mallet, titulaire du lot “Dallage”, répondre au cahier des charges n’a pas été chose facile. Première étape, le terrassement et le traitement de l’assise à la chaux et au ciment ont été conduits de façon à obtenir les différentes hauteurs correspondant aux trois épais-



Le portique accueillant l’A380 est ancré sur de nombreux inserts et nécessite un nombre exceptionnel d’armatures.

seurs du radier : 70 cm, 1 m et 2,20 m en assurant une portance minimale de 60 MPa. Une exigence largement respectée avec 100 à 200 MPa mesurés. Les emprises, correspondant aux caniveaux qui véhiculent les nombreux fluides, ont ensuite été décaissées, ainsi que trois fosses profondes de quatre mètres. “La mise en œuvre des nappes d’armatures, des tirants passifs longitudinaux et transversaux ainsi que des inserts de fixation du portique a pratiquement nécessité deux mois” rapporte Daniel Hagolle, directeur de travaux.

Pour des questions d’homogénéité de traitement avec les zones situées en dehors de l’emprise du portique (65 % de la surface), recouvertes uniquement d’une dalle en béton classique aéroportuaire de 40 cm, le mode opératoire choisi a consisté à couler le béton en deux temps : le radier jusqu’à la côte “moins 20 cm”, puis le dallage d’épaisseur 20 cm, coulage confié à l’entreprise SIB, sous-traitant spécialisé dans



les sols industriels. Cette dalle, qui incorpore un treillis soudé, est rendue solidaire du radier par des connecteurs. “Les deux ouvrages en béton se comportent de façon monolithique” souligne Jacques Morel.

■ Jusqu’à 140 m³ par heure

Mené en continu sur vingt-neuf heures, du vendredi 25 avril à 5h au lendemain 10h, le coulage du radier à la pompe a mobilisé trois centrales BPE, afin de fournir sans interruption environ 4 000 m³ de béton. “Deux équipes de huit personnes se sont relayées jour et nuit, atteignant une moyenne de 140 m³/heure” ajoute le directeur de travaux.

Globalement, sur l’ensemble du site Jean-Luc Lagardère, le responsable situe le pic d’activité sur une période de trois mois, allant d’avril à juin 2003, et pendant laquelle le groupement a mis en œuvre 30 000 m³ de béton sur différents hangars, soit la moitié du volume total !

■ PRINCIPAUX INTERVENANTS

- Maîtrise d’ouvrage : Airbus
- Maîtrise d’œuvre : Groupement Technip-Coflexip (mandataire), ADPi (architectes et ingénieurs), Cardete et Huet (architectes),
- Entreprises gros-œuvre : SOGEA (mandataire), Dodin, DV Construction, Mallet
- Contrôle : Veritas, Socotec



Coulage à la pompe permettant l’approvisionnement du béton en tous points.



Le lissage à l'hélicoptère : technique courante des entreprises de dallage industriel.

■ Un véritable marbre

Reste qu'une telle productivité demandait un contrôle permanent : "Deux à trois géomètres se relayaient, notamment pour vérifier l'implantation des armatures et des inserts de fixation" souligne Jacques Morel. Quant aux dallages, exécutés une semaine plus tard, l'entreprise SIB a réalisé de "véritables marbres", selon les termes du responsable des structures béton. "Le béton, vibré à l'aiguille comme le radier, a été réglé puis lissé à l'hélicoptère, reprend Daniel Hagolle. Un durcisseur a été appliqué pour fermer la surface du béton". Objectif : offrir une surface lisse "comme un miroir" et faciliter le nettoyage en interdisant la fixation des poussières (porosité très faible). Dernière étape, le sciage des joints de retrait, organisé selon une trame carrée de cinq mètres de côté, a été réalisé à l'aide d'une scie diamantée.

■ Ouvrage d'art

Pour Daniel Hagolle, intituler "Dallage" le lot dont il a la direction, est au-dessous de



Le béton est d'abord réparti à la pompe puis vibré à l'aiguille.

la réalité. "La complexité des travaux confère aux réalisations le statut de véritable ouvrage d'art, estime l'ingénieur. Pendant la phase de mise en place des armatures, on avait davantage l'impression de se trouver dans un atelier de chaudronnerie que sur un chantier de génie civil !". Le caractère d'exception des infrastructures est donc à la mesure de celui du projet industriel qu'elles sont destinées à accueillir. "La réussite de l'opération tient à la qualité des rapports entre les intervenants, toujours excellents, assure Eric Escande. La souplesse et la coopération de tous a facilité l'extraordinaire coordination des différents corps d'état, indispensable à la bonne marche du chantier et au respect des délais." D'autant qu'une contrainte de taille s'est greffée au contexte déjà difficile à gérer : la modification des spécifications des équipements de test et du portique, au fur et à mesure de leur mise au point, alors que les travaux avaient déjà commencé. "Dans ce genre de chantier extrêmement complexe, il faut savoir être réactif et s'adapter aux inévitables évolutions" conclut Daniel Hagolle. ●



L'utilisation d'une règle vibrante accroît la productivité sur chantier.

■ DES KILOMÈTRES DE RÉSEAUX

Une des nombreuses difficultés rencontrées par le groupement d'entreprises pour le bâtiment S34 destiné aux essais, mais surtout pour le hangar 71 (12 500 m²) réservé au montage de l'avion, est l'extraordinaire densité de fluides passant sous le radier en béton desservant les équipements.

"Contrairement aux avions précédents montés dans quatre ateliers différents, l'A380 est assemblé sur un seul poste, ce qui entraîne une superposition des outillages et de leurs réseaux" explique Daniel Hagolle, évoquant l'incroyable enchevêtrement de caniveaux, niches et autres fourreaux en béton, qui totalisent cinq kilomètres dans ce bâtiment.

Ces ouvrages, réalisés très majoritairement en béton préfabriqué pour des raisons de délai, sont organisés dans plusieurs plans étagés à différentes profondeurs, de "moins 80 cm" à "moins 2,50 m". Pour Daniel Hagolle : "La fabrication du radier a nécessité de nombreuses réservations pour différents petits ouvrages, principalement des fosses, dont une destinée à un ascenseur. L'ensemble de la plateforme est un véritable gruyère !".



La scie diamantée permet de positionner avec précision les joints de retrait.



Le premier giratoire en BCMC réalisé à Chambéry, est en parfait état après deux ans et demi de service.

Chambéry : le BCMC au service de giratoires très sollicités

Après un premier chantier-test concluant, la ville de Chambéry choisit, une nouvelle fois, le BCMC pour s'affranchir des dégradations sur des giratoires supportant un trafic de poids lourds.

Intéressée par la présentation faite par l'entreprise Mauro et le cimentier Vicat, la ville de Chambéry décide d'expérimenter au printemps 2001 la technique du BCMC, sur un giratoire situé dans la zone industrielle des Landiers. Cette zone d'activité venait d'accueillir une grande surface de bricolage, à l'origine d'un trafic incessant de semi-remorques, très pénalisant pour ce type d'ouvrage, du fait de la conjonction d'efforts de giration importants, de charges élevées et de vitesses très

faibles. *"La technique du BCMC nous paraissait bien adaptée à la problématique posée, explique Franck Dunoyer, ingénieur responsable du service voirie de la ville. Mais nous voulions disposer d'un élément de comparaison pour confirmer cette analyse"*. Ce qui fut fait avec un nouveau rond-point, pour lequel fut choisie la solution de l'enrobé.

■ Un surcoût amorti rapidement

Réalisés à la même époque par l'entreprise Mauro en mars 2001, ces deux ouvrages neufs sont soumis à un trafic équivalent. Après une première année de fonctionnement, la solution de l'enrobé commence à montrer des signes de faiblesse : *"Nous avons constaté un début d'orniérage, malgré l'utilisation de solutions dites anti-orniérantes, poursuit Franck Dunoyer. En revanche, sur le BCMC, nous n'avons eu à déplorer que la présence de taches*

d'huiles, rendues visibles par la clarté du revêtement en béton désactivé".

Sur le plan structurel, le BCMC s'est comporté comme l'espérait le responsable : *"Grâce à l'absence d'entretien, on estime que le surcoût de la solution sera amorti en l'espace de trois à cinq ans"* précise l'ingénieur. À ce jour, soit deux ans et demi après sa mise en service, le giratoire des Landiers donne toujours entière satisfaction. *"Les points de faiblesse se manifestent rapidement, rappelle Jean-François*

■ PRINCIPAUX INTERVENANTS

- **Maîtrise d'ouvrage :** Communauté d'Agglomération de Chambéry
- **Maîtrise d'œuvre :** Ville de Chambéry
- **Fournisseur BPE et mise en œuvre des bétons :** entreprise Mauro
- **Fournisseur du ciment :** Ciments Vicat



Des coffrages radiaux scindent la surface en petites unités et limitent les joints sciés.



La faible teneur en eau du béton limite sa porosité, gage de pérennité.

Mauro, PDG de l'entreprise. *Si aucun désordre n'est constaté après une année, on peut tabler sur une durée de vie de quinze ou vingt ans*".

■ Deuxième giratoire en BCMC

Cet essai concluant a donc poussé les services techniques de la ville de Chambéry, maître d'œuvre pour le compte de la communauté d'agglomérations, à faire de nouveau appel à cette technique en novembre 2002, dans la ZI de la Houille Blanche. Si l'environnement est similaire, le niveau de contraintes est encore plus élevé : *"Le rayon de giration est plus faible et ce giratoire est situé à l'extrémité d'une voirie, avec un terre-plein central infranchissable qui oblige les poids lourds à l'emprunter pour ressortir de la zone industrielle, ce qui génère un trafic très important"* souligne Franck Dunoyer.

Contrairement au premier chantier, le giratoire de la Houille Blanche est un ouvrage existant, construit en 1997, ayant fait l'objet de plusieurs réparations, la dernière remontant à 2001 (reprise de la couche de roulement en enrobé à module élevé). *"L'assise a été rabotée afin de disposer d'une épaisseur de huit centimètres. Certaines zones très fragilisées ont même été purgées et reconstituées avec une grave bitume"* explique Jean-François Mauro. Autre différence avec le premier chantier, qui constituait une première pour la ville comme pour l'entreprise, celle-ci choisit de scinder la surface en "parts de camembert" à l'aide de coffrages. L'intérêt est double : mieux maîtriser la régularité de la finition du béton désactivé et limiter le sciage des joints, une technique employée uniquement pour les joints concentriques annulaires espacés d'un mètre. *"Nous avons coulé le béton en damiers"* précise Jean-Pierre Exertié, conducteur de travaux



Le béton, vibré à l'aiguille, est ensuite réglé et lissé soigneusement.

■ Huit centimètres d'enrobés et de béton

Etudié par Vicat venu assister l'entreprise, le dimensionnement de la structure a modifié l'altimétrie et le profil en travers de l'ouvrage. *"Comme les bordures devaient être remplacées, il était possible de surélever un peu l'ouvrage, sans quoi nous n'aurions pas pu disposer des huit centimètres d'enrobés nécessaires après rabotage, l'épaisseur de la grave bitume n'étant que de douze centimètres"* explique Jean-Marc Potier, responsable des marchés de TP pour la France chez Vicat. Sur cette assise, une épaisseur minimale de huit centimètres de béton a été appliquée, ramenant la dévers initial de 4 à 2 %, valeur suffisante pour le bon écoulement des eaux. *"En pratique, nous avons appliqué entre huit et onze centimètres pour compenser les irrégularités de l'assise. Afin de garantir la qualité de la finition, nous avons choisi d'attendre que le béton blanchisse avant de pulvériser le désactivant, ce qui limitait son action et nous permettait de laver le lendemain"* précise Jean-Pierre Exertié. *"Nous n'y pensions pas au départ, mais le choix d'une finition en béton désactivé permet de mieux signaler le carrefour, et la texture particulière du béton. Cela renforce la sécurité en incitant les usagers à ralentir"*.

■ Un marché d'avenir

Favorable au BCMC pour les giratoires à fort trafic, la ville de Chambéry compte poursuivre prochainement avec un troisième ouvrage. Une démarche loin d'être isolée, comme en témoigne Jean-Marc Potier qui a recensé trois chantiers avant la fin de l'année dans la région Rhône-Alpes.

■ LE CHANTIER EN BREF

- **Lieu :** Chambéry
- **Projet :** réfection d'un giratoire en ZI
- **Contraintes :** offrir une structure esthétique et résistante à l'orniérage et autres dégradations causées par les poids lourds
- **Solution :** une chaussée en BCMC désactivé
- **Surface de béton :** 400 m²
- **Durée des travaux :** 10 jours

"Nous nous sommes positionnés sur le BCMC afin de nous démarquer en apportant le meilleur service à nos clients, précise Jean-François Mauro. Quand on considère le nombre de giratoires réalisés depuis une quinzaine d'années, mais aussi les cycles de réparation des enrobés, il serait absurde de ne pas tirer parti de cette technique innovante qui ne peut que se développer à l'avenir". Quand le message émane d'une entreprise qui a su se former en l'espace d'une seule réalisation, il n'est que plus pertinent.

"Le BCMC est une solution accessible aux entreprises et compatible avec la production courante des centrales BPE, analyse Jean-Marc Potier. Les volumes absorbés par ces petits chantiers sont limités et les formulations tout à fait comparables, à l'exception d'un dosage en ciment légèrement supérieur afin de répondre à des exigences de délai de remise en service : 36 heures pour le giratoire des Landiers et 72 heures pour celui de la Houille Blanche. Et Jean-Marc Potier de conclure : "Les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre, confrontés à l'intensification du trafic et aux dégâts provoqués par les essieux tridem, sont en train de prendre conscience que les solutions traditionnelles ne peuvent plus faire face à l'évolution des contraintes". ●



La pulvérisation d'un désactivant permet de rendre les granulats plus apparents.

Remue-méninges

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

■ Travaux de pavage

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 du Remue-méninges de *Routes* n°84 : Trains en circulation



Rappel du problème posé: Alors que je me promène le long d'une voie de chemin de fer, j'observe deux faits :

- un train me dépasse toutes les 12 minutes
- un train me croise toutes les 4 minutes

Les trains roulent à une vitesse uniforme, égale dans les deux sens. Quant à moi, je me déplace à une vitesse constante.

Question : à quel rythme les trains quittent-ils leurs gares de départ ?

Solution

Si les trains quittent respectivement leurs gares de départ toutes les "X" minutes, cela signifie qu'à l'endroit où l'un d'eux m'a dépassé, un autre train arrivera "X" minutes plus tard.

Quand ce dernier me dépassera à son tour, il aura parcouru en (12 - X) minutes le chemin que j'aurai moi-même parcouru en 12 minutes. Ce train fait donc en $\frac{12 - X}{12}$ minutes,

le chemin que je fais personnellement en une minute.

Dans l'autre sens, un train me croisera 4 minutes après le passage du précédent. Durant les (X - 4) minutes qui restent, il fera le chemin que j'ai parcouru en 4 minutes.

Il en résulte que le chemin que je fais en une minute est parcouru par le train en $\frac{X - 4}{4}$ minutes.

Il suffit finalement de résoudre l'équation suivante :

$$\frac{12 - X}{12} = \frac{X - 4}{4}$$

D'où **X = 6**

Les trains quittent donc leurs gares de départ toutes les 6 minutes.



AGENDA

18-20 novembre 2003 Salon des Maires et des Collectivités Locales (SMCL) - Parc des Expositions (Porte de Versailles)

Cimbéton sera présent au SMCL (Hall 3 - Stand K 60) en partenariat avec le SNBPE (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi), la FIB (Fédération de l'Industrie du Béton) et le CERIB (Centre d'Etudes et de Recherche de l'Industrie du Béton).
Thème exposé : **Les bétons pour l'environnement.**

4-7 avril 2004 9^e Symposium international de la route en béton (Istanbul)

Ce symposium, qui était prévu du 27 au 30 avril 2003, aura finalement lieu du 4 au 7 avril 2004.

Il est organisé par Cembureau, l'AIPCR et la Turkish Cement Manufacturers' Association et comportera quatre thèmes principaux :

- Projets et spécifications. Analyse du cycle de vie.
- Matériaux pour revêtements en béton.
- Techniques de construction, entretien et réparations sur site. Stabilisation au ciment. Fissuration.
- Sécurité. Protection de l'environnement. Revêtement en béton pour la réduction du bruit.

À ces thèmes s'ajoutent deux ateliers :

- Le premier chantier en béton.
- Le retraitement des chaussées souples à froid au ciment.

Renseignements :

CEMBUREAU,
rue d'Arlon, 55
B-1040 Bruxelles (Belgique)
Tél. : +32 2 234 10 11
Fax : + 32 2 230 47 20
Email : secretariat@cembureau.be