

bitume.info

AMÉNAGER, CONSTRUIRE, INNOVER

N° 10 - OCTOBRE 2005



CHANTIERS AÉROPORTS Liège choisit le bitume pour rénover sa piste



Groupement
Professionnel
des Bitumes



CHANTIERS

Le pont d'Aquitaine
s'élargit
à six voies



RECHERCHE

Du bitume
sous le ballast
de la LGV Est



ROUTES

Plan pluriannuel
de rénovation
de la voirie à Rouen



p.4



p.6



p.8



p.16



p.13



p.18

CHANTIERS

- 4 Le Pont d'Aquitaine s'élargit à six voies
- 6 A89, une autoroute pour désenclaver le Massif Central
- 8 Aéroport de Liège - Quatre semaines pour faire piste neuve
- 11 Enrobés ocre pour voie verte

RECHERCHE-INNOVATION

- 13 Ligne à Grande Vitesse Est - Sous les rails, le bitume

LA ROUTE

- 16 Avec les liants clairs, les revêtements prennent des couleurs
- 18 Rouen : un plan pluriannuel de rénovation de la voirie

HISTOIRES DE BITUME

- 20 Les mésaventures du "Radeau de la Méduse"

Consommation de bitume

à fin juin 2005 :

1,52 Mt

(1,58 Mt à la même date en 2004).

Ce chiffre s'explique en partie par les très mauvaises conditions météorologiques en début d'année, qui ont entraîné un retard important dans la réalisation des chantiers au cours du premier semestre.

4^e Congrès mondial de l'émulsion

La science des émulsions est en pleine évolution. Les industries de l'émulsion sont confrontées à de nouveaux défis. Ces deux aspects trouvent leur écho dans le partenariat fort qui s'est développé entre la recherche universitaire et la recherche industrielle.

Les Congrès Mondiaux de l'Emulsion ont connu un succès international, regroupant à Paris en 1993, à Bordeaux en 1997 et à Lyon en 2002 plus de 1 000 participants représentant plus de 60 pays.

Les congressistes proviennent d'horizons très variés de l'industrie agroalimentaire, phytosanitaire, matières plastiques, travaux routiers, pharmacie, cosmétique, photographie, encres, peintures, adhésifs, explosifs, détergents, ou de la recherche universitaire.

Ces congrès sont destinés à favoriser les échanges entre les chercheurs, scientifiques et ingénieurs des diverses industries autour du thème commun de l'émulsion, à promouvoir les transferts de technologies et de connaissances fondamentales dans ce domaine, en faisant le point, tous les quatre ans, des progrès accomplis et des nouvelles orientations.

En rassemblant des chercheurs de l'université et du monde industriel, l'édition 2006 a l'ambition de faire le point sur l'état des connaissances et de fournir un repère utile pour le futur de ce domaine scientifique.

(3-6 octobre 2006, Lyon)

Bitume.info • Revue périodique éditée par le Groupement Professionnel des Bitumes et destinée à faire connaître les réalisations routières, industrielles, hydrauliques ou autres dans lesquelles le bitume joue un rôle important.

4 avenue Hoche - 75008 Paris / Tel.: 01 40 53 70 10 / Fax : 01 40 53 70 49 / www.bitume.info / Mél : contact@bitume.info

Directeur de la publication : Samir Kazziha, Rédacteur en Chef : Bernard Lombardi. Conception et réalisation : Images et Formes. Ont participé à la réalisation de numéro : les membres du GPB (BP, EssoMobil, Nynas, Repsol-YPF, Shell, Total), Jean-Pierre Sergent, Francis Gouge • Crédits photographiques : ASF, Aéroport de Liège, Shell-Immediates Production, Marie de Rouen - Arnaud Bertereau, Photo12.com/ARJ • Dépôt légal : Octobre 2005. ISSN 1764-6790. Diffusion gratuite.

Risques sanitaires et environnementaux

Les problématiques sanitaires et environnementales constituent des enjeux de plus en plus décisifs dans les politiques publiques et les décisions industrielles et économiques.

L'objectif du colloque ORGAGEC'051, qui s'est tenu à Nantes les 4 et 5 octobre 2005, était de proposer une approche transversale des matériaux organiques de la construction, depuis leur production et leur mise en œuvre jusqu'à leur fin de vie, en impliquant l'ensemble des parties prenantes (métiers de la construction, acteurs de la santé publique et de l'environnement).

Les résultats de deux études ont été présentés. L'une a permis de faire le point sur les démarches d'évaluation des risques pour la santé et l'environnement, les démarches de prévention, de protection

et de correction. L'autre visait à ouvrir des perspectives en termes d'actions de recherche scientifique et technique et de normalisation et à faciliter des collaborations en réseau au niveau européen.

Parmi les partenaires de ce congrès, organisé conjointement par le CNAM, le CSTB, le LCPC et l'ENTPE, figurait le GPB, aux côtés notamment de plusieurs ministères (Équipement et Transports, Santé et Famille, Écologie et Développement durable) et de l'ADEME.

1- ORGAGEC est un cycle de séminaires européens consacrés à l'ensemble des problématiques relatives aux matériaux organiques utilisés dans tous les domaines de la construction, bâtiment et génie civil.

XXIII^e Congrès mondial de la Route

99 ans après la tenue du premier congrès mondial de la route, qui avait rassemblé les délégués de 27 pays dans la capitale française en 1908, Paris sera l'hôte de la 23^e édition de cette manifestation organisée par l'Association mondiale de la route (AICPR) qui accueille tous les quatre ans les acteurs de la route du monde entier.

Quatre thèmes stratégiques choisis par le Comité d'organisation rythmeront ce congrès : gouvernance et gestion des réseaux routiers, mobilité durable, sécurité routière et exploitation, qualité des infrastructures routières. Dans ce dernier thème seront abordées les questions concernant les chaussées routières.

Les séances techniques, l'exposition, les séances spéciales, les visites techniques, les événements organisés en marge du congrès, sont autant d'occasions de rencontrer les experts et professionnels du monde entier, de partager avec eux les résultats des travaux de l'AICPR (<http://www.piarc.org/>) ainsi que les réflexions et expériences menées dans chaque pays, de découvrir des projets et des techniques issus des 5 continents, de renforcer les liens formels et informels entre les professionnels de la route tout autour du monde. Nous en reparlerons.

(17-21 septembre 2007 Palais des Congrès, Paris)

Le FEHRL réfléchit aux matériaux durables

Le dernier congrès du FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories), une association internationale créée en 1989 regroupant les laboratoires publics de recherche routière de 27 pays européens, s'est tenu à Bruxelles, du 14 au 16 juin 2005. Les travaux discutés ont porté sur de nombreux sujets : objectifs et moyens de la recherche routière, problèmes des nuisances sonores liées à la circulation, durée de vie des chaussées, etc. Une importante délégation française du LCPC, conduite par Jean-Michel Piau, a produit plusieurs communications portant notamment sur l'analyse du cycle de vie des matériaux routiers, le recyclage et les alternatives envisageables aux matériaux existants dans une perspective de développement durable.

RECTIFICATIF

Dans notre Hors-Série 1, nous évoquons, page 28, "Les campagnes de sécurité du GPB". Comme le montre la présence des deux logos, il s'agit en fait d'une campagne commune USIRF-GPB, décidée à la suite des deux enquêtes menées par le GPB sur les conditions dans lesquelles sont opérées les livraisons de bitume. Que notre partenaire veuille bien nous excuser pour cette omission involontaire.



La qualité, un des secrets de la réussite

D'abord un grand merci à nos lecteurs qui nous encouragent régulièrement par leurs sympathiques messages soulignant la qualité de notre magazine. Notre premier numéro hors-série, paru au début de l'été, semble avoir été particulièrement bien accueilli grâce à la qualité de ses synthèses et de ses présentations. La qualité, ici comme ailleurs, est un des secrets de la réussite et je profite de l'occasion pour remercier tous ceux qui, par leur travail et leur concours, font que cette publication a su vous intéresser et vous plaire.

Au sommaire de ce numéro 10, vous trouverez des articles qui illustrent notre démarche : faire mieux connaître de manière concrète et vivante, sur le terrain, les applications innovantes ou classiques du bitume et des produits bitumineux.

Pourquoi, par exemple, les produits bitumineux remplacent-ils d'autres techniques sur l'aéroport de Liège ou s'introduisent-ils sous les rails de la LGV-Est ? Et pourquoi les liants clairs voient-ils leurs applications se multiplier, que ce soit dans les chaussées de tunnel ou les pistes cyclables et autres voies vertes... ? Vous le saurez vite en lisant les articles correspondants.

Vous saurez également pourquoi le bitume est devenu un pilier de la politique de rénovation et d'entretien de la voirie d'une ville comme Rouen (dans les prochains numéros de bitume.info, vous découvrirez comment d'autres communes, petites et grandes, recourent à notre matériau favori...).

Extraordinaire produit que le bitume naturel, utilisé par les plus anciennes civilisations comme par les plus modernes ! Un exemple ? "Le radeau de la Méduse", non le radeau lui-même (quoiqu'il ait fait preuve d'une grande résistance), mais le célèbre tableau de Géricault dans lequel des pigments bitumineux ont été utilisés pour la couleur noire. Il est vrai qu'à l'époque le liant clair n'avait pas encore été inventé, sinon nous le retrouverions probablement dans les autres couleurs...

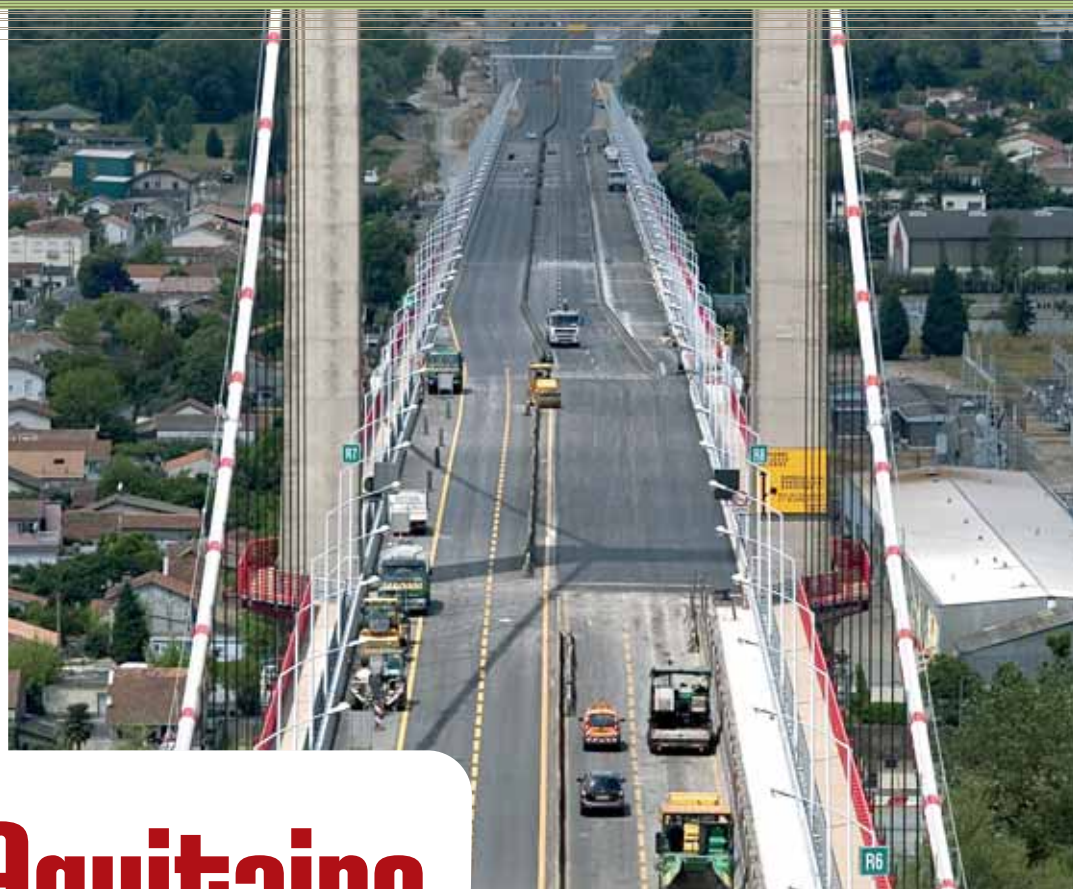
Bonne lecture à tous.

Samir Kazziha
Président

Quarante ans après sa construction, le Pont d'Aquitaine, qui franchit la Garonne à l'ouest de Bordeaux, s'élargit à 2 x 3 voies pour faire face à l'important trafic routier de ce contournement de la capitale girondine. Grâce à la rapidité de mise en œuvre des produits bitumineux utilisés et à la flexibilité du fournisseur de bitume, il aura suffi de huit week-ends aux entreprises pour réaliser l'étanchéité de l'ouvrage et la chaussée.



Le Pont d'Aquitaine s'élargit à six voies



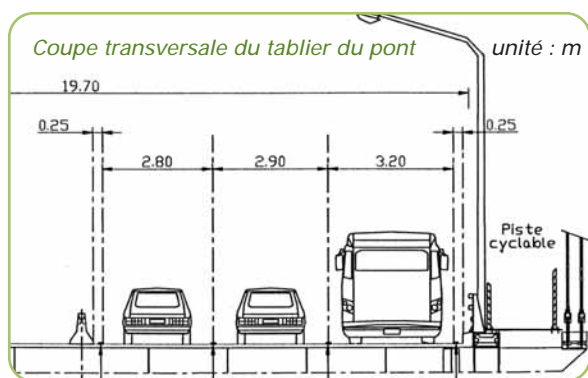
Ouvert à la circulation en 1967, le Pont d'Aquitaine permet le contournement par l'ouest de la capitale bordelaise pour les véhicules circulant suivant l'axe Nord-Sud. Il s'agit d'un pont suspendu à trois travées de portées respectives de 143 m, 394 m et 143 m. Le tablier est à 53 m au-dessus des eaux de la Garonne et les pylônes culminent à 103 m. Sa largeur est de 20 m et sa surface utile de 13 600 m². Le trafic de poids lourds a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, à cause de la croissance des flux de mar-

chandises entre la péninsule ibérique et le nord de l'Europe, d'une part, et du développement de la zone industrielle de Bordeaux Ouest, d'autre part, et l'ouvrage était de plus en plus souvent saturé.

Les câbles de suspension réclamant d'être changés, le maître d'ouvrage décida de profiter de ces importants travaux pour ajouter au viaduc une voie de circulation routière dans chaque sens. Grâce au déplacement des nouveaux câbles de 2 mètres vers l'extérieur par rapport aux anciens, le tablier se trouve élargi. Pour être mise en service à 2 x 3 voies, la partie suspendue a dû auparavant bénéficier d'un certain nombre de travaux de finition (création de nouvelles pistes cyclables en encorbellement, pose de séparateurs centraux, marquage au sol, etc.), parmi lesquels la reprise de l'étanchéité et la réfection du revêtement de chaussée nous intéressent ici plus particulièrement.

de jour et en semaine, observe Michel Ducrocq, Chef de Centre chez Smac Acieroid Sud-Ouest, qui a réalisé l'étanchéité du Pont d'Aquitaine. Cela nous a demandé de concevoir une organisation particulièrement pointue puisque nous avons dû travailler de façon extrêmement fractionnée, en nous assurant chaque fois de la disponibilité des hommes, des matériaux et des équipements."

Mêmes observations chez Screg Sud-Ouest, l'entreprise de travaux publics mandataire du marché et en charge de la pose des enrobés de la chaussée, qui a dû s'organiser pour respecter un planning d'activité tenant compte à la fois des restrictions imposées par la préfecture (excluant certains week-ends particulièrement chargés et la période des vacances en juillet-août) et des aléas de la météo (impossible de poser l'étanchéité par temps de pluie). *"Il a fallu mettre en place une organisation à la fois rigoureuse et flexible, car chaque phase de nos interventions était minutée, mais tout pouvait être remis en question 24 h avant le démarrage prévu, raconte Paulo Lopes Monteiro, Directeur Technique de Screg Sud Ouest. Pendant les 50 heures où le pont était à notre disposition, entre*



Un chantier qui a demandé une grande flexibilité

"La singularité de ce chantier aura été l'obligation de travailler de nuit, pendant les week-ends uniquement, alors que nous travaillons habituellement

le moment où la circulation était déviée, le vendredi à 23 h, et celui auquel nous rendions le pont à la circulation, le lundi à 4 h du matin, il fallait déposer la signalisation, fraiser l'ancienne couche d'enrobé et l'étanchéité existante, refaire un reprofilage en enrobé, laisser à nos collègues de Smac Acieroid le temps de poser la membrane d'étanchéité et intervenir à nouveau pour poser la couche de roulement. Sans oublier le marquage et la séparation des voies, qui devaient impérativement être terminés pour la remise en circulation."

Des interventions fractionnées et rigoureusement phasées

Chaque intervention sur la chaussée portait sur une section de 120 mètres linéaires environ, entre deux joints de dilatation de l'ouvrage, sur 3 voies, et se décomposait en une séquence rigoureusement phasée :

- 1/ fraisage de l'ancienne chaussée, y compris l'étanchéité, jusqu'au béton (dans la nuit du vendredi au samedi) ;
- 2/ reprofilage en enrobé de la surface du tablier, à cause de la discontinuité du profil en travers entre les deux voies existantes et la voie nouvellement créée (dans la matinée du samedi) ;
- 3/ répandage d'un enduit d'imprégnation à froid (EIF) sur le reprofilage et soudage à la flamme de la membrane d'étanchéité bitumineuse spéciale Ouvrage d'Arts d'Axter (filiale de Smac Acieroid) en lés préfabriqués de 80 m de long (épaisseur 4 mm), à l'aide d'une machine spéciale DSM (dérouleuse /



Pose de l'étanchéité par la DSM dérouleuse/soudeuse/maroufleuse

soudeuse / maroufleuse) et essais d'arrachement (dans l'après-midi et la nuit du samedi) ;
4/ pose d'un BBSG antiornierant 0/10 d'une épaisseur de 5 à 6 cm pour la couche de roulement, formulé pour résister aux contraintes du trafic à faible vitesse des poids lourds dans les montées, à l'aide de 2 finisseurs, et compactage par 2 cylindres non vibrants, pour éviter les sollicitations excessives de l'ouvrage (le dimanche matin) ;
5/ remise en place du marquage et du balisage (dans l'après-midi et la nuit du dimanche).

Un important travail de préparation technique

"Cette réalisation a exigé un important travail de préparation technique pour le choix de l'enrobé et de la couche d'accrochage, observe Paulo Lopes Monteiro. Après étude en laboratoire et une série de planches d'essai, nous avons retenu pour la couche d'accrochage une émulsion spéciale, le Néoflex. Pour l'enrobé de la couche de roulement, le cahier des charges techniques exigeait d'excellentes performances antiornierantes, car le pont présente des pentes importantes et la circulation des poids lourds s'y fait à faible vitesse, sous des températures souvent élevées en été. Notre choix s'est porté sur un BBSG 0/10 à base de granulats éruptifs et de liant Multiphalte. Grâce à cette formulation, nous avons obtenu 3,2 % d'ornières à 30 000 cycles, ce qui correspond aux performances d'un BBME."

Le choix du fournisseur de bitume, conforme au cahier des charges technique, a reposé en grande partie sur sa capacité à approvisionner le poste d'enrobage à la demande, de manière discontinue et en faibles quantités : "Environ 200 tonnes d'enrobé, soit une dizaine de tonnes de bitume par intervention, cela ne représente même pas la moitié d'un camion-citerne, souligne Paulo Lopes. Les services logistiques de notre fournisseur de bitume ont su parfaitement répondre à nos besoins, compte tenu de ces contraintes opérationnelles et des caprices de la météo."

Les travaux de chaussée, commencés en mars 2005, se sont terminés en septembre, totalisant huit week-ends de travail intensif. ■



Pose de la couche de roulement sur l'étanchéité

Fiche technique

Etanchéité

EXCELPONT® GC d'AXTER

Membrane d'étanchéité à base de liant bitumineux ALPA®, à armature polyester avec autoprotection en surface, par granulés céramiques blancs/gris et sous-face thermofusible. Cette chape monocouche soudée pour ouvrage d'art est mise en œuvre au chalumeau sur un enduit d'imprégnation à froid (EIF). La protection mécanique est assurée par les enrobés bitumineux à chaud.

Conditionnement par rouleaux de 80 m x 1 m.

- Caractéristiques du liant (valeurs typiques) :
Point de ramollissement bille et anneau (NF EN 1427) : 150 °C
Pénétration à 25 °C (NF EN 1426) : 40 1/10 mm
Souplesse à froid sur mandrin de Ø 20 mm (UEAtc) pas de fissures à : - 10 °C
Allongement à la rupture : 800 %
- Caractéristiques du produit fini
Résistance à la traction (NF EN 12311-1) longueur/largeur : 1100/1000 N/5 cm
Allongement à la rupture (NF EN 12311-11) longueur/largeur : 40/40 %
Pliage sur mandrin de Ø 20 mm (UEAtc) résiste à : -10 °C
Retrait libre (NF EN 1107-1) : ≤ 5 ‰
Tenue à la chaleur à la verticale (UEAtc) : 120 °C

Bitume

Shell MULTIPHALTE® HM

Bitume spécial fabriqué par un procédé de raffinage non conventionnel. Présentant une faible susceptibilité thermique et donc plus visqueux aux températures de service élevées que les bitumes classiques de mêmes classes, ce bitume permet aux couches d'enrobé de résister aux déformations permanentes. Aux basses températures de service, il est moins rigide que les bitumes classiques de mêmes classes et permet aux couches d'enrobé de résister à la fissuration. Le bitume Shell Multiphalte HM ne réclame pas d'autres conditions de fabrication des enrobés, par rapport aux bitumes classiques, qu'une température d'enrobage supérieure de 10 °C environ.



Le viaduc de la Sioule surplombe la vallée du même nom.



A89, une autoroute pour désenclaver le Massif Central

➔ **Tronçon après tronçon, l'A89, qui reliera la façade atlantique à la région Rhône-Alpes, s'ouvre à la circulation. Actuellement, deux sections sont en cours d'achèvement : Terrasson-Brive nord (11 km) et Le Sancy-Combronde (52 km).**



L'A89, 5 ans après la mise en service de son premier tronçon, offre aujourd'hui 243 km ouverts à la circulation sur les 340 du projet total. Elle constitue le maillon essentiel d'une grande transversale ouest-est qui reliera la façade atlantique à la région Rhône-Alpes, désenclavant au passage le Massif Central. Deux nouveaux tronçons sont actuellement en travaux :

- la section Sancy-Combronde, qui raccordera, à partir de janvier 2006, l'A89 à l'A71 (Paris-Bourges-Clermont). Plusieurs ouvrages d'art importants ont été réalisés. Le viaduc de la Sioule, d'une longueur de 991 m et d'une hauteur maximale de 150 m, est le plus spectaculaire. Il en coûte 450 millions d'euros à Autoroutes du Sud de la France (ASF) pour construire plus de 52 km très attendus ;
- la section Terrasson-Brive nord d'un coût de 154 millions d'euros, dont la mise en service suivra de peu, permettra d'assurer une continuité autoroutière quasiment complète à l'exception du tronçon Thenon-Terrasson (18 km) qui a soulevé quelques problèmes aujourd'hui réglés. La DUP modificative (déclaration d'utilité publique) a été signée le 13 juillet dernier. Les travaux ont démarré et sa mise en service est prévue pour 2008. A terme, 3 heures suffiront pour relier Bordeaux

à Clermont-Ferrand, la moitié de ce qu'il fallait en 1996, avant l'ouverture du premier tronçon. Actuellement, une moyenne de 6 000 véhicules par jour empruntent l'autoroute. Cette fréquentation devrait monter à 10 000.

52 km d'un seul tenant

La principale particularité du tronçon Sancy-Combronde tient à ses dimensions : 52 km de longueur. "L'entreprise a été déclarée adjudicataire de deux lots contigus ce qui permet de réaliser une section de 52 km d'un seul tenant. Il faut rappeler qu'à ces 52 km s'ajoutent les 11 km du tronçon Terrasson-Brive nord", souligne avec une discrète fierté François Raphaël, chef d'agence d'Eurovia GPI grands travaux, qui réalise les chaussées sous la maîtrise d'œuvre de Scetauroute.

Pour faire face à ce défi à relever simultanément sur trois fronts, il a fallu beaucoup de rigueur, de préparation et des moyens exceptionnels.

Trois centrales mobiles d'enrobage, une par lot, ont été mises en place :

- un TSM 25 XL à Brive ;
- un TSM 25 senior sur Le Sancy-la Sioule ;
- un TSM 25 major sur la Sioule-Combronde.

Les deux dernières étaient installées de part et d'autre du viaduc de la Sioule, chacune étant dédiée à un tronçon.

Les habituelles semi-remorques ont fait place à d'énormes 8 x 8 de 40 t de charge utile, qui ont fait la noria entre les centrales d'enrobage et les chantiers d'application. "En périodes de pointe, on a fait travailler jusqu'à 34 engins sur le chantier Sancy-Combronde et jusqu'à 8 sur celui de Brive", rappelle Nicolas Bréchet, directeur de travaux.

A cette armada s'ajoutent trois finisseurs grande largeur, jusqu'à 10 m, trois finisseurs extensibles de 2,50 à 6 m et neuf compacteurs. Au plus fort du chantier, on a compté jusqu'à 215 personnes travaillant simultanément sur les trois sites.

83 cm de confort de roulement

L'A89 offre sur tout son parcours 2 x 2 voies avec une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 3 m et des refuges avec poste d'appel d'urgence tous les 2 km. Des voies pour les véhicules lents ont été ajoutées dans certaines montées ou descentes. Les parties circulées sont constituées pour la section Terrasson-Brive nord d'une couche de forme de 50 cm en graves non traitées (GNT), sur lesquelles on a posé 13 cm de grave-bitume de fondation (GBF) 0/14 classe 3, puis encore 13 cm de grave-bitume de base (GBB) 0/14 classe 3. Le tout est recouvert d'une couche de roulement constituée de 7 cm de béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/14. Pour le reste (BAU, postes d'appel d'urgence), les GBF et GBB sont remplacés par des GNT, également recouvertes par 7 cm de béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/14, ce qui assure une continuité visuelle avec le reste de la chaussée. Pour la section Le Sancy-Combronde, les parties circulées sont réalisées avec une couche de forme de 65 cm de GNT, 10 cm de GBF, 8 cm de GBB et 7 cm de BBSG.

Pour les matériaux basaltiques entrant dans la composition des granulats, des fines activées à la chaux, ont été introduites pour neutraliser l'eau retenue dans les pores du basalte. Pour les maté-

riaux rhyolitiques, on utilise des fines classiques (calcaires). Pour ce dernier tronçon, une seule classe de bitume (35/50) a été utilisée, y compris pour les voies lentes. "Le choix d'une classe unique permet de linéariser les fabrications et de lisser les approvisionnements, explique François Raphaël. Cette option a permis d'effectuer un même passage de finisseur sur toute la largeur et d'éviter de faire un joint longitudinal et d'assurer ainsi une plus grande pérennité à l'ouvrage."

La situation géographique du chantier imposait de longs trajets au bitume, notamment pour celui qui provenait de Feyzin (Rhône). Pour éviter tout risque de rupture des approvisionnements, d'importantes capacités de stockage furent mises en place auprès des centrales d'enrobage. "Grâce à cette précaution, il n'a pas été nécessaire de phaser le chantier Sancy-Combronde", observe Nicolas Bréchet.

Le premier entretien est prévu dans 9 ans avec l'application d'un nouveau BBSG de 6 cm en couche de roulement, le BBSG ancien servira alors de couche de liaison.

Vers les chantiers zéro déchet

L'aspect environnemental a été largement pris en compte sur les deux chantiers. Ainsi, les trois centrales ont fait l'objet d'un plan très strict, comprenant notamment la mise en place de cuves double peau, la construction de bacs maçonnés pour recueillir tous les fluides en cas de fuite accidentelle (rupture d'un flexible) et l'installation de bassins de décantation des eaux de ruissellement. Les résidus de chantier (blancs de poste, fonds de transport, coupes, etc.) ont été passés au concasseur et recyclés en GNT. "Cette valorisation systématique de nos déchets de fabrication, conclut Nicolas Bréchet, nous a fait faire un pas supplémentaire vers la réalisation de chantiers propres à rejets zéro dans l'environnement." Un objectif d'autant plus réaliste que les matériaux bitumineux sont recyclables à 100 %. ■

Repères

Tronçon Sancy-Combronde

Longueur : 52 km,

Surface des chaussées : 1,25 million de m²,

Déblais : 15 millions de m³,

Remblais : 10 millions de m³,

Enrobés : à l'origine, il était prévu 800 000 tonnes de matériaux enrobés mais certaines couches ayant pu être surclassées, tout en garantissant la même durée de vie, 670 000 tonnes ont suffi ;

Bitume : 40 000 tonnes entièrement fournies par Total (Feyzin). Une seule classe est utilisée sur ce tronçon, le classique 35/50

Montant des travaux : 450 M€ HT

Tronçon Terrasson-Brive nord

Longueur : 11 km,

Surface des chaussées : 250 000 m²,

Déblais : 4,2 millions de m³,

Remblais : 2,35 millions de m³,

Enrobés : 185 000 tonnes,

Bitume : 9 000 tonnes. Le bitume 35/50 a été livré par Esso (Port-Jérôme) et le bitume spécial Multiphalte HM permettant de fabriquer les bétons bitumineux anti-oniérants par Shell (raffinerie de Petit-Couronne).

Montant des travaux : 154 M€ HT



Atelier d'application avec un élévateur de cordon.

Une autoroute écologique

De la protection des loutres à celle des orchidées

L'intégration environnementale a fait l'objet d'un niveau de soin jamais atteint pour une autoroute. L'A89 traverse des régions aux caractéristiques bien marquées puisqu'elle passe du vignoble libournais, au causse du Périgord, du plateau des Millevaches à la chaîne des puys. Ces caractéristiques ont été prises en compte non seulement dans la construction des ouvrages, mais aussi dans le choix du tracé qui évite par exemple des stations d'orchidées protégées. Un grand nombre d'aménagements spécifiques ont été prévus. La protection contre le bruit repose en partie sur la mise en place de buttes de terre (merlons) plantées

d'arbres. Après l'étude des besoins de la faune par des organismes spécialisés et indépendants, des passages en dessous et au-dessus des voies, sont aménagés à intervalles réguliers. Il y en a, par exemple, sept sur la section Le Sancy-Combronde. L'A89 participe à la sauvegarde de la loutre. En effet, on a constaté un début de recolonisation et Autoroutes du Sud de la France (ASF) a fait aménager des ouvrages de rétablissement des cours d'eau pour favoriser ses déplacements. Tous les kilomètres environ, des bassins sont créés pour recueillir et dépolluer l'eau de ruissellement de l'autoroute.



Quatre semaines de travail, 20 h par jour, 7 jours sur 7

Aéroport de Liège

Quatre semaines pour faire piste neuve

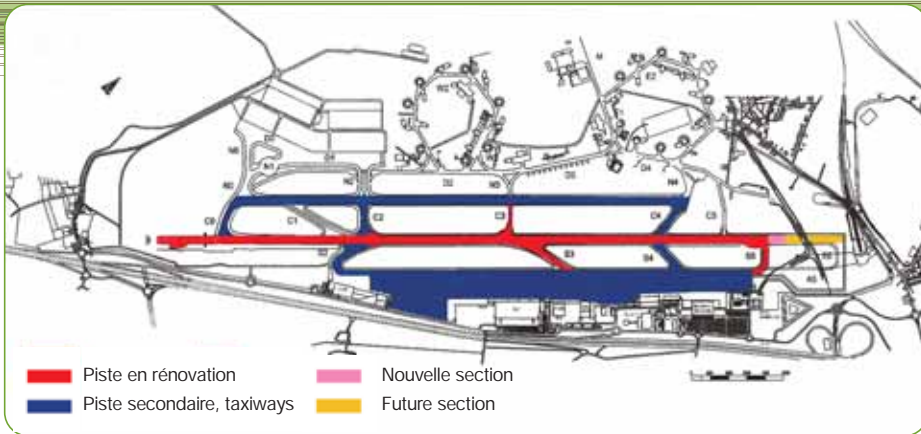
Pour rénover la piste principale de l'aéroport de Liège (Belgique), le choix du maître d'ouvrage s'est porté sur les enrobés bitumineux. Une fois de plus, ce matériau a fait la preuve de sa supériorité lorsqu'il s'agit de mener à bien un chantier en un temps record.

Longtemps, les pistes des aéroports ont été réalisées en dalles de béton hydraulique. Ce matériau traditionnel jouissait d'une réputation bien établie de longévité et il équipait la majorité des aéroports dans le monde entier. Aujourd'hui, de plus en plus de maîtres d'ouvrage lui préfèrent les enrobés bitumineux, aussi bien pour la création de nouvelles pistes que pour la rénovation de pistes anciennes. Les aéroports de Paris-Charles-de-Gaulle, Madrid ou Francfort ont ainsi récemment fait appel aux enrobés pour la réfection de pistes réalisées à l'origine en dalles de béton hydraulique. C'est une solution de ce type qu'a choisie SAB, gestionnaire de l'aéroport de Liège-

Bierset, en Belgique, pour refaire la piste principale dont la partie construite en dalles de béton présentait des signes inquiétants de fatigue : fissurations et ruptures des coins risquant de mettre en danger la sécurité des avions.

La construction de cet aérodrome à vocation militaire à son origine, remonte aux années précédant la 2^{ème} Guerre mondiale. La piste était constituée de dalles de béton à ses deux extrémités, soit un tiers de sa longueur, et d'une partie centrale en matériaux hydrocarbonés, pour les deux autres tiers. Une première rénovation, dans les années 1950, avait consisté à recouvrir les dalles existantes d'une deuxième couche de dalles de 5 m de côté sur 23 cm d'épaisseur, en intercalant





Le chantier était phasé de façon à laisser le passage des avions sur l'un des taxiways (en bleu) traversant la piste (en rouge).

une couche en matériaux hydrocarbonés. Au début des années 1990, la section centrale de la piste en enrobés avait été resurfacée par l'application d'un revêtement bitumineux coulé à froid.

Assurer le décollage à pleine charge des plus gros porteurs

L'aéroport aurait pu se satisfaire de cette solution s'il était resté d'intérêt local. Mais, sous l'impulsion de la région wallonne il est en train de devenir un grand aéroport de fret, le 8^{ème} en Europe, avec près de 400 000 t en 2004 et a l'ambition de doubler ce chiffre à l'horizon 2010, tout en prenant une part significative dans le marché des vols charters.

La réalisation de ces objectifs implique des investissements importants : construction d'un nouveau terminal d'une capacité de 1 million de passagers par an, extension du parc pétrolier de 1 000 à 6 000 m³, création d'une nouvelle zone de stockage du fret, agrandissement des aires de manœuvre et de parking pour les avions gros porteurs et, ce qui nous intéresse ici, rénovation et extension de la piste principale. La rénovation a été décidée, on l'a vu, pour des raisons de sécurité. L'extension de 400 m a pour but de permettre le décollage des plus gros porteurs, Boeing 747 ou Airbus A380, à pleine charge, pour les vols intercontinentaux sans escale technique.

Une solution tout enrobés bitumineux pour des raisons de facilité de mise en oeuvre

"Lorsque nous avons commencé les études, deux choix étaient possibles, rappelle Alain Curvers, responsable de la sécurité et de la maintenance chez SAB. L'une était de conserver la structure mixte existante, l'autre de faire appel aux enrobés pour l'ensemble de la piste."

La première solution impliquait d'extraire la dalle supérieure avant de poser des dalles neuves sur une couche de réglage (coulis de béton). "C'était possible, mais pour ne pas interrompre totalement

le trafic pendant plusieurs mois, poursuit A. Curvers, il aurait fallu recourir à la méthode utilisée à Genève, qui consiste à interrompre puis à rétablir le trafic quotidiennement, autant de fois qu'il y a de dalles à remplacer, en effectuant chaque fois la succession des opérations : extraction, pose d'une nouvelle dalle préfabriquée sur une couche de réglage en coulis de ciment, séchage... Nous avons calculé que les travaux se seraient étalés sur plusieurs

// Seule une solution à base d'enrobés bitumineux rendait possible la réalisation de cette tâche dans un délai aussi court. //

années, ce qui était incompatible avec les exigences de nos clients !"

L'autre solution, le tout enrobés, entraînait certes une fermeture totale de la piste, mais pendant 4 semaines seulement, ce que rendait possible l'existence d'une piste secondaire suffisant aux besoins réduits de la période estivale. C'est cette dernière solution qui fut choisie.



La centrale d'enrobage installée sur le site, d'une capacité de 400 t/h.

20 heures de travail par jour, 7 jours sur 7

"Le cahier des charges nous imposait de réaliser, non seulement la réfection totale de la piste, mais aussi la création des 100 premiers mètres de la piste nouvelle, entre le 1^{er} et le 28 août, rappelle Dominique Werpin, Responsable Projets de JMV Screg Belgium. Il est évident que seule une solution à base d'enrobés bitumineux rendait possible la réalisation de cette tâche dans un délai aussi court, au prix il est vrai de 20h de travail par jour, 7 jours sur 7."

La structure, définie par le bureau d'études GREISCH (BEG), très proche de celle choisie par Aéroport de Paris (actionnaire à 25 % de l'aéroport de Liège) pour la réfection de la piste n° 2 de Roissy CDG, en 2003, répond au même cahier des charges général : grande résistance à l'usure, absence d'orniérage, forte cohésion pour éviter tout risque de délitement. Elle comporte une série de couches d'enrobés, dont l'épaisseur totale varie de 21 à 39 cm sur les 3 300 m ●●●



Fiche technique

Profil en travers de la piste

Au-dessus des dalles

- couche d'usure de 5 cm en BBA 0/14 (5,3 % de bitume-polymère), granulats de porphyre.
- couche de 7 cm en BB* 0/20 (4,6 % de bitume 20/30), granulats de grès, 25 % de recyclage,
- couche de 2 cm anti-remontée de fissures en sable-bitume Composaf (9,5 % de bitume-polymère),
- sous-couche de 7 cm en BB 0/20 (4,6 % de bitume 35/50), granulats de grès, 25 % de recyclage,
- couche inférieure de 14 cm en GB 0/20 (3,5 % de bitume 50/70), granulats de grès, 33 % de recyclage.

Au-dessus des anciens enrobés

- couche d'usure de 5 cm en BBA 0/14 (5,3 % de bitume-polymère), granulats de porphyre,
- couche de 7 cm en BB 0/20 (4,6 % de bitume 20/30), granulats de grès, 25 % de recyclage,
- couche anti-remontée de fissures de 2 cm en sable-bitume Composaf (9,5 % de bitume-polymère),
- sous-couche de 7 cm en BB 0/20 (4,6 % de bitume 35/50), granulats de grès, 25 % de recyclage.

Nouvelle section

- couche d'usure de 5 cm en BBA 0/14 (5,3 % de bitume-polymère), granulats de porphyre,
- couche de 7 cm en BB 0/20 (4,6 % de bitume 20/30), granulats de grès, 25 % de recyclage,
- couche anti-remontée de fissures de 2 cm en sable-bitume Composaf (9,5 % de bitume-polymère),
- sous-couche de 7 cm en BB 0/20 (4,6 % de bitume 20/30), granulats de grès, 25 % de recyclage,
- couche inférieure de 34 cm en GB 0/20 (3,5 % de bitume 50/70), granulats de grès, 33 % de recyclage.

*Dans la nomenclature française, il est d'usage de désigner une coupe 0/20 sous l'appellation de grave-bitume (GB), les bétons bitumineux (BB) ne dépassant pas 0/14. Nous respectons ici l'usage belge.

... de la piste actuelle, avec un rehaussement de 10 cm du niveau de la surface de roulement, et atteint 60 cm sur les 100 m de piste nouvelle (voir fiche technique). Les accotements de 10 m de large situés de part et d'autre de la piste ont également été rehaussés de 10 cm. Dans le souci d'économiser les granulats, une partie des matériaux de fraisage ont été recyclés dans les couches inférieures.

Une grande flexibilité des fournisseurs de bitume

Pour des raisons de sécurité, la piste ne devait comporter aucun joint longitudinal sur une bande centrale occupant la moitié de sa largeur totale (45 m). C'est pourquoi il fallut mettre en œuvre quatre ateliers comportant quatre finisseurs avançant de front pour poser un tapis de 25 m de large d'un seul tenant. "L'exercice était délicat,

mais la principale difficulté du chantier était ailleurs, explique Philippe Dubru, directeur de JMV Screg Belgium. La contrainte vraiment sévère était de laisser le passage aux avions obligés de traverser la piste en travaux pour se rendre de la piste secondaire aux aires de parkings, et inversement, à une cadence allant, de nuit, jusqu'à 26 mouvements par heure ! Nous avons donc mis en place un phasage rigoureux que, bien entendu, nous avons dû adapter en fonction des aléas de chantier – et il y en a eu – comme la présence de dalles de béton armé de 39 cm d'épaisseur ou de dalles fissurées à remplacer dont personne ne soupçonnait l'existence."

Les variations de planning d'un chantier exigent une grande flexibilité dans les approvisionnements, qui repose largement sur les capacités d'adaptation du fournisseur de bitume. Une capacité dont Nynas Benelux a su faire preuve au prix d'une organisation sans défaillance. ■

Le chantier en chiffres

Longueur de la piste :

3 300 m (portée à 3 400 m en 2005 et à 3 700 m en 2008)

Surface traitée : 200 000 m²

Bitumes :

6 000 t dont :

Bitume classique (Nynas) : 4 000 t

Bitume polymère (Nynas, Emubel) : 2 000 t

Enrobés : 140 000 t

dont : Grave-bitume : 40 000 t

Sable-bitume : 8 000 t

Sous-couches : 67 000 t

Couche de surface : 25 000 t

Granulats :

- 3 centrales d'enrobage dont
 - 1 centrale mobile sur site (400 t/h)
 - 2 centrales fixes (2 x 250 t/h)

Mise en œuvre

- 6 finisseurs
- 12 compacteurs
- 12 semi-remorques

Maître d'Ouvrage : SOWAER (Société Wallonne des Aéroports)

- Adjudicataire : Société Momentanée JMV-ENROVIA-WEGEBO-VBG-FABRICOM GTI (les 4 premières citées étant 4 filiales de Screg Belgium)
- Montant des travaux : 10 000 000 € HT





5 km d'enrobés clairs posés en 3 jours.

Enrobés ocre pour voie verte

→ Cinq kilomètres de chaussée réalisés d'un seul tenant en enrobés clairs : le segment de voie verte qui longe la Saône entre Fontaines et Fleurieu-sur-Saône, au nord de Lyon, apporte une preuve supplémentaire de l'excellence des produits bitumineux pour ce type d'application, appelé à connaître un fort développement .



Chaque week-end, à la belle saison, ils sont des milliers à emprunter la voie de couleur claire qui serpente le long de la Saône, parallèle à la RD 433, entre Fontaines-sur-Saône et Fleurieu-sur-Saône, dans le département du Rhône, à une quinzaine de kilomètres au nord de Lyon : cyclistes principalement, mais aussi rollers, skate-boarders, piétons pousseurs de landaus, ils sont de plus en plus nombreux à apprécier de pouvoir se promener en toute sécurité sur une chaussée interdite aux véhicules à moteur, dont le revêtement donne une délicieuse sensation de "glisse".

Ce segment de 5 km de longueur, réalisé au cours du printemps et de l'été 2004, fait partie d'un vaste ensemble, puisqu'il s'intègre dans un projet de voies vertes qui reliera Bâle à Marseille, en rejoignant à Lyon un itinéraire en provenance du lac Léman. Ces deux voies offriront, après leur achèvement, près de 800 km de chaussées entièrement séparées de la circulation automobile et permettront aux cyclistes de découvrir en toute sécurité les paysages des rives de la Saône et du Rhône, jusqu'au bord de la mer Méditerranée. Mais revenons au segment qui nous intéresse et qui va de Fontaines-sur-Saône à Fleurieu.

Un choix dicté par des considérations esthétiques

"La solution technique retenue pour la chaussée tient compte du fait que cette voie, entièrement séparée, ne sera circulée que par des véhicules légers non motorisés ou des piétons, explique Philippe Bardet, Responsable Technique Régional adjoint, pour la région Rhône Alpes Auvergne, d'Appia-Eiffage, entreprise adjudicataire du marché. Nous avons donc opté pour une couche de roulement réalisée en enrobé à chaud directement posée sur le concassé constituant la couche de fondation."

S'agissant d'une voie vouée aux loisirs, donc au plaisir des usagers, la prise en compte des critères esthétiques, en particulier l'intégration harmonieuse dans le paysage, s'imposait. "Le choix d'un enrobé constitué de granulats de couleur et d'un liant clair nous a paru la meilleure solution, même si le cahier des charges techniques ne l'exigeait pas et si cela complique un peu la mise en œuvre car il faut travailler avec un matériel parfaitement propre pour éviter toute trace de liant noir, poursuit Philippe Bardet. Nous avons ainsi pu mettre pleinement en valeur la couleur ocre du granulat issu de carrières locales, qui se marie parfaitement avec la pierre des construc- ●●●

En savoir plus...

La Saône : lien social et activité économique

La restauration paysagère progressive des berges de la Saône, à laquelle participe la création de la voie verte, fait partie de l'aménagement du Val de Saône, un territoire qui représente, avec 16 communes, près de 4 % de la population du Grand Lyon et 15 % de sa superficie. L'Agenda 21 du Val de Saône privilégie le fleuve et son approche environnementale comme thème d'expérimentation : qualité de l'eau, aménagement des berges, maîtrise des risques... Mais la Saône est également abordée sous l'angle économique et social : usages de la rivière, attrait touristique, requalification des zones d'activités...

Les enjeux sont de trois ordres :

- la préservation des ressources et l'amélioration de l'organisation urbaine,
- la valorisation de la dynamique économique et la création d'emplois,
- la solidarité et la satisfaction des besoins.



... tions du Beaujolais et des Monts d'Or."

La seule contrainte du liant clair, c'est la propreté des matériels : des citernes jusqu'aux finisseurs, en passant par le poste d'enrobage et les bennes de transport d'enrobés, tout doit être nettoyé

dont une rampe et une cuve dédiées aux liants clairs, a été bloquée pour le chantier et les 1 450 tonnes d'enrobés ont pu être livrées au finisseur à la température de 150 °C, malgré un trajet de 80 km d'une durée de 1 h 30 environ à cause de la traversée de Lyon.

Des voies vertes continues depuis Bâle jusqu'à Marseille

"Nous avons pu montrer notre savoir-faire sur un chantier de grande taille en liant clair. En effet, nous avons livré une centaine de tonnes de MEXPHALTE C P1 en 48h au départ de notre usine SPB de Chateaufort (13), observe Vincent Begon, de Shell Bitumes. Nous avons préconisé le MEXPHALTE C P1, car grâce à sa teneur en polymères, il offre une excellente adhérence avec la plupart des granulats de couleur."

Mais laissons le mot de la fin à Jean-Pierre Rovirat, de la DDE du Rhône, maître d'ouvrage : "Quand j'observe l'occupation de cette voie le long de la Saône, empruntée certains jours depuis l'aube par

// Grâce au liant clair, nous avons pu mettre en valeur le granulat ocre, issu de carrières locales, qui se marie parfaitement avec la pierre des constructions du Beaujolais et des Monts d'Or. //

avant la mise en œuvre du produit, de façon à éliminer toute trace de noir. Dans le cas présent, l'entreprise, en accord avec le fournisseur de bitume, a choisi de poser les 5 km d'enrobés clairs en trois jours : pendant cette période, une centrale d'enrobage à double ligne d'injection de liant,

les patineurs en rollers et jusqu'au milieu de la nuit par des cyclistes, je me dis que c'est vraiment une réussite. Et j'attends avec impatience l'ouverture des segments qui permettront un jour de circuler sur des voies vertes depuis Bâle jusqu'à Marseille..." ■

Repères

Mexphalte C P1

Le Mexphalte CP1 est un bitume de synthèse transparent en film mince destiné principalement à la fabrication d'enrobés colorés à haute performance.

Pour certaines applications particulières où le bitume doit présenter une faible susceptibilité à la température, Shell bitume propose les Mexphalte C P1 et P2 modifiés par l'adjonction de polymères.

Caractéristiques	Mexphalte C P1
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	44 à 54
Point de ramollissement B & A (°C)	46 à 52
Point d'éclair (°C)	> 250
Point Fraass (°C)	- 10
Limite de pompabilité (°C)	100



Le sous-ballast en enrobé facilite l'accès des engins de chantier et économise les granulats.



Ligne à Grande Vitesse Est Sous les rails, le bitume

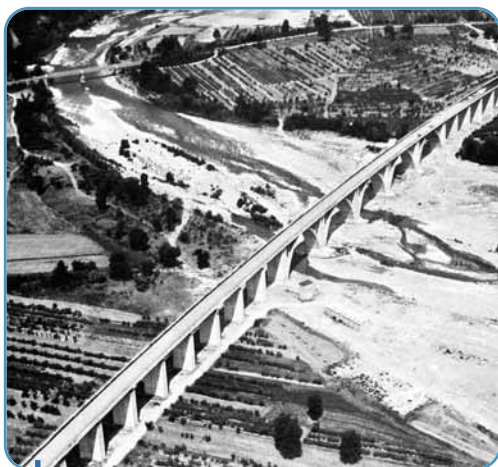
Le TGV qui reliera Paris à Strasbourg en 2 h 20 roulera pendant 3 km sur une portion expérimentale de la Ligne à Grande Vitesse Est reposant sur des enrobés bitumineux sous ballast. Une innovation qui n'est pas tout à fait une première, puisqu'il y a 30 ans les chemins de fer italiens et britanniques exploraient déjà la possibilité d'améliorer la tenue des voies ferrées en faisant appel au bitume.

// Cette solution pourrait se développer, notamment lorsqu'il y a des déficits de matériaux et des optimisations de profil à rechercher. //

Longtemps après ses homologues américain, italien ou britannique, Réseau Ferré de France (RFF) se lance à son tour dans l'expérimentation d'un nouveau type de structure de voie, dans lequel intervient une couche réalisée en matériaux bitumineux. La Ligne à Grande Vitesse Est (LGV-Est) qui sera mise en service en 2007, comportera en effet un tronçon de 3 km dont le ballast repose sur une couche de grave-bitume, un matériau emprunté aux techniques routières. Les essais devront valider la tenue de ce nouveau type de structure, dont l'adoption pourrait constituer une petite révolution dans la réalisation des voies ferrées à grande vitesse, un élément essentiel à la qualité et à la sécurité des voies de chemin de fer.

Une planche d'essai de 3 km

"Le but essentiel de cet essai est double, explique Didier Thomas, expert technique sur le projet LGV-Est. Il s'agit tout d'abord d'approcher une recherche d'avantages sur la traficabilité de la plate-forme avant la pose des voies ferrées, puisque la tendance actuelle est de faire les travaux préliminaires de génie civil, de pose des caténaires, des câbles de signalisation et de télécommunication, en utilisant des moyens routiers. L'autre avantage recherché, c'est la réduction de l'épaisseur des structures d'assise qui, dans le cadre du profil en long, nous permettent de jouer sur les profondeurs de déblais et les hauteurs de remblais. Avec l'emploi d'une couche de grave-bitume, nous avons obtenu une réduction en épaisseur de 36 cm de matériaux ●●●



200 km de la ligne à grande vitesse Florence / Rome reposent sur un sous-ballast bitumineux.

... nobles, ce qui n'est pas négligeable. L'essai a donc été conçu pour permettre de vérifier d'une part la traficabilité de la plate-forme pour les engins routiers qui précèdent la pose des voies et, d'autre part, la tenue du matériau sous les sollicitations des trains à grande vitesse en termes de performances mécaniques, de comportement et de durabilité. Si tout cela s'avère concluant, cette solution pourrait se développer dans certaines configurations, notamment lorsqu'il y a des déficits de matériaux et des optimisations de profil à rechercher."

Ce sont ces hypothèses que RFF étudiera après la mise en service de la ligne, à partir de 2007, grâce à une "planche d'essai" de 3 km de longueur, réali-

sée en avril et mai 2005 au sud de Reims par les filiales Colas, pour la formulation des matériaux bitumineux, leurs calculs fabrication et mise en œuvre, en collaboration avec SNCF Ingénierie pour les calculs de dimensionnement et le pilotage de l'étude de faisabilité.

La section choisie, à proximité de la gare nouvelle Champagne-Ardenne, près de Reims offre l'avantage de comporter toutes les configurations de profil en long et en travers de la LGV : déblai, remblai, pente unique, double pente, ouvrages d'art.

Les objectifs de l'essai, conformément au cahier des charges de RFF, sont d'analyser et de contrôler :

La longue histoire du ballast bitumineux

Au début des années 1970, le centre de recherche d'Esso Bitumes pouvait faire état dans un rapport d'un certain nombre de travaux exploratoires envisageant l'utilisation du bitume dans la construction des voies ferrées. Certains de ces travaux remontaient à la fin des années 1930 ! D'autres, plus récents, étaient menés au Japon et aux Pays-Bas, en Suède, aux Etats-Unis, en Italie et en Grande-Bretagne, les compagnies ferroviaires de ces deux derniers pays ayant travaillé avec les services recherche de Shell.

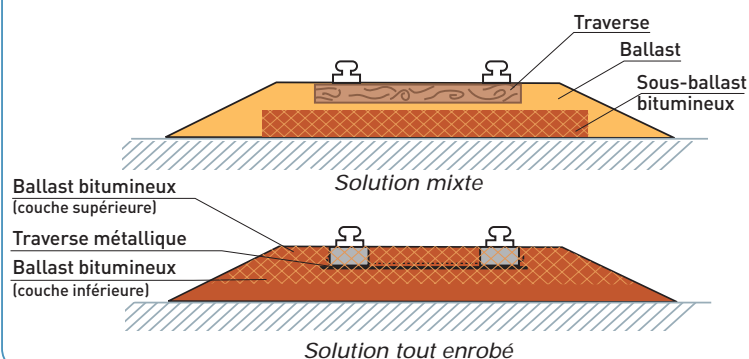
Le rapport recensait les différentes solutions proposées pour améliorer la durée de vie d'un ballast grâce aux matériaux bitumineux. Deux tendances principales se faisaient jour, la solution tout enrobé et la solution mixte.

Dans la première, les rails reposaient sur des traverses d'acier ou de béton noyées dans une première couche d'enrobé, elle-même posée sur une couche d'assise également réalisée en enrobé (le tout reposant sur une couche de fondation en matériau non lié).

Dans la deuxième solution, les rails reposaient par l'intermédiaire de traverses de bois sur un ballast conventionnel d'épaisseur réduite, posé sur une couche d'enrobé bitumineux, dite "sous-ballast".

- Au Royaume-Uni, des essais entrepris par British Railways ont abouti en 1974 à la pose d'une voie expérimentale du premier type, posée sur une assise entièrement en enrobé, mise au point par le centre de recherche Esso à Abingdon. La construction en enrobé offrant une résistance élevée alliée à une prise rapide semblait idéale pour le remplacement de tronçons de voie vitaux dont le service ne peut être interrompu plus de quelques heures.

LES SOLUTIONS EXPÉRIMENTÉES PAR LES PRÉCURSEURS



- Aux Etats-Unis, l'Asphalt Institute (AI) s'intéressa également aux possibilités qu'offrent les enrobés bitumineux pour la construction des voies de chemin de fer dès les années 1960. Après avoir exploré puis écarté les solutions tout enrobés, les essais entrepris avec la Santa Fe Railway en 1969 se tournèrent vers une solution mixte, avec un ballast classique posé sur un sous-ballast bitumineux. Trois sections furent construites, avec des épaisseurs d'enrobés respectivement de 63, 127 et 190 mm, sur une longueur totale de 630 m. Les mesures au moyen de capteurs, puis les carottages effectués pendant une durée de 30 ans ont démontré l'excellente tenue du dispositif et sa supériorité par rapport au ballast classique en stabilité et en qualité du profil de la voie.

- En Italie, c'est une solution du même type qu'a choisie Ferrovie dello Stato pour équiper certaines sections de la ligne à grande vitesse Florence / Rome. Le sous-ballast en enrobés bitumineux d'une épaisseur de 12 cm, mis au point par la direction de la recherche d'Esso France, était conçu pour "améliorer les caractéristiques mécaniques de la structure et diminuer les coûts de maintenance, tout en entraînant une réduction significative des durées de construction".

- la faisabilité et la compatibilité de la technique avec les contraintes de construction d'une LGV ;
- les avantages pour le chantier, principalement la possibilité de circuler sur la plate-forme en cours d'aménagement ;
- les performances mécaniques, la durabilité et le comportement sous trafic ;
- les aptitudes aux opérations de maintenance ;
- les avantages technico-économiques que peut apporter ce procédé.

5 000 m³ de matériaux économisés par km de voie

Le ballast est constitué de roches dures concassées non liées, sélectionnées pour résister à l'abrasion (ou attrition) qui émousse les angles. Son épaisseur est fonction de la charge et de l'intensité du trafic (généralement de 30 à 40 cm). Sur la LGV-Est, le ballast est posé sur une sous-couche de 20 cm de GNT 0/31,5 reposant sur une couche de forme de granulats calcaires non liés de 50 cm. Dans le segment expérimental, la couche de forme de granulats calcaires de 50 cm est supprimée et une couche de grave-bitume de 14 cm est posée directement sur une couche de réglage de 20 cm de GNT 0/31,5. Le gain en épaisseur est de 36 cm (voir illustration ci-dessous), ce qui représente une économie de 5 000 m³ de matériaux par km de voie par rapport à la solution de base, soit 15 000 m³ pour les 3 km de voies expérimentales. L'étude menée par Colas Est, Screg Est et le laboratoire central de Colas France a abouti à la formulation suivante : GB 0/20 à base de bitume classique 35/50, fourni par Shell Bitumes, et de granulats calcaires de 4 fractions différentes (0/3, 3/6, 6/10, 10/20). Les essais réalisés sur le produit fabriqué ont montré que les performances sont conformes aux hypothèses de dimensionnement¹.

Une mise en œuvre particulièrement soignée

La mise en œuvre a fait l'objet de soins particuliers. Après compactage de la couche de réglage 0/31,5, un enduit superficiel monocouche à l'émulsion de bitume dosée à 1,5 kg/m² avec des gravillons 6/10, a d'abord été posé sur toute la largeur de celle-ci (14,50 m) afin d'assurer une protection contre les intempéries et permettre la circulation des engins sans entraîner de détérioration.

Les 12 000 t de grave-bitume, fabriquées dans la centrale d'enrobage de Reims Enrobés, à raison de 220 t/h, à une température de 150-160 °C pour un taux d'humidité de 5 % des granulats, ont été transportées sur le chantier par semi-remorques bâchées et appliquées sur 10,70 m de largeur en deux passes d'un finisseur de 5,35 m. Le compactage à 96 % de compacité (4 % de vide) a été assuré par des compacteurs P 2 et des doubles billes vibrantes. L'étanchéité sur le joint longitudinal en 1 m de largeur est assurée par un enduit superficiel à l'émulsion de bitume polymère dosée à 1,45 kg/m² avec des gravillons 4/6. Enfin, la totalité de la grave-bitume, y compris ses flancs, a été traitée avec un enduit superficiel monocouche à l'émulsion de bitume dosée à 0,8 kg/m² recouverte d'un gravillon 4/6.

Un programme de mesures de 4 années

Un programme de suivi de la zone d'essai a été défini par SNCF Ingénierie pour mesurer pendant 4 ans les performances mécaniques, le comportement du matériau sous trafic et sa durabilité. Les mesures effectuées à l'aide de capteurs (jauges de contraintes, accéléromètres, sondes thermiques, etc.) placés dans la structure expérimentale permettront d'établir des comparaisons avec des capteurs identiques



placés dans la zone classique.

Plusieurs types de mesures seront effectuées :

- enfoncement de la traverse lors du passage d'un bogie sur chaque file de rails ;
- déformations lors des passages ;
- variations de pression dans la couche de réglage ;
- variations de température au sein de la GB.

Un protocole de suivi est prévu pour une durée de quatre ans. Au terme de ce délai, RFF pourra décider en toute connaissance de cause de l'avenir à donner à cette solution innovante pour les futures LGV. ■

1 - Module de rigidité > 9 000 MPa, Résistance à la fatigue à 10 °C, 25 Hz > 110 µdéformations à 1 million de cycles...

La LGV-Est

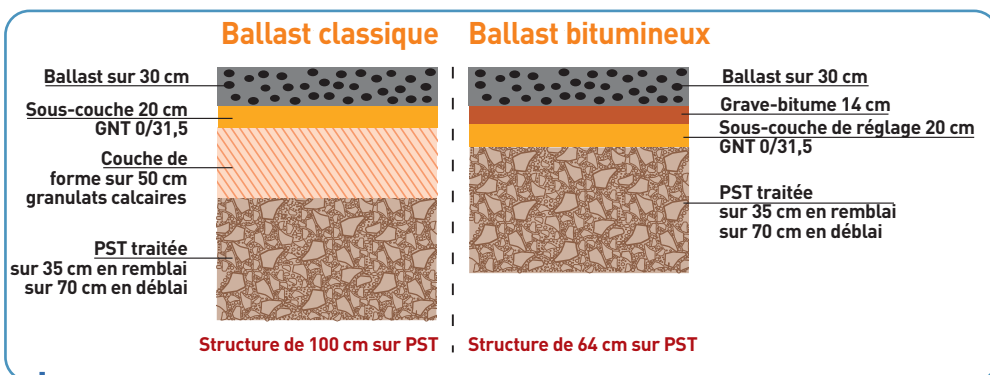
La construction de la ligne nouvelle a été décomposée en deux phases :

- la première va de Vaire-sur-Marne (Seine et Marne) près de Paris à Baudrecourt (Moselle), où elle se raccorde aux lignes Metz-Sarrebruck et Metz-Strasbourg
- la deuxième ira de Baudrecourt à Vendenheim (Bas-Rhin) près de Strasbourg.

Entre temps, le TGV roulera à vitesse normale entre ces deux villes sur la ligne existante Metz-Strasbourg. Le temps de trajet Paris-Strasbourg passera de 4 h à 2 h 20 après la première phase, puis à 1 h 50 après la deuxième phase.

Caractéristiques générales

- Linéaire de lignes nouvelles :** 300 km (première étape)
- Linéaires de raccordement :** 44 km
- Gares nouvelles :** Champagne-Ardenne, Meuse, Lorraine
- Vitesse potentielle :** 350 km/h
- Vitesse commerciale :** 320 km/h
- Alimentation électrique :** 2 x 25 kV – 50 Hz
- Linéaire de rails :** 1 288 km
- Ballast :** 3 100 000 t
- Traverses :** 1 000 000



La structure expérimentale de la LGV Est permet une réduction de 36 cm en épaisseur, entraînant un gain en matériaux de 5 000 m³/km.



Application d'un revêtement clair dans le tunnel de Lodève, sur l'A75.



Pose d'un enduit bicouche coloré chez un particulier

Avec les liants clairs les revêtements prennent des couleurs



L'amélioration du cadre de vie et de la sécurité conduit aujourd'hui à accorder une part croissante à la couleur dans la voirie urbaine. Pour répondre à cette attente, les fabricants de bitume ont créé des liants clairs qui permettent de jouer avec toute une gamme de teintes pour tous les revêtements routiers.

Nous observons un changement dans les mentalités des responsables de communautés urbaines qui demandent de plus en plus souvent que les revêtements routiers s'intègrent au paysage, en rappelant des teintes naturelles et en mettant en valeur la couleur des granulats utilisés, constate Claire Binard, ingénieur Développement Assistance Technique de Total Bitumes. Notre démarche est d'accompagner les entreprises ou les communautés urbaines à trouver la solution technique routière la plus adaptée à leur problématique.

Le tunnel de Lodève, comme la piste cyclable du Pouliguen ou les trottoirs de Bordeaux, que nous évoquons dans ces pages de "bitume.info", constituent autant d'exemples d'applications de liants

clairs, à chaud ou à froid, associés à des granulats de couleur choisis pour des propriétés bien particulières : accentuation des différences entre les voies de circulation, intégration dans le paysage, économies d'énergie d'éclairage...

Pour des applications de dimensions modestes où la priorité est donnée à la couleur

À performances techniques égales des revêtements routiers, les maîtres d'ouvrage attachent de plus en plus d'importance à ces qualités qui permettent de répondre à des cahiers des charges multiples, aussi bien dans le cadre de la réalisation d'ouvrages d'art (tunnels) que d'aménagement urbain (trottoirs, voies réservées aux

Zoom sur...

Trois exemples de réalisations en enrobés clairs

autobus, etc.) ou d'équipements de loisirs (pistes cyclables). "Pour la fabrication d'enrobés ou d'asphalte, l'offre en liants clairs est aussi diversifiée que les bitumes purs, allant de la classe 20/30 à la classe 70/100 précise Claire Binard. Nous pouvons également fournir des émulsions prêtes à l'emploi pour les enduits superficiels ou les couches d'accrochage, spécialement formulées pour empêcher la remontée du noir des couches inférieures..."

Les liants synthétiques clairs sont le plus souvent destinés à des applications de dimensions modestes : un tunnel de quelques centaines de mètres de long, un aménagement lors d'une traversée urbaine, quelques kilomètres de piste cyclable de largeur réduite... Compte tenu des faibles dimensions de la plupart des chantiers, les produits proposés par les différents fabricants sont disponibles en vrac mais aussi sous des conditionnements fractionnés : conteneurs de 1t, fûts de 190 kg, pains de 5 ou 20 kg.

Les liants clairs, qui sont des bitumes faisant appel à des additifs de synthèse, ont un coût supérieur à celui des liants noirs classiques. Ce surcoût reste cependant modéré car il ne concerne, rappelons-le, que 5 % environ de la masse de la couche de roulement, un BBM ou un BBTM qui n'excède pas 2,5 ou 3 cm d'épaisseur (les autres 95 % étant constitués par les granulats, dont la qualité a évidemment un impact sur le résultat final). C'est pourquoi, il est accepté par les maîtres d'ouvrage qui donnent la priorité au résultat recherché : esthétique, qualité et stabilité de la couleur, associées aux performances techniques et à la flexibilité de mise en œuvre qui sont celles des produits noirs classiques. ■

Compactage d'un revêtement de trottoir



• Tunnel de Lodève, sur l'A75 (34)

Le tunnel bi-tube de 450 m de long, entre Millau et Montpellier (photo page de gauche), comporte deux ouvrages : le tunnel Est, d'une largeur de 11 m, comportant 3 voies dont une voie lente de montée ; le tunnel Ouest, d'une largeur de 9,50 m, comptant 2 voies et une BAU. La teinte claire recherchée pour améliorer la luminosité à l'intérieur de l'ouvrage (sécurité accrue, moindre consommation électrique pour l'éclairage¹) a été obtenue grâce à une couche de roulement à base de liant de synthèse clair et de granulats silico-calcaires, auxquels a été ajouté 1 % de pigment blanc. Le BBTM 0/6, de 2,5 cm d'épaisseur, a été appliqué à une température de 165 °C sur une couche d'accrochage formulée à l'émulsion (Emulvia Clean) afin d'éviter les salissures sur les voies en sortie de tunnel. La remise en circulation est intervenue après 4 heures.

Entreprises : Mazza Grands Travaux et Eurovia Grands Travaux,
Centrale : poste SEM.

1 - Les travaux du CETU (Centre d'étude des tunnels) ont montré l'influence positive de l'éclairage sur la sécurité dans les tunnels. Dans une récente étude technico-économique, cet organisme conclut en faveur des chaussées claires avec deux arguments : amélioration du confort pour les conducteurs (atténuation du stress visuel en entrée de tunnel, meilleure perception des obstacles) et réduction des coûts d'exploitation grâce aux économies d'éclairage réalisées.



La piste cyclable du Pouliguen en bord de mer.

• Piste cyclable le long de la côte sauvage, au Pouliguen (44)

La piste cyclable du Pouliguen (photo ci-dessus) a été créée par transformation et séparation d'une voie de circulation de la D45, sur une longueur de 2,5 km et une largeur de 3 m. La couleur "sable humide", recherchée pour une bonne intégration dans le paysage, a été obtenue grâce à un enrobé 0/10, de 4 cm d'épaisseur, à base de liant clair 50/70 et de granulats locaux dont la teinte naturelle est celle de la côte. Entreprises : VIAUDMOTER (Eurovia), Centrale : Société Armoricaïne de Travaux Routiers.

• Trottoirs de la ville de Gradignan, Communauté Urbaine de Bordeaux (33)

Le revêtement des trottoirs (photo en bas, à gauche) a été réalisé avec un enduit superficiel bicouche : les deux couches d'émulsion étaient dosées à 1,8 kg par m², les granulats utilisés étaient des Porphyres rouges 2/4 et 4/6. La température d'application entre 65 °C et 70 °C (l'émulsion, livrée à température ambiante, est chauffée dans la répandeuse).

Entreprise : SOPEGA TP.

Liant : Émulsion de KROMATIS® ECR 70 (Total)

Les liants utilisés sur ces chantiers appartiennent à la gamme KROMATIS®

Mise en œuvre

Les liants clairs ont un comportement identique à celui des bitumes classiques et s'utilisent dans les mêmes conditions, avec la précaution essentielle de s'assurer de la propreté des matériels utilisés pour le stockage, la fabrication et la mise en œuvre. Ils donnent accès à une très large palette de teintes pour les revêtements urbains :

- Enrobés bitumineux
- Asphaltes coulés
- Coulis à froid et enduits superficiels.

La “ville aux cent clochers” possède aussi plus de 200 km de voies communales dont l'état, de l'avis général, laissait fort à désirer. Jugeant cette situation indigne de la capitale haut-normande, l'équipe municipale a décidé, en 2001, d'aborder le problème de front et entamé une rénovation systématique dans laquelle les enrobés bitumineux jouent un rôle déterminant.



Un quai en enrobé de couleur pour accueillir l'Armada.

Rouen : un plan pluriannuel → de rénovation de la voirie

Rouen offre une situation complexe du point de vue de la voirie. Cette ville possède à la fois un centre historique très dense, riche en voies piétonnes, des quartiers accrochés aux flancs des collines abruptes qui enserrant la rive droite, où les pentes dépassent couramment les 10 %, et des axes de transit parallèles à la Seine où s'engouffre la circulation générée par l'activité du port et des grandes entreprises industrielles en périphérie sur la rive gauche. “Du fait de l'absence de contournement de la ville, nous subissons une circulation lourde qui entraîne une dégradation rapide de certaines voies, explique Albert Lainnemé, maire adjoint chargé de la voirie. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons entrepris un effort sans précédent pour remettre les voies communales à un niveau digne de notre cité et décidé la mise en œuvre d'un plan pluriannuel de rénovation. Chaque année, depuis deux ans, c'est près de deux millions d'euros que nous consacrons à cette tâche : 1,2 à 1,5 M€ pour les travaux de rénovation lourde et 500 000 € pour les petites interventions d'entretien de routine.”

L'inventaire des sections les plus dégradées pour déterminer les priorités

Pendant la durée du plan pluriannuel 2001-2007, environ 80 km de voies, soit plus d'un tiers de la voirie municipale, seront rénovés, incluant toutes les sections les plus dégradées.

“Notre travail a commencé par l'inventaire des voies les plus endommagées dans les différents secteurs de la ville, de façon à commencer par les réparations les plus urgentes, commente Albert Azoulay, directeur adjoint des Espaces publics. Il fallait aussi harmoniser nos chantiers avec les travaux menés par la DDE et la DDI, pour les voies d'intérêt national qui traversent la ville, de façon à aboutir à la rénovation de quartiers entiers.”

Selon l'état de dégradation des rues, la rectification des profils était effectuée par rabotage ou par reprofilage. “Chaque rue est un cas particulier, explique Gérard Bouillon, chef du centre Devaux, Colas Ile-de-France Normandie. Certaines n'avaient pas été entretenues depuis plus de vingt ans. Les unes sont bombées, d'autres sont affaissées.

Tantôt c'est le profil en travers, tantôt le profil en long qui est déformé. La principale difficulté, c'est l'hétérogénéité et la taille réduite des chantiers.”

La réfection d'une voie ne concerne pas seulement la chaussée, mais aussi les trottoirs, traditionnellement en asphalte coulé, les caniveaux, les entrées d'immeuble et de garage. Tâches auxquelles il faut ajouter la mise aux normes PMR (personnes à mobilité réduite), la signalisation verticale et horizontale... “La récompense, c'est que, lorsque nous avons achevé un chantier, pour le riverain c'est comme si sa rue était neuve”, observe M. Lainnemé.

Après l'effort de rénovation en profondeur qui a porté en 2001-2003 sur la structure et le revêtement des voies les plus dégradées, les années 2004-2005 ont été consacrées à des travaux de réfection plus légère, portant principalement sur les couches de surface : rabotage, reprise ponctuelle d'un affaissement de chaussée éventuel (déflachage) et pose d'un nouveau tapis de BBM.

Une planification rationnelle grâce au découpage de la ville en îlots

Parallèlement aux grands travaux de rénovation, des chantiers complémentaires de petite réfection sont entrepris à la demande des riverains ou des services techniques en cas de détérioration accidentelle. Pour planifier rationnellement ces interventions, la ville a été divisée en trois zones : Est, Ouest et Sud. Chacun de ces ensembles est découpé en douze îlots qui bénéficient tour à tour, à raison d'un îlot par mois dans chaque zone, de travaux d'entretien. Ce système évite le saupoudrage aléatoire et permet de concentrer les travaux sur des espaces limités, avec des résultats clairement visibles, à la satisfaction des riverains (et des élus). "Il nous donne aussi le moyen, observe Albert Azoulay, de répondre aux demandes d'intervention des riverains en leur indiquant à quel moment des travaux sont prévus dans leur quartier."

Pour les travaux de chaussée, le choix de la municipalité s'est porté sur les produits bitumineux : enrobés noirs classiques pour les chaussées, asphalté et enrobé pour les trottoirs. De l'asphalté clair évoquant la pierre a été utilisé pour la place des Carmes, de façon à améliorer l'aspect de ce vaste espace commerçant au cœur de la rive droite. Pour la réfection des trottoirs, traditionnellement en asphalté noir, la préférence va aujourd'hui aux enrobés, qui offrent l'avantage de pouvoir ouvrir puis refermer plus rapidement une tranchée en cas d'intervention ponctuelle sur une installation souterraine. "De plus, ces enrobés travaillés à la main, qui sont tout aussi confortables pour les handicapés ou les poussettes que l'asphalté, sont nettement moins glissants par temps de pluie", ajoute M. Azoulay. L'asphalté garde cependant droit de cité pour quelques aménagements de petites surfaces, par exemple des squares réservés aux piétons et aux cyclistes.

Un enrobé spécial pour diminuer les bruits de roulement

"Nous avons choisi les produits bitumineux, avec une préférence pour les enrobés, car ils offrent la solution la plus satisfaisante en termes de rapport coût / qualité et de rapidité de chantier; explique encore Alain Lainnemé. De plus, ils apportent un élément de confort incomparable et décisif en atténuant significativement les bruits de circulation." Depuis 2004, en effet, le choix des responsables rouennais s'est porté sur un enrobé dont la formulation spéciale abaisse significativement le

niveau des émissions sonores provoquées par le roulement des véhicules.

"C'est en proposant en alternative à la solution prévue au cahier des charges, une variante avec un enrobé Rugosoft®, que nous avons remporté le marché, rappelle Gérard Bouillon, Chef d'Agence de la société Devaux - Colas Ile-de-France Normandie. Cet enrobé Rugosoft® a été retenu pour son efficacité dans la lutte contre les bruits de roulement mais également pour sa capacité à garantir un niveau durable d'adhérence élevé. Pour cet enrobé de granularité continue, généralement 0/6, il est utilisé un bitume modifié par ajout de polymères type Colflex N ou S selon l'importance du trafic. L'optimisation de la structure granulaire de cet enrobé lui confère en outre, un aspect esthétique particulièrement attractif pour la voirie urbaine. Rugosoft® a reçu le prix "Décibel d'Or 2005" décerné par le Ministère de l'environnement."

La grande affaire de Rouen, on le sait, c'est l'Armada qui rassemble périodiquement les grands voiliers du monde entier le long de ses quais. Le point d'orgue de la rénovation de la voirie de la ville, c'est peut-être le quai rive droite, entre le pont Guillaume-le-Conquérant et le pont Corneille, lieu de promenade favori des rouennais à pied, à vélo ou en rollers : 11 000 m² d'enrobés coulés à froid rouge vif, à base d'émulsion de bitume clair de synthèse, posés en bicouche, pour la première section, et 6 000 m² pour la deuxième section, achevée en septembre 2005, réalisée en enrobé bitumineux coulé à froid, coloré par ajout d'oxyde de fer. "Une réalisation et un traitement architectural qui donnent à notre ville une visibilité et un aspect vraiment très agréable", note en souriant Albert Azoulay. ■

En savoir plus...

Sur un tapis rouge

L'agglomération rouennaise s'est dotée d'un système de transport en commun, TEOR

(transport est-ouest rouennais), en voie d'achèvement. Il s'agit d'autobus articulés qui ont la particularité de circuler en site propre et qui bénéficient d'un guidage optique innovant leur donnant l'avantage lors des passages dans les sections partagées avec le trafic ordinaire.



Les sections en site propre sont repérées visuellement par leur couleur rouge vif. Il s'agit d'une plate-forme en

GNT et grave-bitume, recouverte d'une couche de roulement en BBSG 0/10 classe 3, à base de bitume modifié anti-orniérage teinté à l'oxyde de fer (formulation mise au point par Eurovia, sur préconisations du CETE Normandie Centre).



Rouen en chiffres

108 000 habitants

230 km de voirie

Plan de réfection pluriannuel 2001-2007 :

80 km de voies

Budget :

rénovation : 1,2 - 1,5 M€

entretien courant : 0,5 M€

Entreprises

Colas Devaux

Travaux Publics Rouennais

Enrobés

Rugosoft : béton bitumineux à chaud pour couche de roulement, de granularité 0/6, et d'un liant de type Colflex N ou S. Grâce à une formulation spécifique, cet enrobé fabriqué en centrale d'enrobage divise par 4 la puissance sonore des bruits de roulement. Sa mise en œuvre est effectuée au finisseur avant compactage.

Les épaisseurs usuelles d'application sont de :

- 2 à 3 cm pour les BBTM (Béton Bitumineux Très Mince)

- 3 à 4 cm pour les BBM (Béton Bitumineux Mince)

Bitumes

Bitume modifié par ajout de SBS pour les enrobés utilisés en couche de roulement.

Emulsion de bitume de synthèse pour les Enrobés coulés à froid.

Les peintres du XIX^e siècle avaient trouvé avec le bitume un pigment idéal pour obtenir les effets de "clair-obscur". Hélas, le bitume est un matériau qui poursuit sa propre vie sur la toile, longtemps après que les autres pigments ont séché...



Les mésaventures du "Radeau de la Méduse"

Pour obtenir des pigments noirs, les peintres ont le choix entre différents matériaux : noir animal, à partir d'os carbonisé (ou d'ivoire autrefois), noir minéral, avec de l'ocre calcinée provenant de fonderies, noir végétal, par calcination du bois, en particulier le fusain, dans des creusets fermés, terre noire, qui est un mélange de carbonate de calcium, de fer, de manganèse et d'argile... L'asphalte ou le bitume sont également utilisés pour obtenir des noirs présentant des reflets bruns. Le XIX^e siècle, entre tous, aura été celui du bitume, comme en témoignent les œuvres de nombreux peintres tels Turner, Géricault, Monet, Renoir... Avant l'avènement de la peinture en tubes, les peintres fabriquaient eux-mêmes leurs couleurs, mélangeant pigments de toutes sortes et liants végétaux ou minéraux, faisant souvent preuve d'audace et d'imagination dans la recherche de nouveaux matériaux et de techniques innovan-

tes pour imiter et surpasser les maîtres anciens. *"Ce matériau confère aux noirs des tonalités rouge sombre d'une grande richesse, souligne Robert Gamblin, auteur d'une étude sur le vieillissement des pigments utilisés par les peintres pour le Smithsonian Institute, à Washington. Malheureusement, c'est un matériau qui ne sèche pas et qui, en réagissant avec d'autres pigments colorés, tend à provoquer des dégâts sous forme de craquelures dans la surface de la peinture."*

Un violent "clair-obscur" en rupture avec les coloris vifs à la mode

Un des plus fameux exemples de peinture au bitume est visible au Louvre. Il s'agit du "Radeau de la Méduse", un tableau de près de cinq mètres sur plus de sept, présenté par Géricault au Salon de 1819 sous le titre de "Scène de naufrage". Cette fidèle reconstitution de la macabre épopée des survivants du naufrage

de la frégate La Méduse, échouée en 1816 sur le Banc d'Arguin, au large de la Mauritanie, fit scandale. Scandale politique, à cause des circonstances du naufrage, sur lequel la Restauration jeta le voile de la censure. Scandale esthétique, car les spectateurs furent déconcertés par le réalisme des représentations de cadavres que comporte le tableau et par les tonalités brunâtres et le violent "clair-obscur" en rupture avec les coloris vifs de la peinture néo-classique de l'époque. Pour le réalisme, Géricault avait travaillé à partir de fragments anatomiques empruntés à la morgue. Et pour le clair-obscur, il s'était abondamment servi de bitume de Judée. On sait aujourd'hui que ce produit ne sèche jamais complètement et c'est pourquoi la toile géante est condamnée à s'assombrir peu à peu avec le temps. À moins qu'on ne trouve le moyen d'enrayer ce phénomène non maîtrisé. Chercheurs, à vos éprouvettes ! ■