

Travaux

n° 831

RÉHABILITATION

- Le viaduc de Richemont
- Mise en sécurité du pont de Gagnac
- Novacol, un procédé de recyclage à froid à l'émulsion de bitume
- Barriquand, le spécialiste en réhabilitation de canalisations de Sogea Construction
- Réhabilitation du site minier de la Combe du Saut
- Réaménagements de carrières chez Colas Midi-Méditerranée
- Réhabilitation évolutive d'un site industriel à Granville
- Réhabilitation du site de Métaleurop Nord

ROUTES

- Assistance intégrée à maîtrise d'œuvre. De Casablanca à Marrakech

Réhabilitation

Travaux

numéro 831

Rehabilitation

juin 2006

Rehabilitation

éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

6

PRÉFACE

Christian Tridon

21

RÉHABILITATION

◆ Le viaduc de Richemont – 39 ans d'une vie de dalle orthotrope
- *The Richemont Viaduct – 39 years in the life of an orthotropic slab*

Divers auteurs

22

◆ Mise en sécurité du pont de Gagnac
- *Improving the safety of Gagnac Bridge*
R. Fournier, M. Boy, Ch. Schmitt, Ph. Gaillard

40

◆ Routes et développement durable : Novacol, un procédé économique et environnemental de recyclage à froid à l'émulsion de bitume
- *Roads and sustainable development : Novacol, an economical and environmentally-friendly cold recycling process with bitumen emulsion*

M. Ballié, D. Thouret

47

◆ Barriquand, le spécialiste en réhabilitation de canalisations de Sogea Construction
- *Barriquand, the pipeline renovation specialist of Sogea Construction*

Ph. Begou, M. Leclercq, D. Barruet

52

◆ La réhabilitation du site minier de la Combe du Saut : une combinaison du confinement des déchets et de la phytostabilisation des sols
- *The rehabilitation of the La Combe du Saut mining site : a combination of the confinement of the waste and the soil phytostabilisation*

Divers auteurs

56

◆ Réaménagements de carrières chez Colas Midi-Méditerranée
- *Quarry reclamation at Colas Midi-Méditerranée*
N. Galland, J.-Fr. Normand

67



Notre couverture

Réhabilitation du site minier de la Combe du Saut dans l'Aude

© Ademe

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Patrick Bernasconi

RÉDACTION

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

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart
Tél. : (33) 02 41 18 11 41
Fax : (33) 02 41 18 11 51
francoise.godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

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

France (11 numéros) : 190 € TTC
Etranger (11 numéros) : 240 €
Etudiants (11 numéros) : 75 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

MAQUETTE

T2B & H
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris
Tél. : (33) 01 44 64 84 20

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle
Martin Fabre
61, bd de Picpus - 75012 Paris
Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat
Saint-Just la Pendue (Loire)

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux). Ouvrage protégé; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie S.A.

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



Sommaire

juin 2006

Réhabilitation

Dans les prochains numéros

- Énergies renouvelables**
- SIAAP**
- Travaux souterrains**
- Réseaux - Galeries multiréseaux**
- Sols et fondations**
- Travaux fluviaux et maritimes**
- Routes et Travaux urbains**



◆ Réhabilitation évolutive d'un site industriel à Granville
- *Adaptable reclamation of an industrial site in Granville*
J.-J. Kachrillo, D. Mazziéri, Y. Charlot

75



◆ Réhabilitation du site de Métaeurop Nord. L'expertise d'Inertec dans le traitement des déchets dangereux
- *Reclamation of the Métaeurop Nord site. Inertec's expertise in hazardous waste treatment*
Ph. de Rochebouët, A. Barbier, D. Verschuere

80



ROUTES

◆ Assistance intégrée à maîtrise d'œuvre. De Casablanca la Blanche à Marrakech
- *Assistance included in project management. From Casablanca to Marrakesh*
J.-P. Danel

84

répertoire des fournisseurs

90

ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

ARTEM.....14	SOTRALENTZ CONSTRUCTION.....
HUNNEBECK24È DE COUVERTURE
KRINGS INTERNATIONAL..2È DE COUVERTURE	STRES2
SECO-RAIL.....20	

En novembre 2002, j'avais déjà eu l'honneur de rédiger la préface de cette même revue. J'y avais dit combien l'acte de réparer devait être considéré comme un acte valorisant. La conservation du patrimoine du génie civil qui nous entoure est à ce prix.

Cette édition ouvre ses pages à la réhabilitation au sens large, puisqu'on y trouve de la conservation de patrimoine d'ouvrages d'art comme des viaducs et des ponts, ou des réseaux de canalisations, mais également de la réhabilitation de sites industriels.

Point commun de cet acte de réhabilitation, la nécessité de conserver à ces équipements la parfaite fonctionnalité que leur impose l'évolution de nos sociétés. Réparer, adapter, conforter, nécessite de nombreuses particularités. Concevoir est certes une action noble et souvent délicate, mais celle qui consiste à intervenir sur un ouvrage ancien et en fonctionnement, est sans aucun doute beaucoup plus complexe. Elle fait appel à de nombreuses compétences de la part de l'ingénieur, dans la phase des prescriptions et définition des méthodologies, mais aussi et surtout de l'entrepreneur dans celle de la réalisation des travaux.

La réparation ou le renforcement d'une structure, suppose qu'un diagnostic précis et rigoureux ait été dressé au préalable. Une analyse des contraintes auxquelles l'ouvrage est soumis doit ensuite être menée avec beaucoup de soins. Elle tiendra compte des difficultés liées au maintien en service total ou partiel de l'ouvrage, des dispositifs souvent très sophistiqués permettant d'assurer la sécurité du personnel et des usagers éventuels, du respect des contraintes imposées par la protection de l'environnement ainsi que des difficultés d'exécution pour éviter d'endommager l'ouvrage pendant l'intervention.

Tout ceci fait appel à des compétences adaptées tant dans le domaine de l'analyse que dans celui de l'exécution.

On compare facilement l'acte de l'entrepreneur à celui du chirurgien, à bien des égards, et toutes proportions gardées, ils sont effectivement très semblables. Nous laisserions-nous opérer par des mains non averties ?

La réhabilitation doit être menée par des spécialistes. Nous en sommes tous convaincus, mais la réalité nous en donne souvent une tout autre version. La sacro-sainte religion du moins disant systématique conduit souvent vers des conditions d'exécution qui peuvent s'avérer dangereuses et inefficaces.

S'il y a bien un domaine sur lequel l'improvisation est à pros-

crire c'est bien celui-ci. Ces travaux nécessitent le recours à du personnel compétent, à un niveau de prix qui, outre le fait de rémunérer les travaux directs, permette également d'en couvrir les contraintes d'exécution.

Le maître d'œuvre doit permettre systématiquement, pour ce type de travaux, l'ouverture aux variantes. Il faut par contre qu'il ait la capacité d'en mesurer et d'en apprécier la pertinence.

Le STRRES se mobilise pour regrouper, dans son domaine de compétence, les adhérents qui en feront la demande sous un "Label STRRES" obtenu après une sélection rigoureuse portant sur des critères mettant en évidence les capacités à

entreprendre de tels travaux. Ce label pourrait être le drapeau sous lequel se regrouperait dans le même esprit de qualité, de sécurité et de respect de l'environnement, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entrepreneurs.

Je conclurai en évoquant la difficulté de nos entreprises à recruter du personnel.

Dans une société en pleine mutation, où les jeunes sont à la recherche de nouveaux repères, leur participation à des métiers qui contribuent à la sauvegarde de nos patrimoines peut leur apporter l'épanouissement qu'ils sont en droit d'attendre.



© Travaux

■ **CHRISTIAN TRIDON**
Président
du STRRES¹

1. Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement de structures. Syndicat affilié à la FNTP.

Le viaduc de Richemont Trente-neuf ans d'une vie

Situé sur l'A31, le viaduc de Richemont franchissant la Moselle est, pour le sens sud-nord, une structure de type dalle orthotrope. Cette dalle a rapidement présenté une fissuration pathologique au niveau des soudures auget-pièce de pont, trop sensibles au phénomène de fatigue. De nombreuses solutions de réparation seront étudiées puis mises en œuvre mais les fissurations de fatigue se généralisent et s'accroissent dans cette dalle sous-dimensionnée. Devant l'impasse technique, une étude préliminaire puis un projet de remplacement sont engagés. Les pistes de solutions sont exposées dans cet article. Compte tenu des nombreuses contraintes, le projet et les travaux de reconstruction se caractérisent, pour minimiser la durée de coupure de l'A31, par l'utilisation performante d'engins spéciaux : bigue fluviale et grues de très fortes capacités.



Figure 1
Plan de situation
Location drawing

■ PRÉSENTATION

L'autoroute A31 franchit la rivière Moselle au niveau de la commune de Richemont.

Historiquement, la construction du viaduc a débuté en 1964 par les tabliers du sens Thionville/Metz, suivie en 1966 par les tabliers du sens Metz/Thionville.

Longitudinalement le franchissement est constitué de deux ponts :

- ◆ un pont d'accès, à poutres précontraintes, de 90 m en trois travées indépendantes permettant de franchir le lit majeur d'inondation et deux gazoducs provenant des hauts fourneaux d'Arcelor ;

- ◆ un pont principal de 164 m franchissant la Moselle en trois travées continues (52,65 m + 58 m + 52,65 m) (figures 1, 2 et 3 et photo 1).

Les profils en travers fonctionnels et structurels sont décrits sur les figures 4 et 5.

Les ponts d'accès sont de type VIPP et sont parfaitement identiques pour les deux sens autoroutiers.

Figure 2
Coupe longitudinale
Longitudinal section

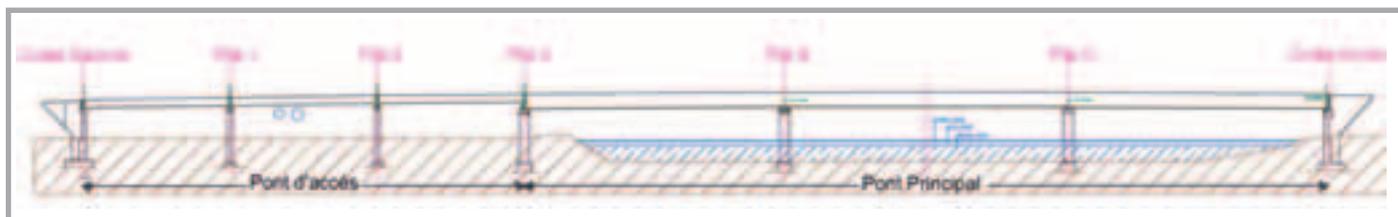


Figure 3
Vue en plan
Plan view

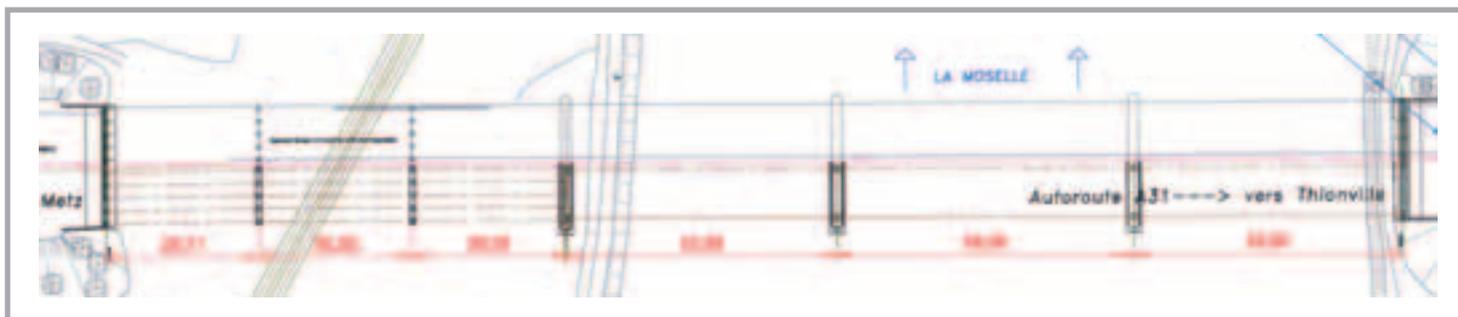


Photo 1
Vue générale
General view



de dalle orthotrope

Le pont principal du sens Thionville/Metz, celui qui fut construit le premier en 1964, est un pont mixte à quatre poutres.

Le pont principal du sens Metz/Thionville, celui construit en second en 1966, devait être identique au précédent. L'appel d'offres laissait une grande latitude et, in fine, la solution variante de l'entreprise "Constructions Métalliques de la Moselle" consistant en une dalle orthotrope à trois, puis finalement deux poutres sera retenue. Cette solution était très compétitive puisque la dalle béton était économisée alors que le tonnage de charpente n'était que faiblement augmenté (on passe de 404 t pour les quatre poutres mixtes à 460 t ici).

Au total une bonne solution donc, quoique... un peu innovante...

C'est en tout cas ici que l'histoire de ce pont commence (photos 2, 3, 4 et 5).

■ PATHOLOGIE DE CETTE DALLE ORTHOTROPE

La dalle orthotrope présente la particularité (car depuis, cela est proscrit) d'avoir des augets discontinus à chaque pièce de pont.

Et vingt ans après la construction (lors d'une inspection en 1984 puis surtout en 1986) un nombre certain de fissures apparaît à la jonction auget-pièce de pont avec des remontées le long de la sou-



Photo 2
1964 - Lancement de l'ossature du tablier mixte quatre poutres de sens Thionville/Metz

1964 - Launching the structure of the composite four-girder deck in the Thionville/Metz direction



Photo 3
1964. Construction du VIPP de trois travées indépendantes sens Thionville/Metz. On note la contrainte des gazoducs

1964. Construction of the viaduct with three independent prestressed beam spans in the Thionville/Metz direction. Note the gas pipeline constraint

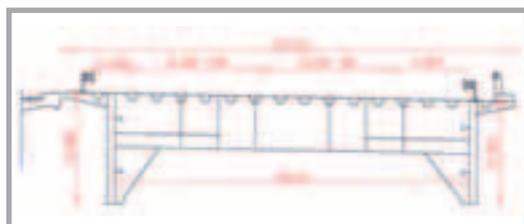


Figure 4
Coupe transversale de la dalle orthotrope
Cross section of the orthotropic slab

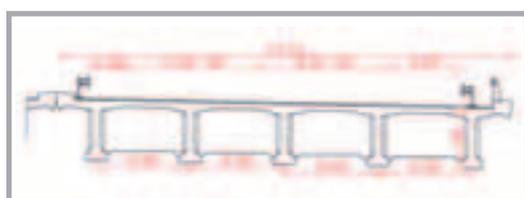


Figure 5
Coupe transversale du VIPP
Cross section of the viaduct with independent prestressed beam spans



Photos 4 et 5
1966. Lancement de la dalle orthotrope du sens Metz/Thionville. L'ouvrage a été lancé au-dessus du garde-grève d'où un dévérinage général d'environ 3,7 m

1966. Launching the orthotropic slab in the Metz/Thionville direction. Note that the structure has been launched above the abutment wall, hence with general jacking down by about 3,7 m

Emmanuelle

Champigny

CHEF DU SERVICE GRANDS TRAVAUX
DDE Moselle/SGT

Hervé Marneffe

CHEF DE LA CDOA
DDE Moselle/SGT/CDOA

Pierre Corfdir

CHEF DE LA DIVISION
OUVRAGES D'ART
CETE de l'Est/DOA

Bernard Prevost

RESPONSABLE TECHNIQUE À LA DOA
CETE de l'Est/DOA

Yves Simon

INGÉNIEUR D'ÉTUDES À LA DOA
CETE de l'Est/DOA (actuellement au CG29)

Hélène Abel-Michel

CHEF DU CENTRE DES TECHNIQUES
OUVRAGES D'ART
SETRA/CTOA

Jacques Berthelémy

DIRECTEUR TECHNIQUE À LA DGO
SETRA/CTOA/DGO

Jean-Emeric Simon

INGÉNIEUR GÉNÉRAL
OUVRAGES D'ART
CGPC

Photo 6
Vue générale de la jonction
auget/pièce de pont

*General view
of the trough/floorbeam
connection*



Photo 7
Vue des fissures types
à la jonction auget-pièce
de pont

*View of typical cracks
at the trough/floorbeam
connection*

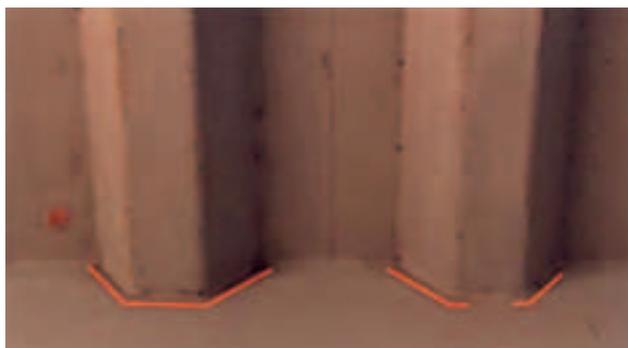


Figure 7
Modèle local (cinq augets
sur deux travées de pièce
de pont) (vue de dessous)
*Local model (five troughs
on two floorbeam spans)
(bottom view)*

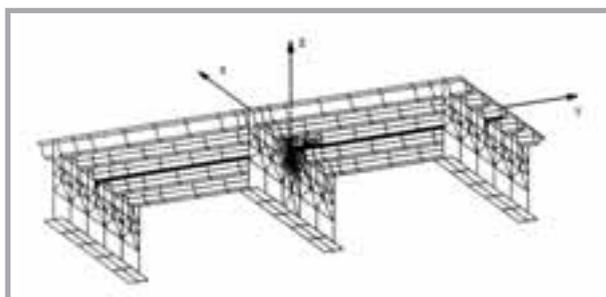
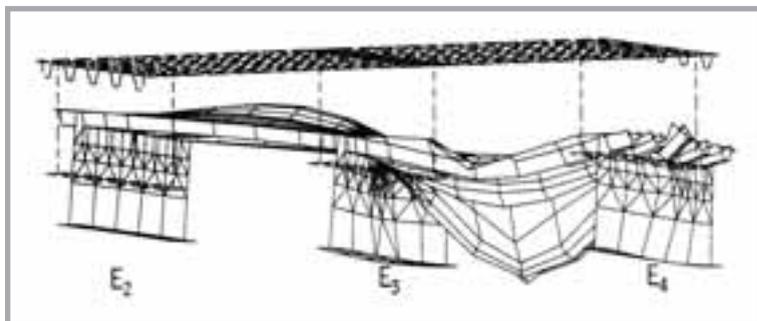


Figure 8
Déformée
amplifiée
*Amplified
deformation*



► dure auget-platelage. Devant ce constat très inquiétant, un suivi régulier est engagé avec demande d'avis de réparation auprès d'experts du ministère de l'Équipement.

Les fissures sont concentrées sous la voie lente (plus précisément sous les roues des PL) et de l'avis des experts il s'agit de fissures évolutives de fatigue des soudures augets-pièces de pont. Ce phénomène de fatigue était peu connu dans les ponts routiers à l'époque de la construction. Le nombre des fissures est assez important (en 1986, on relève 80 fissures de jonction auget-pièce de pont et pour l'auget n° 7, 28 % des jonctions sont atteintes). Des fissures augets-platelage en travée de pièces de pont sont aussi constatées (12 fissures en 1986).

L'évolution de la fissuration sera assez marquée

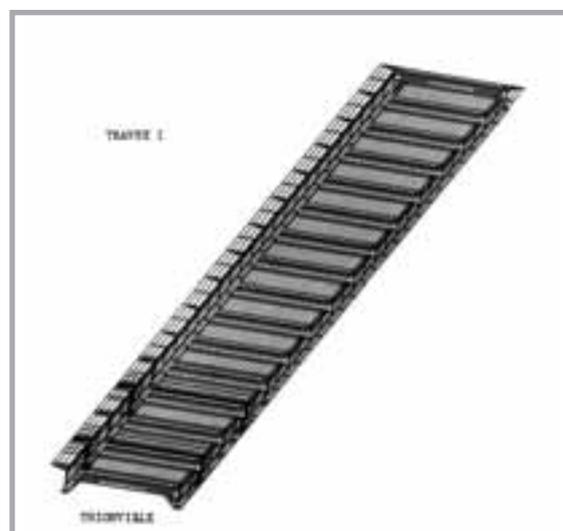


Figure 6
Modèle général (vue de dessous)
General model (bottom view)

puisque chaque année 6 m de fissures nouvelles sont enregistrés (photos 6 et 7).

En 1987, les 80 cordons fissurés seront refaits et un an plus tard deux de ces cordons se refissureront.

Par la suite, des projets de réparation plus ambitieux ont vu le jour, notamment pour créer la continuité des augets. En particulier, un essai de réparation a prévu la découpe d'un auget 50 cm de part et d'autre d'une pièce de pont, la découpe de la pièce de pont pour libérer le passage, et la soudure bout à bout du tronçon de 1 m assurant la continuité de l'auget. Cependant une fissuration du cordon de soudure bout à bout est vite apparue. Il faut dire, qu'outre la mauvaise disposition constructive qu'est l'interruption des augets au passage des pièces de pont, s'ajoute un sous-dimensionnement important des augets qui occasionne des $\Delta\sigma$ sous PL (ou convoi de fatigue pour le calcul) bien trop importants (géométrie des augets : espacement 60 cm, hauteur 18,5 cm, tôle de platelage de 12 mm et tôle d'auget de 6 mm).

On peut citer qu'ici, les augets font 18 cm de haut alors que sur une autre dalle orthotrope de l'A31 (Autreville) ils font 24 cm et que s'il fallait les redimensionner suivant les règlements actuels, ils feraient 30 à 35 cm.

En 1990, le LCPC a entrepris une étude aux éléments finis avec des mesures *in situ* pour caler expérimentalement le modèle physique puis évaluer la pertinence de différents projets de réparation. La modélisation comprend un modèle général pour déterminer les conditions aux limites d'un modèle local à maillage plus fin (figures 6 et 7).

Plusieurs cas de charge sont étudiés avec notamment : une roue de poids lourd à mi-travée de pièce de pont, une sur la travée de pdp précédente, et une sur l'auget à l'aplomb de la pièce de pont.

La première série de calcul a porté sur l'ouvrage actuel.

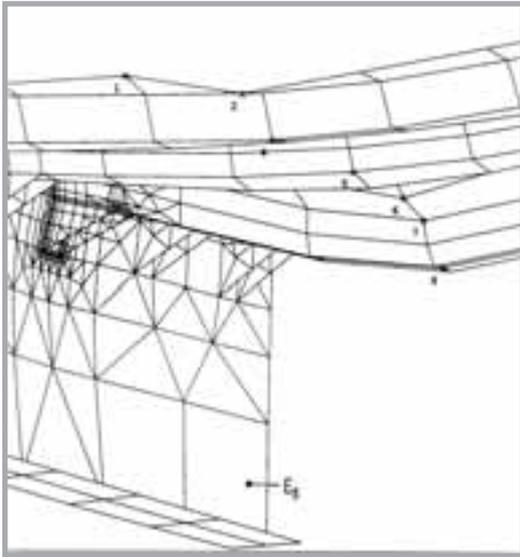


Figure 9
Etude d'une réparation par gousset de 10 ou 6 mm
sous chaque âme d'auget
Design of a repair by 10 mm or 6 mm gusset plate
under each trough web

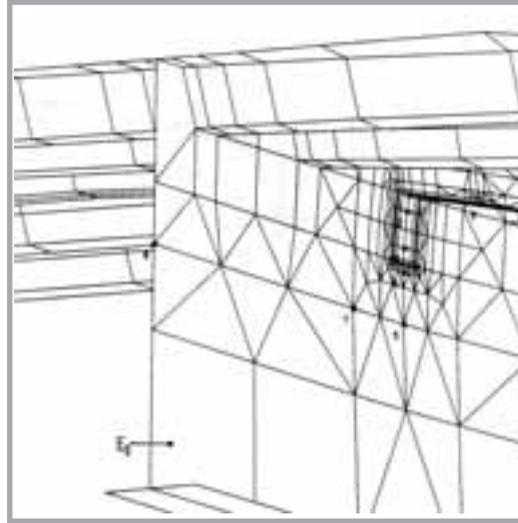


Figure 10
Etude d'une réparation par cornière de 10 ou 6 mm
sous chaque extrémité d'auget
Design of a repair by 10 mm or 6 mm bracket
under each trough end

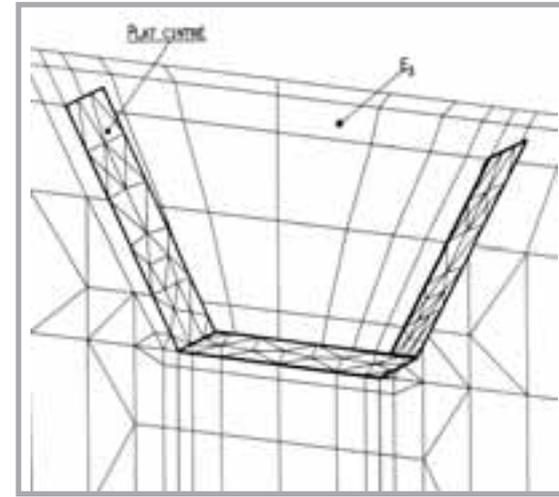


Figure 11
Etude d'une réparation par plat cintré de 8 mm
doublant la jonction auget-pièce de pont
Design of a repair by 8 mm bent flat section backing up
the trough/floorbeam connection

Les résultats de calcul ont été comparés à des mesures de jauges sur place sous chargement connu. Une très bonne corrélation a été obtenue puisqu'une jauge donne une variation de contrainte maximale 65 MPa en sous-face d'auget à 2,5 cm de l'entretoise quand le calcul fournit un résultat de 63 MPa. Ces variations de contrainte, certes essentiellement en compression, sont énormes vis-à-vis de la classe de fatigue des assemblages et du trafic poids lourds (figure 8).

Ensuite, une deuxième série de calculs a porté sur les réparations envisagées (cf. figures 9, 10, 11). De cette étude il est ressorti que la solution 3 par plat cintré, doublant la jonction, (solution mise en œuvre sur le pont de Severn en Grande-Bretagne) était la meilleure des trois.

Cependant, quelle que soit la solution de réparation, les variations de contraintes restent trop importantes compte tenu de la hauteur d'auget, et les réparations ne permettent qu'un allongement de la durée de vie.

Un calcul en fatigue fut pratiqué et aboutit au tableau suivant (figure 12).

La classe de détail pour la jonction auget-pièce de pont se situe entre 36 (pénétration partielle) et 71 (pleine pénétration). La classe probable se situe autour de 50 ou 56 et donne une durée de vie de 10 à 15 ans concordante avec l'apparition des fissures.

A noter que la classe de détail est un fractile à 5 %, c'est-à-dire qu'à partir d'essais d'assemblage, la classe est déterminée comme étant la valeur où 95 % des valeurs d'essais sont au-dessus. D'où la différence entre durée de vie de calcul et apparition en nombre de fissures (normal, les classes sont pour dimensionner un ouvrage et l'apparition d'une seule fissure est anormale).

La réparation permet d'augmenter la durée de vie, avec une classe 50 toujours valable pour la jonc-

tion à la pièce de pont et une classe cependant plus faible pour l'assemblage à clin du plat en extrémité de renfort.

La solution par plat cintré a été mise en œuvre tant que possible lors de réparation des jonctions auget-pièce de pont.

"Comme prévu", ces réparations ne seront que provisoires et une fissuration apparut moins de 10 ans après (photos 8 et 9).

Pendant 15 ans, la DDE entreprenait une campagne de soudures de réparation tous les 3 ans pour environ 18 m (campagnes en 1987, 1990, 1994, 1996, 1998 et 2000).

Cependant, on ne put que constater que les fissures continuaient de se développer sur tous les



Photo 8
Fissure réparation jonction
auget-pièce de pont
à l'extrémité du plat
de raccord
Crack repair on the trough/
floorbeam connection
at the end of the flat
connecting section

Classe d'assemblage	Durée de vie assemblage d'origine (années)	Durée de vie assemblage réparé par plat cintré (années)	
		Soudure côté Entretoise	Soudure côté Auget
36	3	27	6
40	4	40	8
45	6	68	12
50	9	107	17
56	12	174	25
63	18	290	37
71	27	402	60
80	43	1 325	102
90	67	2 925	168

Figure 12
Tableau des estimations
des durées de vie
Table of service
life estimates



Photo 9
Fissure auget-platelage
et aussi problème
d'étanchéité
Trough/decking crack
and also waterproofing
problem

Photo 10
Photo d'une des deux zones
de platelage rompu
*Photo of one of the two broken
decking areas*



Photo 11
Sablage
du platelage
*Sandblasting
the decking*



Photo 12
Amenée
des tôles la nuit
*Bringing in plates
at night*



Photo 13
Contre-perçage
et pose des boulons HR
*Counter-drilling
and installation
of high-strength bolts*



► augets, que les fissures auget-platelage se multipliaient et surtout que les réparations en venaient à se fissurer elles-mêmes. L'augmentation du trafic PL sur A31 (10000 véh./j TMJA en 1970; 75000 véh./j TMJA en 2004 dont 15 % de PL) aggravait cette pathologie de fatigue liée aux nombres de cycles alors que chaque auget atteignait sa limite de vie et on peut ainsi dire que le phénomène "s'accélérait".

■ ACCIDENTS DU PLATELAGE ET BOULONNAGE

Ces dégradations successives ont trouvé leur apogée en septembre 2000 avec l'effondrement de deux zones du platelage fissurées, ce qui a imposé la fermeture immédiate de la voie lente.

La mise à nu du platelage permettra d'ailleurs de constater d'autres fissures sur celui-ci (photo 10). Un comité technique a été constitué au sein du ministère de l'Équipement. Il fut alors décidé de cibler des solutions de réparations temporaires et plusieurs solutions de réparations sont rapidement étudiées. Un renforcement provisoire par tôles additionnelles boulonnées est choisi pour sécuriser le platelage en pontant les éventuels fissures et trous en formation. La solution du boulonnage a été préférée à un système de fixation par soudage pour des raisons de temps de mise en œuvre – durée plus courte et peu de contraintes de météo (ce qui n'est pas le cas pour un soudage), donc l'A31 plus vite rendue à une circulation normale –, mais aussi pour l'absence de perturbations des champs de contraintes des soudures existantes que pouvaient occasionner un soudage.

Un calcul des boulons HR prenant un effort de glissement sollicitant correspondant à la reprise de la moitié de la contrainte élastique dans la tôle de platelage existant (la tôle additionnelle ayant 12 mm d'épaisseur comme le platelage) détermina un nombre de 12000 boulons HR Ø 20 pour l'ensemble des deux voies.

Ce renforcement provisoire a été mis en œuvre au 1^{er} semestre 2001 (du 15 mars au 15 juin) (photos 11, 12 et 13).

La pose du platelage était faite en deux phases transversales pour couvrir la VL puis la VR et permettre la circulation des véhicules légers. Les principales étapes étaient les suivantes :

- ◆ pose BT4 avec filet de protection ;
 - ◆ rabotage enrobé et arrachage chape ;
 - ◆ réparation de quelques fissures de platelage ;
 - ◆ meulage de cordons ;
 - ◆ sablage général ;
 - ◆ pose des tôles préperçées servant de guide et perçage du platelage entre augets ;
 - ◆ boulonnages ;
 - ◆ complexe d'étanchéité et enrobé par demi-voie.
- A ce propos (la pose d'enrobé par demi-chaussée),



Photo 14
Exemple de boulon rompu
Example of broken bolt

l'ouvrage sous l'effet différentiel de la chaleur sur une seule poutre s'est courbé en plan (figure 13) et a cassé ses taquets transversaux d'appareils d'appui. On n'y pense qu'après ce genre de problème, mais sur un ouvrage entièrement métallique, donc bon conducteur de chaleur, la pose d'enrobé par demi-chaussée et même par chaussée entière doit être vérifiée d'un point de vue de déformation de structure.

La réparation par tôles additionnelles boulonnées avait certes une vocation temporaire mais encore une fois l'histoire s'est accélérée puisque 6 mois après le boulonnage, on découvrit (l'ouvrage était placé sous haute surveillance) que nombre de boulons sous la VL étaient desserrés voire cassés (photo 14).

Ce phénomène surprit et sans que l'explication du phénomène soit clairement élucidée par les experts, les flexions locales importantes du platelage sous passage de PL furent incriminées.

Des contre-écrous PAL furent mis en place sur tous les écrous pour éviter le desserrage et 6 mois après, les écrous se desserraient encore. Il fut décidé de manière pragmatique (à défaut de mieux) de procéder au cas par cas, par zone, à des changements mensuels de boulons (y compris par des boulons très pratiques ne se serrant que d'un côté) puis, en même temps, au changement de zones d'enrobé, également trop vite dégradées.

■ LA DÉCISION DE RECONSTRUCTION ET L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

Devant tant de problèmes techniques qui se traduisaient par de graves problèmes d'exploitation de l'autoroute et des risques d'accidents, la DDE cherchait des solutions et l'engagement des études de remplacement de la dalle orthotrope sera signifié par la Direction des Routes en mars 2001. Un diagnostic complet de l'ouvrage d'accès est entrepris et conclut à la nécessité de prévoir égale-

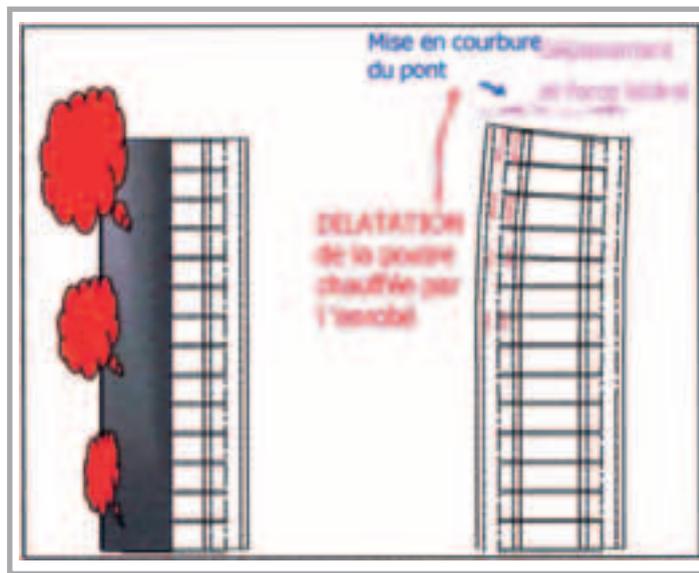


Figure 13
Mise en courbure de la dalle orthotrope suite à la pose d'enrobé par demi-ouvrage

Bending of the orthotropic slab after laying asphalt on half of the structure

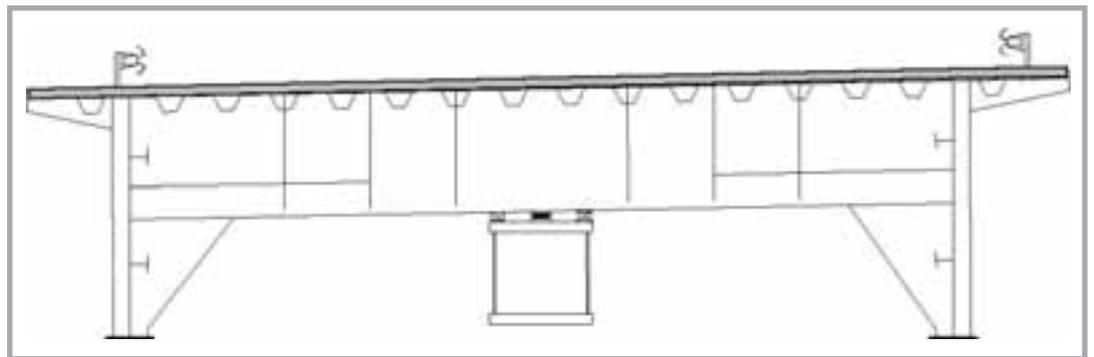


Figure 14
Solution de réparation par dalle Robinson et troisième poutre caisson
Repair solution by Robinson slab and third box girder

ment à moyen terme le remplacement des tabliers en béton précontraint; les raisons principales étant : la nécessité de renforcer chaque poutre par une précontrainte extérieure pour pallier les pertes de tensions par relaxation, l'impossibilité géométrique d'offrir une BAU de plus de 1,87 m, l'impossibilité de mettre un dispositif de retenue de niveau H2 permettant de diminuer le risque de chute de PL sur le double gazoduc de monoxyde de carbone en dessous.

L'étude préliminaire d'ouvrage d'art fut complexe puisqu'il fut envisagé à la fois des solutions de réparation, des solutions de remplacement sur site, des solutions de reconstruction en site propre avec un nouveau tracé autoroutier, soit au total 14 scénarios.

Les solutions de réparations : des idées intéressantes

La principale solution (figure 14) consistait à créer une dalle robinson (dalle de 10 cm connectée au platelage) pour résoudre le problème du platelage orthotrope, avec un caisson glissé en troisième poutre entre les deux poutres très écartées (l'entraxe entre les deux poutres de la dalle orthotrope actuelle était de 9,5 m) pour aider la structure générale à reprendre le surplus de poids. Cependant, malgré différents essais de contre-flèches et de mise en place avec vérinages-dénivellations pour rapporter les efforts sur le caisson, qui devait être d'une hauteur limitée (entre le dessous des pièces de pont et les semelles des poutres, il ne peut faire que 1,2 m), il ne sera pas possible d'aboutir techniquement à une solution justifiée au calcul.

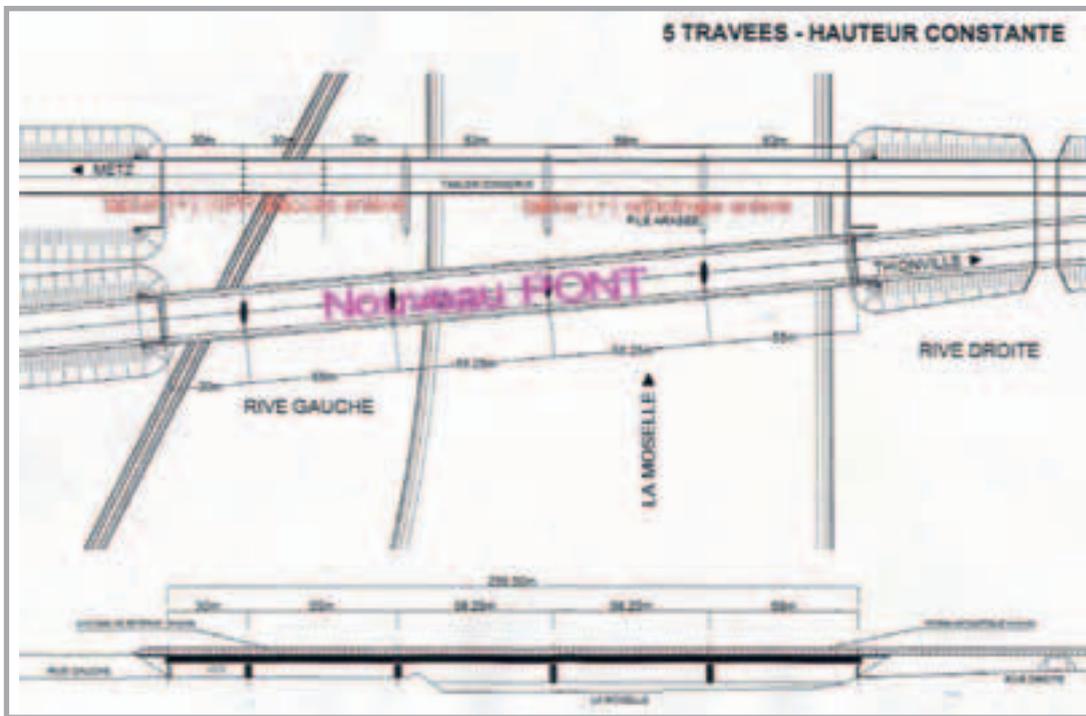


Figure 15
Planche de la solution
du nouveau pont en site propre
Illustration of the solution
for the new reserved right-of-way
bridge



Figure 16
Cinématique 1
Kinematics 1

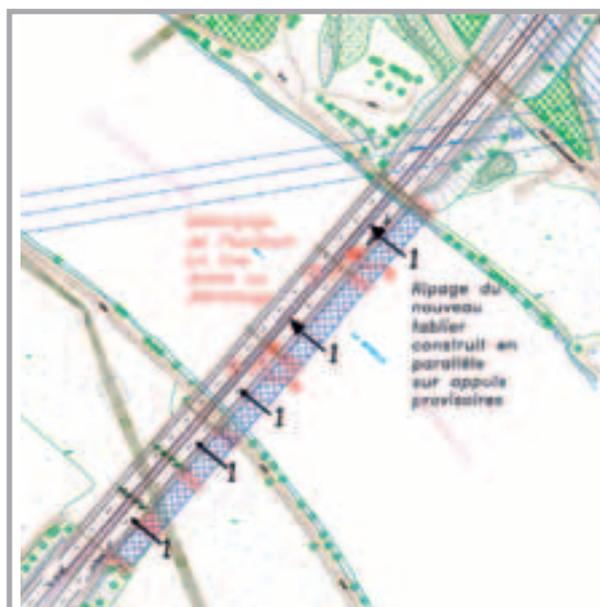


Figure 17
Cinématique 2
Kinematics 2



Les solutions de constructions en site propre

Techniquement, il s'agit de la famille de solution la moins problématique car la zone est libre. Le tracé autoroutier avec un rayon amont plus important sera amélioré. Avec certes quelques contraintes, comme l'alignement des appuis pour respecter les trajectoires des passes navigables et le passage au-dessus du gazoduc, le nouveau franchissement se situe dans la gamme des ouvrages bien connus (figure 15). Les inconvénients de cette solution sont ailleurs :

- ◆ elle est d'abord la plus chère puisqu'il faut des acquisitions foncières, des remblais et un certain linéaire autoroutier, la construction des nouveaux appuis ;
- ◆ elle est la plus longue en terme de délais avec le délai de DUP et celui de la loi sur l'eau avec, de plus, le débat sur les tracés de l'A32 et un éventuel nœud autoroutier qui viennent la complexifier définitivement.

Les solutions de reconstruction en place

Il faut étudier des solutions qui minimisent la durée d'indisponibilité d'un tablier c'est pourquoi on s'oriente vers des solutions avec un ouvrage neuf que l'on construit pour l'essentiel à côté, avant de le mettre en place "au dernier moment". Bien sûr, il faut gérer en plan la place pour la démolition de l'ouvrage existant avec celle prise par le tablier neuf. On peut dire que sont envisagés deux jeux de "pousse-pousse" :

- ◆ soit un ouvrage mixte muni de dalles préfabriquées avec zones de clavage ultérieur construit en parallèle le long de l'A31 en rive, puis ripé sur celle-ci, puis lancé (figure 16);
- ◆ soit un ouvrage mixte réalisé sur appuis provisoires en rivière alignés sur les piles existantes, avec une dalle coulée en place classiquement, que l'on met ensuite en place par ripage transversal (cette solution est développée au chapitre suivant) (figure 17).

En février 2003, l'étude préliminaire est rendue et la décision de la Direction des Routes se porte sur la famille de solutions de reconstruction en place. Il est demandé d'étudier précisément le projet d'une reconstruction en parallèle et aussi, compte tenu des contraintes, celui d'une reconstruction directement sur les appuis définitifs.

La reconstruction est en tout cas programmée et promise pour 2005.

LE PROJET DE RECONSTRUCTION

Le projet va étudier dans le détail les modalités de remplacement des tabliers.

Les données initiales

Beaucoup de données fonctionnelles sont imposées par le choix d'une reconstruction en place :

- ◆ la longueur des travées puisqu'il est prévu de réutiliser les piles et culées existantes;
- ◆ le tracé en plan (l'essentiel de l'ouvrage est droit, mais un rayon en plan de 750 m précède l'ouvrage et déborde de 24 m sur l'ouvrage);
- ◆ le profil en long (un arc de rayon 10 000 m);
- ◆ le profil en travers classique d'une autoroute mis aux normes de l'ICTAAL (BAU de 3 m).

Le choix du type de structure est guidé par les exigences du maître d'ouvrage, tant au niveau du coût, avec le réemploi des appuis existants, qu'au niveau de la durabilité, avec un ouvrage offrant une garantie d'utilisation de cent ans. Ces exigences ont conduit à retenir des ponts à ossature mixte acier-béton, solution certes peu innovante, mais parfaitement maîtrisée.

Description de la structure du tablier principal

Le choix s'est porté sur un bipoutre mixte de hauteur constante à entretoises, très compétitif pour les portées de franchissement (52,20 m - 58 m - 52,65 m). La hauteur des poutres métalliques est de 2,15 m (soit un élanement courant du $1/27^\circ$) et avec les 35 cm de dalle sur poutres, on arrive à une hauteur de structure de 2,50 m qui permet d'augmenter un peu (26 cm) le gabarit existant offert à la navigation fluviale.

Compte tenu du balancement (rapport travée de rive - travée centrale), les semelles des poutres sont assez larges (1 000 mm pour la semelle inférieure et 850 mm pour la semelle supérieure). Le vérinage du tablier se fait sous les pièces de pont des appuis (PRS de 1,4 m sur pile et 0,9 m sur culée) (figure 18).

Description de la structure du tablier d'accès

L'ouvrage d'accès actuel est un VIPP à trois travées de 30 m indépendantes. Pour le remplacer, un ouvrage à trois travées continues s'avère mieux adapté car il permet :

- ◆ de supprimer les joints de chaussée sur les appuis intermédiaires;
- ◆ de n'avoir sur pile qu'une seule ligne d'appui au lieu de deux, ce qui offre une place plus confortable (largeur de chevêtre de pile = 1,2 m) pour les appareils et dés d'appui;
- ◆ de répartir les efforts de freinage sur l'ensemble des appuis.

Transversalement, l'ouvrage projeté est un pont mixte à cinq poutres, choix peu habituel qui est motivé par le réemploi des appuis conçus pour un tablier à cinq poutres. On conserve ainsi les appareils d'appui à l'aplomb des fûts des piles.

La hauteur des poutres est de 1,00 m (élanement

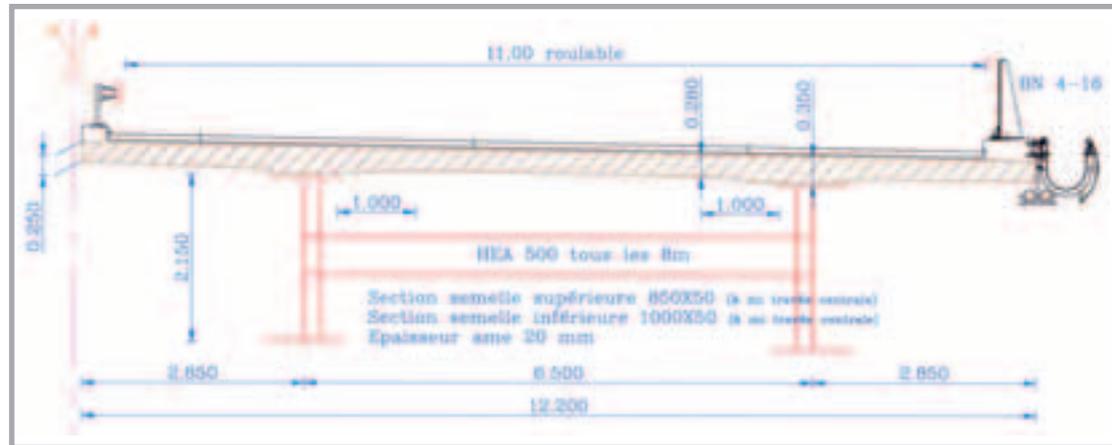


Figure 18
Coupe transversale pont principal
Cross section of main bridge

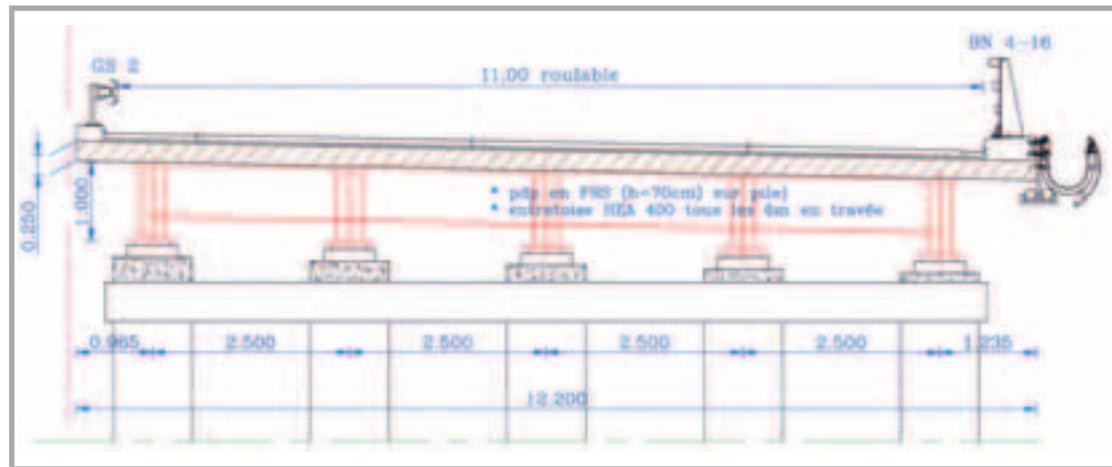


Figure 19
Coupe transversale pont d'accès
Cross section of approach bridge

= $1/30^\circ$), et avec la dalle d'épaisseur constante de 25 cm, on arrive à une hauteur de structure de 1,25 m, soit 35 cm de moins que l'actuel VIPP. Ceci permet de concevoir des appareils et dés d'appui de hauteur satisfaisante et de se dégager un peu des gazoducs. On note la "surabondance" des cinq poutres et le mauvais balancement des travées (figure 19).

La réutilisation des appuis

La volonté de réutiliser les appuis est bien sûr d'abord économique, mais aussi technique.

Pour l'ouvrage principal, les appuis, un voile unique de 25 m de long, sont communs aux tabliers portant les deux sens de circulation de l'autoroute. La navigation impose, elle, deux passes navigables (une passe de 30 m en rive gauche et une passe centrale de 50 m) qui ne peuvent être réduites. Enfin, le déplacement des appuis dans le lit majeur de la Moselle serait bien délicat au regard des exigences de la loi sur l'eau. De ce fait, malgré un balancement des travées qui n'est pas optimal, il n'est guère envisageable de modifier l'implantation des appuis.

Pour l'ouvrage d'accès, les piles de chaque sens autoroutier sont indépendantes et sont constituées par un chevêtre peu épais coiffant cinq colonnes, une colonne sous chaque poutre de VIPP. Le déplacement des appuis dans le lit d'expansion de la Moselle, à proximité des gazoducs, a également été rapidement écarté.

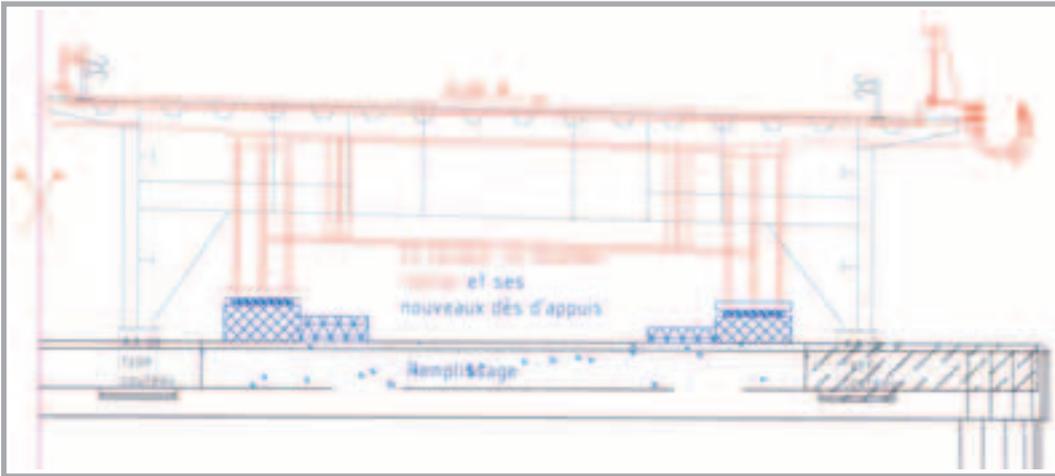


Figure 20
Reconfiguration type
d'une pile du pont
principal

*Typical reconfiguration
of a pier of the main
bridge*

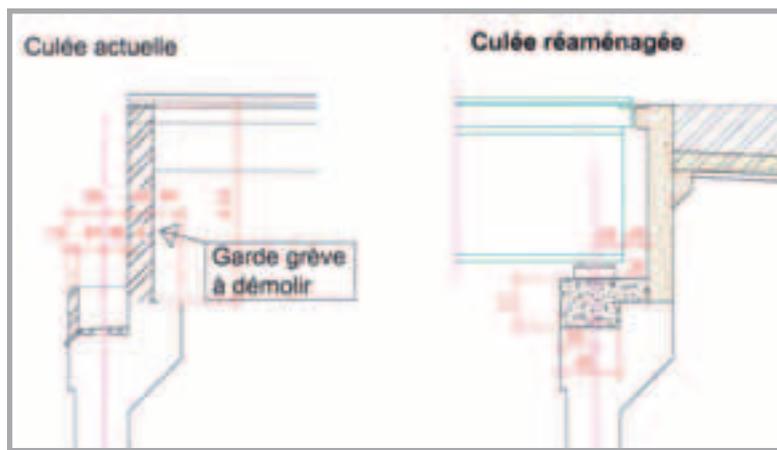
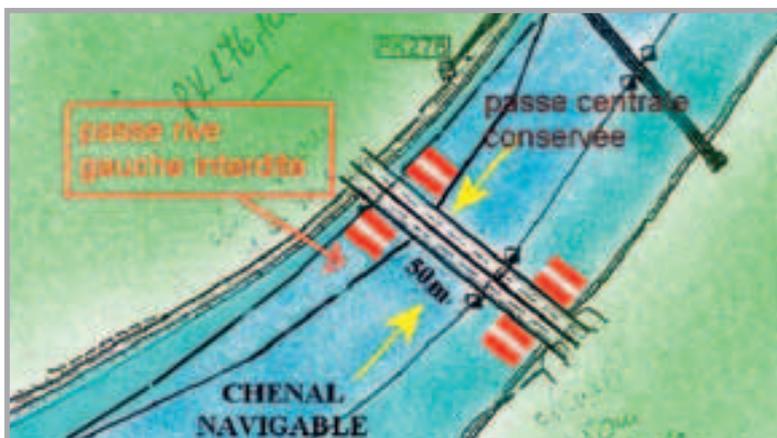


Figure 21
Reconfiguration type
d'une culée

*Typical reconfiguration
of an abutment*

Figure 22
Réduction à une seule
passe navigable

*Reduction to a single
navigable channel*



A la suite de ces raisons techniques il a fallu :

- ◆ vérifier les natures et cotes des sols en retrouvant les documents géotechniques d'époque et en les complétant de nouveaux essais pressiométriques ;
- ◆ s'assurer de la cote des semelles d'après les documents d'exécution en recoupant cela par des forages traversant les semelles ;
- ◆ s'assurer de la qualité des bétons ;
- ◆ recalculer les portances avec le nouveau tablier mixte projeté plus lourd que la dalle orthotrope existante ;
- ◆ faire le bilan des inspections détaillées et des visites subaquatiques pour vérifier l'absence de fissuration pathologique ou d'affouillement.

Quelques aménagements des têtes de piles étaient bien sûr nécessaires :

- ◆ piles 1 et 2 de l'ouvrage d'accès : l'implantation des poutres n'étant pas modifiée, le réaménagement des têtes d'appui se limite à la démolition et la reconstruction des dés d'appui ;
- ◆ pile B et C : comme le nouveau tablier est moins épais, le réaménagement consiste à réaliser de nouveaux dés d'appui. L'entraxe du bipoutres étant de 6,5 m au lieu des 9,5 m des poutres de la dalle orthotrope, ces travaux de dés pourront être réalisés avec la dalle orthotrope présente et circulée, donc hors coupure (figure 20) ;
- ◆ pile-culée A : l'espace d'about à l'arrière des deux axes des tabliers existants est insuffisant. Il est donc nécessaire de "décapiter" la tête d'appui et d'en refaire une offrant une place suffisante pour des abouts de bonne conception ;
- ◆ culée rive gauche et culée rive droite : pour les deux culées l'espace libre était insuffisant pour faire des abouts de bonne conception. Il a donc été décidé de casser le garde-grève existant et d'en réaliser un nouveau greffé à l'arrière de la culée (figure 21).

L'analyse des contraintes d'exécution

Le délai de coupure du trafic sur l'autoroute, les gênes occasionnées au transport fluvial ainsi que la gestion des risques liés à la présence de gazoducs sont les trois principales contraintes d'exécution.

La navigation

Le trafic fluvial sur ce tronçon de la Moselle est d'environ 20 bateaux par jour ; les travaux en rivière provoquent une gêne évidente et il n'y a pas de déviation possible pour les bateaux. Les mesures d'exploitation visant à sécuriser la circulation fluviale pendant les travaux ont été étudiées avec le Service de la Navigation. Elles impliquent la fermeture de la passe en rive gauche, la limitation de la vitesse des bateaux à 5 km/h et l'interdiction de se croiser sous le pont (figure 22). L'information de ces mesures et des travaux est faite par avis à la batellerie et par panneaux au niveau des écluses amont et aval.

Comme chaque année, une période de chômage de 10 jours permet l'entretien de la voie d'eau et il a été acté de concentrer au maximum les travaux nécessitant des arrêts de navigation, pendant ces 10 jours.

Les gazoducs

Les deux gazoducs (deux tuyaux de 2 m de diamètre) passant sous la deuxième travée du pont d'accès, transportent sur 12 km du monoxyde de carbone produit par l'usine Arcelor et acheminé jusqu'à la centrale EDF de Richemont (photo 15). Ce

gaz incolore et inodore peut, en grande concentration, être mortel ou laisser des lésions définitives. Il est véhiculé à faible pression dans les gazoducs, ce qui rend la détection de petites fuites très difficile. En cas de rupture franche d'un gazoduc, le risque est réputé mortel dans un rayon de 110 m et à effets potentiellement irréversibles dans un rayon de 350 m. Les ouvriers du chantier et les automobilistes arrêtés sur l'A31 sont donc directement concernés. Il y a une vingtaine d'années, une péniche heurtant les gazoducs (plus bas à l'époque) provoqua sept morts.

Une concertation avec la DRIRE et EDF a permis d'identifier les phases de chantier présentant le plus de risque pour les gazoducs et d'acter les arrêts de gazoducs nécessaires. Hormis la réalisation d'un appui provisoire à proximité, il s'agissait de l'enlèvement-démolition de la travée 2 du VIPP, de la mise en place par lancement de l'ossature métallique, du coulage de dalle au-dessus des gazoducs, enfin du ripage transversal. Il sera décidé de scinder le lancement de l'ossature et d'intercaler le coulage des deux plots de dalle survolant les gazoducs, ceci afin de supprimer l'arrêt correspondant (phase 1 : on lance l'ossature en s'arrêtant une travée avant terme ; phase 2 : on coule les deux plots qui seront *in fine* au-dessus du gazoduc ; phase 3 : on finit le lancement). Enfin, une opportunité importante apparaît puisque tous les 3 ans, EDF est tenu de fermer ces gazoducs pendant une semaine pour leur entretien et que cette fermeture triennale est programmée en 2005 en même temps que la reconstruction. Là encore (un peu comme le chômage de la navigation) il est acté de concentrer et planifier les arrêts souhaités pendant cette semaine. Compte tenu des enjeux, une convention tripartite Etat - Arcelor - EDF entérinera *in fine* les modalités convenues.

Le trafic routier

Pas de tour de magie possible, une coupure du trafic autoroutier de plusieurs mois était nécessaire pour ce changement des tabliers. Un basculement de la circulation sur l'autre sens et mise à 2 x 1 voie de l'A31 serait dangereux et peu efficace. Pour assurer le trafic nord-sud très important du fait des nombreux Lorrains travaillant au Luxembourg, plusieurs systèmes de déviation ont été mis en œuvre en fonction du trafic visé : trafic local ou international. Ces mesures d'exploitation ont fait l'objet de campagnes d'informations régulières bien avant les travaux. Pendant les travaux, la circulation doit continuer !

Les réponses techniques à ces contraintes d'exécution

Si les choix majeurs définissant l'ouvrage définitif étaient si contraints que les solutions techniques se sont vite imposées, par contre, la réalisation de l'ouvrage offrait de nombreuses variantes possibles.



Photo 15
Vue des deux gazoducs
depuis le pont d'accès
View of the two gas pipelines
from the approach bridge



Figure 23
Schéma montrant
comment le VIPP
à démonter
est coincé
Drawing showing
how the viaduct
to be disassembled
is stuck

Deux grandes options ont été étudiées pour répondre au cahier des charges :

- ◆ construction d'un tablier en parallèle de l'ouvrage existant puis ripage transversal ;
- ◆ construction d'un ouvrage mis en place directement sur appuis définitifs.

Ces deux grandes options ont été étudiées pour évaluer leur impact en terme de coût, de délai, et de risque. Ceci impliquant notamment d'examiner les techniques de démolition de l'ouvrage existant et de construction de l'ouvrage neuf.

L'enlèvement et la démolition des tabliers existants

Enlèvement des tabliers VIPP de l'ouvrage d'accès

Dans le cas d'une construction en parallèle sur appuis provisoires, la zone dans laquelle se situe le tablier est très fortement contrainte. En effet, la seconde travée enjambe deux gazoducs tandis que l'ensemble de l'ouvrage est coincé entre les tabliers du sens (-) de l'A31 et le tablier neuf construit en parallèle.

De par la présence du gazoduc sous la deuxième travée du VIPP, la méthode envisageable ne peut être qu'une méthode de démontage et non de démolition. Il s'agit donc de désolidariser les poutres et de les enlever par le dessus. L'utilisation d'une grue qui ne pourrait être basée qu'au-delà du nouveau tablier, oblige à une portée rédhitoire (figure 23).

Finalement, le choix du mode de démolition est



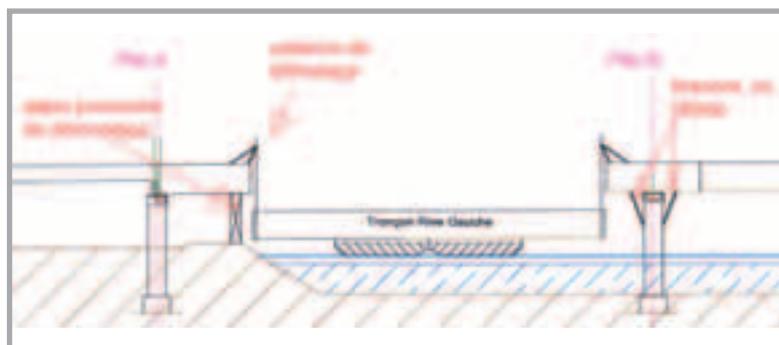
Photo 16
Exemple
de cintre lanceur
Example
of launching centre



Photo 17
1966 - Bâti métallique
pour lancement
et dévérinage de la dalle
orthotrope
1966 - Steel frame
for launching and jacking
down the orthotropic slab



Figure 24
Solution de démolition
par déhissage
Demolition
by tearing down



alors très restreint et se porte sur la déconstruction du tablier par cintre délançeur (photo 16). Ce genre d'engin utilisé pour la construction des VIPP, ressemble à un grand pont roulant couvrant deux travées qui permet d'acheminer de travée en travée les poutres sans sortir de l'emprise de l'ouvrage lui-même.

Dans le cas d'une construction directement sur les appuis définitifs, des grues mobiles peuvent alors s'approcher et une déconstruction plus classique et moins onéreuse par grutage des poutres peut être envisagée.

Enlèvement de la dalle orthotrope de l'ouvrage principal

Les solutions d'enlèvement ne sont pas simples non plus. La première solution consiste à "délançer" l'ouvrage.

La dalle orthotrope a été mise en place à l'époque (photo 17) par lancement depuis la rive droite à partir de l'A31 finie (le garde-grève était totalement

construit) puis dévérinage de 3,7 m sur ces appuis définitifs. Un processus en sens inverse est donc tout à fait envisageable en acceptant cependant la difficulté d'un délançage en hauteur qui oblige à équiper les appuis de bâtis métalliques (à l'image de ceux conçus à l'époque).

Pour éviter le vérinage de 3,70 m, et comme le garde-grève de la culée rive droite doit être refait, un délançement plus classique au niveau des appuis est aussi envisagé moyennant un décaissement de l'A31. Cette variante qui implique un soutènement le long de la chaussée opposée, restée en circulation, a été finalement abandonnée.

Une dernière idée de destruction consiste à utiliser les moyens fluviaux avec le découpage et le déhissage sur barges de tronçons (cf. figure 24).

Le ripage transversal et la construction d'appuis provisoires

Pour une construction en parallèle, il faut réaliser des appuis provisoires, puis riper transversalement les nouveaux tabliers complètement réalisés (ossature + dalle + équipements).

Le ripage transversal (figure 25) est une opération que les entreprises d'ouvrages d'art maîtrisent mais qui reste peu courante. Pour ne pas rendre plus complexe cette opération, il convient d'avoir les appuis provisoires proches des appuis définitifs pour réaliser un chemin de glissement et limiter le ripage. Le ripage peut se faire à plat moyennant un sabot de rattrapage du dévers sous poutre.

Pour les appuis provisoires, on distingue les appuis en rivière et les appuis terrestres. La conception des appuis en rivière doit répondre à certains critères : permettre une mise en œuvre par barges pour ne pas gêner la navigation et l'écoulement de la Moselle, et être facilement démontables. On s'est donc orienté vers des tubes métalliques servant de fondation et d'élévation, avec une plate-forme en tête. La configuration des sols ne permet pas le battage puisque la Moselle coule quasiment sur les marnes dures et il fallait des fondations plus coûteuses consistant en des fûts métalliques scellés jusqu'au TN dans un forage tubé de plus gros diamètre.

Les appuis provisoires (figure 26) doivent reprendre les efforts induits lors de deux étapes importantes de la construction : un éventuel lancement de l'ossature (la descente de charge est faible, environ 230 t par appui) et le ripage transversal lorsque l'ouvrage est fini (la descente de charge est alors forte, de l'ordre de 1100 t par appui). *In fine*, compte tenu de ces efforts, il faut envisager un portique de cinq fûts Ø 1000 liaisonnés en tête par des doubles HEB 700.

Les appuis provisoires du pont d'accès sont de conception similaire avec des fûts de diamètre 800. Soucieux de protéger des chocs de péniches les

appuis provisoires et surtout le nouveau tablier qu'ils soutiennent, une protection de type glissière portée par des pieux scellés dans les marnes (identiques aux fondations des appuis provisoires) a été conçue (cf. figure 27).

Modalités de mise en place des ossatures et "solutions"

Deux grandes techniques ont été envisagées :

Solution 1 : lançage

Cette première technique concerne le cas d'un ouvrage construit en parallèle à l'ouvrage existant. L'ossature de l'ouvrage principal est lancée sur ses appuis provisoires depuis une plate-forme d'assemblage située en rive droite, plate-forme cependant fortement limitée par la présence à 70 m de la rive d'une route départementale. L'ossature de l'ouvrage d'accès est lancée sur ces appuis provisoires depuis une plate-forme d'assemblage en rive gauche, lançage un peu gêné par la courbe intérieure de 750 m de l'autoroute avant l'ouvrage. Pour cette solution comme pour les suivantes, les dalles de mixte sont plutôt envisagées coulées en place surtout pour l'ouvrage d'accès car la dalle est mince et il faut assurer le bon appui sur cinq poutres.

Solution 2 : mise en place des ossatures par barges ou bigues

Cette technique a été envisagée aussi bien pour un ouvrage construit en parallèle à l'ouvrage existant que pour la mise en place directement sur appuis définitifs.

La Moselle est un obstacle mais aussi un moyen de transport capable d'acheminer de très gros colis et on peut imaginer le transport des ossatures par la voie d'eau.

Le principe général est :

- ◆ d'amener les ossatures par bateau. Les largeurs, 10,6 m pour l'ouvrage d'accès et 7,5 m pour l'ouvrage principal, ne posent pas de problème pour les écluses. Pour les longueurs, l'ossature du pont d'accès sera amenée et mise en place en entier, celle du pont principal sera amenée et mise en place en trois colis (un tronçon central de 67 m et deux tronçons de rive de 48 m);
- ◆ de transférer les tronçons d'ossature sur des barges disposées le long d'un ponton en rive gauche (zone non naviguée);
- ◆ de hisser l'ossature de 6 m (50 cm au-dessus du niveau des appuis provisoires) par des portiques en tours montés sur ces barges;
- ◆ de conduire les barges aux pieds des appuis provisoires et de déposer les ossatures sur les appuis provisoires ou sur appuis définitifs.

Sur place, la mise en place se ferait selon la cinématique suivante : mise en place ossature d'accès, lancement, mise en place de la travée centrale

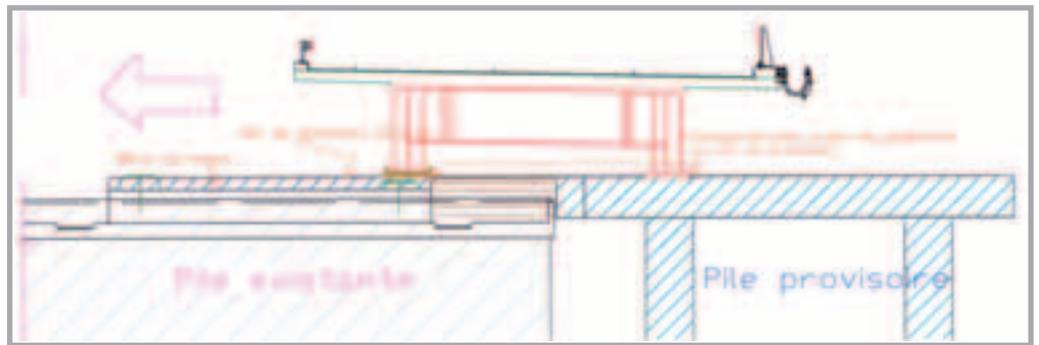


Figure 25
Principe du ripage transversal
Schematic of transverse sliding

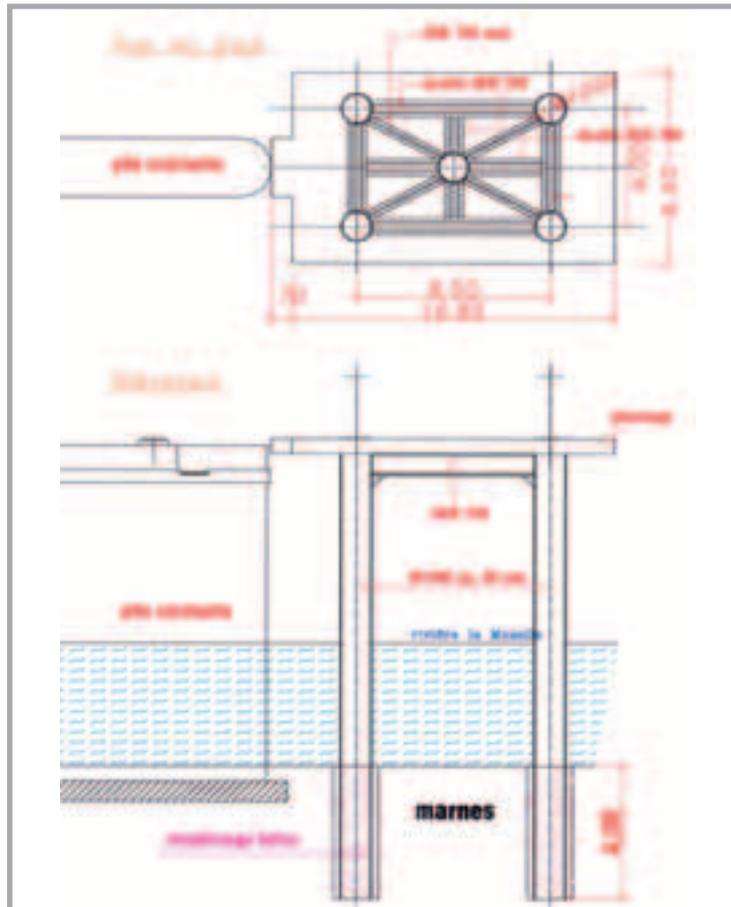


Figure 26
Conception des piles provisoires en rivière
Design of temporary piers in river

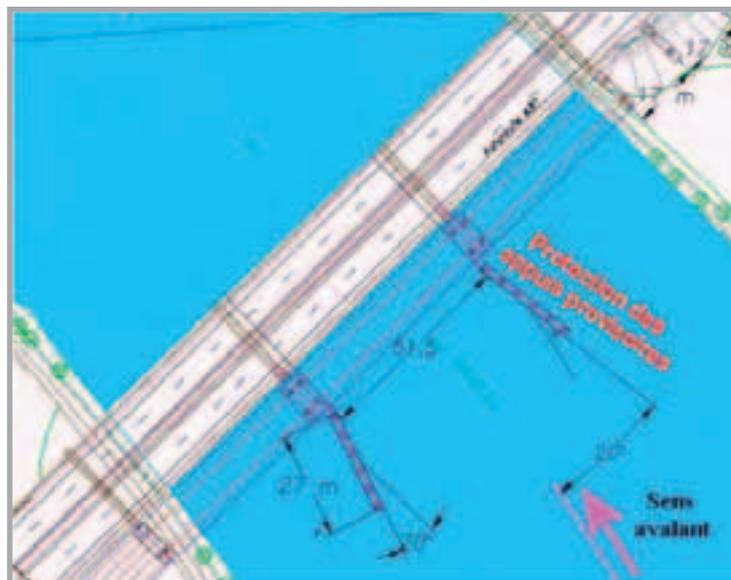


Figure 27
Les appuis provisoires sont protégés des chocs des bateaux
The temporary supports are protected against boat impacts

Photo 18
Exemple
de bigue fluviale
*Example of heavy river
derrick taken from BT8*



► de l'ossature principale, mise en place de la travée droite, puis gauche.
Bien sûr plutôt que des barges, des bigues fluviales – grues flottantes spécialement conçues pour ce genre de travaux – pourront être préférées (photo 18 tirée du BT 8).

Solution retenue par la Direction des Routes

Le comparatif des solutions a porté sur de nombreux critères comme la durée de coupure d'A31, la durée des travaux et l'occupation du lit majeur de la Moselle, la gêne à la navigation, le nombre de jours d'arrêt de gazoduc, et bien sûr le coût financier.

Le choix majeur a rapidement porté sur le compromis entre le coût de l'ouvrage et le délai d'interruption de la circulation sur l'autoroute. On pouvait soit envisager une construction en parallèle de l'ouvrage existant, puis ripage transversal, solution qui optimisait le délai d'interruption du trafic de presque 2 mois, soit envisager une reconstruction directement sur les appuis existants qui optimisait le coût (gain de 1,9 M€). Un fois reconstruit, l'ouvrage étant dans les deux cas parfaitement et définitivement identique, le choix de la Direction des Routes s'est finalement porté sur cette dernière option. Les travaux de dalles et d'équipements du tablier se faisant pendant la coupure de l'A31, il faut donc s'attacher à réduire les durées notamment de la réalisation de la dalle de l'ouvrage principal en envisageant, soit une réalisation par plots préfabriqués, soit pour arriver au même gain de temps, un travail avec deux équipages mobiles et la mise en place directe par bigues de l'ossature munie de ses paniers de ferrailage. Moyennant cette mise en place performante des ossatures par bigue et une optimisation forte du planning, le délai de coupure peut être de 5 mois.

Les grands principes de construction de la solution de base du DCE peuvent être, en résumé, listés ainsi :

- ◆ une période de préparation de 4,5 mois (avec

d'abord l'étude de la charpente pour une commande au bout de 2 mois) – une période d'exécution de 10 mois avec un délai distinct de 5 mois de coupure de l'A31 ;

- ◆ les arrêts navigation clairement donnés et inchangeables. Idem pour les arrêts gazoducs avec impossibilité de changement de la planification très en amont (coût journalier répercuté de 45 k€) ;

- ◆ un enlèvement du VIPP par grues (puisqu'elles peuvent dans le cas retenu s'approcher des poutres) avec tout de même la difficulté du gazoduc – un enlèvement de la dalle orthotrope par vérinage et dé-lancement ;

- ◆ une amenée par péniche des ossatures toutes faites (en trois tronçons pour l'ouvrage principal) ;

- ◆ une mise en place de l'ensemble par bigues ou barges (cf. solution 2) avec les paniers de ferrailage passif de dalle ;

- ◆ un bétonnage avec deux équipages pour l'ouvrage principal.

■ LES TRAVAUX DE RECONSTRUCTION

L'offre retenue est une variante proposée par le groupement d'entreprises GTM - Eiffel - Cardem. La variante du groupement portait sur l'utilisation de la bigue fluviale pour y compris l'enlèvement de la dalle orthotrope existante (une fois ce matériel spécifique acheminé, il est vrai qu'il était bien rentable de l'utiliser aussi pour le démontage) et sur l'enlèvement du VIPP d'accès non pas poutre par poutre mais par groupe de deux ou trois poutres moyennant l'utilisation des grues mobiles les plus puissantes du marché. Cette dernière proposition dûment décrite permettait de réduire les tâches à exécuter à proximité des gazoducs (gain de délais et sécurité au moins supérieure).

La période de préparation, 4 mois et demi, était longue mais justifiée par l'organisation des nombreuses tâches à enchaîner pendant les 5 mois de coupure de l'A31 et notamment les contraintes liées aux dates intangibles des arrêts pour les gazoducs et la navigation. Il fallait donc que tout soit parfaitement défini et validé avant de commencer les travaux. Très tôt dans cette période de préparation, les engins spéciaux (grues mobiles et bigue) ont été réservés et le planning général a été affiné. Au bout de 2 mois la charpente était validée sans aucune modification par rapport à la répartition matière du DCE et les tôles pouvaient être commandées. Au terme des 4,5 mois, tous les documents d'exécution étaient visés.

Sur les 10 mois de travaux, voici un reportage photos des principales tâches d'exécution :

Les travaux hors coupure d'A31 (photos 19 à 23).

LES TRAVAUX HORS COUPURE D'A31 (photos 19 à 23)

Photo 19
Réalisation complète
par Eiffel
des charpentes
à Lauterbourg
(pour chargement
ensuite sur le Rhin)

*Complete
construction by Eiffel
of structures
in Lauterbourg
(for subsequent
loading on the Rhine)*



Photo 20
Dragage de la Moselle sous la travée 3 pour assurer le tirant d'eau
nécessaire de 2,5 m

*Dredging the Moselle under span 3 to provide the necessary draught
of 2,5 m*



Photo 21
Réalisation des pistes d'accès et zones d'installation
Execution of approach tracks and installation areas



Photo 22
Accès à tous les appuis
et palée provisoire
nécessaire à la découpe
de l'about de la dalle
orthotrope pour libérer
le plus tôt possible
la pile-culée A

*Access to all the supports
and the temporary bent
necessary to cut out
the end plate
of the orthotropic slab
to free abutment pier A
as soon as possible*



Photo 23
Réalisation des nouveaux dés d'appui pour les piles B
et C (entraxe du nouveau pont plus faible)

*Execution of the new support pedestals for piers B
and C (smaller centre-to-centre distance
of new bridge)*

LES TRAVAUX PENDANT LA COUPURE DE L'A31 LE 24 AVRIL 2005 POUR 5 MOIS

La démolition des VIPP (photos 24 à 29)



Photo 24
Rabotage
et allégement
des tabliers
principal
et d'accès

*Planing
and lightening
the main
and approach
decks*



Photo 25
Sciage longitudinal
du VIPP pour faire
un groupe de deux
et trois poutres

*Lengthwise sawing
of the viaduct to form
a group of two
and three girders*



Photos 26 et 27
Grutage à l'aide de deux grues de 800 t
Cranage using two 800-tonne cranes



Photo 28
Vue des deux grues en action. Le contre poids est de 160 t. La masse du groupe de trois poutres est de 210 t. La place de la dépose a été bien prévue. La pose sur cale permet de libérer les palonniers
View of the two cranes in action. The counterweight is 160 tonnes. The weight of the group of three girders is 210 tonnes. The space for placing down has been carefully provided for. Placing down on a block frees the lifting beams

Photo 29
Les mâchoires avides des croq'béton se jettent sur le VIPP au sol et le réduisent rapidement en miettes. Les matériaux seront triés et revalorisés

The greedy jaws of the concrete eaters throw the viaduct to the ground and quickly pull it to pieces. The materials will be sorted and recycled



La démolition du pont principal (photos 30 à 32)



Photo 30
La bigue arrivée repliée de Hollande a été déployée avec ses caissons latéraux. La dalle orthotrope est découpée en trois tronçons. Ici levage du tronçon rive droite de 52,5 m (poids de 192 t). Chaque enlèvement prend moins de 6 heures

The heavy derrick which arrived folded up from Holland has been deployed with its side caissons. The orthotropic slab is cut up into three sections. Here, lifting the right-bank section by 52,5 m (weight of 192 tonnes). Each removal operation takes less than 6 hours



Photos 31 et 32
La bigue vient déposer le tronçon sur une estacade spécialement réalisée. Elle est actionnée par ses moteurs. Le mouvement est sécurisé par quatre élingues à treuil. Chacun des trois tronçons est donc enlevé, puis découpé en petits éléments mis en dépôt provisoire sur place



The derrick places the section down on a specially built jetty. It is powered by its engines. The movement is secured by four winch slings. Each of the three sections is therefore removed, then cut up into small parts and temporarily deposited on the site

L'aménée et la pose du tablier neuf du pont d'accès (photos 33 à 35 et figures 28 et 29)



Photo 33
L'infatigable bigue hisse l'ossature du pont d'accès (90 m de long, 295 t). Elle est à son maximum de charge et le ferrailage passif sera mis ensuite, ainsi que l'arrière et l'avant-bec

The indefatigable derrick hoists the approach bridge structure (90 m long, 295 tonnes). It is at its maximum load, and the passive reinforcements will then be placed together with the launching tail and nose

Photo 34
La bigue vient déposer l'ossature sur les patins de glissement

The heavy derrick places the structure down on the sliding pads



Photo 35
Une fois l'arrière-bec et l'avant-bec assemblés le lancement de l'ossature du pont d'accès vers ses appuis peut commencer

Once the launching tail and nose have been assembled, launching of the approach bridge structure toward its supports can begin

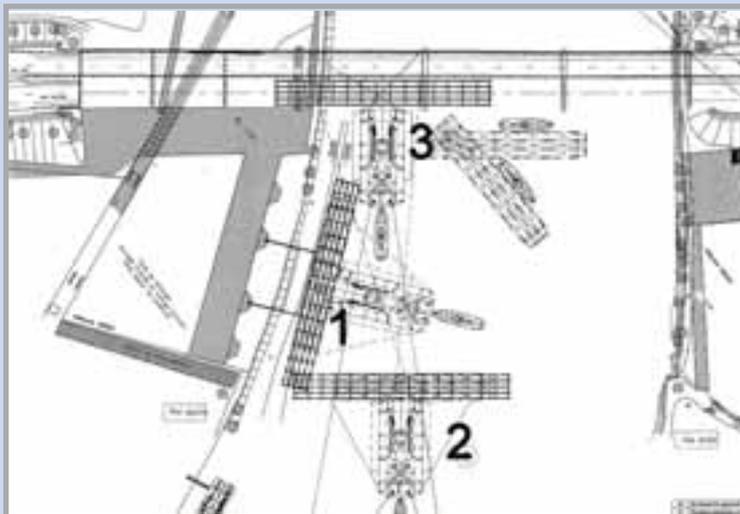


Figure 28
Cinématique de pose de l'ossature du pont d'accès
(phases $\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$)

*Kinematics of laying the approach bridge structure
(phases $\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$)*

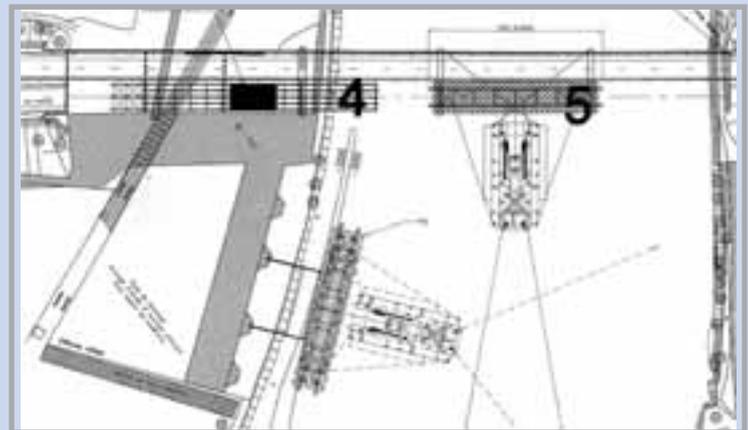


Figure 29
Poursuite de la cinématique : $\phi 4$ l'ossature d'accès munie d'un avant et arrière-bec a été lancée jusqu'à la pile P1 ce qui libère les travées principales 2 et 3 en rivière. Les deux plots de dalle au-dessus du gazoduc sont coulés. L'arrière-bec est enlevé.

$\phi 5$, pose de la travée 2 centrale de l'ossature du pont principal. Viendra ensuite la pose de la travée 3, puis le lancement total du pont d'accès, puis la pose de la travée 1 de l'ossature du pont principal

Kinematics (continued) : $\phi 4$ The approach structure fitted with launching tail and nose has been launched up to pier P1, thereby freeing main spans 2 and 3 in the river. The two slab blocks above the gas pipeline are poured. The launching tail is removed.

$\phi 5$, laying centre span 2 of the main bridge structure. Span 3 will then be laid, then complete approach bridge launching will be performed, and then span 1 of the main bridge structure will be laid

L'amenée et la pose du tablier neuf du pont principal (photos 36 à 39)



Photo 36
Accostage des péniches apportant les tronçons de l'ossature principale

Berthing of barges bringing in the main structure sections

Photos 37, 38 et 39
La bigue soulève le tronçon qui a été muni des paniers de ferrailage (le poids de chacun est inférieur à 300 t, ferrailage compris). Mise en place de chacun des trois tronçons. Suivent immédiatement le rabotage des trois tronçons, puis plus classiquement le bétonnage de la dalle par équipages mobiles et la réalisation de toutes les superstructures

The heavy derrick raises the section that has been fitted with the reinforcing baskets (each weighing more than 300 tonnes, reinforcement included). Placing each of the three sections. This is immediately followed by end-to-end joining of the three sections, then more conventionally by slab concreting by mobile rigs and execution of all the superstructures





Photo 40
Mission accomplie, l'ouvrage est fini dans le délai de 5 mois de coupure. Réouverture à la circulation le 26 septembre 2005

Mission accomplished, the project is finished within the period of 5 months' closure. Reopening for traffic on 26 September 2005

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Coût : 5,715 M€ TTC pour les ouvrages
- Aciers de charpentes : 730 t
- Béton pour hourdis : 860 m³ (585 m³ OA principal et 275 m³ OA accès)
- Aciers passifs pour hourdis : 176 t pour l'OA principal (soit 300 kg/m³) et 66 t pour l'OA d'accès (soit 240 kg/m³)

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitrise d'ouvrage

Etat - Ministère de l'Équipement

Maitrise d'œuvre

DDE de Moselle - Service Grands Travaux

Travaux

- Génie civil : GTM (mandataire)
- Charpente métallique : Eiffel
- Démolition : Cardem

EPOA + APROA + DCE

DDE de la Moselle (SGT/CDOA) et CETE de l'Est/DOA avec conseil intégré IGOA et Setra

Etudes d'exécution

- Génie civil : Favier-Verne et associés
- Métal : Arcadis + Eiffel

Contrôle extérieur

CETE de l'Est/DOA (études) et LRPC de Nancy (matériaux)

ABSTRACT

The Richemont Viaduct – 39 years in the life of an orthotropic slab

Various authors

The Richemont viaduct crossing the Moselle on the A31 motorway is, in the South-North direction, an orthotropic slab type structure. This slab soon showed pathological cracking at the level of the trough-floorbeam weld joints, too sensitive to the phenomenon of fatigue. Many repair solutions were to be studied and then implemented, but the fatigue cracks became generalized and developed increasingly rapidly in this under-sized slab. Faced with this insoluble technical problem, a preliminary design and then a replacement project were undertaken. The approaches for solutions are outlined in this article. Given the numerous constraints involved, and to minimise the length of time for which the A31 is cut off, the project and reconstruction work are characterised by the efficient use of special machinery : heavy river derrick and very-high-capacity cranes.

RESUMEN ESPAÑOL

El viaducto de Richemont – 39 años de una vida de placa ortótropa

Autores diversos

Ubicado en la autopista A31, el viaducto de Richemont que salva el río Moselle corresponde, para el sentido sur-norte, a una estructura de tipo losa ortótropa. Esta placa presentó rápidamente una fisuración patológica en la parte de las soldaduras de aislamiento-pieza de puente, demasiadas sensibles al fenómeno de fatiga. Numerosas soluciones de reparación fueron estudiadas y aplicadas a continuación pero la formación de fisuras de fatiga se generaliza y se aceleran en esta placa subdimensionada. Ante parecido estancamiento técnico, se han emprendido un estudio preliminar y, acto seguido, un proyecto de sustitución. En el presente artículo se exponen las vías para una solución. Cuenta habida de los numerosos imperativos, el proyecto y los trabajos de reconstrucción se caracterizan, para reducir al mínimo la duración de corte del tráfico de la autopista A31, mediante la utilización sumamente

eficaz de equipos especiales : pórtico fluvial y grúas de muy elevadas capacidades.

Mise en sécurité du

Assurant le franchissement de la Garonne par la route départementale 63, le pont de Gagnac, en Dordogne (France) vient d'être renforcé par collage de tissu de fibres de carbone (TFC). Construit en 1963, l'ouvrage, un VIPP (viaduc à poutres précontraintes à travées indépendantes), comporte cinq travées et mesure 181,50 m de long et 8 m de large. Pour effectuer les travaux sans interrompre la circulation, Freyssinet a dû mettre en place un échafaudage mobile de grande importance qui permettait l'accès aux sous-faces du pont. En parallèle, tous les appareils d'appui et joints de chaussée ont été remplacés.



Photo 1
Vue d'ensemble
CDOA
General view,
CDOA

■ PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage concerné, patrimoine du Conseil général de Haute-Garonne, se situe sur la commune de Gagnac et permet à la RD 63 de franchir la Garonne. Construit en 1963, il s'agit d'un VIPP (viaduc à poutres précontraintes à travées indépendantes) de 181,50 m constitué de cinq travées (de 38 mètres en moyenne) comportant trois poutres chacune.

Le tablier de 8 m de large (6 m de chaussée et deux trottoirs d'un mètre) repose sur trois poutres de 1,9 m de hauteur, espacées transversalement de 2,9 m. Le hourdis, d'une épaisseur de 0,16 m à 0,20 m, est précontraint transversalement. Chaque travée comporte quatre entretoises (une entretoise sur chaque appui et deux entretoises intermédiaires).

La précontrainte longitudinale est basée sur dix câbles de type CO2 par poutre (photo 1).

■ HISTORIQUE DES INTERVENTIONS

Cet ouvrage, au-delà de la surveillance régulière, a fait l'objet de nombreuses investigations depuis une quinzaine d'années.

Soumis à une inspection détaillée tous les 3 ans, quelques désordres (en particulier fissurations des âmes) avaient attiré l'attention dès la première inspection de 1989.

Par la suite et compte tenu des problèmes d'injection de la précontrainte rencontrés sur ce type d'ouvrage, une campagne de contrôle des injections de gaine par gammagraphie a été menée en 1990. Celle-ci a mis en évidence de nombreux défauts d'injection des gaines protégeant les câbles de précontrainte (statistiquement 77 % des gaines seraient concernées).

La réalisation de fenêtres en 1993 a permis de confirmer la présence de vides et d'eau dans les gaines et même un début de corrosion de câble. Des essais de chargement ont alors été réalisés pour vérifier que l'ouvrage était toujours conforme à son utilisation (adéquation avec le trafic supporté).

Les recalculs de l'ouvrage réalisés en 1994, à l'aide du programme VIPP du Setra, ont fait apparaître un déficit de capacité portante de l'ouvrage de l'ordre de 25 % des surcharges réglementaires en vigueur, à la fois en flexion et vis-à-vis de la résistance au cisaillement (par comparaison aux règles BPEL).

Ces résultats sont aggravés par l'insuffisance d'armatures passives (liée aux instructions de l'époque définissant les règles de calculs justificatives des

pont de Gagnac

structures précontraintes) et donnés sous réserve de la tension résiduelle dans la précontrainte en place.

En 1998 cette inconnue a été levée par des essais à l'arbalète, à partir de fenêtres à mi-portée et près de l'about. Les résultats, reportés dans le tableau I, plutôt favorables en travée, aggravent les conclusions aux abouts de poutres en ce qui concerne la résistance au cisaillement, puisque les mesures ont montré une perte de tension supplémentaire de 10 % environ dans les zones de relevage des câbles (figure 1).

Ce dernier point a conduit à considérer que les risques ne pouvaient plus être négligés vis-à-vis de la sécurité des usagers.

■ RISQUE PRÉSENTÉ PAR L'OUVRAGE

Il y a lieu de mentionner que le pont de Gagnac est de la même génération que le pont de Foix et construit avec les mêmes types de précontrainte et d'insuffisance en armatures passives. Les ruptures de fils enregistrées par l'instrumentation mise en place sur cet ouvrage ont entraîné la décision de fermeture de l'ouvrage puis sa démolition.

Si les dernières mesures réalisées sur les câbles de précontrainte ont rassuré sur la résistance en flexion, les risques d'une rupture par cisaillement près des appuis ont été aggravés. Sur des poutres précontraintes (utilisées pour des tabliers type VIPP), on peut effectivement distinguer deux types de rupture :

- ◆ une rupture par flexion en travée : ce type de rupture a un comportement "ductile";
- ◆ la rupture par cisaillement près d'un appui, qui a un comportement "fragile".

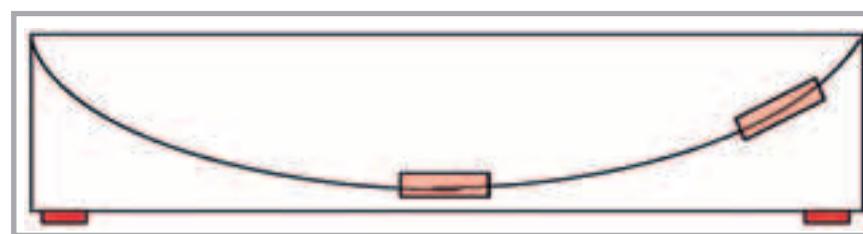
Le risque de rupture "fragile" qui affecte les poutres du pont de Gagnac est d'autant plus à prendre en considération qu'il est imprévisible et irréversible. N'étant pas précédé de déformations visibles permettant d'alerter le gestionnaire, au contraire de la rupture ductile, il ne peut être géré par des mesures d'exploitation (limitation, fermeture).

■ OPTIONS SUR LE DEVENIR DE L'OUVRAGE

En 1998, un comité technique chargé d'éclairer et faire des propositions au maître d'ouvrage a été mis en place. Il regroupait un représentant du maître

d'ouvrage (Conseil général), son maître d'œuvre (CDOA), des spécialistes du réseau technique (LRPC et DOA du CETE de Bordeaux) et un bureau d'études privé (Arcadis ESG).

La gravité des défauts constatés lors des investigations (précontrainte insuffisante, défaut d'injection généralisé), le sous-dimensionnement de la structure vis-à-vis de la résistance au cisaillement mis en évidence par les calculs et les inconnues sur l'état actuel de la précontrainte et son évolution dans le temps, n'ont pas permis d'envisager de rendre à la structure une résistance fiable et durable compatible avec les règlements actuels.



	A mi-portée	Près de l'about
Tension mesurée	F = 65 t	F = 50 t
Tension théorique selon calculs	F = 60 t	F = 57 t
Variations	8%	-12%

Le comité technique fut alors confronté à plusieurs options concernant le devenir de l'ouvrage :

- ◆ la mise sous surveillance ;
- ◆ la "mise en sécurité" de l'ouvrage ;
- ◆ la démolition-reconstruction du tablier.

La première solution, mise en œuvre sur le VIPP de Foix, consistant en un système d'écoute des ruptures de fils, posait de nombreux problèmes :

- ◆ pas de garantie de fiabilité du dispositif ;
- ◆ un coût du système de surveillance, fonctionnant en permanence, très important (pouvant s'avérer dans le temps plus onéreux qu'une reconstruction), d'autant que l'ouvrage possède quinze poutres soit trente abouts à surveiller (contre cinq poutres soit dix abouts pour le pont de Foix) ;
- ◆ une nécessaire limitation des charges sur l'ouvrage pour respecter la sécurité des usagers ;
- ◆ une règle de conduite à se fixer pour fermer définitivement le pont au-delà d'un nombre de ruptures détectées, alors même que l'état initial des câbles reste inconnu.

La troisième solution nécessitant la fermeture de l'itinéraire pendant de nombreux mois n'était pas envisageable car l'ouvrage demeure un franchissement stratégique de la Garonne.

Richard Fournier

CHEF DE LA CDOA
DDE Haute-Garonne



Michel Boy

RESPONSABLE
DU DÉPARTEMENT OA
Arcadis ESG Sud-Ouest



Christian Schmitt

CHEF DE SECTEUR
Freyssinet Sud-Ouest



Philippe Gaillard

CONDUCTEUR
DE TRAVAUX
Freyssinet Sud-Ouest



Figure 1
et tableau I
Résultats
des essais
à l'arbalète

Results
of crossbow
tensile/
compression
tests

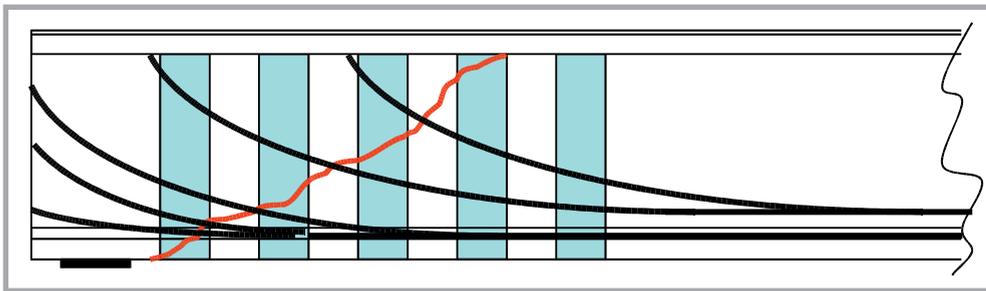


Figure 2
Principe de couture de la fissure potentielle
Potential crack stitching principle

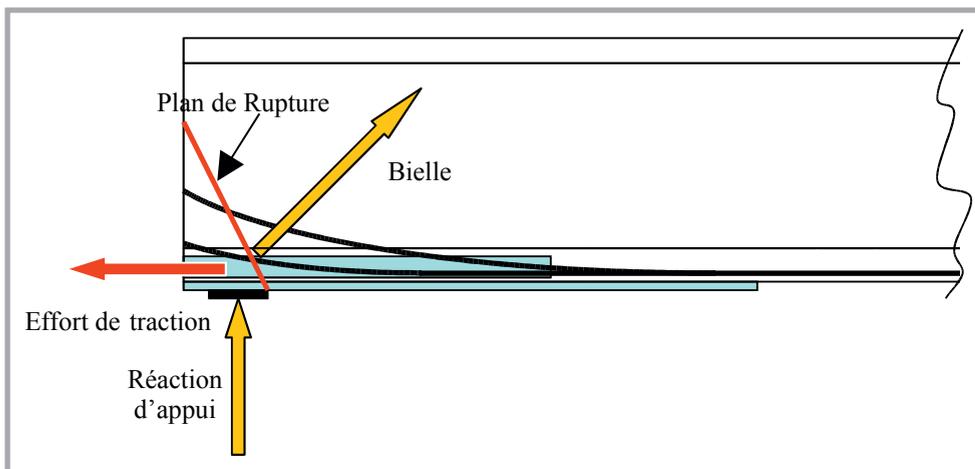


Figure 3
Reprise de la bielle d'appui
Repair of the supporting rod



A noter qu'à moyen terme, la construction programmée d'ouvrages, en amont et aval, rendra cette option envisageable.

La solution qui s'est alors imposée a donc été la "mise en sécurité" de l'ouvrage. L'objectif étant de prolonger l'utilisation de l'ouvrage, par une solution technique à définir, et permettre son exploitation en conservant un niveau de sécurité compatible avec les charges qu'il supporte.

■ NIVEAU DE PROTECTION RECHERCHÉ

Il fallait pour ce faire sécuriser le tablier face à une éventuelle rupture par cisaillement.

L'analyse montrait que le risque de désordre ferait suite à la rupture d'un certain nombre de fils sur un même toron, or les fils torsadés entre eux ont tendance à se réancrer sur le toron qu'ils constituent en provoquant des surtensions pouvant conduire à sa rupture.

Le phénomène est le même avec les torons d'un câble. On peut donc imaginer un enchaînement de ruptures pouvant conduire à la rupture d'un câble. Un tel événement, susceptible d'entraîner la rupture de la structure, n'était pas à exclure après mise en évidence de la fragilité de la structure par les expertises.

Les travaux à engager devaient pouvoir garantir

qu'en cas de désordre majeur sur une poutre, la sécurité des usagers restait préservée.

Parallèlement, il était souhaitable qu'un tel affaiblissement de la résistance structurelle produise des effets visibles qui préviennent le maître d'ouvrage, ainsi à même de prendre les décisions nécessaires.

La rupture serait ainsi précédée d'un état d'alerte permettant de couper la circulation pour assurer la sécurité des usagers.

■ SOLUTION TECHNIQUE DE MISE EN SÉCURITÉ

Le Conseil général de la Haute-Garonne, après avis du comité technique et étude des différentes solutions envisagées, a opté pour une solution technique consistant au renforcement par mise en place de matériaux composites.

Hypothèses de dimensionnement adoptées

- Prise en compte des charges permanentes actuelles sans majoration.
- Surcharges routières correspondant aux camions Bc (justifié par l'intensité du trafic PL sur l'ouvrage).
- Précontrainte résiduelle sur la base des mesures effectuées.

Le renforcement a été dimensionné afin de compenser le manque de résistance de la structure dans l'hypothèse de la rupture d'un câble (pour ce dernier point il a été fait un calcul enveloppe dans les sections (environ tous les 2 m) en considérant chaque fois la rupture du câble le plus défavorable suivant l'effet recherché).

Les "Recommandations provisoires AFGC" publiées en décembre 2003 ont été adoptées pour valider les calculs. Elles ont d'ailleurs été rendues contractuelles au niveau du DCE.

Reprise de l'effort tranchant (renforcement des âmes)

Le principe est de coudre verticalement le long de la fissure potentielle (figure 2).

A titre indicatif la valeur d'effort tranchant à reprendre par les bandes de matériaux composites verticales correspondait, avec les hypothèses adoptées, à 50 - 60 % de l'effort tranchant total selon que l'on considère les poutres de rive ou les poutres centrales, plus sollicitées.

Longueur d'application : au-delà du quart de la travée les contraintes tangentes dans les âmes en cas de rupture d'un câble deviennent "acceptables" (~ 2,0 à 2,5 MPa à l'ELS). Cela correspond à une longueur d'environ 9,00 m à partir de l'axe d'appui.

Reprise de la bielle d'appui (figure 3)

La décomposition de la réaction d'appui, par des bielles inclinées dans l'âme des poutres amène une composante horizontale au droit de l'appui lui-même qui se traduit par un effort de traction au niveau du talon de la poutre.

En cas de déficience de l'un des deux câbles inférieurs ancrés à l'about des poutres et qui équilibrent actuellement cet effort, le talon de la poutre peut être soumis à des tractions importantes susceptibles de provoquer des amorces de rupture. Les bandes horizontales disposées doivent être ancrées au droit de l'appareil d'appui. Il est souhaitable que ces bandes règnent sur toute la longueur où l'influence de la rupture d'un câble peut avoir des effets dans le talon.

Ces bandes horizontales jouent un rôle important dans la résistance à la rupture : les exemples montrent que les fissures par cisaillement s'amorcent dans le talon et qu'elles ne se produisent pas forcément tout près de l'appui (le cas évoqué dans la revue *Ouvrage d'art* de novembre 1992 décrit une fracture située à 2,50 m de l'appui).

Dans le cas du pont de Gagnac, les bandes ont été disposées sur une longueur voisine de 8,00 m avec une dégressivité de l'effort à reprendre.

Sur appui, l'effort de traction est voisin de 70 % de la réaction et la part à reprendre par les bandes de matériau composite voisin de 50 % de cet effort, en cas de rupture de l'un des deux câbles (soit de l'ordre de grandeur de l'effort résiduel dans un câble d'environ 55 t).

■ LE CHANTIER

A l'issue de la consultation lancée par le Conseil général, c'est Freyssinet avec son procédé de renforcement par TFC® (Tissu de fibres de carbone) qui a été retenue.

Données générales

Le chantier comportait d'autres prestations délicates, mais non spécifiques à ce type de renforcement.

Ainsi, les renforcements d'about de poutre, devant être exécutés au-delà des appuis, ont nécessité le vérinage et la dépose des appareils d'appui. Leur remplacement a été un effet induit des travaux.

Enfin, le chantier nécessitait la mise en œuvre d'échafaudages de grande hauteur permettant un accès maximal aux faces des poutres à renforcer. Le choix, par l'entreprise, d'un échafaudage mobile a permis un gain de temps important.

On notera comme contrainte du chantier, liée à la faible largeur de tablier et la réservation d'emprises pour le chantier et les échafaudages, la mise sous



Photo 2
Echafaudages
Scaffolding

alternat de la circulation pendant toute la durée des travaux (et même quelques fermetures totales de nuit lors des phases de vérinage). Ce point a d'ailleurs été complété par une interdiction de la circulation poids lourds (hors secours et transports en commun) garantissant une limitation des vibrations de l'ouvrage afin de ne pas nuire à l'adhérence du matériau composite lors de la polymérisation des résines.

Conception de l'échafaudage et gestion de la circulation

Réalisés en intrados de l'ouvrage, sur les faces et les sous-faces de poutres ainsi que dans les zones d'appui, les travaux de renforcement du tablier sont exécutés sous circulation alternée. Une configuration qui a conduit les équipes de Freyssinet à travailler au-dessus de l'eau en plusieurs postes tout en privilégiant la sécurité.

L'élaboration du planning des travaux a rapidement mis en exergue l'importance qu'allait jouer l'échafaudage, qui serait l'un des facteurs clés du bon déroulement du chantier. Freyssinet s'est donc rapproché des échafaudeurs pour mettre au point un système de portique roulant et suspendu, dont le platelage inférieur est démontable pour pouvoir traverser les zones de piles. Les parties latérales sont, quant à elles, fixes et permettent de stocker le matériel pendant les phases de déplacement.

Les portiques offrent un gabarit de 6 m respectant ainsi les 4,5 m réglementaires. Le dispositif est complété par des portiques de sécurité (servant de fusibles routiers) qui dégagent un gabarit de 4,5 m. Sur le tablier, deux rangées de glissières en béton armé (GBA) sont installées pour créer une file de circulation alternée de 3 m de large. Pour réguler le flux de véhicules, des feux tricolores de type urbain avec une gestion modulable assistée de radars ont été installés (photo 2).



Photo 3
Essai d'arrachement
Pull-out test



Photos 4 et 5
Préparation (reprofilage et meulage)
Preparation (reprofiling and grinding)

Renforcement du tablier : les tests préalables

Avant mise en œuvre du tissu de fibres de carbone, des essais d'arrachement ont été réalisés conformément à la norme NF P 18-852. Il s'agit des essais sur le béton des poutres pour s'assurer de la bonne tenue de la peau du béton, qui assurera la transmission des efforts au matériau composite, ainsi que des essais d'arrachement de pastilles d'une planche test pour s'assurer de l'adhérence du complexe sur le béton. Un test a d'ailleurs été reproduit à chaque changement de lot de résine, en tant qu'essai de convenance. Dans tous les cas, la barre des 2 MPa souhaitée a été dépassée (photo 3).

La préparation du support

La bonne qualité générale du béton a permis globalement de ne pas recourir à des prestations de ragréage prévues au marché. Cependant, pour garantir une adhérence optimale du complexe au béton des poutres, un sablage léger des zones à traiter a été réalisé. Dans le même but, il a été procédé au reprofilage des angles rentrants, en résine additionnée de

sable, et au meulage des arêtes des talons de poutre (photos 4 et 5).

Les conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre du tissu nécessite une vérification préalable de la température ambiante et du support (pour la résine employée elles devaient être supérieures à 5 °C, sans dépasser 35 °C) mais aussi une comparaison entre la température du support et le point de rosée de l'air ambiant (support > rosée + 3°) comme avant une mise en peinture. De fait, l'humidité liée au surplomb de la Garonne a parfois nécessité de décaler l'activité de pose du tissu en matinée.

La pose du complexe tissu-résine

Toutes les bandes de TFC sont préparées sur le chantier. La pose du complexe peut alors se réaliser, suivant un plan d'implantation précis, très semblable à un plan de ferrailage où les aciers seraient remplacés par des bandes de tissu numérotées en fonction de leur longueur et largeur (les largeurs étant imposées par des standards de fabrication). La découpe à bonne longueur des bandes et leur numérotation est effectuée au préalable.

Après application d'une couche de résine époxy, la bande de tissu est positionnée puis marouflée. Une deuxième couche de résine de fermeture est alors appliquée, puis "serrée" pour évacuer l'éventuel excès de résine (photos 6 et 7).

Suivant les zones à renforcer, plusieurs bandes se superposent, se chevauchent, se croisent. Dans le cas de superposition de couches de TFC, le cycle de pose se répète autant de fois que cela est nécessaire.

La souplesse du matériau employé permet les maillages de bandes et l'adaptation aux déformations de profil des poutres.

Remplacement des appareils d'appui

Pour remplacer les appareils d'appui, au nombre de 30 (six par pile et trois par culée), les opérations de levage du tablier sont exécutées de nuit et requièrent la fermeture du pont aux automobilistes. Tandis que des fenêtres de 10 heures (entre 20 heures et 6 heures) sont autorisées pour réaliser ces travaux, seules 4 à 5 heures de fermeture effective du pont sont nécessaires.

Pour assurer le levage, chaque pile de l'ouvrage est équipée de 12 vérins de 90 t de capacité à 650 bars et munis d'écrous de sécurité, six comparateurs de déplacement (d'une précision de l'ordre du 100^e de millimètre) et trois pompes hydrauliques. Compte tenu de la descente de charges d'environ 35 t par appui et de la capacité des vé-



Photos 6 et 7
Pose du TFC® (Tissu de fibres de carbone) en cours et poutre terminée
Laying of TFC® (carbon fibre fabric) in progress and completed girder

rins, les opérations de levage sont effectuées à faible pression (près de 200 bars).

Le tablier est levé de 50 mm. Après le calage des écrous de sécurité des vérins, les équipes de Freyssinet déposent les appareils d'appui défectueux puis les bossages et réalisent un sablage en sous-face des poutres. Elles appliquent ensuite, sous les talons des poutres, un renforcement par collage de TFC avant de reconstituer les bossages d'appui et de mettre en place les nouveaux appareils d'appui en néoprène. L'ouvrage est alors descendu à sa cote finale, reposant sur les vérins, et les matages sur appuis sont réalisés (bossages supérieurs). Enfin, le tablier est reposé sur ses appuis définitifs. Les opérations de levage et les déplacements des portiques d'échafaudages étant liés, les équipes Freyssinet optimisaient leur intervention. Ainsi, les appareils d'appui de chaque culée ont été remplacés en même temps que ceux des piles voisines (photos 8 et 9).

Délai de réalisation

Initialement programmé pour une durée de 6 mois, le chantier a été mené à bien en 4 mois. Ce délai raccourci de 2 mois est dû notamment, au choix d'un échafaudage mobile qui a permis un accès facile à l'ensemble des zones de travail et évité de longues phases de montage et démontage au droit des quatre piles, à l'efficacité de l'entreprise et au caractère répétitif des interventions qui furent ainsi optimisées.

CONCLUSION

Les travaux ont redonné à l'ouvrage un niveau de sécurité compatible avec son usage, tout en maintenant une circulation piétonne et VL alternée.



Photos 8 et 9
Vérinage et vue des appuis remplacés
Jacking and view of replaced supports



Le coût total des travaux s'élève à 530 000 € TTC, soit environ 35 000 € TTC par poutre.

L'intérêt du procédé retenu, hormis sa facilité de mise en œuvre, est l'exploitation de l'ouvrage "jusqu'au bout" de sa capacité.

De fait, le complexe tissu-résine ne sera entièrement mobilisé qu'après sa mise en tension par déformation des poutres et apparition de fissures d'effort tranchant, susceptibles de se produire après la rupture d'un câble.

La méconnaissance de l'état exact de l'ouvrage (tension résiduelle, fils rompus...) n'empêche donc pas son niveau normal de service jusqu'à l'apparition des désordres.

Cependant, et c'est la limite de l'intervention réalisée, dès lors que les désordres dans la structure auront entraîné la sollicitation du matériau composite, le pont devra être fermé. L'échéance de cet événement, voire son occurrence, restant inconnue.

Conscient de ce fait, le Conseil général, maître d'ouvrage de l'opération, accélère son projet de réali-sation d'un autre franchissement de la Garonne, à une dizaine de kilomètres de là.

ABSTRACT

Improving the safety of Gagnac Bridge

R. Fournier, M. Boy, Ch. Schmitt, Ph. Gaillard

Gagnac Bridge, providing a crossing over the Garonne via county road 63 in Dordogne (France), was recently reinforced by carbon fibre fabric (TFC) bonding. Built in 1963, the structure, a viaduct with independent prestressed beam spans, comprises five spans and is 181.50 m long and 8 m wide. To perform the work without interrupting the traffic, Freyssinet had to set up major mobile scaffolding to provide access to the bridge soffits. At the same time, all the supporting devices and pavement joints were replaced.

RESUMEN ESPAÑOL

Aseguramiento del puente de Gagnac

R. Fournier, M. Boy, Ch. Schmitt y Ph. Gaillard

Permitiendo el franqueo del río Garonne por la carretera departamental 63, el puente de Gagnac, en el departamento de Dordogne (Francia) acaba de ser reforzada por encolado de tejido de fibras de carbón (TFC). Construido en 1963, la estructura, un VIPI (viaducto de vigas pretensadas de tramos independientes), consta de cinco tramos y mide 181,50 m de longitud y 8 m de anchura. Para efectuar los trabajos sin tener que interrumpir el tráfico rodado, Freyssinet tuvo que instalar una estructura de cimbra móvil sumamente importante que permitía el acceso a las partes inferiores del puente. En el mismo tiempo, se han reemplazado todos los aparatos de apoyo y juntas de pavimento.

Routes et développement durable : Novacol, un procédé économique et environnemental de recyclage à froid à l'émulsion de bitume

Economies d'énergie et des ressources naturelles, augmentation des coûts de transport, encore plus de respect de l'environnement, réduction de la gêne à l'utilisateur et aux riverains, il convient aujourd'hui de faire appel, chaque fois qu'il est possible, à des techniques d'entretien, de recyclage et de retraitement en place pour mieux répondre à ces exigences.

Avec plus de 3,5 millions de mètres carrés de chaussées retraitées avec le procédé Novacol, la démarche de Colas s'inscrit parfaitement dans cet esprit.

Les techniques de retraitement en place à froid et à l'émulsion de bitume répondent aux besoins d'entretien des chaussées durables et environnementales.

Après rappel de la technique, le bilan environnemental est décrit à partir d'un cas concret et montre tout l'intérêt de Novacol, comparativement aux techniques d'entretien classique en enrobés à chaud.

Conscient que la préservation de l'environnement et des ressources est l'un des plus importants challenges que devra relever le monde de la route du XXI^e siècle, Colas a développé, entre autres, un procédé de recyclage en place à froid des chaussées routières et aéronautiques par de l'émulsion de bitume.

La loi sur l'interdiction de mise en décharge des sous-produits valorisables de la construction applicable au 1^{er} juillet 2002, les recherches d'économie des ressources naturelles, l'augmentation des coûts de transport sont autant de facteurs qui militent en faveur des techniques d'entretien alternatives, sûres, encore plus économes en granulats d'apport et en énergie.

Aujourd'hui, plus que jamais, il devient de plus en plus économique et fréquent de valoriser les matériaux en place par rapport aux autres solutions de substitution ou de renforcement lourd.

■ LE RECYCLAGE À FROID DES CHAUSSÉES

Description du procédé Novacol

Le procédé Novacol consiste à retraiter en place à froid des couches de chaussées routières ou aéronautiques sur des épaisseurs de 5 à 20 cm de façon à obtenir une nouvelle couche de base ou de liaison homogène et performante. Elle reçoit ensuite un revêtement de type enduit superficiel, enrobé coulé à froid, enrobé à chaud ou à froid. C'est un procédé adaptable à chaque cas de chantier et le traitement est réalisé :

◆ avec une émulsion de bitume régénérant ou non (cas des couches de roulement notamment) ;



Photo 1
Atelier de retraitement
Novacol
Novacol resurfacing
equipment

◆ avec du liant composite Stabicol de Colas, mélange homogène de liant hydraulique adapté et d'émulsion spéciale (cas de renforcement de structure).

Cette technique permet d'obtenir un recyclage à 100 %, avec d'excellentes performances et assurer la durabilité recherchée.

Principe et matériel

A l'aide d'un atelier compact et puissant, Novacol réalise :

- ◆ le fraisage à froid sur l'épaisseur désirée, précédé ou non d'un apport de granulats correctifs en une seule passe de 3,5 à 3,80 m de large ;
- ◆ le dosage de l'eau d'apport et du liant de traitement. Les systèmes de dosage de ces constituants sont asservis à la vitesse d'avancement de la machine ;
- ◆ le malaxage de l'ensemble pour obtenir un mélange homogène (photo 1) ;
- ◆ la mise en cordon des matériaux traités ;
- ◆ l'application d'une couche d'accrochage nécessaire au collage de la couche recyclée ;
- ◆ le répandage des matériaux, transférés par un élévateur de cordon dans un finisseur à table à pouvoir de compactage élevé.



Photo 2
Travaux
par demi-chaussée
circulation maintenue
Work on half-roadway,
with traffic maintained



Le compactage des matériaux est effectué par un cylindre vibrant lourd VT2 ou VT3 et d'un compacteur à pneus P1 (3 t/roue).

La protection éventuelle de surface est réalisée par un enduit de scellement ou de cure suivant les cas. La couche de roulement définitive peut être un enduit superficiel, un enrobé coulé à froid "Colmat", un béton bitumineux à froid "Colasmac" ou à chaud d'épaisseur adaptée au cas de chantier et au trafic supporté.

Domaine d'emploi

Novacol a de multiples utilisations. Il résout notamment les problèmes de :

- ◆ décollements des enrobés de leur support, des couches traitées de base sur fondation. Le liant de traitement est fonction du problème à résoudre et du trafic supporté ;
- ◆ fissuration due aux couches inférieures traitées au liant hydraulique par la création d'une couche à l'émulsion de bitume anti-remontée de fissure ;
- ◆ fissuration de surface des couches de roulement en enrobés par vieillissement du bitume. Dans ce cas, une émulsion de bitume régénérant est utilisée. Elle permet de modifier efficacement les caractéristiques rhéologiques du bitume vieilli ;
- ◆ retraitement en place des chaussées souples déformées et présentant des dégradations dues à la fatigue des matériaux. Ce retraitement est réalisé avec une émulsion de bitume et il redonne à la chaussée un bon uni et des caractéristiques mécaniques adaptées au trafic supporté et à la durée de vie escomptée ;
- ◆ retraitement des chaussées semi-rigides présentant des dégradations dues à la fatigue des matériaux ou à une insuffisance des caractéristiques

mécaniques vis-à-vis du trafic supporté. Il permet de réaliser en place une chaussée mécaniquement correcte. Ce traitement peut être limité à la voie lente de chaussée à fort trafic routier ou autoroutier.

Novacol optimise l'emploi des matériaux existants, notamment dans les régions à faible ressource en granulats.

Etude préalable

Point de passage obligé, l'étude de laboratoire préalable a pour but d'évaluer la faisabilité de la technique de déterminer le mode et la profondeur de traitement et sa formulation. Elle comporte une auscultation de la chaussée par carottage ou par sondage de la chaussée et par des mesures de déflexion si besoin.

Elle permet de définir des sections homogènes de traitement, d'analyser les matériaux prélevés, de connaître la structure des chaussées et l'état des interfaces.

Destiné à récupérer les matériaux du site, un fraissage expérimental peut être réalisé pour procéder à l'étude de formulation préalable.

Cas du recyclage par Novacol des couches de roulement

Une analyse du liant vieilli est réalisée en vue de choisir le type de régénérant et son dosage en fonction de la teneur en liant en place. Un correctif granulaire peut être ajouté suivant la granulométrie des enrobés. Les caractéristiques PCG et Duriez sont déterminées et doivent répondre aux spécifications du guide sur le retraitement des anciennes chaussées.

Caractéristiques du liant après retraitement

Le traitement conduit à une modification notable de la température de ramollissement bille et anneau (TBA) ; l'objectif visé est une réduction de TBA de 5 à 15 °C :

- ◆ essai Duriez :
 - pourcentage de vides $\leq 14 \%$,
 - $r/R \geq 0,70$,
 - $R_c (14 j) \geq 5 \text{ MPa}$,
- ◆ essai > PCG : % de vides à 100 girations $\leq 25 \%$.

Conditions de mise en œuvre

Les rendements varient entre 5000 et 10000 m² par jour suivant le cas de chantier et l'épaisseur du retraitement. Celui-ci est effectué en une seule passe de 3,50 à 3,80 m de large. L'atelier compact de mise en œuvre autorise de déporter la circulation sur une autre voie d'où une quasi-absence de la gêne à l'utilisateur. La remise sous trafic de la voie traitée a lieu au fur et à mesure de l'avancement de chantier. Le procédé est adaptable au problème à traiter (photo 2).

Assurance de la qualité - Le guide du retraitement à froid

Edité par le Setra et réalisé par le Comité Français pour les Techniques Routières (CFTR), le guide du retraitement en place à froid des anciennes chaussées fournit des recommandations sur cette technique. Il précise notamment les analyses adaptées au diagnostic de chaussée, détaille les modalités d'exécution et les matériels préconisés et indique comment assurer la qualité de l'ouvrage réalisé.

Ce guide définit les différents domaines d'emploi à travers la classification des retraitements en place à froid, les études préalables nécessaires (y compris la manière d'aborder le dimensionnement) et les matériels disponibles sur le marché. Selon la technique de retraitement envisagée, l'objectif recherché et le principe adopté pour résoudre le problème rencontré (problème de surface ou défaut structurel), une classification des retraitements en place est établie à partir de cinq classes distinctes : renforcement structurel (classe I), réhabilitation des couches de surface (classes II et III), renforcement structurel (classe IV) et renforcement structurel ou correction d'un défaut des couches de surface (classe V).

Le chapitre "contrôles" prévoit ceux habituels sur les liants d'apport et ceux relatifs au retraitement proprement dit.

L'ensemble des documents constituant le Guide technique contribue au développement du retraitement en place à froid des anciennes chaussées en informant clairement les projeteurs et les décideurs des avantages environnementaux, techniques et économiques. Il expose également les conditions nécessaires à la réussite de cette technique de réhabilitation.

Exemple de bilan environnemental

Technique de recyclage s'inscrivant pleinement dans le concept du développement durable, Novacol participe à la protection de l'environnement, aux économies de granulats et d'énergie. Il contribue ainsi à une meilleure gestion des déchets tout en réduisant les transports, la gêne occasionnée aux usagers et aux riverains.

C'est dans ce contexte de développement durable qu'un bilan environnemental a été réalisé à partir d'un cas concret d'un chantier de réfection de chaussée en comparant une solution traditionnelle de renforcement avec des enrobés à chaud et une solution de retraitement en place à froid à l'émulsion de bitume.

Il est établi à partir d'une évaluation partielle du cycle de vie, une des composantes du développement durable.

Rappelons qu'elle permet pour l'activité routière :

- ◆ d'évaluer les impacts environnementaux en termes de consommation d'énergie ;
- ◆ de quantifier les gaz à effet de serre.



Figure 1
Analyse du cycle de vie Novacol
Novacol life cycle analysis

Toutes les étapes et les phases du cycle de vie sont prises en compte depuis l'extraction et la production des matières premières, comme le pétrole, les matériaux de base comme le bitume, les granulats, l'eau... jusqu'à la fin de la durée de service de la chaussée en passant par les phases de fabrication des matériaux, leur mise en œuvre, sans oublier le trafic routier global supporté par la structure pendant sa durée de service retenue lors des études et qui, en l'occurrence, est de 15 ans (figure 1).

A chacune de ces étapes, les émissions de gaz à effet de serre et les quantités d'énergie consommées sont évaluées. Une telle étude implique également le choix d'une unité fonctionnelle de travail afin de pouvoir comparer les différentes techniques entre elles. Dans l'exemple décrit ci-après, l'unité de surface d'un mètre carré de chaussées réparées a été retenue.

Cette évaluation partielle du cycle de vie permet de dresser une véritable carte d'identité environnementale du produit.

Ce peut être un outil d'aide à la décision. En effet, le nouveau Code des marchés publics autorise la prise en compte des exigences environnementales dans l'achat public dans le respect des principes généraux de la commande publique.

Elles sont prises en compte par les dispositions mentionnées dans les articles 14, 45 et 53 du Code des marchés publics. Ce dernier article en particulier permet aux acheteurs publics de placer le critère environnemental à niveau élevé par rapport à l'ensemble des autres critères de choix.

Remettre à l'appui de l'offre un bilan environnemental d'une variante technique et économique s'inscrit parfaitement dans le concept du développement durable.

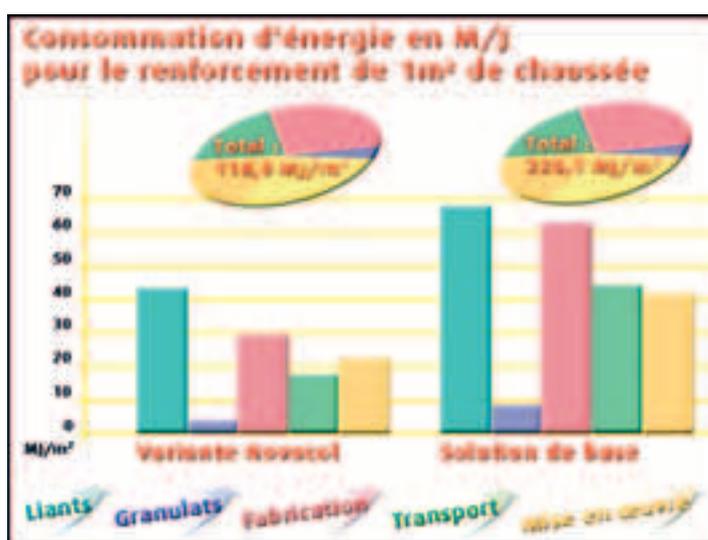
Cette analyse a été réalisée pour le chantier de réfection des chaussées de la RD 911, déviation de Sainte-Livrade, dans le Lot-et-Garonne. La surfa-

Photo 3
Retraitement
de l'ancienne chaussée

*Resurfacing
the old pavement*



Figure 2
ACV Novacol
consommation
énergétique
*Novacol energy
consumption life cycle
analysis*



► ce concernée par ces travaux représente 31500 m² (photo 3).

Initialement étudiée, la solution traditionnelle de renforcement en enrobés à chaud consiste à :

- ◆ fraiser la chaussée sur 7 cm de profondeur, soit 160 kg/m² de fraisats ;
- ◆ mettre en œuvre un béton bitumineux de liaison 0/10 mm en 4 cm d'épaisseur, soit 90 kg/m² ;
- ◆ recouvrir l'ensemble par un béton bitumineux semi-grenu 0/10 mm en 6 cm d'épaisseur, soit 140 kg/m².

Retenue par le Conseil Général du Lot-et-Garonne, la solution de Colas Sud-Ouest consiste à retraiter en place et à froid par Novacol l'ancienne chaussée sur une profondeur de 7 cm puis d'appliquer ensuite un béton bitumineux mince de 4 cm, soit 90 kg/m².

Le déroulement de l'étude comprend plusieurs étapes.

Collecte des données

Une décomposition précise du système est réalisée.

Depuis l'extraction du pétrole en passant par l'éla-

boration des matières premières : bitume, granulats... la fabrication et la mise en œuvre du produit et sa durée de service.

Ensuite, ces différents "flux entrants" font l'objet d'une analyse avec quantification des émissions de gaz et des consommations énergétiques.

A chacune des étapes, les valeurs calculées sont ramenées à l'unité fonctionnelle retenue : le mètre carré de chaussée.

Les distances de transport retenues sont :

- ◆ 540 km entre la raffinerie et le poste d'enrobage à chaud utilisable ;
- ◆ 50 km entre la carrière et le poste d'enrobage ;
- ◆ 106 km entre l'usine d'émulsion située à Auch dans le Gers et le chantier ;
- ◆ 35 km, distance moyenne entre le poste d'enrobage et la mise en œuvre des enrobés.

Pour 1 m² de chaussée traitée sur la RD 911, les résultats montrent que la technique de retraitement Novacol conduit à une économie d'énergie de près de 50 % par rapport à la solution classique de renforcement en enrobés à chaud.

C'est pratiquement dans toute la chaîne du processus, de la fabrication à la mise en œuvre, que cette consommation d'énergie est réduite de 50 %. En d'autres termes et pour ce chantier spécifique, sur le plan énergétique, la technique de renforcement à chaud nécessite deux fois plus d'énergie que le retraitement en place à froid à l'émulsion de bitume (figure 2).

De même, en prenant les mêmes éléments de calculs, toujours pour ce chantier, la solution de renforcement, ramenée au mètre carré de chaussée réparée, produit deux fois plus de gaz à effet de serre que la technique Novacol. La technique retenue par le Conseil Général du Lot-et-Garonne pour la RD 911 a permis de réduire de 50 % l'émission de gaz à effet de serre (figure 3).

A ce bilan environnemental positif, ceux de la sécurité et de la réduction des nuisances sont également à prendre en compte.

En effet, avec la technique de retraitement en place, les riverains et les usagers de cette route départementale n'ont pas eu à supporter le passage de 5182 t de produits de fraisage et 2960 t d'enrobés de liaison.

A raison de 25 t par camion, ces 8000 t de matériaux représentent un va-et-vient de plus de 325 poids lourds qui n'a pas eu lieu, probablement à la grande satisfaction des riverains.

CONCLUSION

Réalisé à partir d'un cas concret de chantier de la déviation de Sainte-Livrade en Lot-et-Garonne, ce bilan environnemental met en évidence que les matériaux à base de l'émulsion de bitume et plus particulièrement la technique de retraitement en place à l'émulsion permettent de mieux encore gérer les

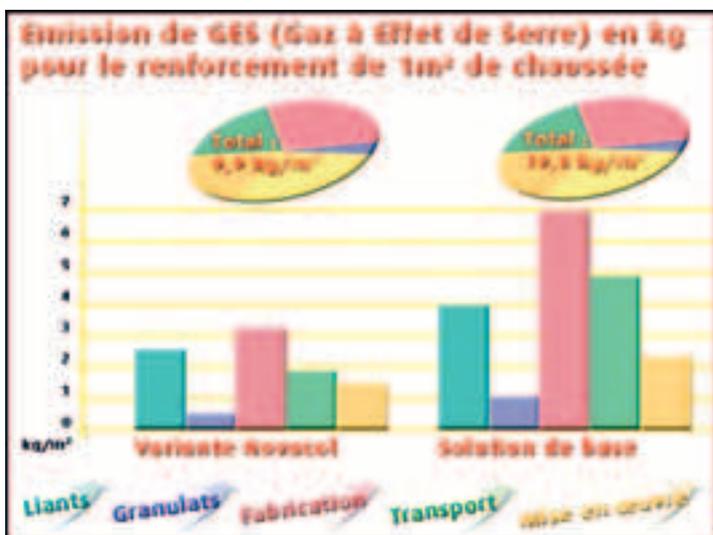


Figure 3
ACV Novacol émission des GES
Novacol greenhouse gas emission life cycle analysis

consommations d'énergie tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

La technique de recyclage à l'émulsion de bitume Novacol est économique financièrement mais également en ressources naturelles de matériaux tout en réduisant la gêne à l'utilisateur et celle occasionnée aux riverains.

En s'affranchissant d'une partie du transport de matériaux par camions, elle participe à la sécurité routière mais aussi à celle des hommes, les travaux se réalisant à froid.

Ce premier écobilan du terrain ouvre des pistes de réflexion pour sensibiliser les décideurs, les donneurs d'ordre, les concepteurs, les rédacteurs de marchés appelés à faire des choix en faveur d'une chaussée durable et environnementale. C'est-à-dire une route encore plus respectueuse de l'environnement, répondant aux exigences des usagers et des riverains au présent sans compromettre celles des générations futures.

Le nouveau Code des marchés publics autorise les acheteurs publics à prendre en compte les exigences environnementales par des critères de sélection.

A l'appui de son offre, l'entreprise peut désormais proposer des techniques encore plus durables vis-à-vis de l'environnement, par exemple de substitution à base d'émulsion, d'enrobé à froid, de recyclage ou de retraitement en place, type Novacol.

ABSTRACT

Roads and sustainable development : Novacol, an economical and environmentally-friendly cold recycling process with bitumen emulsion

M. Ballié, D. Thouret

To save energy and natural resources as transport costs increase, and especially for reasons of environmental conservation and attenuation of nuisances for the users and frontage residents, today, whenever possible, in-situ maintenance, recycling and resurfacing techniques should be used for a better response to these requirements. With over 3.5 million square metres of pavement resurfaced with the Novacol process, Colas's approach is perfectly in line with this spirit.

Cold and bitumen emulsion in-situ resurfacing techniques meet the needs for maintenance of sustainable, environmentally-friendly pavements.

Following a summary of the technique, the environmental balance is described based on a concrete case, which shows all the benefits of Novacol by comparison with conventional hot mix asphalt maintenance techniques.

RESUMEN ESPAÑOL

Carreteras y desarrollo sostenible : Novacol, un procedimiento ahorrativo y medioambiental de reciclaje en frío con emulsión bituminosa

M. Ballié y D. Thouret

Ahorros de energía y de recursos naturales, aumento de los costes de transporte, mayor respeto del medio ambiente, reducción de la molestia para el usuario y el vecindario, hoy día, es preciso recurrir, cada vez que así es posible, a personal técnico de mantenimiento de reciclaje y de retratamiento in situ para responder de mejor modo a estas exigencias.

Con más de 3,5 millones de metros cuadrados de pavimentos retratados mediante el procedimiento Novacol, el enfoque de Colas se sitúa perfectamente en esta orientación.

Las técnicas de retratamiento in situ

en frío y por medio de emulsión bituminosa corresponden a las necesidades de conservación de los pavimentos sostenibles y medioambientales.

Tras haber presentado la técnica, el balance medioambiental se describe a partir de un caso concreto y permite demostrar el interés de Novacol, por comparación con las técnicas de conservación convencionales por aglomerados en caliente.

Spécialisée dans les travaux de réhabilitation, l'entreprise de canalisation Barriquand, basée à Compiègne (Oise), a été rachetée en 2002 par Sogea Construction (groupe VINCI), dont l'hydraulique est l'un des trois métiers historiques. Dotée d'une batterie complète de procédés et depuis janvier 2006 d'une usine d'imprégnation de gaines Foreverpipe® de très forte capacité, Barriquand est désormais un acteur majeur du marché de la réhabilitation par chemisage continu en France – et le partenaire d'élection des cinquante entités du réseau "cana" de Sogea Construction.

Barriquand, le spécialiste de canalisations de Sogea

Basée à Compiègne (Oise), l'entreprise de canalisation Barriquand, qui fête cette année son 85^e anniversaire, "a toujours eu la volonté de se démarquer techniquement tout en proposant les mêmes prestations que ses concurrents", explique Philippe Begou, son directeur. Cela explique sans doute que l'entreprise se soit organisée de longue date en deux agences, l'une dédiée aux travaux classiques de canalisation sur ses marchés locaux, l'autre vouée aux travaux spéciaux – réhabilitation et assainissement sous vide –, qu'elle réalise dans tout l'Hexagone¹. "Au-delà de la lisibilité de l'offre, précise Mickaël Leclercq, le chef de l'agence travaux spéciaux, cette organisation répond au profil du marché. En effet, en dehors de certaines techniques comme le tubage² ou les reprises dans les canalisations de grande dimension, la réhabilitation est une spécialité qui met en jeu des procédés très techniques³ nécessitant d'importants investissements que ne justifiaient pas les besoins locaux."

Un savoir-faire et une réputation construits de longue date

Lorsque le marché émerge, au début des années 1990, sous la demande des collectivités locales urbaines, de plus en plus réticentes à l'idée d'imposer les nuisances de chantiers classiques à leurs administrés, Barriquand est une des rares PME indépendantes à s'y engager. Sous l'impulsion de son patron d'alors, Pierre Barriquand, elle s'équipe d'un système d'inspection vidéo et de robots multifonctions puis fait l'acquisition d'une première unité de chemisage continu (1994) et d'une unité de chemisage partiel (2000). Parallèlement, elle forme ses équipes, forge son savoir-faire et construit sa réputation. Damien Barruet, directeur activité TP Centre de Sogea Nord-Ouest, n'a rien oublié de l'image "d'innovateur et de pionnier des nouvelles technologies qui était celle de Pierre Barriquand dans le monde des "cana" à cette époque". Il n'a pas oublié non plus comment, dans les entre-

prises de Sogea Construction, le besoin d'intégrer une compétence spécifique en réhabilitation s'est peu à peu fait sentir et s'est exprimé, notamment à l'occasion des réunions trimestrielles du club hydraulique de l'entreprise.

Rien d'étonnant, donc, dans le rachat de Barriquand par Sogea Construction à l'été 2002, ni dans les moyens apportés ensuite au développement de son activité réhabilitation, "à la dimension de Sogea Construction", estime Mickaël Leclercq. La boîte à outils de l'agence s'enrichit tout d'abord d'un nouveau robot de fraisage, Prokutter® (cf. encadré "Prokutter®, l'outil de fraisage téléguidé"), puis d'un procédé de chemisage en continu par ultraviolets, "Photoliner®" (cf. encadré "Photoliner®, le chemisage continu des diamètres et linéaires moyens"), enfin, début 2006, d'un nouveau procédé de chemisage en continu, Foreverpipe® (cf. encadré "Foreverpipe®, le chemisage en continu hautes performances"), qui élargit l'offre de Barriquand pour la réhabilitation de canalisations de fort diamètre et sur grandes longueurs – mais surtout décuple son potentiel d'activité.

Respecter des standards de qualité industriels

Pour le présenter, Mickaël Leclercq vous entraîne dans l'arrière-cour de l'entreprise, vers un vaste bâtiment industriel flambant neuf. "Il n'existe en France

PROKUTTER®, L'OUTIL DE FRAISAGE TÉLÉGUIDÉ

Domaine d'application

Fraisage de canalisations gravitaires de diamètre 150 (chemisé) à 600 mm

Système de fraisage autopropulsé, le robot Prokutter® est piloté depuis un fourgon. Il réalise le fraisage de joints, de perforations, de fissures longitudinales ou transversales, de racines et assure les ouvertures de branchements. Il peut se déplacer selon trois axes : rotation, avance-recul, montée-descente, et combiner ces trois mouvements. Des adaptateurs montés sur les roues permettent de travailler jusqu'au diamètre 600. Toutes les opérations sont effectuées sous contrôle vidéo et font l'objet d'enregistrement numérique.

1. En 2005, le chiffre d'affaires de l'agence canalisation était de 7 M€ et celui de l'agence travaux spéciaux de 4,5 M€, dont 3 M€ en réhabilitation.

2. Dans le tubage, une canalisation en PEHD de diamètre inférieur est mise en place dans la conduite à réhabiliter puis scellée à l'aide d'un coulis de ciment.

3. En France, une quinzaine d'entreprises sont spécialisées dans la réhabilitation par chemisage continu. Certains procédés comme l'enroulement hélicoïdal ou le remplacement par éclatement ne sont maîtrisés que par quelques sociétés.

en réhabilitation Construction

Philippe Begou

DIRECTEUR
Barriquand

Mickaël Leclercq

CHEF DE L'AGENCE
TRAVAUX SPÉCIAUX
Barriquand



Damien Barruet

DIRECTEUR ACTIVITÉ TP CENTRE
Sogea Nord-Ouest TP

PHOTOLINER®, LE CHEMISAGE CONTINU "ULTRA-VIOLET"

Domaine d'application

Réseaux gravitaires ; chemisage continu de canalisations circulaires ; diamètre 150 à 500 mm ; linéaires compris entre 10 et 150 m

Composée d'une succession de trames de fibres de verre enroulées sans couture avec recouvrement radial et imprégnées d'une résine polyester ou vinylester monocomposant photodurcissable, la gaine est treuillée à l'intérieur de la canalisation. Obturée à chaque extrémité, elle est gonflée à l'air pour venir se plaquer sur l'ouvrage existant. Une source de rayonnement est ensuite introduite et déplacée à vitesse contrôlée provoquant la réticulation de résine par photosensibilité.



Procédé Photoliner®.

Après mise en place de la gaine dans la conduite, le chariot émetteur d'ultraviolets est introduit. Une fois le processus enclenché, la polymérisation s'effectue à la vitesse de 1 m/min en diamètre 300 mm

Photoliner® process.

After placing the duct in the pipe, the UV emitting trolley is inserted. Once the process is underway, polymerisation is performed at a rate of 1 m/min. in 300 mm diameter



- Produit certifié ISO 9001/EN 29001.
- Disponible en plusieurs épaisseurs de 3,5 à 9,8 mm par pas de 0,7 mm. Diverses qualités de résines permettent de répondre à des agressivités chimiques extrêmes.
- Performances hydrauliques similaires à celles du PVC.
- Gaine prête à l'emploi sans aucune manipulation de résine.

Procédé Photoliner®. A partir du poste de commande, le chef de chantier contrôle les opérations en direct tandis que tous les paramètres permettant d'établir la traçabilité de l'intervention sont enregistrés

Photoliner® process. From the control station, the site foreman controls the operations directly, while all the parameters to establish the traceability of operations are recorded

que deux usines de ce type, indique-t-il, mais c'est un équipement totalement complémentaire de celui, mobile, d'exécution de chantier, car avant d'être mises en œuvre, les gaines Foreverpipe® doivent être préparées, c'est-à-dire imprégnées de résine. Et la maîtrise de cette opération, qui doit respecter des standards de qualité industriels, est aussi la clé de la maîtrise de nos coûts."

Stockées au rez-de-chaussée, les gaines de feutre polyester qui sont livrées sur mesure par le partenaire italien de Barriquand, la société S3 SONCINI, Sp.a, sont hissées au premier niveau via une tré-

mie et déroulées sur un plan de préparation de 30 m de long où elles sont d'abord mises sous vide, étape très importante pour l'imprégnation proprement dite, car toute zone où une bulle d'air subsisterait dans le feutre représenterait un risque de rupture pour la future canalisation. La résine d'imprégnation, polyester ou époxy selon le type de conduite à réhabiliter, est ensuite injectée à la quantité strictement nécessaire au niveau de la tête de la gaine, qui passe dans plusieurs systèmes de galets avant d'être chargée sur un lit de glace dans le camion isotherme qui en assurera la livraison au chantier.



Procédé Foreverpipe®. A la mi-mars 2006, Barriquand a réalisé à Fleury-les-Aubrais (Loiret) deux opérations de chemisage en continu, l'une d'une conduite en béton eaux usées - eaux pluviales de 400 mm de diamètre sur 76 m, l'autre d'une conduite en grès de 500 mm de diamètre sur 105 m. Dans les deux cas, la mise en place de la gaine a été réalisée en un seul tir. Ces chantiers, qui auraient duré trois semaines en exécution traditionnelle, ont été réalisés en trois jours

Foreverpipe® process. In mid-March 2006, Barriquand carried out two continuous lining projects in Fleury-les-Aubrais (Loiret), one involving a concrete sewage-rainwater pipe 400 mm in diameter over 76 m, and the other a sandstone pipe 500 mm in diameter over 105 m. In both cases, duct laying was carried out in a single pull. These projects, which would have taken three weeks using traditional techniques, were completed in three days

Procédé Foreverpipe®. Au premier niveau de l'atelier d'imprégnation, la gaine est déroulée sur le plan de préparation où elle sera mise sous vide avant d'être imprégnée

Foreverpipe® process. At the first level of the impregnation equipment, the duct is unwound on the preparation surface where it will be placed under vacuum before being impregnated

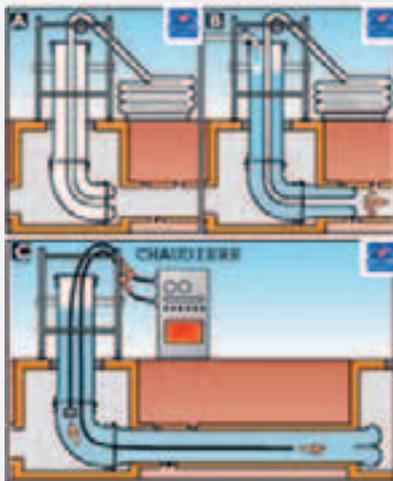


FOREVERPIPE®, LE CHEMISAGE EN CONTINU HAUTES PERFORMANCES

Domaines d'application

Réseaux gravitaires ou sous pression (jusqu'à 40 bars) d'eaux usées, d'eaux pluviales et réseaux d'assainissement industriels; chemisage en continu de canalisations circulaires, ovoïdes ou même carrées; diamètre 200 à 1500 mm; linéaires jusqu'à 350 m

Livrée imprégnée et maintenue au froid dans un lit de glace pour empêcher la polymérisation de la résine, la gaine de chemisage est mise en œuvre depuis une plate-forme surélevée, nécessaire pour former la colonne d'eau qui assure sa réversion à l'intérieur de la conduite (cf. schéma). Une fois mise en place, la gaine est polymérisée sur la conduite à réhabiliter par chauffage de l'eau.



A. Introduction de la gaine imprégnée de résine dans la conduite.
B. Avancement de la gaine par la pression hydrostatique.
C. Polymérisation par chauffage de l'eau.

A. Insertion of the duct impregnated with resin in the pipe.
B. Moving the duct forward by hydrostatic pressure.
C. Polymerisation by heating the water.

Procédé Foreverpipe®. Pupitre de commande et de contrôle de la chaudière à l'intérieur de l'unité mobile
Foreverpipe® process. Boiler control and monitoring console inside the mobile unit



Très technique, le procédé Foreverpipe® est mis en œuvre par une équipe de sept personnes à l'aide d'une unité mobile (ci-dessus) intégrant tous les systèmes de contrôle et d'enregistrement des opérations ainsi que la chaudière, indispensable pour la phase de polymérisation de la conduite

The highly technical Foreverpipe® process is implemented by a team of seven people using a mobile unit (above) incorporating all the operation monitoring and recording systems and the boiler, which is indispensable for the pipe polymerization phase

Un marché sur le point de s'éveiller

"Sur ce site, poursuit Mickaël Leclercq, nous pouvons préparer quelque 30 000 m de gaine par an. C'est un potentiel considérable si l'on songe que le marché de la réhabilitation, tel que nous l'avons estimé, ne représente en France que 100 000 m par an."

Beaucoup de raisons permettent pourtant de penser que c'est un marché qui va se réveiller et se développer, "comme il l'a déjà fait en Allemagne, où des usines d'imprégnation tournent en travail posté, ou en Italie, où notre partenaire S3 SONCINI, Sp.a réalise de très importants chantiers pour l'industrie", estime Philippe Begou, sous l'effet conjugué d'une demande accrue des collectivités et d'une évolution des modes de financement qui, à l'avenir, pourraient être moins favorables aux travaux neufs en France. L'industrie constitue également une cible⁴, même si la réglementation ne contraint pas encore les industriels, comme dans d'autres pays, à tester chaque année leurs réseaux et à les entretenir.

"L'usine est en route depuis le 3 janvier. Dès le 9, on a commencé à appliquer le procédé, et à la fin mars, six chantiers avaient été réalisés à Collonges (Rhône), Melun (Seine-et-Marne), Saint-Leu-d'Esserent (Oise), Tours (Indre-et-Loire), Chauny (Aisne), Fleury-les-Aubrais (Loiret), énumère Mickaël Leclercq, dont deux apportés par des entités de Sogea Construction, qui, dans l'immédiat, constituent pour Barriquand, un irremplaçable et indispensable relais auprès des maîtres d'ouvrage."

4. Plusieurs chantiers de réhabilitation ont été réalisés par Barriquand à l'aide du procédé Photoliner® pour des pétroliers et des industriels de la chimie (Arizona Chemical, ExxonMobil, Sanofi Aventis).

ABSTRACT

Barriquand, the pipeline renovation specialist of Sogea Construction

Ph. Begou, M. Leclercq, D. Barruet

Pipeline company Barriquand, a renovation work specialist based in Compiègne (Oise region), was taken over in 2002 by Sogea Construction (Vinci Group), one of whose three historic businesses is hydraulic engineering. With a comprehensive range of processes, and since January 2006 with a Foreverpipe® duct impregnation plant of very large capacity, Barriquand is now a major player in the continuous lining renovation market in France – and the chosen partner of the 50 entities in Sogea Construction's "pipe-laying" network.

RESUMEN ESPAÑOL

Barriquand, empresa especialista en rehabilitación de canalizaciones de Sogea Construction

Ph. Begou, M. Leclercq y D. Barruet

Especializada en los trabajos de rehabilitación, la empresa de canalización Barriquand, con base en Compiègne (Oise), fue adquirida en 2002 por Sogea Construction (grupo VINCI), cuya actividad hidráulica constituye una de las tres actividades históricas. Dotada de una batería completa de procedimientos y, desde enero de 2006 de una planta de impregnación de conductos ForeverpipeG de muy elevada capacidad, Barriquand es actualmente un protagonista destacado del mercado de la rehabilitación mediante revestimiento continuo en Francia –y el socio preferido de las 50 entidades de la red "cana" de Sogea Construction.

Réhabilitation du site minier une combinaison du confinement et de la phytostabilisation des sols

Certains sites industriels ou miniers ont été exploités pendant des dizaines d'années sur des surfaces parfois importantes. Les activités ont pu générer une pollution des sols et le coût de la dépollution atteint alors des proportions importantes. Les travaux de recherche entrepris au cours des dernières années permettent aujourd'hui de proposer des techniques nouvelles pour maîtriser les conséquences de cette pollution. L'objectif de cet article est de présenter un cas de réalisation à grande échelle de la technique de phytostabilisation des sols après avoir excavé et confiné les sols les plus pollués. Dans le cas d'une pollution par de l'arsenic comme sur le site de la Combe du Saut, la technique utilisée vise à permettre la reconquête de la surface par un couvert dense de végétaux adaptés, aidés par l'apport de grenaille d'acier (dont l'objectif est de diminuer la toxicité des sols pour les plantes). Le couvert végétal limite l'infiltration de la pollution ainsi que l'érosion du sol pollué par l'eau et le vent. Il en résulte ainsi une diminution du transfert de pollution.



Figure 1
Localisation du site
Site location

■ PRÉSENTATION DU PROJET

A la suite d'une décision interministérielle prise en 1998, l'Ademe a été chargée de la dépollution du site de la Combe du Saut situé dans l'Aude, au nord de Carcassonne et au sud de la Montagne Noire (figure 1).

L'exploitation minière dans le secteur remonte à l'antiquité mais, à partir du début du XX^e siècle, le minerai contenant de l'or, d'autres métaux et de l'arsenic est extrait de la mine de Salsigne.

Transporté à plusieurs kilomètres à l'est vers le site de la Combe du Saut, il est traité par pyrométallurgie ou hydrométallurgie (cyanuration). Environ 150 t d'or et 200 000 t de trioxyde d'arsenic (As₂O₃ - Anhydride arsénieux) seront produites pendant le siècle dernier. L'arsenic est vendu pour être utilisé en tant que traitement phytosanitaire dans les vignes, pour le traitement du bois (C.C.A.) ou aussi pour la verrerie. Plus de 1 000 mineurs travailleront sur l'exploitation.

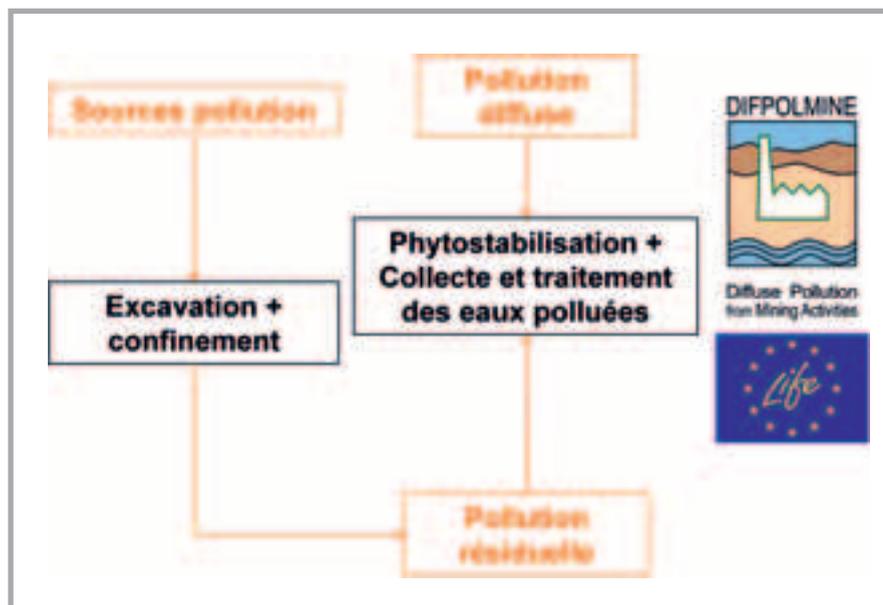
En 1992, la Société des Mines et Produits Chimiques de Salsigne (SMPCS) est liquidée et le site est découpé en trois parties : la Société d'Exploitation de la Pyrométallurgie de Salsigne (SEPS) qui se spécialise dans le traitement des déchets industriels jusqu'en 1996, la société SNC Lastours, pour l'exploitation de tailings par cyanuration, et la société Mine d'Or de Salsigne (MOS) dont l'activité de production d'or par hydrométallurgie perdura jusqu'en 2004.

En 1999, l'Ademe intervient en urgence pour prendre en charge d'abord les problèmes laissés par la société SEPS, dans le cadre de ses interventions en matière de réhabilitation des sites pollués à responsable défaillant (circulaire du 7 juin 1996). Les missions de l'Ademe sont fixées par plusieurs arrêtés préfectoraux de 1999 à 2004. Il s'agit d'abord d'assurer la maintenance et la mise en sécurité du site notamment par le traitement des eaux polluées dont la concentration atteint plusieurs dizaines de milligrammes par litre (photo 1).

Les études réalisées par différents bureaux d'études (IRH Environnement, Burgeap, Arcadis) vont permettre d'évaluer les volumes de déchets et de sols pollués : ils sont considérables, 2 millions de m³ environ. La concentration en arsenic dans les sols atteint par endroits en surface 100 000 mg/kg (10 %).

Compte tenu du contexte méditerranéen du site, les sols sont fortement érodés par les eaux de pluie entraînant une partie des eaux polluées (arsenic et matières en suspension) directement dans la riviè-

Figure 2
Principes de la dépollution
Pollution control techniques



de la Combe du Saut : des déchets

Patrick Jacquemin

CHEF DE PROJET
Ademe

Marc Arguillat

CHARGÉ DE MISSION INDUSTRIE
Ademe

Richard Tuphé

CHEF DE PROJET
Scetauroute

Soazic Le Guen

INGÉNIEUR D'ÉTUDES
Scetauroute

Jolanda Boisson

CHARGÉE D'AFFAIRES
IRH Environnement

Georges Pottecher

DIRECTEUR SCIENTIFIQUE
Groupe IRH Environnement

Ann Ruttens

RESPONSABLE DE RECHERCHE
Université Hasselt (Belgique)

Jaco Vangronsveld

PROFESSEUR
Université Hasselt (Belgique)

Bernard Saunal

CHEF D'EXPLOITATION
Bec Frères



Photo 1
Le site en 1999

The site in 1999

re Orbiel jouxtant le site. Les études permettent d'estimer à environ 2 t la masse d'arsenic transférée dans l'environnement chaque année. Le second vecteur identifié est l'envol de poussières, sans que l'on puisse mettre en évidence un lien direct de cause à effet entre le site et les concentrations mesurées dans l'atmosphère à plusieurs kilomètres (environ 2 µg/m³).

■ PRINCIPES DE LA RÉHABILITATION : DÉMOLIR, CONFINER, STABILISER, VÉGÉTALISER

Après évacuation des déchets les plus dangereux et démolition de l'usine, le projet de réhabilitation comprend deux phases successives :

- ◆ premièrement, le confinement des déchets et des sols excavés les plus pollués ;
- ◆ deuxièmement, la gestion des eaux de ruissellement et la phytostabilisation des sols dans le cadre d'un projet européen Life Environnement (Difpolmine) (figure 2).

Le site www.difpolmine.org présente le programme de la conférence et visite qui se tiendra du 12 au 14 décembre 2006.

■ LE CONFINEMENT DES DÉCHETS ET DES SOLS POLLUÉS

Introduction

Les hypothèses et les contraintes de l'étude du confinement étaient :

- ◆ un volume entrant de déchets et de terres polluées estimé à environ 350 000 m³ ;

- ◆ une zone de confinement délimitée utilisant une alvéole étanche construite sur le site démolí, et deux bassins existants nommés B1 et B2 ;
- ◆ la réalisation d'une couverture étanche par une géomembrane. Celle-ci est ancrée dans le substratum rocheux et est couverte par un mètre de matériaux terreux ;
- ◆ la réalisation d'un confinement permettant l'évacuation des eaux pluviales de manière efficace afin de ne pas créer de faiblesse hydraulique dans la couverture étanche (figure 3).



Figure 3
La zone du confinement
et le réseau de drainage
*The containment area
and drainage network*

■ LA PROBLÉMATIQUE : RÉALISER UN CONFINEMENT DANS UN CONTEXTE ANTHROPIQUE ET GÉOLOGIQUE COMPLIQUÉ

Le site de la Combe du Saut est situé sur un horizon géologique hétérogène constitué d'une série tertiaire argilo-calcaireuse recouvrant une série primaire contenant des grès, des quartzites, des schistes, des pélites, des calcaires et dolomites



Photo 2
Bassin B1 en cours
de consolidation
Bassin B1
undergoing
consolidation

► dont la structure est quasi verticale. Deux failles NNO-SSE de décrochements horizontaux affectent la série primaire.

La série tertiaire recouvre la série primaire avec un pendage plutôt orienté vers le sud.

En avant de la limite de recouvrement se trouvent d'importantes masses glissées de blocs calcaires emballés dans des limons argileux. Ces masses se trouvent dans la partie est du site, tandis que les terrains tertiaires en place se trouvent à l'ouest. Les dépôts issus de l'exploitation minière reposent soit sur les formations tertiaires en place à l'ouest, soit sur les matériaux tertiaires glissés au sud-est, soit sur le socle primaire.

■ DIFFICULTÉS RENCONTRÉES POUR LE DRAINAGE DU CONFINEMENT ET SOLUTIONS

Le projet prévoyait initialement la pose de drains dans le bassin B1 raccordés à ceux déjà réalisés en amont (bassin B2). Ce réseau comprenait :

- ◆ un drain amont au bassin B1 raccordé à un regard de chute ;
- ◆ un drain dans B1 partant du regard de chute vers un regard de relevage aval ;
- ◆ une galerie ovoïde sur micropieux fondés dans le substratum du regard de relevage vers une cheminée existante au sud ;
- ◆ de la cheminée existante vers la station de traitement à l'est, l'utilisation d'une ancienne galerie de 250 m de long.

Le début des travaux a consisté à vider le bassin B1 en relevant les eaux vers la cheminée et la galerie.

Une fois le bassin "à sec", il restait en fond un niveau de fines sédimentées dont la présence avait été envisagée mais dont l'épaisseur importante,

de l'ordre de 4 m, était impossible à connaître avant les travaux en raison de la présence et des caractéristiques chimiques des eaux stockées dans le bassin.

La réalisation du réseau prévu par ailleurs difficile en raison des très mauvaises caractéristiques mécaniques des boues de décantation.

En effet, le remblaiement d'une hauteur de 20 à 25 m de déchets autour des puits et sur la galerie ovoïde sur micropieux aurait entraîné un tassement important du confinement provoquant deux phénomènes :

- ◆ des frottements négatifs sur les puits entraînant éventuellement leur rupture voire une déformation préjudiciable ;
- ◆ pour la galerie, un effet appelé "Marston", qui consiste en un frottement négatif des terres qui tassent autour de l'ouvrage sur les terres qui surmontent l'ouvrage. Cet effet aurait généré une contrainte verticale correspondant au double du poids des terres sur l'ovoïde et ne permettait donc pas d'envisager sa création sur micropieux (photo 2).

Après consolidation des boues (par mélange avec des matériaux à confiner du site), la solution retenue fut de créer un réseau de drains dans le bassin B1, raccordé gravitairement à la galerie en aval de la cheminée existante.

Le réseau de drainage en provenance du bassin B2 fut raccordé directement à la cheminée séparant ainsi les exutoires des bassins B1 et B2. Un niveau de drainage de "sécurité" du bassin B1 vers la cheminée existante fut également créé afin de limiter l'éventuelle mise en charge du confinement à la cote amont de la galerie existante.

L'accès à ces ouvrages est possible à partir de la galerie raccordée à la station de traitement (nettoyée et aménagée de manière à permettre son accès sans risques).

■ DESCRIPTION DE L'OUVRAGE (MODELÉ, COUVERTURE...) : BIEN COMBINER LES VOLUMES TERRASSÉS ET LA FORME FINALE DU CONFINEMENT

L'enjeu principal, après l'estimation approximative du volume de déchets et terres polluées excavées, était de réaliser un confinement dans le lieu le plus adéquat. Celui-ci a été préalablement défini suite à l'étude de différents scénarios. Il se situe sur le bassin appelé B1.

Les matériaux excavés sont confinés sur le site. Ils sont recouverts par un dispositif d'étanchéité par géomembrane composé de bas en haut par une géomembrane étanche, un géocomposite de drainage surmonté enfin, par un mètre de matériaux de terre végétalisable.

Le confinement reçoit le dispositif d'étanchéité sur une surface développée de 10 ha environ (photo 3).

La forme 3D finale du confinement a été dépendante de plusieurs facteurs et devait, au moment de l'étude, pouvoir être modifiable sans changer la conception générale entre le projet et la réalisation. La géométrie en altitude du confinement présente des pentes comprises entre 1 et 20 % (5H/1V). Ces pentes garantissent la stabilité de l'ouvrage (notamment de la couche de matériaux terreux) et permettent l'évacuation des eaux météoriques sur la couverture étanche, facilitée par ailleurs, par un géocomposite de drainage.

Certaines zones devaient pouvoir être modifiées afin de caler la réalité des volumes confinés et la géométrie du confinement (respect des pentes préconisées et forme générale en dôme).

La géométrie du confinement en plan a été fixée définitivement par la recherche du substratum rocheux. Celui-ci reçoit l'ancrage du dispositif d'étanchéité de manière à garantir un isolement hydraulique optimum du site confiné.

Des données de sismique réfraction couplées à des sondages ont permis le positionnement des ancrages de la géomembrane, affiné au moment des travaux. Les limites de la zone étaient également dépendantes des fils d'eau des fossés d'eaux pluviales ceinturant le confinement.

Un volume plus important de matériaux que celui estimé a dû être excavé, ce qui a nécessité un volume plus important du confinement. Le calage entre les estimations et les nouveaux besoins a été réalisé simplement. La forme finale du dôme du confinement respecte la conception générale initiale, mais présente des cotes d'altitude différentes par endroits. Le complément de déblai à stocker avec l'emprise en plan a eu pour effet de faire "gonfler" la géométrie du confinement comme un ballon de baudruche ce qui, au vu des pentes initiales théoriques faibles n'a pas eu d'incidences notables sur les ruissellements (et donc sur le réseau d'assainissement et sur la stabilité du massif).

■ RUISSellement : LE DOUBLE ENJEU DES "ÉPISODES CÉVENOLS"

La problématique

De très forts orages s'abattent périodiquement sur le site. Le débit du ruissellement sur le sol peu profond et en grande partie nu peut alors dépasser 500 m³/h par hectare. Pendant une campagne de mesures effectuée par IRH Environnement, une pluie d'une importance plus que centennale (350 mm du 12 au 14 novembre 1999) a provoqué l'écoulement d'environ 80000 m³ sur le site. D'autres pluies



Photo 3
Pose
de la géomembrane
bitumineuse
Laying the bituminous
geomembrane barrier



Photo 4
Résultat de l'érosion
après une forte pluie :
route inondée barrée
Result of erosion
after heavy rain : blocked
flooded road

majeures ont eu lieu en décembre 1996 et en septembre 2005.

Dans ces circonstances, la circulation sur le CD 101 est interrompue du fait des dépôts apportés par l'érosion (photo 4). Le ruissellement doit donc être maîtrisé pour assurer la sécurité routière.

Par ailleurs, il a été mesuré que les eaux pluviales transportent une grande quantité d'arsenic vers la rivière Orbiel. Pendant le seul orage de 1999, on estime le rejet à 1 260 kg d'arsenic, ce qui est considérable (cf. Etude hydraulique de la zone du site SEPS pour la maîtrise des eaux pluviales, 2001, IRH). En dehors des événements extrêmes, le ruissellement apporte de l'ordre de 1 300 kg/an d'arsenic à l'Orbiel. Il s'agit du principal transfert de pollution, en masse, causé par le site. Sa maîtrise est un enjeu majeur du projet de réhabilitation.

Après les opérations de confinement, on s'attend à ce que les eaux issues de certaines zones restent polluées durant un certain temps, compte tenu de la pollution résiduelle du sol.

■ LES SOLUTIONS

La maîtrise du ruissellement repose sur les dispositifs suivants :

◆ la végétalisation (cf. infra) réduit le ruissellement en favorisant l'infiltration, et fixe le sol, ce qui limi-

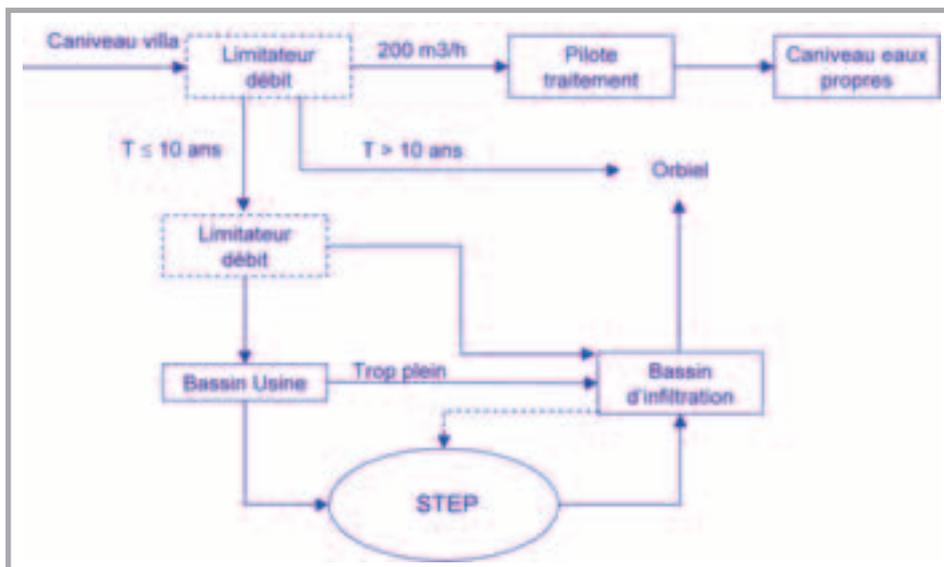


Figure 4
Principes des écoulements sur le site après réhabilitation
Drainage techniques on site after reclamation

Figure 5
Le réseau
superficiel
*The surface
network*



► te l'érosion. On parle de phytostabilisation compte tenu des effets attendus sur la mobilité des polluants ;

- ◆ un réseau séparatif intercepte et canalise les écoulements. Les eaux propres sont rejetées à l'Orbiel. L'implantation des caniveaux maximise la concentration attendue dans les eaux à traiter, d'après une modélisation des écoulements, quantitative en débit et qualitative en pollution. Cette modélisation, développée par IRH Environnement, repose sur un MNT et sur les cartes d'occupation du sol, de texture et de pollution. Elle a été calée sur 40 événements pluvieux. Afin d'assurer la sécurité routière, les capacités des réseaux sont basées sur la pluie de septembre 2005 (pluie centennale), en considérant un coefficient de ruissellement de 70 % (coefficient élevé et homogène dans l'espace pour un scénario catastrophe) ;

- ◆ les eaux polluées, en volume réduit, sont traitées dans deux stations physico-chimiques. L'une traite les petits événements par coagulation-floculation avec des réactifs préparés en ligne. Ce traitement innovant a été validé par un pilote de 200 m³/h. L'autre station traite les eaux stockées par précipitation à la chaux. Le traitement des eaux de ruissellement cessera lorsque l'objectif de rejet (1 mg/l As) sera atteint.

Les rejets d'eau traitée rejoignent l'Orbiel par infiltration en berge, tandis que les eaux polluées des orages majeurs décantent dans le bassin d'infiltration avant rejet par surverse.

Des préleveurs automatiques permettent de suivre la qualité des eaux de ruissellement (figures 4 et 5).

■ L'ÉTUDE ET LA MISE EN ŒUVRE DE LA PHYTOSTABILISATION

Immobiliser la pollution résiduelle et diffuse et aider la végétation à croître dans un contexte phytotoxique

En cas de pollution des sols par des métaux, les hommes ou les animaux peuvent être exposés à travers le transfert par la chaîne alimentaire, par l'inhalation de poussières transportées par le vent ou directement par l'ingestion de sol. Sur les secteurs les plus pollués, la biodiversité est fortement réduite et la croissance des plantes perturbée. Il y a par ailleurs un risque de transfert des contaminants par érosion (par la pluie ou le vent) ou par les eaux souterraines (Rutten et al., 2006 ; Vangronsveld et Cunningham, 1998). Cette dispersion des métaux augmente la probabilité d'exposer les hommes ou les animaux. En réponse au souci croissant d'amélioration de la santé et de la qualité de l'environnement, différentes technologies ont été développées pour traiter les sols contaminés par des métaux. Classiquement, la réhabilitation est basée sur des excavations et du confinement des matières contaminées ou des techniques ex-situ de lavage, solidification voire vitrification (Vangronsveld et Cunningham, 1998). En raison des coûts élevés de ces techniques, en particulier lorsque le site est très grand ou en raison de problèmes spécifiques (comme la faible disponibilité de sols propres pour recouvrir ou remplacer les sols pollués), un besoin de trouver des solutions alternatives s'est fait sentir. Au cours des dernières années, des travaux de recherche ont exploré les potentialités de la phytoremédiation qui utilise les propriétés des plantes pour réhabiliter les sites. Dans le cas de sols pollués par des métaux, la phytostabilisation est une technique basée sur le renforcement du couvert végétal qui aide à diminuer le transfert des polluants. En outre, elle participe à l'amélioration esthétique des sites concernés.

Du fait que la contamination est souvent trop forte pour permettre une croissance saine des végétaux (même dans le cas de plantes tolérantes), l'immobilisation du métal par des amendements adaptés est souvent utilisée en complément. Grâce à leur pouvoir, ces amendements ont la propriété de favoriser les processus géochimiques comme la précipitation, la sorption, l'échange ionique ou les réactions d'oxydoréduction pour réduire la mobilité du polluant et par conséquent sa biodisponibilité (Mench et al., 2000). Ainsi la combinaison de l'ajout d'un agent immobilisant et de la revégétalisation permet de limiter les impacts environnementaux des zones contaminées.

Différentes étapes successives sont nécessaires pour développer un protocole de phytostabilisation adapté aux conditions spécifiques d'un site.

Sélection des espèces végétales

Le choix initial a été fait selon les cinq principes suivants :

- ◆ l'inventaire des espèces caractéristiques identifiées localement ;
- ◆ le mélange de différents groupes de plantes (a) des graminées pour leur propriété à couvrir le sol et leur système racinaire dense (b) des légumineuses pour leur propriété de fixation de l'azote de l'air (c) certaines autres espèces pour leur caractère esthétique ou d'autres avantages (par exemple limiter l'accès des promeneurs) ;
- ◆ la disponibilité commerciale des semences ;
- ◆ la prise en compte des résultats de précédents ensemencements sur le site ;
- ◆ les résultats des tests effectués au laboratoire sur différents cultivars.

L'application de ces cinq critères a permis de définir une liste de 18 plantes (tableau I).

Essais au laboratoire : étude de la mobilité de l'arsenic et de la phytotoxicité des échantillons de sols prélevés sur le site, avec et sans grenaille d'acier (amendement immobilisant)

Evaluation de l'effet de la grenaille d'acier sur la mobilité de l'arsenic

La grenaille d'acier est utilisée généralement pour le décapage des surfaces. Elle contient principalement du fer (97 % FeO) et des impuretés comme du manganèse (Mn 0,6 à 1 %) ou de la silice (Si 0,8 à 1,2 %). La grenaille d'acier s'oxyde naturellement dans le sol générant des oxydes de fer et de manganèse, réagissant avec les éléments traces présents dans la solution du sol (Mench et al., 1998). Des études antérieures ont montré le caractère immobilisant (pour l'arsenic et des métaux) de la grenaille d'acier (Boisson et al., 1999 ; Vangronsveld

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Graminées 46%	Légumineuses 32%	Autres espèces 22%
<i>Agrostis capillaris</i> (6%) <i>Highland</i>	<i>Coronilla glauca</i> (3%)	<i>Daucus carota</i> (2%)
<i>Arrhenatherum elatius</i> (12%) <i>Arone</i> 6% <i>Gladiator</i> 6%	<i>Lotus corniculatus</i> (5%) LEO 2.5% <i>Gran San Gabrielle</i> 2.5%	<i>Echium vulgare</i> (2%)
<i>Dactylis glomerata</i> (18%) => <i>Amba</i> 9% => <i>Sparta</i> 9%	<i>Mellilotus alba</i> (7%)	<i>Euphorbia characias</i> (localement)
<i>Festuca ovina</i> (5%) => <i>Bornito</i>	<i>Medicago lupulina</i> (5%) => <i>Virgo</i>	<i>Plantago lanceolata</i> (6%)
<i>Holcus lanatus</i> * (5%)	<i>Onobrychis sativa</i> * (12%)	<i>Plantago coronopus</i> (3%)
	<i>Spartium junceum</i> (localement)	<i>Sanguisorba minor</i> (9%)

Tableau I
Liste des semences
utilisées
List of seeds used

et al., 1995). D'ailleurs, dans les sols non contaminés, les oxydes de fer et de manganèse sont connus pour jouer un rôle important dans la rétention des éléments traces (Adriano, 2001). La grenaille d'acier est mélangée à un taux de 1 % (en masse) avec le sol prélevé en différents secteurs du site. Après une période d'incubation de 4 semaines, nécessaire pour permettre une réaction optimale entre le sol contaminé et la grenaille, les effets du mélange sont évalués au moyen d'extractions avec de l'eau distillée (ratio sol/liquide 5/25, agitation 24 heures à 60 tr/min, détermination de la concentration en arsenic dans les extraits du sol traité et non traité). Les résultats sont présentés dans le tableau II. L'apport de grenaille à 1 % a pour conséquence une réduction moyenne de la quantité d'arsenic extraite de 66 % (moyen pour les sols différents). Les essais ont confirmé le fort pouvoir immobilisant de la grenaille d'acier dans le cas de la Combe du Saut.

Evaluation de la phytotoxicité du sol avec et sans apport de grenaille d'acier

Deux types de tests de phytotoxicité ont été réalisés pour évaluer la phytotoxicité des échantillons de sols, et la réduction de cette toxicité induite par l'ajout de grenaille d'acier. Le premier est un test de croissance de plants de haricot (*Phaseolus vulgaris*). L'évaluation est basée sur des analyses morphologiques et des paramètres biochimiques (capacité des enzymes de stress) des plantes cultivées en conditions environnementales contrôlées. Des croissances réduites des plants testés et des hautes capacités d'enzymes de stress correspondent à des indications de substrats fortement phytotoxiques (Van Assche and Clijsters, 1990, Vangronsveld and Clijsters, 1992). En fonction de la réponse biologique, les substrats peuvent être rangés en classes de toxicité (classe 1 : non toxique ; classe 2 : légèrement toxique ; classe 3 : modérément toxique ; classe 4 : fortement toxique). Comparée aux tests de croissance, l'utilisation des enzymes de stress pour l'évaluation de la toxicité offre l'avantage d'être

Figures 6 et 7
Réponse à la croissance du haricot
(Phaseolus vulgaris)
sur des échantillons de sols du site
de la Combe du Saut, avec et sans
grenaille d'acier. La mesure
de la guajacol peroxydase (GPOD,
enzyme de stress) montre la disparition
de la phytotoxicité avec l'apport
de grenaille d'acier

Response to the growth of beans
(Phaseolus vulgaris) on soil samples
from the Combe du Saut site,
with and without steel shot.
The measurement of guajacol
peroxydase (GPOD, stress enzyme)
shows that phytotoxicity disappears
when steel shot is applied

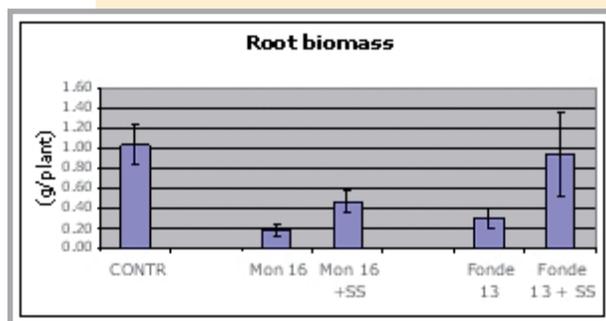
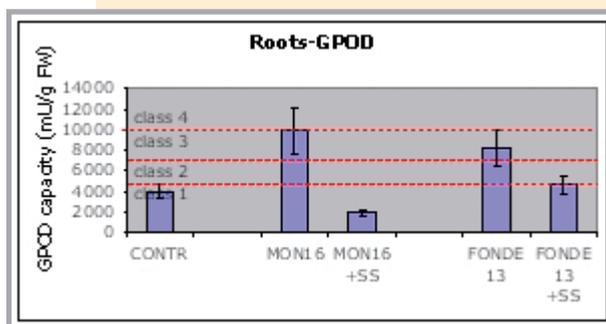


Tableau II
Concentration
dans les extraits
à l'eau des sols
prélevés
en différents lieux
avec et sans
grenaille d'acier
Concentration
in water extracts
of soils sampled
in various
locations with
and without steel
shot

	Emplacement	As total	As dissous dans l'eau	Réduction %
		(Eau régale) (mg/kg MS)	(mg/kg MS)	
Contrôle			<0.25	/
CAU 1	Emplacement 1	14200	584 ± 112 (a)	39%
CAU 1 + grenaille			360 ± 44 (b)	
CYAN 4	Emplacement 2	380	1.6 ± 0.1	82%
CYAN 4 + grenaille			0.29 ± 0.07	
CYAN 10	Emplacement 3	1250	7.1 ± 0.3	36%
CYAN 10 + grenaille			4.5 ± 0.4	
FONDE 13	Emplacement 4	815	17.6 ± 0.4 (a)	79%
FONDE 13 + grenaille			3.6 ± 0.6 (b)	
MON 16	Emplacement 5	115	8.3 ± 0.2 (a)	95%
MON 16 + grenaille			0.4 ± 0.1 (b)	

faiblement influencée par l'effet nutritif du sol. Pour deux emplacements du site de la Combe du Saut ("Monitoring" (Mon) et "Fonde"), le test de croissance du haricot a permis d'identifier des réponses différentes avec et sans grenaille d'acier (figures 6 et 7). Sans apport de grenaille d'acier la mesure de la capacité de l'enzyme de stress guajacol peroxydase (GPOD) révèle la présence de phytotoxicité (classe 3). La toxicité disparaît avec le mélange de la grenaille. Ce résultat est à mettre en parallèle avec la réduction de la quantité d'arsenic extraite présentée dans le tableau II.

Dans un second temps, les plantes sélectionnées lors de la première étape sont semées sur les échantillons de sols non traités et traités (photos 5 et 6), et leur courbe de croissance est enregistrée. Les résultats de ce test confirment celui du test de croissance des plants de haricot. Par exemple, comme illustré dans la photo 6, des symptômes de chlorose, indicateur de toxicité, sont visibles sur Lotus corniculatus et Onobrychis sativa, poussant sur les sols non traités MON 16, alors qu'ils ne sont pas identifiés sur les sols traités.

Essais sur planches tests construites sur le site

Cinq planches tests, dirigées dans le sens de la pente, ont été installées en différents lieux du site. Les planches sont divisées en deux parties : une première surface (5 x 20 m) estensemencée avec le mélange de semences (et après apport de grenaille d'acier pour quatre planches) et l'autre est laissée en l'état. Des caniveaux étanches couverts récupèrent séparément les eaux de ruissellement provenant des deux surfaces et les dirigent vers un dispositif de mesure (débit) et de collecte d'échantillons (sédiments, eaux). La concentration en ar-



Photos 5 et 6
Tests de croissance des plantes sélectionnées sur des échantillons
du site, avec et sans grenaille d'acier. La photo 6 montre
des symptômes de chlorose sur plusieurs espèces et pour le sol
non traité

Growth tests for selected plants on site samples, with and without
steel shot. Photo 6 shows chlorosis symptoms on several species
and for untreated soil





Photo 7
Planche test en mai 2005
Test section in May 2005

senic est mesurée dans les sédiments et les eaux. L'interprétation des données rend possible l'évaluation de l'effet de la phytostabilisation (et de l'immobilisation de l'arsenic) sur les eaux de ruissellement.

Le développement de la végétation sur les planches est appréhendé par la présence et l'abondance des différentes espèces, ce qui permet d'ajuster le mélange de semences utilisé pour la réalisation à grande échelle (photos 7, 8 et 9).

■ LA MISE EN ŒUVRE SUR SITE

La phase préalable de terrassement

Afin de réaliser les travaux de terrassement dans le délai contractuel, le groupement d'entreprises Bec (mandataire) - Cazal, a mobilisé deux échelons de pelles et tombereaux automoteurs pour extraire les 450 000 m³ de déchets et terres polluées. Le premier échelon est composé d'une pelle CAT 345 et de quatre à cinq tombereaux articulés A35 assurant un rendement journalier moyen de 3200 m³. Le deuxième échelon comprenant une pelle CAT 345 plus quatre tombereaux A35 réalisant une production de 2400 m³/jour.

La mise en œuvre dans le confinement a été faite par un bouteur D7, le compactage étant exécuté avec un compacteur vibrant type V5, une niveleuse MG14 et une arroseuse assurant l'entretien des pistes de chantier.

L'ensemble du matériel présent sur le chantier est équipé de filtre de pressurisation de cabine (type P3) afin de répondre aux exigences du marché en matière de sécurité.

La deuxième phase des travaux a démarré courant février 2006. Bec réalise la pose de 100 000 m² de géomembrane en bitume élastomère sur le confinement. La protection de l'étanchéité sera assurée par une couverture en matériaux d'apport, d'une épaisseur de 1,00 ml, qui seraensemencée par voie hydraulique (photos 10 et 11).



Photo 8
Croissance des végétaux après 2 semaines sans traitement (la végétation disparaît après 6 semaines)

Plant growth after two weeks without treatment (the vegetation disappears after six weeks)



Photo 9
Croissance des végétaux après 2 semaines avec traitement

Plant growth after two weeks with treatment



Photo 10
Terrassement des déchets et des sols pollués
Grading wastes and polluted soils



Photo 11
Ensemencement hydraulique des zones phytostabilisées
Hydroseeding of phytostabilised areas

Photo 12
Mesure de la concentration
en arsenic dans les sols

*Measurement of arsenic
concentration in the soil*



Photo 13
Epandeur
pour la grenaille d'acier
Steel shot spreader



Photo 14
Mélange
de la grenaille d'acier
avec le sol
par un casse-caillou
*Mixing of steel shot
with the soil
by a stone breaker*



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Volumes terrassés et confinés : 475 000 m³
- Surface phytostabilisée : 14 ha
- Grenaille d'acier apportée : 330 t
- Surface du confinement : 10 ha

La réception des zones décapées

La réception des zones terrassées est réalisée par une mesure *in situ*, à l'aide d'un appareil portable de fluorescence X de la marque Niton. De nombreux échantillons sont prélevés sur 15 cm d'épaisseur (avec repérage des coordonnées) et analysés. Sur des mailles carrées de plusieurs dizaines de mètres, des échantillons composites sont confectionnés et envoyés au laboratoire pour confirmer que la concentration mesurée est bien inférieure au seuil demandé par l'arrêté préfectoral, à savoir dans le cas de la Combe du Saut 3 000 mg/kg en As (photo 12).

■ APPLICATION À GRANDE ÉCHELLE DE LA PHYTOSTABILISATION

Quatorze hectares du site de la Combe du Saut possédant une pollution diffuse ou résiduelle encore élevée sont traités à la grenaille d'acier, afin de réduire l'assimilation de l'arsenic par les plantes. La période de stabilisation est d'un mois minimum après le mélange de la grenaille d'acier dans le sol. Les plantations, de semis et d'arbres, s'effectuent après ce temps de stabilisation.

Mode opératoire

La grenaille d'acier (type zz 156) est livrée par semi-remorques, conditionnée dans des bigbags de 2 t. L'épandage de la grenaille est réalisé, en un seul passage, avec un épandeur agricole tracté (Lely capacité 5 t).

Afin de pouvoir réaliser le malaxage et le broyage des zones rocheuses sur 15 cm, l'entreprise a mis en place un broyeur Kirpy WX 300. Ce type de matériel, permettant d'obtenir une mouture homogène, a été utilisé sur la totalité des zones. Un

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Ademe

Maitre d'œuvre

- Scetauroute
- IRH Environnement
- ICF Environnement

Laboratoire

Université Hasselt (Belgique)

Entreprises

Bec (mandataire) - Cazal

compactage systématique des zones traitées est effectué en fin de journée (photos 13 et 14).

Contrôle

Le contrôle du dosage de grenaille a été fait en réalisant des essais à la bêche (1 % de la densité sèche).

Le contrôle des épaisseurs, de la vitesse d'avancement de la machine et l'homogénéité de l'épandage et malaxage étant assuré par le chauffeur d'engin et le chef d'équipe (figure 8).

■ UN DISPOSITIF MIS EN PLACE POUR L'ÉVALUATION

Il faudra plusieurs années pour évaluer pleinement les effets du projet qui se terminera à l'automne 2006.

Un dispositif de suivi sera installé sur l'ensemble des réseaux de façon à pouvoir mesurer les débits et les concentrations résiduelles dans les eaux. L'objectif sera d'une part, de mieux appréhender les réels effets de la phytostabilisation et d'autre part de quantifier le flux résiduel de polluants qui migre encore vers l'environnement (photo 15).

■ CONCLUSION

Avant d'envisager l'utilisation de la phytostabilisation, une bonne connaissance de la pollution du site et des impacts est nécessaire. Des essais préalables doivent être réalisés pour décider si l'apport d'un amendement est nécessaire et lequel, pour sélectionner un mélange de semences adapté aux conditions du site et à la pollution. Par ailleurs il conviendra de s'assurer que les usages futurs du site sont compatibles avec le degré de



Figure 8
Points de mesures prévus pour l'évaluation finale

Planned measuring points for final evaluation

pollution résiduelle. Des servitudes pourront le cas échéant être décidées.

■ RÉFÉRENCES

- ADRIANO D.C. (2001). Trace elements in terrestrial environments. Springer-Verlag, New York, USA.
- BOISSON, J., MENCH, M., VANGRONSVELD, J., RUTTENS, A., KOPPONEN, P., DE KOE, T., 1999. Immobilization of trace metals and arsenic by different soil additives : evaluation by means of chemical extractions. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30 : 365-387.
- MENCH, M., VANGRONSVELD, J., LEPP, N., EDWARDS, R., 1998. Physico-chemical aspects and efficiency of trace element immobilization by soil amendments. p. 151-182 In : *In situ* inactivation and phytorestitution of metal contaminated soils. Vangronsveld J. and Cunningham S. (eds.). Springer-Verlag, ▶

Photo 15

Le site en mars 2006

The site in March 2006



Berlin Heidelberg and R.G. Landes Company, Georgetown, TX, USA.

- RUTTENS, A., COLPAERT, J., MENCH, M., BOISSON, J., CARLEER, R., VANGRONSVELD, J., 2006. Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. II : Influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil additives on metal leaching. *Env. Pollut.* (In Press).

- VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H., 1990. A biological test system for the evaluation of the phytotoxicity of metal-contaminated soils. *Environ. Pollut.* 66 : 157-72.

- VANGRONSVELD, J., CLIJSTERS, H., 1992. A biological test system for the evaluation of metal phytotoxicity and immobilization by additives in metal contaminated soils. p. 117-125. In : Merian, E., Haerdi, W. (eds.). *Metal compounds in environment and life, 4 (Interrelation between chemistry and biology)*. Science Reviews Inc., Wilmington, USA.

- VANGRONSVELD, J., CARLEER, R., CLIJSTERS, H., 1994. Transfer of metals and metalloids from soil to man through vegetables cultivated in polluted gardens : risk assessment and methods for immobilization of these elements in soils. In : Vanavas, S.P. (ed.). *Environmental contamination*. Edinburgh, CEP Consultants.

- VANGRONSVELD, J., CUNNINGHAM, S., 1998. Introduction to the concepts. In : *In situ inactivation and phytoremediation of metal contaminated soils*. Vangronsveld J. and Cunningham S. (eds.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg and R.G. Landes Company, Georgetown, TX, USA.

ABSTRACT

The rehabilitation of the La Combe du Saut mining site : a combination of the confinement of the waste and the soil phytostabilisation

Various authors

All over the world large mining sites and industrial areas exist that have been under exploitation for decades. The activities often generated an extensive soil contamination and remediation costs reach significant proportions. Recent research efforts have led to the development of new techniques to reduce the risks associated with such pollution. The objective of this paper is to present a case study where phytostabilisation was applied at large scale after having excavated and confined the most contaminated waste and soil. Phytostabilisation is a technique in which plants (often in combination with the use of soil amendments) are used to reduce the negative impact of contaminated areas. In the case of arsenic contamination like in La Combe du Saut, the aim of the technique is the colonisation of the site by a dense vegetation cover of adapted plant species, of which the fitness can be improved thanks to the addition of steel shots (an arsenic immobilising substance, which aims to decrease the phytotoxicity of the soil). The vegetation cover decreases the infiltration rate of the pollutant and the water and wind erosion of the polluted soil. Pollution transfer is thus limited.

RESUMEN ESPAÑOL

La rehabilitación de las instalaciones de la mina de la Combe du Saut : una combinación del confinamiento de los residuos y de la fitoestabilización de los suelos

Autores diversos

Algunas instalaciones industriales o mineras fueron explotadas durante decenas de años sobre superficies a veces importantes. Las actividades han podido generar una contaminación de los suelos y el coste de la descontaminación puede alcanzar en este caso

proporciones significativas. Los trabajos de investigación llevados a cabo durante el transcurso de estos últimos años permiten, hoy en día, proponer diversas nuevas técnicas para controlar las consecuencias de dicha contaminación. El objetivo de este artículo consiste en presentar un caso de ejecución a gran escala de la técnica de fitoestabilización de los suelos después de haber procedido a la excavación y confinamiento de los suelos que presentan una contaminación significativa. En el caso de una contaminación derivada del arsénico como ocurre en las instalaciones de la Combe du Saut, la técnica empleada tiene por propósito permitir la reconquista de la superficie mediante un importante recubrimiento de vegetales adaptados, y con ayuda de la aportación de granalla de acero (cuyo objetivo consisten en reducir la toxicidad de los suelos para las plantas). El recubrimiento vegetal permite limitar la infiltración de la contaminación así que la erosión del suelo contaminado por el agua y el viento. De ellos se deriva una disminución de la transferencia de contaminación.

Réaménagements de carrières chez Colas Midi-Méditerranée

Nicolas Galland
CHEF D'EXPLOITATION (MARSEILLE)
COORDINATEUR
DES CERTIFICATIONS
ENVIRONNEMENTALES
Colas Midi-Méditerranée

**Jean-François
Normand**
INGÉNIEUR GÉOLOGUE CARRIÈRES
Colas Midi-Méditerranée

Activité indispensable au dynamisme économique, mais soumise à des contraintes croissantes, l'exploitation de granulats est tenue de maîtriser ses impacts pour assurer sa pérennisation, notamment en montrant ses compétences quant au réaménagement de ses anciens sites d'extraction.

Après quelques rappels sur les principaux textes applicables aux réaménagements de carrières, Colas Midi-Méditerranée, filiale du groupe de construction routière, implantée dans le Sud de la France, expose ses réalisations en la matière, puis présente les techniques employées pour parvenir à des résultats adaptés aux particularités de chaque site.

L'activité de production de granulats pour le bâtiment et les travaux publics répond à un besoin continu en ces matériaux, chiffré entre 7 et 8 t par habitant et par an. C'est cette demande qui détermine la nécessité de transporter les matériaux, et la cadence à acheminer. Par conséquent, les unités de production doivent se tenir les plus proches possible des zones de consommation de granulats, pour minimiser les inconvénients liés au transport : coût répercuté à la collectivité, consommation d'énergie non renouvelable, impact sur la sécurité routière.

Parallèlement, l'extension de la population, et donc des emprises urbaines et du tissu routier, engendre une pression croissante sur l'espace. Des carrières initialement implantées en zones rurales sont rattrapées par les villes. Cette activité étant par nature consommatrice d'espace, elle entre en compétition avec le développement de l'urbanisation à laquelle, paradoxalement, elle contribue, ainsi qu'avec le maintien des surfaces agricoles et la protection des zones naturelles... Il est donc impératif que les anciennes zones d'extraction trouvent une réaffectation satisfaisante et en adéquation avec les besoins locaux, qu'il s'agisse de zones d'activités, de terres cultivables, de parcs de loisirs, de bases nautiques, d'espaces naturels, ou encore de bassins écrêteurs de crues.

Dans un contexte où l'ouverture de nouvelles carrières est rendue difficile par la multiplication des contraintes qui s'y appliquent, l'« après-carrière » doit donc faire partie intégrante d'un projet d'exploitation, car représentant l'une des principales conditions de son acceptation par la collectivité. Les carrières présentent par ailleurs une grande diversité :

- ◆ contexte périurbain ou rural ;
- ◆ extraction en roche massive à l'explosif, ou alluvionnaire ;
- ◆ avec des productions annuelles allant de quelques milliers de tonnes à plusieurs millions de tonnes ;

- ◆ dans des environnements tout à fait variables (zones classées, présence d'espèces protégées, ou bien milieu sans intérêt écologique particulier...);
 - ◆ des contextes socioécologiques différents ;
 - ◆ des pressions locales plus ou moins importantes...
- L'ensemble de ces paramètres conduit à des réaménagements qui se doivent de répondre au mieux aux exigences de ces parties intéressées.

Les évolutions réglementaires et leurs applications aux réaménagements

Alors que les carrières étaient précédemment sous un régime d'autorisation municipale, la loi n° 70-1 du 3 janvier 1970 portant modification de diverses dispositions du Code minier les a soumises à autorisation préfectorale. La réglementation impose alors uniquement que le site soit, lors de la cessation d'activité, rendu dans un état tel qu'il n'engendre pas de danger pour le public ni de risque patent pour l'environnement.

Par la suite, le décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979 a appliqué aux carrières l'obligation de joindre aux demandes d'autorisation une étude d'impact ; c'est dans ce document qu'est notamment exposé le projet d'exploitation et de remise en état, selon un phasage conçu si possible de manière coordonnée, dans le but de laisser le moins d'espace possible en travaux.

Ce même décret a été abrogé en juin 1994 à l'occasion du rattachement des carrières aux installations classées ; cela n'a pas modifié l'obligation de remise en état, qui est donc maintenant inscrite de longue date dans le droit français. Malgré tout, en termes d'image de marque, les industries extractives actuelles demeurent tributaires des séquelles de certaines exploitations menées dans le passé, et plus précisément d'évolutions indésirables de ces sites après le départ du carrier, dès qu'ils ne font plus l'objet d'une gestion par celui-

Photo 1
Seuil de régulation
des eaux de crue
Overflow control weir



Photo 2
Ilot, berges talutées
et végétalisées
*Island, sloped
and revegetated banks*



Photo 3
Parcours
de santé
Health run



Photo 4
La gravière des Mées
et son avifaune
*The Mées gravel pit
and its birdlife*



ci, ni par conséquent d'un contrôle régulier par son administration de tutelle, la DRIRE.

D'où l'intérêt, non seulement de remettre le site en état afin qu'il s'intègre au mieux dans son environnement, mais également de s'assurer qu'une affectation stable permettra d'en assurer une gestion pérenne ; c'est ainsi que la simple remise en état devient un réaménagement.

Pour sécuriser le premier de ces deux objectifs, l'exploitation de chaque carrière nécessite, en vertu du décret n° 96-18 du 5 janvier 1996, la mise en place d'une garantie financière. Cette caution bancaire est calculée de manière à pouvoir couvrir, en cas de défaillance de l'exploitant, les coûts engendrés par la remise en état prévue dans l'arrêté préfectoral d'autorisation. De plus, le plan annuel de situation prescrit par l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994, et donc depuis lors par chaque arrêté préfectoral d'autorisation de carrière, doit illustrer les zones remises en état, ce qui en facilite le contrôle par l'administration.

En revanche, concernant le second objectif, la réglementation nationale n'impose pas de prescriptions particulières en matière de réaménagement paysager et d'affectation à terme. C'est alors le carrier qui, en établissant des partenariats adaptés, peut apporter dans son étude d'impact les informations relatives à la gestion future du site.

Il apparaît quelquefois, en accord avec les autorités et les associations concernées, en fonction d'évolutions du contexte local, de l'exploitation ou des exigences des tiers, que le plan de réaménagement soit revu ou que la finalité du réaménagement change.

De façon générale, c'est l'environnement du site, sa morphologie et son contexte politique ou social qui conditionnent les modes de réaménagements employés. Nous verrons que, dans un même site, l'emploi de plusieurs techniques différentes est nécessaire pour aboutir à un réaménagement réussi. Dans l'immédiat, voici les principaux réaménagements opérés par les filiales carrières de Colas Midi-Méditerranée.

■ QUELQUES RÉALISATIONS

Gravière d'Aigues-Vives (30) : prévention des inondations

La gravière d'Aigues-Vives se situe entre Montpellier et Nîmes, à proximité du Rhony, un affluent du Vidourle. Cette exploitation des Etablissements Lazard extrait des matériaux alluvionnaires de la Vistrenque, qui sont caractérisés par leur couleur jaune.

La gravière, proche de zones inondables, a été aménagée de manière à pouvoir jouer le rôle de bassin écrêteur des crues. Un seuil a été aménagé afin de canaliser la surverse des eaux des crues du

Rhony vers le lac. En 2005, la crue du 6 septembre a engendré une augmentation du niveau du lac de 1,20 m, ce qui correspond au stockage de 240000 m³ d'eau, limitant ainsi l'impact sur les communes situées en aval : Aimargues et Le Cailar.

D'autre part, de manière complémentaire, la gravière sera réaménagée en lac à vocation de base de loisirs. Les usages multiples de ce futur site touristique ont rendu nécessaire la création de berges végétalisées à pentes variées, de deux plages (travaux en cours) ainsi que d'îlots et de zones à faible profondeur favorisant d'ores et déjà le développement de la faune et de la flore (photos 1 et 2).

Lac de la gravière des Mées (04)

L'ancienne gravière des Mées est située dans la plaine de la Durance, aux environs de Château-Arnoux (Alpes-de-Haute-Provence). Elle a été exploitée de 1983 à 1998 par la société Perasso. Le réaménagement de ce site s'est traduit par la création d'un lac destiné à la pêche, entouré d'un chemin de promenade avec des aires de pique-nique.

Les berges ont été remblayées et talutées, le substratum limoneux a été par endroits couvert de graviers naturels criblés (dits "roulés") afin de rendre les berges plus accueillantes pour les promeneurs. Aujourd'hui, sur le site, cohabitent des cygnes et canards colverts qui y nichent, les pêcheurs ainsi que des promeneurs. Plus aucun vestige de l'ancienne activité industrielle ne peut rappeler que ce plan d'eau est une ancienne zone d'extraction de granulats (photos 3 et 4).

Remblai et talutage de la gravière de Saverdun (09)

La carrière d'alluvions silico-calcaires de Saverdun, exploitée par les Etablissements Siadoux, se trouve en Ariège, à quelques kilomètres au nord de Pamiers.

Dans un secteur où plusieurs gravières sont en activité, l'objectif ciblé du réaménagement est la recolonisation rapide des berges et des terrains remblayés pour une intégration rapide du site dans son environnement. Après réaménagement, les étangs devraient tous être transformés par leurs propriétaires en espaces de détente et de loisirs. Les berges du lac sont remblayées, talutées avec des angles de pente différents selon la nature du milieu recherché. Ces variations de pentes permettent une recolonisation naturelle plus rapide et plus diversifiée (photos 5 et 6).

Reboisement de la sablière de Cazan (13)

Cette carrière à ciel ouvert, située sur la commune de Lambesc (Bouches-du-Rhône) et proche d'Aix-



Photo 5
Petit pont sur les eaux calmes
Small bridge over quiet water



Photo 6
Plantation de saules au bord de la gravière
Willow plantation on the edge of the gravel pit



Photo 7
Plantation après talutage de la zone d'extraction
Plantation after sloping of the quarrying area

en-Provence, extrait des éboulis de pente calcaires à matrice sableuse. Elle est exploitée par la société Midi Concassage.

L'environnement local du site se compose d'un bois de pins d'Alep et d'éperons rocheux calcaires partiellement couverts de garrigue.

Les fosses d'extraction déjà exploitées ont été remblayées et talutées, et l'étude des ruissellements a été optimisée afin de limiter les eaux stagnantes et les zones de ravinements excessifs. Les matériaux de surface étant drainants, le choix des variétés d'arbres à planter a dû être adapté.

Les quatre essences principales retenues furent le chêne vert, le chêne pubescent, le genêt spartier et le pin d'Alep, afin de favoriser la reprise rapide de l'écosystème local. L'espace est aujourd'hui recolonisé en outre par des essences arbustives de la garrigue : ciste cotonneux, dorycnium, romarin, argelas (ajonc de Provence)... (photos 7 et 8).

Zone écologique de la gravière des Laurons (04)

La gravière des Laurons est localisée à Manosque (Alpes-de-Haute-Provence), en bordure de la Durance. Elle a été ouverte en 2003 par les Etablissements Lazard.

L'exploitation et la remise en état du site consistent, à partir d'une zone agricole autrefois conquise sur la forêt alluviale, à recréer un milieu humide durancien. Actuellement en voie de raréfaction, ce genre de biotope est favorable aux oiseaux, insectes et batraciens, et pourrait assurer la pérennisation des castors dans le secteur. Après son ré-



Photo 8
Talutage et reboisement
Sloping and afforestation

Photo 9
Zone humide
des Laurons
*Laurons wet
area*



Photo 10
Développement de phragmites
dans la zone humide
*Development of warblers
in the wet area*



Photo 11
Envol de canards.
Gravière des Laurons
*Flight of ducks.
Laurons gravel pit*



Photo 12
Fronts sommitaux réaménagés
(talutage, vieillissement
de roches, plantations...)
*Reclaimed tops of quarry faces
(sloping, rock ageing,
plantations, etc.)*

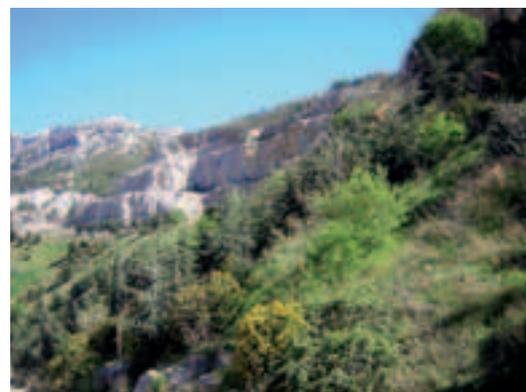


Photo 13
Partie basse des fronts sud réaménagée
Reclaimed lower part of the southern faces

aménagement, le site sera géré par la commune de Manosque qui a présenté un projet de site pédagogique d'observation de la faune et de la flore. La particularité de ce réaménagement consiste en la réalisation de zones humides par excavation, ainsi qu'en la création volontaire de berges abruptes favorisant l'implantation d'espèces qui apprécient d'y nidifier et de s'y alimenter. Une zone périphérique de prairie sèche est recrée pour servir de milieu d'étude aux chercheurs. Elle est remblayée avec des matériaux issus du creusement des zones humides et de la terre de découverte, puis replantée d'espèces locales.

Une récente modification du projet initial de réaménagement permet de maintenir sur son lit actuel un ruisseau affluent de la Durance et son boisement rivulaire (photos 9, 10 et 11).

Carrière de roches massives de Saint-Tronc (13)

La carrière de calcaire Perasso à Saint-Tronc est située en périphérie de Marseille, dans un vallon du massif du Mont Carpiagne, au nord des Calanques. En bordure directe de la ville, le site se trouve dans un paysage montagneux, partiellement recouvert de garrigue. Cette carrière est exploitée en "dent creuse", mais la perception lointaine des fronts sommitaux demeure inévitable.

Pour limiter la visibilité de la zone d'extraction, un écran rocheux est maintenu durant la phase d'exploitation et de remise en état des fronts sommitaux. Quand ceux-ci parviennent à leur position définitive, des tirs de mines sont laissés en place, des matériaux meubles sont apportés en talutage, puis ensemencés, dans un double objectif de reverdissement et de stabilisation. La végétalisation est ensuite complétée par des plantations, le choix des espèces ayant été effectué avec l'assistance de l'INRA.

Un vieillissement de roche par projection d'oxydes

a permis l'acquisition immédiate d'une patine plus sombre que les fronts de taille, et d'aspect semblable aux rochers naturels environnants. Enfin, les carreaux inférieurs de la carrière sont progressivement remblayés avec des matériaux inertes, en réponse à une forte demande de l'agglomération marseillaise en sites d'accueil de ces remblais. Les différentes méthodes de réaménagement utilisées sur le site ont permis de contribuer à la limitation de l'impact visuel, à l'intégration paysagère, et à terme à la recolonisation de ces espaces par la faune et la flore locales (photos 12 et 13).

■ PRINCIPALES TECHNIQUES UTILISÉES

Talutage

Dans une carrière de roches massives, les secteurs où l'on choisit de ne pas conserver des fronts affleurants doivent faire l'objet d'un terrassement, appelé talutage (terme également utilisé pour les carrières de roches meubles, et en travaux publics), qui consiste à donner à une pente de terrain un profil harmonieux.

Ce résultat est obtenu par le remaniement de matériaux meubles sur place, et/ou l'apport de tels matériaux, par exemple des stériles issus du décapage du gisement ou de son traitement, ou bien encore des remblais inertes (cf. ci-après).

Le talutage peut être réalisé dans le but de constituer une pente régulière, ou de créer des modelés plus ondulés, en fonction des nécessités d'intégration paysagère propres à chaque site, et pour maîtriser les risques de ravinement liés au climat local et à la granulométrie des matériaux superficiels (figures 1 et 2).

Tir de mines

Afin d'interrompre par endroits la linéarité des fronts et banquettes, on peut procéder à des tirs dont on laisse en place les matériaux, en les remaniant si nécessaire à l'aide d'une pelle hydraulique.

Il en résulte un éboulis rappelant un pierrier naturel qui, outre son intérêt paysager, représente un habitat apprécié par diverses espèces animales, en particulier : reptiles, petits mammifères, certains oiseaux, quelques amphibiens, et de nombreux arthropodes (figures 1 et 3).

Vieillessement artificiel

Les carrières de calcaire et d'autres matériaux clairs, par exemple certains granites, engendrent souvent un contraste visuel important avec leur environnement immédiat. Afin d'atténuer cet impact, un vieillissement artificiel des fronts peut être proposé. Il consiste à projeter sur les parois à traiter

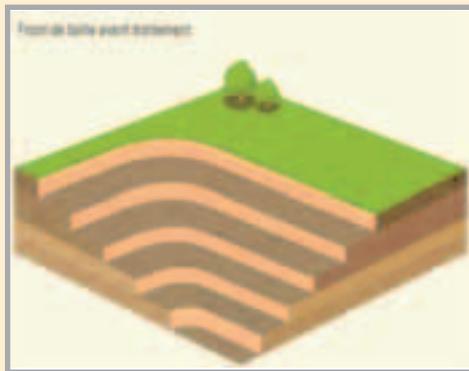


Figure 1
Front de taille avant traitement
Quarry face before treatment

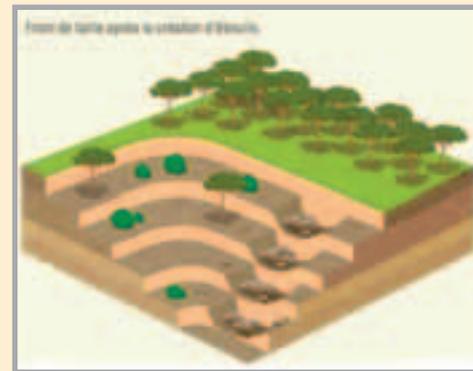


Figure 3
Front de taille après la création d'éboulis
Quarry face after creation of talus scree



Figure 2
Front de taille après talutage
Quarry face after sloping

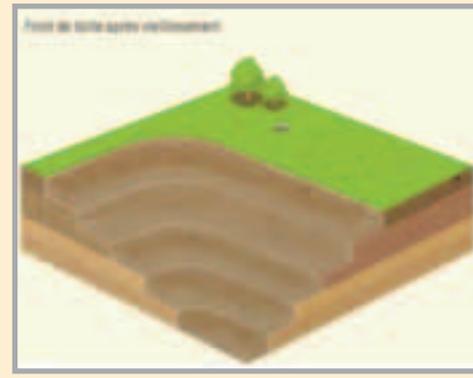


Figure 4
Front de taille après vieillissement
Quarry face after ageing

une substance permettant l'acquisition immédiate d'une patine plus sombre que la roche, et d'aspect semblable à une patine naturelle. L'adoption de cette technique impose le choix de procédés inoffensifs pour l'écosystème existant, et compatibles avec une recolonisation normale de la roche par les lichens qui constituent la patine naturelle, puis par la végétation saxicole (figures 1 et 4).

Remblai par des matériaux inertes

Les carrières représentent des sites privilégiés pour mettre en dépôt définitif de type "classe 3" (remblais inertes) des matériaux excédentaires de chantiers, en proposant pour cet usage des superficies qu'il faudrait sinon développer aux dépens de zones agricoles ou naturelles. Ces dépôts peuvent être gérés conjointement avec des centres de tri et de valorisation de matériaux inertes, dans lesquels la fraction recyclable est traitée par une installation de concassage-criblage, et réutilisée dans les chantiers du BTP.

Les apports de matériaux sont soumis à un processus de contrôle destiné à garantir le caractère inerte des matériaux mis en remblai. En particulier, le déversement des matériaux ne doit pas être effectué directement sur la zone à remblayer, mais dans un premier temps sur une aire appropriée, d'où ils sont repris, après contrôle, par un engin (chargeuse ou boteur) qui les met en place sur le



Figure 1
Front de taille avant traitement
Quarry face before treatment

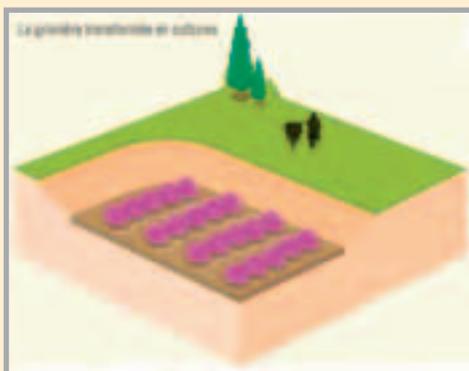


Figure 7
La gravière transformée en cultures
Gravel pit converted into crops



Figure 5
Après le remblai
After backfilling



Figure 8
Front de taille après "hydroseeding"
Quarry face after hydroseeding

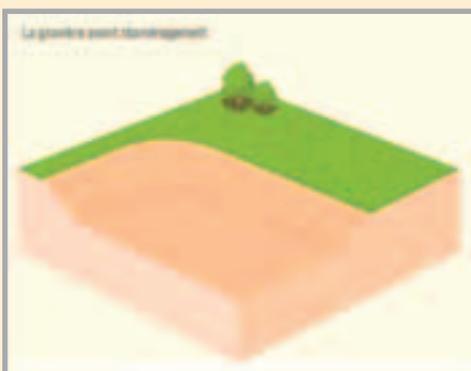


Figure 6
La gravière avant réaménagement
Gravel pit before reclamation



Figure 9
Front de taille après plantation
Quarry face after planting

La terre végétale doit avoir été stockée en tas de faible hauteur pour conserver ses qualités arables, puis être régalée sur une épaisseur suffisante (de l'ordre de 30 cm, selon la technique de labour). La première année un semis de luzerne, trèfle, ou autre espèce fixatrice d'azote, aide à atteindre des rendements normaux les années suivantes. Ce type de réaménagement peut être appliqué tant aux extractions de roches meubles qu'aux carreaux finaux des carrières de roches massives (figures 6 et 7).

Ensemencement hydraulique

Pour ensemer les terrains en pente, où l'emploi d'engins agricoles est impossible, on peut adopter un procédé classiquement employé dans la RTM (restauration des terrains en montagne) : l'ensemencement hydraulique, ou "hydroseeding". Cette technique consiste à projeter sur la pente un mélange de graines, de fibres de cellulose aidant à leur fixation, et éventuellement d'engrais. Elle permet d'une part de stopper le ravinement susceptible d'affecter les matériaux récemment mis en place, d'autre part d'accélérer l'intégration paysagère du secteur traité.

Il faut cependant veiller à utiliser des espèces déjà présentes localement, ou au moins des espèces qui cèdent la place rapidement à la flore spontanée, afin de préserver les possibilités d'évolution vers une composition floristique intégrée à l'écosystème local (figures 1 et 8).

Végétalisation par plantation

Cette opération répond à trois objectifs principaux : paysager, écologique, géotechnique. Paysager car, dans le cas général, l'ensemencement ne permet l'implantation que de végétaux herbacés, or une pente simplement herbeuse peut être inadaptée au paysage local, notamment en contexte de forêt, de lande arbustive ou de garrigue. De plus, des plantations sur les merlons périphériques renforcent l'effet de masque visuel tout en leur conférant un aspect naturel.

Écologique car, moyennant un choix judicieux des espèces à planter, celles-ci offrent le gîte et le couvert à de nombreuses espèces animales et végétales, et peuvent contribuer à créer ou rétablir des corridors biologiques ; on veillera donc à retenir des espèces adaptées au contexte local.

Géotechnique car, si l'ensemencement permet une fixation rapide de la surface du sol, la stabilité des talus dépend entre autres de l'implantation d'une végétation à enracinement plus profond.

Les techniques varient selon les espèces et le sol d'accueil : plantation en motte ou racines nues, âge des plants, arrosage initial, protection contre les rongeurs. Il est souhaitable de souscrire un entretien et une garantie de reprise, avec le cas échéant



lieu de dépôt définitif. Les remblais sont ensuite recouverts de terre en vue de permettre l'implantation de la végétation (figures 1 et 5).

Réaménagement agricole

Lorsque l'extraction laisse subsister des superficies suffisantes hors d'eau, ces terrains peuvent être réaménagés en vue d'un usage agricole (cultures, vergers, vignes, prés de fauche, pâtures). Pour ce faire, le modelage doit être étudié en vue de permettre le libre écoulement des eaux pluviales vers la périphérie du terrain, les mouillères étant des secteurs de moindre productivité, de surcroît gênants pour le passage des machines agricoles.

un remplacement des sujets morts (figures 1 et 9). Tout comme dans le cas du réaménagement agricole, les superficies hors d'eau peuvent faire l'objet d'une valorisation, en l'occurrence une réaffectation forestière.

Les espèces possibles peuvent être différentes de celles utilisées en réaménagement paysager ou écologique, dans le cas où l'objectif est principalement économique (cas des peupleraies en plaine alluviale, par exemple) (figures 10 et 11).

Création d'un lac

L'exploitation de gravières en lit majeur de cours d'eau fournit l'occasion, grâce à la présence de la nappe phréatique d'accompagnement, de créer des plans d'eau, qui sont le plus souvent affectés à la pêche de loisirs ou la pisciculture.

Les lacs issus de gravières de grandes dimensions peuvent également être réaménagés en bases de loisirs nautiques, comme il en existe de nombreux exemples, en particulier à proximité des grandes agglomérations.

Les plans d'eau issus de gravières sont générateurs d'une biodiversité presque toujours plus intéressante que celle du terrain initial, en particulier si les profondeurs issues de l'extraction sont diversifiées. Il est à ce titre souhaitable de créer des hauts-fonds qui, outre leur rôle dans la colonisation végétale du site, constituent des frayères permettant aux plans d'eau de pêche de renouveler de façon autonome leur peuplement de poissons (figures 12, 13 et 14).

Constitution de milieux humides

Ce procédé répond principalement à un objectif de réaménagement écologique. En complément à la création des plans d'eau, il est possible de terrasser certaines berges en constituant des mares temporaires ou permanentes, favorables aux amphibiens, libellules, et autres groupes d'animaux comprenant des espèces patrimoniales. Afin d'éviter la prédation des œufs et larves par des poissons, ces mares doivent être séparées des plans d'eau principaux.

Dans d'autres cas, l'exploitation des alluvions à sec peut être complétée par un surcreusement permettant à la nappe d'affleurer sur une faible tranche d'eau, en assurant également une diversification des profondeurs pour offrir des biotopes favorables à de nombreuses espèces animales et végétales. Tant en gravière qu'en carrière de roches massives, les bassins de décantation des eaux de procédés et les bassins de collecte d'eaux pluviales créent, y compris en cours d'exploitation, des milieux vite colonisés par la végétation locale, ne nécessitant que peu d'interventions lors du réaménagement pour acquérir un intérêt écologique optimal (figures 10 et 15).

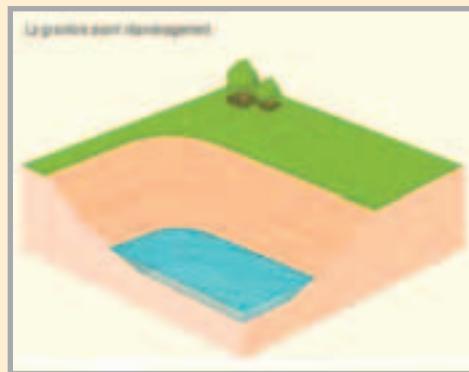


Figure 10
La gravière avant réaménagement
Gravel pit before reclamation

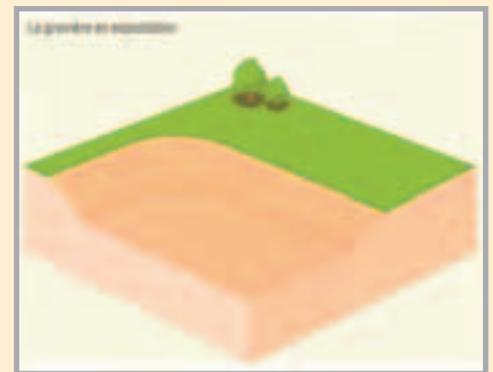


Figure 13
La gravière en exploitation
Gravel pit in operation

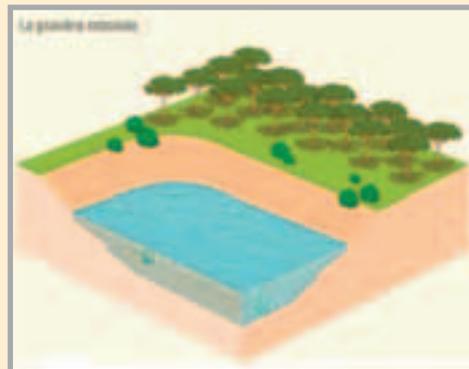


Figure 11
La gravière reboisée
Afforested gravel pit

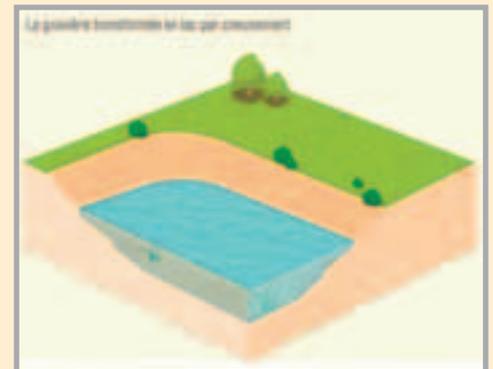


Figure 14
La gravière transformée en lac par creusement
Gravel pit converted into a lake by digging

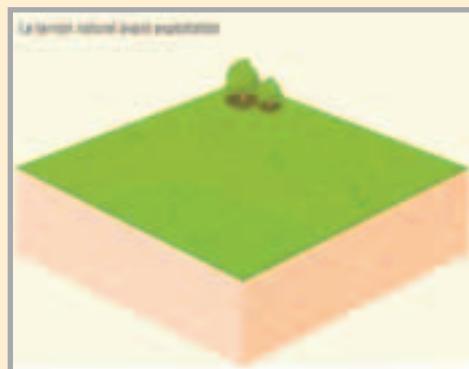


Figure 12
Le terrain naturel avant exploitation
Natural ground before operations

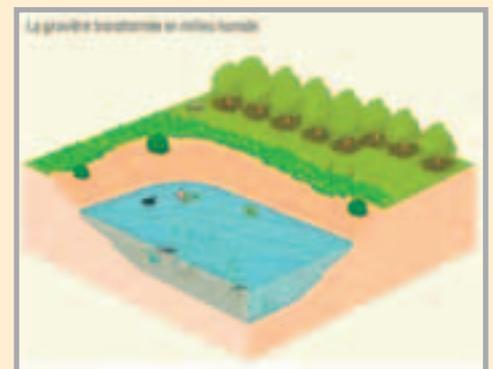


Figure 15
La gravière transformée en milieu humide
Gravel pit converted into a wet area

Talutage des berges

Tant pour les gravières en eau que pour les carrières de matériaux meubles à sec, le réglage des pentes du terrain final permet de restituer un espace utilisable et harmonieux.

Les matériaux mis en œuvre sont, selon les cas et les stades du réaménagement : le terrain en place non exploité (limites du gisement autorisé, enclaves inexploitable), la reprise des stériles stockés, des apports extérieurs de remblais inertes, et en dernier lieu la terre arable qui permettra la végétalisation. On peut utiliser pour ces opérations les matériels suivants : pelle hydraulique, bouteur, voire chargeuse.

De façon générale, en vue de la recolonisation biologique du site, une berge est d'autant plus inté-

ressante qu'elle comprend des sinuosités, des îlots, des plages alternativement exondées et inondées en fonction des battements de nappe. Il est également souhaitable, selon les matériaux présents, de maintenir ou créer quelques escarpements meubles, permettant la nidification d'espèces telles que le guêpier d'Europe ou l'hirondelle de rivage (figures 10 et 16).

CONCLUSIONS

Les réaménagements réalisés hier et aujourd'hui conditionnent l'accès aux réserves exploitables de demain.

Bien que les granulats soient une ressource indispensable, la pérennité de l'activité à l'échelle locale est sans cesse remise en cause par des réactions de type "Nimby" ("pas à côté de chez moi"), qu'il convient de prévenir, en particulier par la présentation de réaménagements en adéquation avec les attentes des riverains, des politiques et des autorités.

En effet, tandis que les carrières mènent régulièrement des actions de nature à améliorer leur image de marque, communiquent sur leurs performances environnementales et réaménagent les sites de manière de plus en plus originale en cherchant à satisfaire aux demandes des parties intéressées, nous assistons à des demandes extérieures de plus en plus poussées et pointues de la part de l'administration, de riverains ou d'associations. La sensibilité à l'environnement de manière globale, s'est accrue et paraît toucher une fraction croissante de la population, au gré des projets qui suscitent parfois l'apparition de comités de défense créés pour la circonstance.

Quels que soient la taille et le type de carrière, l'industrie extractive est à l'origine d'impacts d'intensité variable sur l'environnement naturel et/ou humain. Mais le regard que l'on peut porter sur les carrières actuelles montre que ces impacts restent limités, et la faune et la flore reprennent rapidement le dessus dès lors que l'extraction s'arrête. Les réaménagements de sites présentés dans cet article ont montré que l'extraction de granulats conduit souvent à la création de nouveaux espaces de vie, tant pour les activités humaines que pour l'environnement naturel. Le réaménagement des carrières permet, sur un même site, d'apporter une diversité de milieux souvent plus importante qu'à l'origine, ce qui entraîne une croissance de la biodiversité.

Ainsi, l'activité extractive doit être perçue non pas comme une consommation d'espace, mais simplement comme un "emprunt" de ces surfaces, générateur de valeur ajoutée pour la collectivité, tant pendant qu'après l'exploitation.



Figure 16
La gravière talutée

*Sloped
gravel pit*

ABSTRACT

Quarry reclamation at Colas Midi-Méditerranée

N. Galland, J.-Fr. Normand

Aggregate quarrying, which plays an essential role in a vital economy but is subject to increasing constraints, must control its impacts to ensure its sustainability, especially by showing its competence with regard to reclamation of its former quarry sites.

Following a few reminders concerning the main legislation applicable to quarry reclamation, Colas highway construction group's subsidiary Colas Midi-Méditerranée, located in southern France, outlines its achievements in this area and then describes the techniques employed to achieve results adapted to the specific features of each site.

RESUMEN ESPAÑOL

Reacondicionamientos de canteras en Colas Midi-Méditerranée

N. Galland y J.-Fr. Normand

Actividad indispensable al dinamismo económico, pero sometida a limitaciones incrementales, la explotación de áridos tiene obligación de controlar sus impactos para asegurar su perennización, demostrando concretamente sus competencias relativas al reacondicionamiento de sus antiguas instalaciones de extracción.

Después de alguna rememoración acerca de los principales textos aplicables a los reacondicionamientos de canteras, Colas Midi-Méditerranée, filial del grupo de construcción vial, implantada en el Sur de Francia, expone sus realizaciones en el aspecto, y a continuación presenta las técnicas empleadas para llegar a conseguir los resultados adaptados a las particularidades de cada instalación.

Réhabilitation évolutive d'un site industriel à Granville

La réhabilitation du site de Soferti à Granville a été entreprise à partir d'une solution originale basée sur une barrière perméable réactive. Une étude détaillée a permis d'adapter le principe aux nombreuses contraintes du site et de faire évoluer la solution en fonction des très nombreux aléas attendus. La solution définitive comprend une station de traitement dimensionnée en anticipant les besoins selon un arbre de décision.

La leçon à retenir de cette expérience de réhabilitation de site industriel au passé chargé est : prévoir une solution évolutive s'adaptant aux aléas.

Jean-Jacques Kachrillo



DIRECTEUR GÉNÉRAL
ADJOINT
Sol Environnement

Dominique Mazzieri



INGÉNIEUR EXPERT
Solétanche Bachy

Yannick Charlot



CHEF DE PROJETS
AU DÉPARTEMENT
RÉHABILITATION
ET GESTION
DE TERRAINS
INDUSTRIELS
Total DG Chimie

■ L'AVANT-PROJET SOMMAIRE

Jusqu'en 1996 la société Soferti a exploité, à Granville, sur un terrain au riche passé industriel, une usine de fabrication d'acide sulfurique et d'engrais. La création de l'usine remonte à 1832. Actuellement, seule subsiste une activité de conditionnement des engrais.

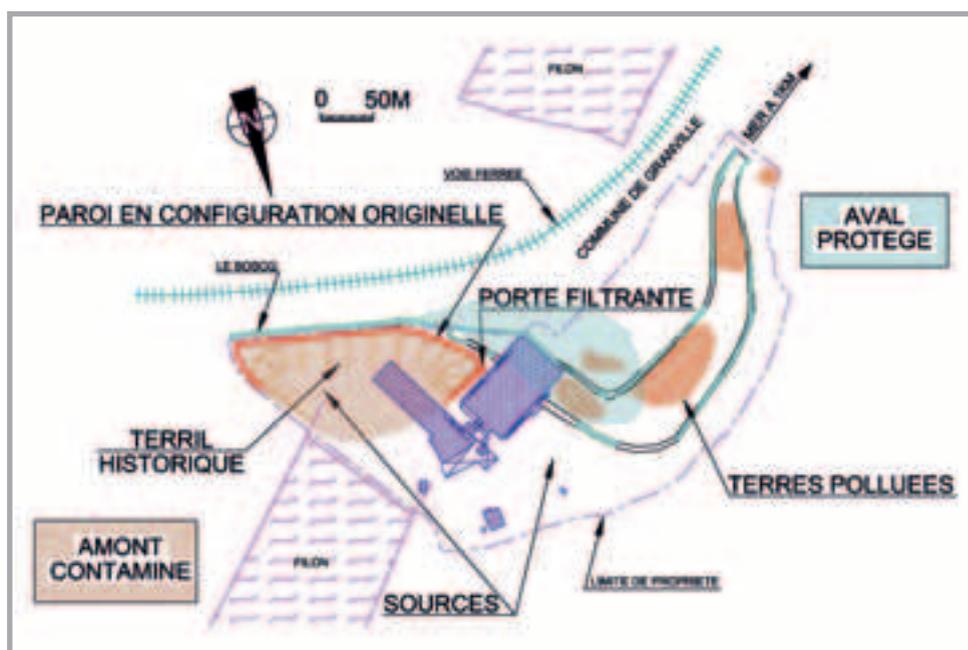
A la suite de l'arrêt de l'activité de production, plusieurs études environnementales ont été conduites. Elles ont montré l'existence de zones polluées. Depuis 1998, Soferti est soumise à un suivi environnemental portant entre autres sur la qualité des eaux de la rivière le Bosq qui traverse le site. Un avant-projet sommaire de réhabilitation a été rédigé. Il prévoyait de réaliser :

- ◆ l'excavation des terres polluées repérées en différents endroits du site et leur dépôt en terril ;
- ◆ la couverture du terril ;
- ◆ une paroi étanche séparant la rivière le Bosq de la source de contamination constituée par le terril. Il préconisait également la réalisation d'une modélisation des écoulements de la nappe phréatique pour mieux comprendre leur régime afin d'y adapter la solution.

C'est la société Sol-Expert International qui a remporté l'appel d'offres pour l'établissement de l'avant-projet détaillé, en présentant une solution originale basée sur la réalisation d'une barrière perméable réactive.

Le présent article décrit le modèle qui a été élaboré, le schéma de la réhabilitation réalisée et les travaux correspondants.

A fin 2005, la plus grande partie des travaux était achevée et il était possible d'en tirer les enseignements.



■ L'AVANT-PROJET DÉTAILLÉ

Principe de la solution

Une première solution de principe avait été proposée par Sol-Expert International dans son offre (figure 1).

Contenu de l'avant-projet détaillé

L'exécution du marché d'APD par Sol-Expert International a donné lieu à la réalisation d'une campagne de reconnaissance comportant :

- ◆ 25 sondages carottés ;
- ◆ des analyses physico-chimiques sur prélèvements ;
- ◆ des relevés piézométriques ;
- ◆ des essais de pompage ;
- ◆ des sondages à la pelle mécanique.

Ces données ont été introduites dans le modèle pour valider la compréhension du fonctionnement hydrochimique du site.

Figure 1
Principe de la solution initiale au stade de l'APD
Schematic of the initial solution at the detailed preliminary design stage

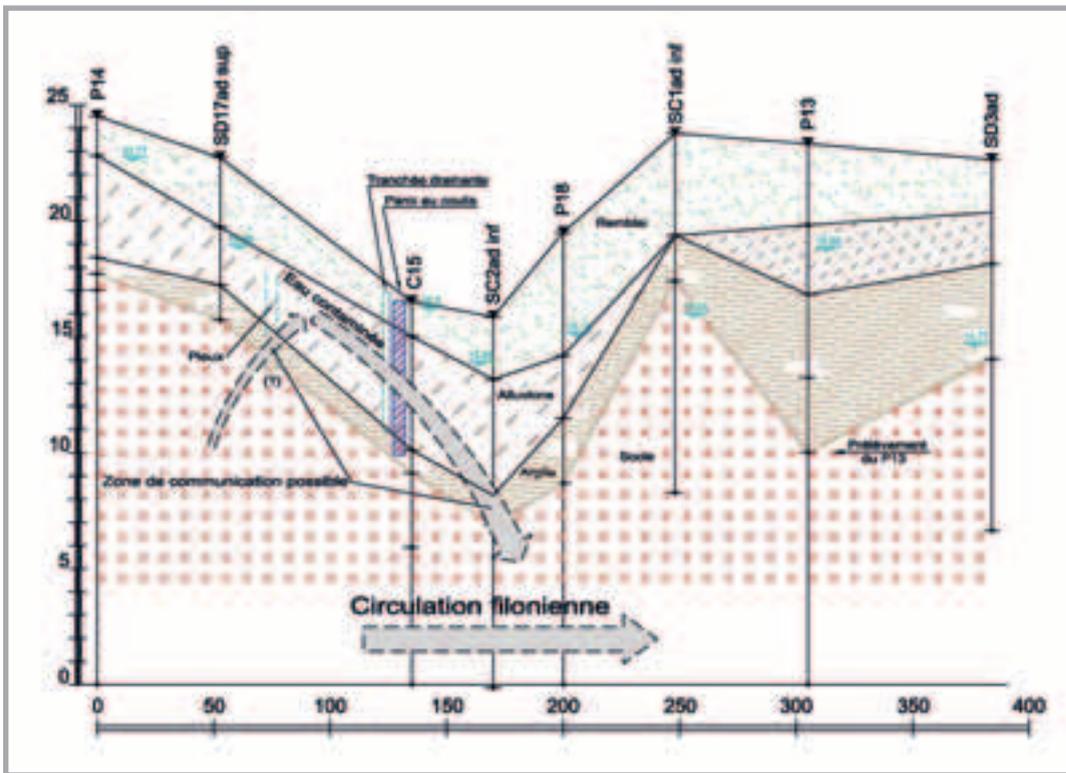


Figure 2
Coupe explicative des circulations d'eaux souterraines
Explanatory cross section of groundwater flows

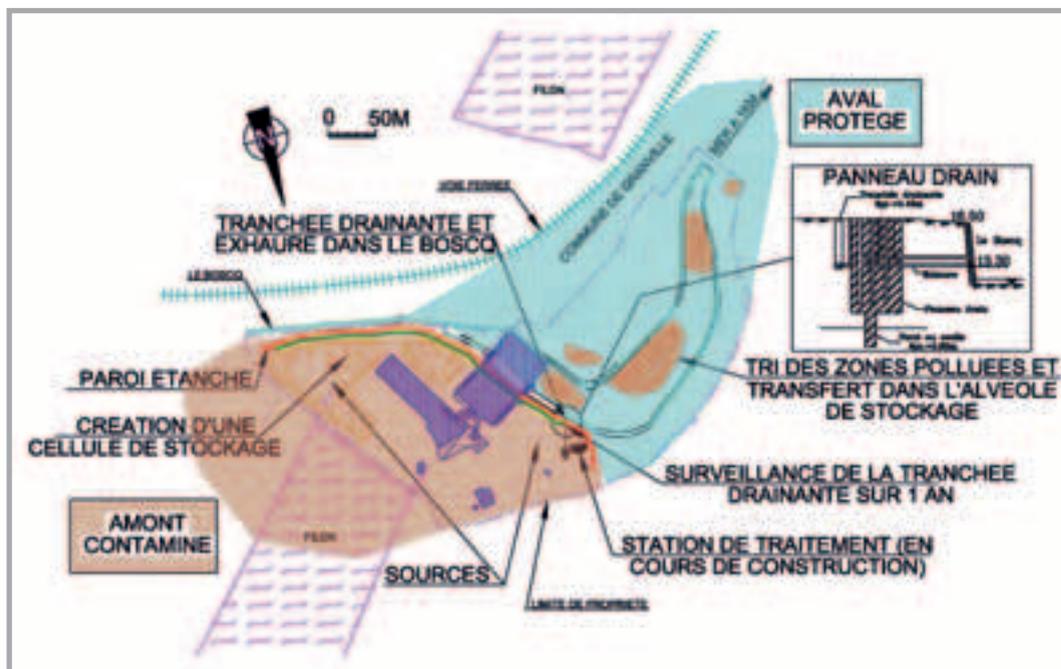


Figure 3
Principe de la solution retenue
Schematic of the solution adopted

Conclusions de la campagne de reconnaissance

Géologie

Le site de Soferti est situé à un coude du Bosq au droit d'un linéament hercynien marqué par une fracturation importante du socle.

La coupe type des terrains est la suivante :

- ◆ remblais pouvant atteindre 8 m d'épaisseur, notamment au droit du terril de dépôt principal ;
- ◆ alluvions : sur une épaisseur variant de 0 à 5 m, sables fins hétérogènes plus ou moins perméables passant latéralement et en bord de thalweg à des argiles sableuses ;

- ◆ couche argileuse d'une épaisseur variant de 1,3 m à plus de 6 m au droit du terril ;
- ◆ substratum schisto-gréseux fracturé, notamment au droit de la zone polluée et par endroits à plus de 10 m de profondeur.

Hydrogéologie

Le site est caractérisé par deux nappes distinctes. La première correspond aux alluvions et est alimentée par le Bosq mais surtout par les venues d'eaux collinaires qui sont essentiellement des sources, parfois canalisées. La seconde, qui règne dans le socle briovérien, est localement en charge et correspond à des circulations dans les fissures. Les deux nappes sont séparées, mais les essais de pompage ont montré que des communications étaient possibles. L'origine de cette communication a été recherchée mais n'a pu être formellement identifiée. On hésite entre des lacunes dans la couche d'argile et des passages créés lors de la perforation de la couche d'argile par les pieux supportant l'usine (figure 2).

La perméabilité des terrains qui sont le siège des circulations de surface varie de 10^{-3} m/s à 10^{-5} m/s.

Contamination de la nappe

La contamination de la nappe superficielle est essentiellement due au nickel. Elle correspond à un épisode précis de l'histoire de l'usine, à savoir l'utilisation de sulfure de nickel pour la fabrication d'acide sulfurique.

Dans les sondages, les teneurs maximales observées sont de 3 à 5 mg/l.

Cette contamination, dont l'origine se situe dans la partie aval du terril, s'étend au-delà des limites de ce terril et notamment sous l'usine.

En conséquence, il a été décidé à ce stade de modifier le tracé de la barrière séparant l'amont du site de l'aval et de l'étendre le long du Bosq jusqu'à la paroi rocheuse bordant l'ouest du site.

Présentation de la modélisation

La modélisation a représenté dans ce projet un point de passage obligé puisqu'elle a en effet constitué un outil indispensable à la compréhension du comportement hydrogéologique du site, nécessaire à la prise de décision.

Les différentes étapes de l'élaboration du modèle ont été les suivantes.

En premier lieu, un schéma conceptuel en trois dimensions du domaine d'études à modéliser a été établi.

Pour ce faire, à l'aide du logiciel SURFER, ont été réalisées des interpolations de la topographie et des interfaces des différentes couches reconnues lors des investigations. Le contexte géologique et structural du site a été simplifié pour permettre l'analyse.

C'est sur ce schéma qu'une modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale a pu être conduite, en régime permanent.

L'objectif était de réaliser un calage de la piézométrie de la nappe alluviale en prenant en compte les relations entre la rivière et la nappe, les recharges probables aussi bien par alimentation latérale que par alimentation verticale issue des précipitations.

Suite à ce calage purement hydraulique, une modélisation hydrodispersive a été réalisée, toujours en régime permanent, avec cette fois un calage sur le suivi des concentrations en solutés métalliques, As, Ni, Pb principalement. L'étude réalisée à ce jour n'a pris en compte, pour le transfert de solutés en milieu poreux, que les phénomènes dispersifs.

Une seconde simulation hydrodynamique pure a permis d'étudier l'influence du dispositif prévu de paroi étanche associée à une paroi drainante sur la piézométrie de la nappe et d'optimiser ce dispositif.

Les logiciels les plus adaptés à cette problématique sont SURFER pour les interpolations, MODFLOW pour la modélisation de l'hydrogéologie du site, MTD3 pour la modélisation du transfert de masse, et MODPATH qui permet de suivre le trajet d'une particule d'eau dans un modèle d'écoulement en milieu poreux.

La complexité du site a fait qu'il n'a pas été possible d'atteindre une précision très élevée sur le débit d'exhaure de la tranchée drainante, qui a finalement été estimé dans la fourchette comprise entre 0,5 m³/h et 10 m³/h. Mais ces simulations ont été déterminantes pour orienter le dessin du projet en fonction des particularités de ce site.

■ CONCLUSION DE L'ÉTUDE D'AVANT-PROJET DÉTAILLÉ

Au terme de l'étude d'APD, la solution envisagée initialement (figure 1) a été modifiée pour tenir compte de l'extension de la pollution des eaux souterraines à l'aval de l'usine sous le bâtiment de stockage (figure 3).

Par rapport au schéma initial (figure 1), la différence principale repose :

- ◆ sur le tracé du couple paroi/tranchée drainante étendu à l'ensemble du site et non limité au terril;
- ◆ en corollaire, compte tenu de la surface drainée et de la présence de sources dans le périmètre drainé, sur l'incertitude du débit de la tranchée drainante selon la présence ou non de sources et de communications entre la nappe de surface et les écoulements dans les schistes sous-jacents.

En conséquence et sur la base du principe général de séparer l'amont contaminé de l'aval protégé, le schéma de réhabilitation est le suivant :

- ◆ création de deux cellules de stockage destinées à recueillir les volumes de terre polluée identifiés



Photo 1
Réalisation de la paroi au coulis dans le bâtiment de stockage

Execution of the grout wall in the storage building

à l'aval de l'écran étanche ainsi que les déblais de la paroi ;

- ◆ partage du site entre l'amont, contaminé, et l'aval, protégé, par un écran étanche ancré dans la couche argileuse.

- ◆ drainage de l'amont par une tranchée drainante parallèle à l'écran, dont le but est d'abaisser le niveau de la nappe sous les déchets du terril, avec un exutoire calé sur le niveau du Bosq à l'aval du site ;

- ◆ surveillance du site pendant un an et, en parallèle :

- détournement des sources identifiées,
- étude de moyens pour diminuer le flux entrant dans le site par la tranchée drainante amont, si le débit est trop important,

- ◆ mise en place du traitement de l'exhaure de la tranchée drainante selon le principe suivant :

- de 0 à 2 m³/h : mise en place d'une porte filtrante,
- de 2 à 4 m³/h : étude d'une porte filtrante alternative en fonction des conditions physico-chimiques,
- au-delà de 4 m³/h : station de traitement par coagulation-floculation.

■ RÉALISATION DES TRAVAUX

Les travaux ont commencé en septembre 2003 et comportent les principaux éléments suivants.

Alvéole de stockage

Cette alvéole en deux parties, d'un volume d'environ 28000 m³, est destinée à recueillir les terres polluées et les déblais de paroi. Elle est restée ouverte pendant plusieurs mois. Une couverture provisoire a été mise en place ainsi que, dans l'alvéole, un système de séparation des eaux drainées avec deux couches drainantes superposées.

Paroi étanche

La paroi au coulis a été réalisée à la pelle (photo 1). L'acidité des eaux souterraines, dont le pH peut descendre à 4, ainsi que la présence de sulfates,

► a conduit à privilégier l'usage d'un coulis adjuvanté avec des cendres volantes.

Paroi drainante

Compte tenu de la présence d'obstacles et de vestiges dans le sous-sol, il a fallu recourir à des coffrages (photo 2).

Photo 2
Réalisation
de la tranchée
drainante

*Execution
of the drainage
trench*



Photo 3
Panneau-drain
une fois posé

*Drain panel
after laying*



Exhaure de la tranchée drainante

L'exhaure de la tranchée est calée au niveau du Bosq. Un panneau-drain (photo 3) a permis d'installer le tuyau d'exhaure au travers de la paroi sans interrompre celle-ci (photo 4).

Surveillance de l'exhaure de la tranchée drainante

Cette surveillance a permis de déterminer des mesures correctives et de choisir le mode de traitement.

Ainsi, après une courte période de stabilisation, le débit de la tranchée sur 1 an s'est établi entre 2,5 et 5 m³/h avec des teneurs en Ni de l'ordre de 5 à 8 mg/l. Si le débit s'est cantonné dans la partie basse de la fourchette envisagée, les teneurs en Ni, en revanche, sont plus élevées qu'on ne l'attendait puisque les investigations réalisées avaient conduit à une estimation de 2,5 mg/l.

Des mesures correctives ont été décidées : la purge de zones spécifiques à l'intérieur de l'usine et la déviation de petites sources. Elles n'ont cependant pas été suffisantes pour diminuer notablement le débit et le flux de nickel.

Parallèlement, des essais en laboratoire ont été entrepris pour voir si de tels flux pouvaient faire l'objet d'un traitement au moyen d'une porte filtrante à filtres renouvelables. Ces essais n'ont pas été concluants à cause du débit trop élevé.

La décision de construire une petite station de coa-

gulation-floculation a alors été prise en janvier 2005. Elle est opérante depuis avril 2006.

■ CONCLUSION

Modéliser un site modifié par l'activité humaine n'est pas une tâche simple. Le niveau d'incertitude dû aux aléas conduit à choisir une solution de réhabilitation souple et évolutive.

Dans le cas d'espèce, c'est le suivi de l'exhaure de la tranchée drainante qui a permis de choisir la solution la mieux adaptée pour traiter le flux pollué.



Photo 4
Exhaure des eaux de la tranchée drainante dans la rivière

Water drainage from the drainage trench into the river

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Soferti

Assistance maîtrise d'ouvrage

Burgeap

Avant projet détaillé

Sol-Expert International

Entreprise générale

Solétanche Bachy France

Construction de la station de traitement

Groupement Sol Environnement - Hytec - CEO

Terrassement

Loisel TP

Etanchéité de la couverture

Immunia

ABSTRACT

Adaptable reclamation of an industrial site in Granville

J.-J. Kachrillo, D. Mazzieri, Y. Charlot

Reclamation of the Soferti site in Granville was undertaken using an original solution based on a reactive permeable barrier. A detailed study enabled the principle to be adapted to the numerous site constraints, with the solution evolving to cope with the very numerous unknown factors expected. The final solution consists of a treatment plant designed by anticipating needs in accordance with a decision tree. The lesson to be learned from this experience of reclamation of an industrial site with an eventful past is to provide for an evolving solution adapting to unknown factors.

RESUMEN ESPAÑOL

Rehabilitación evolutiva de una planta industrial en Granville

J.-J. Kachrillo, D. Mazzieri e Y. Charlot

La rehabilitación de la planta de Soferti en Granville fue iniciada a partir de una solución original fundada en una barrera permeable reactiva. Un estudio exhaustivo ha permitido adaptar el principio a las numerosas restricciones de la planta y hacer evolucionar la solución con arreglo a los muy numerosos riesgos que se vislumbran. La solución definitiva incluye una estación de tratamiento dimensionada anticipando las necesidades según un árbol de decisión.

La lección que se debe retener de esta experiencia de rehabilitación de planta industrial que fue objeto de un pasado muy importante : prever una solución evolutiva que se adapta a los riesgos.

Réhabilitation du site

L'expertise d'Inertec dans dangereux

L'expertise d'Inertec en matière de traitement des déchets dangereux s'est particulièrement illustrée à l'occasion des travaux de réhabilitation de l'ancien site de Métaleurop Nord. Une cartographie des résidus dangereux, pour assurer leur traçabilité, a été réalisée au cours des opérations de déconstruction à l'aide d'une base de données associée à un Système d'Information Géographique. Cette opération a précédé le traitement sur site par stabilisation et neutralisation de plus de 7 700 t de déchets toxiques et corrosifs. La présence de métaux lourds et de pH extrêmes rendait l'opération particulièrement difficile.



Photo 1
Vue générale du site
de Noyelles-Godault
*General view
of the Noyelles-Godault site*

Photo 2
Echantillonnage
des résidus sur site
*Sampling residues
on site*



Métaleurop Nord, filiale de Métaleurop SA, groupe européen spécialisé dans la métallurgie des métaux non ferreux, était implantée depuis 1894 sur le site de Noyelles-Godault, près de Douai, dans le département du Pas-de-Calais (photo 1). L'exploitation de la fonderie de zinc et plomb, classée "Seveso 2", a brutalement pris fin en janvier 2003, laissant sur une cinquantaine d'hectares de nombreux déchets dangereux : résidus de process, déchets liés à l'activité, pollution historique.

Le 12 novembre 2003, le tribunal de grande instance de Béthune a désigné Sita comme reprenneur du site de Métaleurop Nord. Expert, entre autres,

en dépollution des sols, Sita a imaginé un projet de réhabilitation d'ensemble dénommé "Agora", qui allie le respect de l'environnement à une volonté de redéploiement économique durable.

Le projet « Agora » est mis en œuvre en trois étapes :

- ◆ mise en sécurité du site et la préparation du projet ;
- ◆ travaux de remise en état du site ;
- ◆ redéploiement économique.

Pour la première étape de ce projet d'envergure, Inertec, filiale de Solétanche Bachy et de Sita, a mis à disposition son savoir-faire dans le domaine des déchets dangereux, en intervenant à la fois sur l'identification des résidus, sur le choix de leur voie d'élimination et sur leur traitement.

En effet, parmi les problématiques majeures rencontrées dans cette opération de réhabilitation de site, figure l'inventaire des déchets, l'organisation de leur traçabilité, l'identification des principaux dangers qu'ils présentent et le choix de la voie d'élimination la mieux adaptée.

Afin de répondre à ces problématiques, Inertec a développé un outil spécifique composé d'une base de données techniques reliée à un Système d'Information Géographique (SIG).

Lors du repérage des résidus sur le terrain, des échantillons sont prélevés pour analyse (photo 2). Une référence unique est créée pour chaque déchet, permettant d'en assurer la traçabilité depuis leur repérage jusqu'à leur élimination finale.

Pour chaque déchet répertorié, les informations col-

de Métaleurop Nord le traitement des déchets

Philippe



de Rochebouët
DIRECTEUR GÉNÉRAL
Inertec

Alain Barbier



DIRECTEUR
D'EXPLOITATION
Inertec

David Verschuere



INGÉNIEUR D'AFFAIRES
Inertec



Photo 3
Repérage par GPS de la position des résidus
Locating the position of residues by GPS

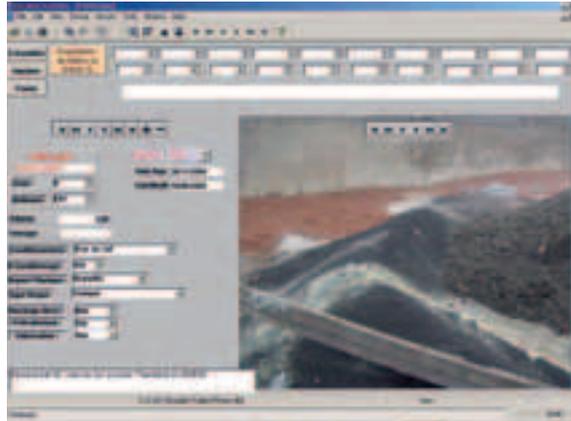


Figure 1
Fiche d'Identité
"Produit"

"Product" ID Card



Figure 2
Cartographie des déchets dangereux, vue d'ensemble
Hazardous waste mapping, overall view

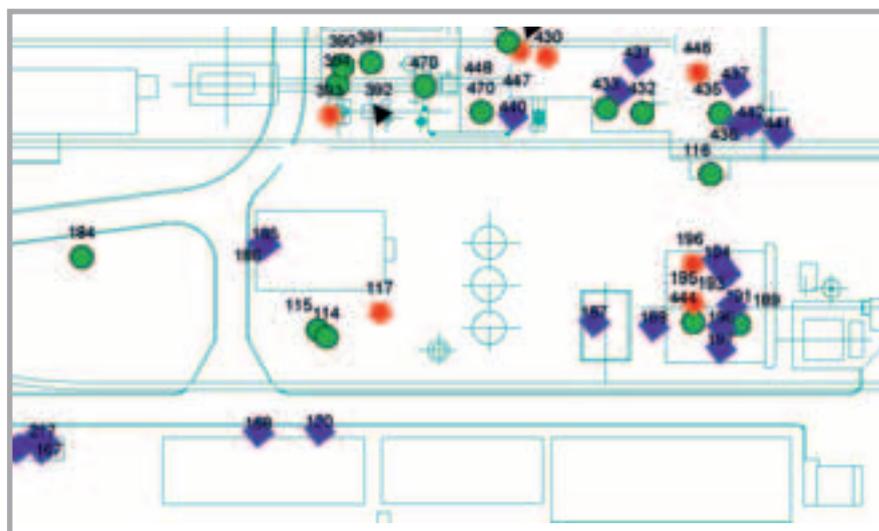


Figure 3
Cartographie des déchets dangereux, détail
Hazardous waste mapping, detail

lectées sont centralisées dans la base de données. Il s'agit de la localisation géographique¹ (photo 3), du volume et du tonnage estimés, de l'aspect physique, du mode de conditionnement et du résultat des analyses effectuées en laboratoire (analyse de la composition totale et analyse après lixiviation). Un caractère de risque est associé à chaque résidu, permettant une localisation aisée des dangers lors de la rédaction des plans de prévention. Toutes ces informations sont réunies dans une fiche d'identité produit, soumise au contrôle et à l'approbation du maître d'ouvrage, qui permet de suivre à chaque instant le déchet (figure 1). Il est alors possible de définir la voie d'élimination la mieux adaptée à chacun des résidus (stockage direct en alvéole de confinement interne, prétraitement avant stockage, élimination extérieure, valorisation...). Des plans peuvent ainsi être édités, localisant chaque déchet en fonction de sa voie d'élimination (figures 2 et 3).

1. Localisation géographique : Une carte du site est enregistrée dans la mémoire d'un ordinateur de poche de type PDA (Personnal Digital Assistant) utilisé sur le terrain lors des campagnes d'inventaire et échantillonnage. Cet ordinateur de poche est équipé d'un module GPS qui permet d'associer des coordonnées géographiques à chaque déchet référencé, permettant ainsi de le localiser sur la carte.

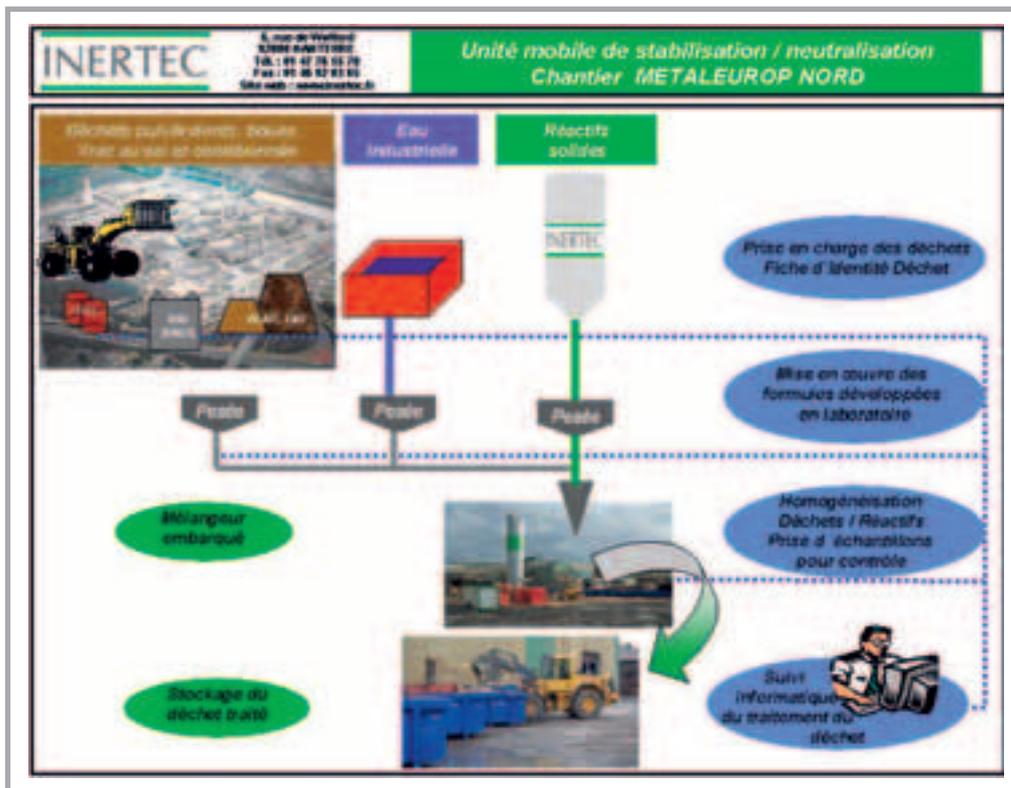


Figure 4
Schéma du processus de traitement

Diagram of the treatment process

L'outil développé répond aux exigences de l'arrêté préfectoral régissant le démantèlement et la réhabilitation du site. Il permet en effet de créer un document d'archive regroupant toutes les informations relatives aux déchets lors de leur élimination vers l'alvéole de confinement, après un traitement préalable si nécessaire, ou lors de leur évacuation vers une filière externe.

Les chimistes d'Inertec ont ainsi examiné les 89 bâtiments du site. Cette campagne a permis de répertorier plus de 920 déchets dangereux et de les enregistrer dans la base de données. En parallèle, le laboratoire d'Inertec – situé à Vernon (Eure) – a réalisé plus de 500 analyses. Les déchets dangereux ont ensuite été collectés et regroupés selon leur nature et leur type de pollution.

La base de données ainsi constituée a aussi permis d'appréhender au mieux les risques chimiques à prendre en compte par les entreprises chargées de la déconstruction du site. La dangerosité des déchets, ajoutée à leur diversité, impose le respect de règles strictes en matière d'hygiène et sécurité au cours des phases de manipulation. Elle requiert une analyse rigoureuse permettant de mettre en place les équipements et les mesures de protection parfaitement adaptés.

Activ'Cœur Environnement, société coopérative de conseil pour le démantèlement, fondée par cinq ex-salariés de Métaeurop Nord, disposait de documents répertoriant les produits ayant pu être utilisés sur le site en fonctionnement.

Les contrôles médicaux, les audits sécurité et les inspections des organismes officiels tels que

la CRAM garantissent la bonne adéquation des moyens et des méthodes utilisés.

En plus de l'inventaire des déchets dangereux, Inertec a été chargée de leur traitement par stabilisation/neutralisation avant stockage en alvéole sécurisée. Deux campagnes de traitement ont été menées, l'une d'octobre 2004 à janvier 2005, l'autre de septembre 2005 à février 2006.

Le mode de traitement des déchets résiduels du site a été développé de façon spécifique pour répondre à chacune des problématiques suivantes :

- ◆ les déchets sont aussi divers que toxiques : granulats, poudres, boues plus ou moins humides. Les polluants rencontrés résultent d'une combinaison d'arsenic, d'antimoine, de zinc, de plomb et de cadmium ;

- ◆ on constate une totale dissémination des déchets sur l'ensemble du site ;

- ◆ l'alvéole de confinement n'étant opérationnelle qu'après la fin de la première phase de traitement, les déchets stabilisés doivent être entreposés puis repris lors de la mise en exploitation de l'alvéole ;

- ◆ les opérations sont effectuées sous le contrôle permanent des administrations.

En conséquence, Inertec a développé un mode de traitement spécifique à ce chantier, tant pour la formule de stabilisation/neutralisation que pour la mise en œuvre (figure 4).

Les formules développées ont fait appel à une sélection de réactifs assurant un traitement de stabilisation/neutralisation, quelle que soit la source et la typologie du déchet rencontré. Les objectifs visés étaient de deux natures :

- ◆ physique : obtention, en final, de granulés de déchets traités pouvant être aisément repris lors du transfert définitif vers l'alvéole ;

- ◆ chimique : stabilisation des métaux lourds et respect des critères d'acceptation en alvéole de confinement interne au site, définis par arrêté préfectoral, après test de lixiviation selon les normes NF X30402-2. Pour la mise en œuvre : une unité mobile a été spécialement développée et implantée sur place (photo 4). L'homogénéisation du mélange des déchets aux réactifs de traitement s'effectuait dans un mélangeur monté sur un chargeur mobile capable de récupérer les déchets sur le site et de vidanger le mélange stabilisé sur la zone de stockage temporaire.

Les équipements de sécurité ont fait l'objet d'une attention particulière et les opérateurs ont été soumis à un contrôle médical continu pendant toute la durée des opérations.

Un contrôle qualité rigoureux a été exercé du début à la fin du chantier par prélèvement en sortie du malaxeur d'échantillons de matériau traité qui ont été répertoriés et analysés au laboratoire.

Les analyses sur éluats, après 28 jours de maturation des échantillons, ont confirmé les performances du traitement conformément au cahier des charges portant sur la stabilisation des éléments

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Superficie du site : 50 ha
- 89 bâtiments
- 100 000 t de déchets (y compris gravats, amiante, bois)
- 100 opérateurs
- 926 types de déchets distincts référencés
- Plus de 550 analyses en laboratoire
- Plus de 7 700 t de déchets traités par stabilisation/neutralisation



Photo 4
Unité mobile de traitement Inertec
Inertec mobile treatment unit

polluants et le respect des seuils d'admission en alvéole de confinement interne.

A l'issue des différentes campagnes de traitement, c'est plus de 7 700 t de déchets dangereux contenant du zinc, du cadmium, de l'arsenic et du mercure, ainsi que des composants à pH extrêmes, qui ont été traitées par stabilisation/neutralisation. C'est bien une réponse globale dans le respect de l'environnement et de la sécurité des opérateurs que la société Inertec a apportée pour réaliser le démantèlement et la dépollution du site Métaleurop Nord.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Sita Agora

Assistance au démantèlement

Activ'Cœur Environnement

Démantèlement

Cepi

Lavage des installations et aspiration des pulvérulents

Saninord

Désamiantage et démolition

Stips TI

Inventaire et traitement des déchets dangereux

Inertec

Conception et exploitation de l'alvéole de confinement

Sita FD

ABSTRACT

Reclamation of the Métaleurop Nord site. Inertec's expertise in hazardous waste treatment

Ph. de Rochebouët, A. Barbier, D. Verschuere

Inertec's expertise in the area of hazardous waste treatment was illustrated in particular on the occasion of reclamation work on the former Métaleurop Nord site. Mapping of hazardous residues, to ensure their traceability, was performed during the deconstruction operations using a database linked to a Geographic Information System (GIS). This operation preceded treatment on site by the stabilisation and neutralisation of more than 7,700 tonnes of toxic and corrosive wastes. The presence of heavy metals and extreme pH levels made the operation extremely difficult.

RESUMEN ESPAÑOL

Rehabilitación de las instalaciones de Métaleurop Nord. La pericia de Inertec en el tratamiento de los residuos peligrosos

Ph. de Rochebouët, A. Barbier y D. Verschuere

La pericia de Inertec en el aspecto de tratamiento de los residuos peligrosos se ha ilustrado particularmente con motivo de los trabajos de rehabilitación de la antigua planta de Métaleurop Nord. Una cartografía de los residuos peligrosos, para garantizar su trazabilidad, se ha llevado a cabo durante las operaciones de demolición por medio de una base de datos asociada con un Sistema de Información Geográfico (SIG). Esta operación ha precedido el tratamiento in situ mediante estabilización y neutralización de más de 7 700 toneladas de residuos tóxicos y corrosivos. La presencia de metales pesado y de valores extremos en cuanto a pH han venido a dificultar particularmente la operación.

Assistance intégrée à De Casablanca la Blanche

L'axe autoroutier Casablanca – Marrakech s'intègre dans la logique de la liaison Agadir – Rabat. Cet axe structurant permettra au Royaume du Maroc de tenir un rôle prépondérant en tant que pôle d'échanges et de transit. L'article décrit le projet et ses caractéristiques techniques puis montre en quoi la coopération entre Scetauroute et Autoroutes du Maroc a été fructueuse.

Extrait carte secteur Settat - Marrakech
Excerpt from Settat-Marrakesh sector map



DESCRIPTION DU PROJET

L'axe autoroutier Casablanca – Marrakech s'intègre dans la logique de la liaison Agadir – Marrakech – Casablanca – Rabat. Le réseau autoroutier se poursuit d'une part vers le nord (Tanger puis l'Europe) et d'autre part vers l'est pour constituer la Transmaghrébine reliant le Sud marocain et la Mauritanie au Sud Tunisien et la Libye.

Cet axe, lorsqu'il sera ouvert à la circulation, permettra au Royaume du Maroc de tenir un rôle prépondérant en tant que pôle d'échanges et de transit. Autoroutes du Maroc (ADM) est à la fois concessionnaire du réseau autoroutier, maître d'ouvrage et maître d'œuvre de ces opérations.

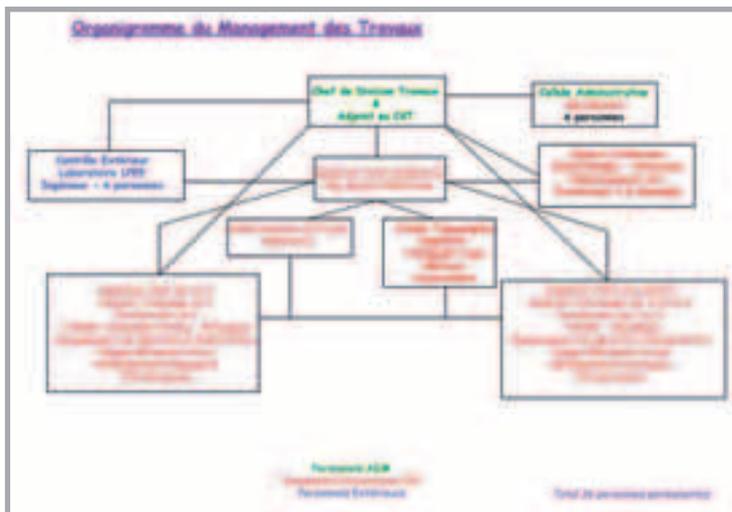
Trois groupements d'entreprises ont été retenus pour cette réalisation :

- ◆ le premier groupement est constitué des entreprises Sintram – Megec – Sotravo – La route du nord;
- ◆ le second groupement est constitué des entreprises Houar – Seprob – SNCE – Somagec;
- ◆ le troisième groupement est constitué des entreprises El Hajji – Sefiani – Arab Contractors – Handassa.

Vue générale des terrassements à l'origine des travaux
General view of earthworks at the work starting point



Organigramme management travaux
Work management organisation chart



MARCHÉ ET DÉLAI

Etudes et décisions antérieures

- Date de notification du marché : 6 juillet 2004
- Date de démarrage de la période de préparation : 26 juillet 2004

Délais d'exécution

Délai global : 29 mois dont :

- à la fin du 4^e mois au plus tard, achèvement des opérations prévues pendant la période de préparation, soit le 25 novembre 2004;
- à la fin du 16^e mois au plus tard :
 - exécution de 50 % des remblais courants,
 - exécution de 50 % des bétons B20 à B30, soit le 25 novembre 2005;
- à la fin du 26^e mois au plus tard, achèvement des travaux de terrassements, drainage et les ouvrages d'art, soit le 25 septembre 2006;
- à la fin du 28^e mois au plus tard, achèvement des travaux d'assainissement, soit le 25 novembre 2006;
- à la fin du 29^e mois, opération de nettoyage et repliement du chantier, soit le 25 décembre 2006



maîtrise d'œuvre à Marrakech

Deux autres marchés importants accompagnent ces travaux :

- ◆ la construction de l'échangeur de Benguéir confiée à un groupement d'entreprises Sintram – Megec ;
- ◆ la réalisation de l'ouvrage de franchissement de l'oued Benguéir confiée à l'entreprise Houar.

Tracé

La section s'inscrit dans un couloir qui inclut également la voie ferrée Rabat – Casablanca – Marrakech et la RN9, après avoir traversé, en déblai, une importante butte constituée par le massif des Rhamnas. Le projet s'infléchit légèrement vers l'ouest à l'approche de Benguéir pour éviter l'agglomération. Au sud de cette ville, l'autoroute enjambe la vallée de l'oued Benguéir par un ouvrage de franchissement de type viaduc. Un échangeur est prévu à proximité de cet ouvrage d'art. Outre la ville de Benguéir, cet échangeur desservira la région de El Kalâa Es Sraghna à l'est et Youssoufia à l'ouest. Le tracé traverse ensuite la plaine de la Bahira sans contrainte particulière. Il évite plusieurs secteurs de douars (fermes isolées ou hameaux) pour arriver au droit de Sidi Bou Othmane. A partir de cette zone, le tracé épouse les flancs du massif des Jbilets qui présente un relief montagneux et des paysages remarquables. Le projet se termine dans la plaine de Tensift en franchissant la voie ferrée avant de se raccorder provisoirement sur la RN9 sur un giratoire à créer. Cette infrastructure sera raccordée sur l'autoroute Marrakech-Agadir, dont les premiers tronçons ont démarré en travaux.

Caractéristiques géométriques

Cette section routière est conçue avec une vitesse de référence de 120 km/h. Le profil en travers est constitué de 2 x 2 voies de 3,50 ml de largeur chacune avec un terre-plein central de 12 ml, réduit à 3 ml de largeur sur 70 % du tracé, et des bandes d'arrêt d'urgence de 2,50 m.

Terrassements

En dehors de la traversée du massif des Rhamnas en début de section (importante ressource en matériaux pour les terrassements), le relief est relativement plat. Seule la petite vallée de l'oued de Benguéir vient rompre la monotonie. La seconde partie du tracé est identique jusqu'au pied de la chaîne des Jbilets (seconde ressource importante de matériaux) qui présente un relief montagneux



Déblais à l'origine du tronçon

Earth cuts at the starting point of the section

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Profil en travers type

- Demi-chaussée : 7,00 m
- BAU : 2,50 m
- BDG : 1,00 m
- Cunette (déblai) : 2,40 m
- Berme (déblai - remblai) : 0,75 m
- Arrondi (déblai - remblai) : 1,00 m

Tracé en plan

Longueur du tracé : du PK 0 + 000 au PK 83 + 746 comprenant un couple d'aires de services au PK 24 + 800, PK 31 + 644 et une aire de service seule au PK 82 + 680 – Un raccordement sur la section 2 – Un viaduc de franchissement de l'oued Benguerir – Un échangeur – Une gare de péage au PK 50 + 800 – Un giratoire au PK 51 + 580

Voies rétablies

- CT 6119 au PK 0 + 439
- CT 6122 au PK 5 + 750
- CT 6103 au PK 27 + 700
- RS 125 au PK 30 + 111
- RP 2002 au PK 36 + 630
- RP 2004 au PK 45 + 266

Vue représentative des matériaux feuilletés rencontrés sur le site des Rhamnas

Representative view of the laminated materials encountered on the Rhamnas site



Réglage des talus sur la section n° 3

Slope grading on section No. 3



CHAUSSÉES

Structure de la chaussée (section courante)

- 20 cm couche de réglage
- 25 cm grave non traitée type GNT
- Enduit d'imprégnation : 10 cm grave bitume (GB)
- Couche d'accrochage : 7 cm béton bitumineux (BB)

Quantités

- GNT + GNF = 670 950 m³
- Grave bitume GB = 364 430 t
- Béton bitumineux BB = 265 220 t
- Liants hydrocarbonés = 37 290 t

et des paysages remarquables. Le début de section est constitué d'un substratum schisteux composé de phyllades gris en bancs subverticaux, avec ponctuellement des niveaux de grès quartziques très massifs ainsi que des filons de quartz et roches éruptives. Après Benguerir, failles et plissements caractérisent la zone dans laquelle des schistes métamorphiques avec intrusions quartziques apparaissent. Cette section représente 9 000 000 m³ de déblais et environ 10 000 000 m³ de remblais.

Ouvrages d'art

On dénombre 50 rétablissements de circulation décomposés en 23 passages supérieurs, quatre passages inférieurs, cinq passages piétons et 18 passages véhicules. 325 H ou dalots permettent également le transit des eaux sous l'autoroute. Le franchissement de la vallée de l'oued de Benguerir nécessite la construction d'un viaduc. Ce choix a été motivé par l'importance de l'oued

notamment en période de crue et afin d'éviter d'édifier un remblai de grande hauteur qui aurait créé un écran dans le paysage. Ce viaduc est classique de type VIPP (viaduc à travées indépendantes à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension). Ce viaduc passe à 20 m au-dessus du lit de l'oued et mesure 111 m de longueur. Il est constitué de trois travées. Chaque tablier est constitué de quatre poutres.

Globalement les ouvrages nécessitent la mise en œuvre de 85 000 m³ de béton et 9 000 t d'acier.

Chaussées

L'une des particularités de la structure de cette section est qu'elle ne comporte pas de couche de forme. En effet, la nature faible du trafic et la douceur du climat (absence de gélivité) ajoutées à une PST humidifiée, insensible à l'eau, et à une GNT de couche de réglage sur 20 cm permettent de faire abstraction d'une couche de forme. Les terrassements se terminent par une arase terrassement et une couche de réglage de 20 cm d'épaisseur. La structure de la chaussée se décompose comme suit de bas en haut : 25 cm de grave naturelle - 10 cm de grave bitume - 7 cm de béton bitumineux. La mise en œuvre de cette structure représente pour la section courante et ses annexes 700 000 m³ de GNT - 365 000 t de GB et 275 000 t de BB.

Equipements d'exploitation

Le système de péage est de type fermé avec un raccordement au nord sur l'autre tronçon en cours de construction et une barrière en pleine voie au sud. Un point d'échange intermédiaire est prévu à Benguerir, et sera équipé d'une gare de péage. Les usagers auront la possibilité de bénéficier de deux couples d'aires de services avec distribution de carburants, zones de détente et de repos, sanitaires, salle de prière et restauration.

Impacts sur l'environnement

Des mesures particulières de protection des milieux aquatiques contre les pollutions chroniques autoroutières sont prises notamment au droit du viaduc de Benguerir.

De plus, en phase travaux l'emplacement des bases vie et bureaux a été choisi pour ne pas poser de contraintes particulières vis-à-vis de l'environnement. Compte tenu des faibles ressources naturelles en eau, des forages profonds ont été réalisés mais sont réservés aux stricts besoins domestiques de la base vie. Le contrôle rigoureux des différents rejets polluants permet de limiter les pollutions de cette dernière.

Il faut également préciser que l'agrément des dépôts se fait en fonction des critères environnemen-

taux en évitant au maximum les dépôts en zone humide.

Enfin, les blessures dans le paysage ont été limitées (remblais, dépôts, etc.).

Coûts de construction

Le coût total de réalisation de la section de 83 km (hors acquisitions des terrains) est estimé à environ 2 milliards de dirhams, représentant un coût moyen de 24 millions DHS soit environ 2,2 millions d'euros le kilomètre.

Délais

Le délai de réalisation de la section autoroutière entre Skhour Rhamna - Marrakech est de 29 mois y compris 4 mois de "période de préparation". L'aspect délai est l'une des contraintes fortes de ce chantier. Les travaux effectifs ont débuté fin novembre 2004 et l'ouverture de cette infrastructure est programmée pour fin 2006, soit à peine plus de deux ans pour réaliser la totalité des travaux, ce qui représente un véritable challenge.

■ LA MISSION D'ASSISTANCE À MAÎTRISE D'ŒUVRE

Le maître d'ouvrage ADM assure également la responsabilité de maître d'œuvre. Toutefois, l'important programme autoroutier marocain a conduit ADM à recourir à une mission "d'assistance à maîtrise d'œuvre" aux modalités de fonctionnement "intégrée".

La proposition de Scetauroute (groupe Egis) a consisté à incorporer une équipe extérieure au sein d'une entité ADM. La réponse positive d'ADM à cette offre traduit une ouverture permettant de renforcer les moyens opérationnels et s'inscrit dans une stratégie de limitation des effectifs.

C'est une première au Maroc, et le groupement franco-marocain Scetauroute – CID a été retenu pour œuvrer aux côtés d'ADM. Scetauroute assure le pilotage du groupement.

Direction des travaux

La maîtrise d'œuvre travaux est assurée par un chef de division et son adjoint, tous deux d'ADM. Le groupement de consultants fournit quant à lui les ingénieurs, les cadres techniques et les techniciens expérimentés structurés en équipe d'assistance.

Le laboratoire LPEE assure un rôle de contrôle extérieur pour le compte d'ADM et complète ainsi l'organisation de la direction des travaux.

L'organigramme ci-dessous présente cette organisation.

Une période d'adaptation ponctuée d'échanges a



Construction du viaduc de l'oued de Benguerir

Construction of Benguerir Wadi viaduct



Réalisation des engagements des matériaux fins par des matériaux rocheux

Execution of fine material decking with rocky materials

permis la mise en place d'outils de fonctionnement efficaces et rigoureux. ADM, de par ses connaissances et sa compréhension de l'environnement du chantier (aspect culturel), des procédures de fonctionnement (aspect organisationnel) et des entreprises nationales, a joué un rôle de "garant". Dans ces conditions, l'équipe d'assistance a pu se concentrer sur des tâches techniques.

Cette collaboration de proximité et la mise en commun des pratiques et méthodes ont été fructueuses. Ce partage a permis à chacun des acteurs de progresser et de trouver sa place dans l'organisation pour atteindre un fonctionnement efficient.

Cette synergie au sein de DTSM s'est traduite par la rédaction commune d'un plan qualité régissant le fonctionnement et les différentes interfaces avec les autres intervenants sur le projet.

Pour l'organisation du chantier

L'apport de l'équipe d'assistance s'est avéré déterminant dès le démarrage de la période de préparation des travaux. Le fait que les entreprises marocaines aient déjà bien souvent fonctionné aux côtés de grands groupes internationaux a permis d'assurer les bases d'un bon fonctionnement. Cependant l'équipe de maîtrise d'œuvre a dû faire

Réalisation
d'un déblai de 20 m
de profondeur
à l'origine du projet

*Execution
of an earth cut 20 m
deep at the starting
point of the project*



- ▶ preuve de vigilance dès la remise des premiers documents. L'expérience acquise par l'équipe d'assistance a aidé à mobiliser les énergies sur l'analyse détaillée des documents de type :
 - ◆ programme général des travaux ;
 - ◆ programme de mouvement des terres ;
 - ◆ plan qualité et environnement ;
 - ◆ plan d'hygiène et de sécurité ;
 - ◆ plans d'installations de chantier et de circulation ;
 - ◆ agréments des matériaux et analyse des sous-détails de prix,
 et de mettre l'accent sur les anomalies constatées et sur les éventuels risques et aléas prévisibles.

Pour la gestion de projet

Une fonction "gestion de projet", clairement définie dans l'organigramme dès l'origine, a permis de gérer et déclencher autant que de besoin des alertes relatives aux suivis des coûts, des délais et de la qualité. Les résultats obtenus font l'objet de reportings réguliers et d'alertes transmises au maître d'ouvrage.

Cette préoccupation de "management de projet" est parfaitement cohérente avec la démarche engagée par ADM dans le cadre de la certification

AFAQ ISO 9001 version 2000 et les certifications de ses collaborateurs (AFITEP, IMPA).

Pour l'assurance qualité

Pour ce qui concerne l'obtention des performances techniques, les marchés prévoient la mise en place d'un système d'assurance qualité de type C incluant un contrôle intérieur de l'entreprise et un contrôle extérieur du maître d'œuvre. Ce dernier est assuré par le Laboratoire public d'essais et d'études.

Là encore l'équipe de maîtrise d'œuvre intégrée a développé de façon efficace la mise en commun d'expériences complémentaires. Des procédures particulières ont permis d'adapter les contrôles aux fonctionnements d'entreprises ne maîtrisant pas totalement les PAQ de type C. L'équipe a insisté sur la garantie d'une indépendance certaine de fonctionnement des chargés "qualité" vis-à-vis de la "production". Ces actions pédagogiques ont facilité l'appropriation de la démarche qualité par les différentes entreprises.

Pour les solutions techniques

Un problème technique a été décelé dès le démarrage des terrassements, à savoir, la réutilisation de certains matériaux à l'état sec voire très sec. Les formations rencontrées délivrent en surface des matériaux classés A1, B5 à C1B5, c'est-à-dire des matériaux non minés, qui une fois extraits, produisent des fines alors qu'ils sont dans un état hydrique très sec. Et sur certains secteurs il s'agit du seul type de matériau rencontré.

Le GTR, cité en tant que document contractuel, exclut le réemploi de ces matériaux.

Le changement de l'état hydrique par humidification n'est pas envisageable eu égard à la climatologie rencontrée sur le chantier, à l'aridité du site et à la rareté des ressources en eau.

Le recours à la mise en dépôt massive de ces matériaux, au profit de matériaux issus d'emprunts qui présentent dans la majorité des cas les mêmes caractéristiques, n'est pas non plus envisagé.

Le CCTP quant à lui, autorise le réemploi sans humidification de ces matériaux sous réserve d'une planche d'essais préalable.

La bonne collaboration et complémentarité entre ADM, le consultant et le LPEE ont permis :

- ◆ de mobiliser les expertises géotechniques et hydrogéologiques du consultant et du LPEE ;
- ◆ de réaliser rapidement des investigations complémentaires ;
- ◆ de procéder à des planches d'essais ;
- ◆ d'exploiter les nouvelles données ;
- ◆ de définir et appliquer une méthode de réalisation de ces remblais ;
- ◆ de gérer en synergie l'aspect contractuel avec les entreprises.

Les principales préconisations techniques ont consisté :

- ◆ à faire varier l'exigence de teneur en eau en fonction des hauteurs de remblais ;
- ◆ à encager les matériaux fins dans des massifs de rive en matériaux plus grossiers ;
- ◆ à réduire et étancher le TPC.

L'application de ces directives a notamment permis d'optimiser la réutilisation des matériaux et de minimiser le recours aux emprunts et les mises en dépôts définitifs.

Pour conclure, le fonctionnement de la division travaux montre la complémentarité qui existe entre ADM et le groupement d'assistance. Le mélange des cultures et des savoir-faire, initié au démarrage de l'opération et entretenu au fil des mois par la volonté commune des hommes en place et les relations constructives établies entre les partenaires, permettent d'envisager sereinement et positivement la fin de cette opération. Cette première expérience voulue par ADM sera une réussite.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Volume des terrassements

- Déblais : 8 882 000 m³
- Remblais : 9 810 990 m³
- Couche de réglage : 820 000 m³

Assainissement

- Fossés : 230 280 ml
- Buses + collecteurs : 20 210 ml
- Drains : 138 620 ml

Ouvrages d'art courants

- 22 passages supérieurs
- 5 passages inférieurs
- 5 passages piétons
- 18 passages véhicules
- 87 dalots

Hydraulique

- 186 ouvrages hydrauliques
- 134 demi-traversées

Béton

- Béton pour assainissement : 1 430 m³
- Béton pour OA : 74 320 m³

Coûts : estimations hors TVA

1 541 725 707,95 dirhams et 351 121 490 dollars

ABSTRACT

Assistance included in project management. From Casablanca to Marrakesh

J.-P. Danel

The motorway corridor from Casablanca to Marrakesh fits in with the approach to the Agadir – Rabat link. This main corridor will enable the Kingdom of Morocco to play a dominant role as a trade and transit centre. The article describes the project and its technical characteristics and then shows how the cooperation between Scetauroute and Autoroutes du Maroc was productive.

RESUMEN ESPAÑOL

Asesoramiento integrado a la dirección de proyecto. Desde Casablanca la Blanca hasta Marrakech

J.-P. Danel

El eje de autopistas Casablanca – Marrakech se integra en la lógica del enlace Agadir – Rabat. Este eje estructurante permitirá al Reino de Marruecos conservar un papel preponderante en calidad de polo de intercambio y de tránsito. En el presente artículo se describe el proyecto y sus características técnicas y, a continuación, viene a demostrar porqué ha sido fructuosa la cooperación entre Scetauroute y Autoroutes du Maroc.