

Travaux

n° 821

• Durabilité des bétons en ouvrages maritimes

• Formulation, retrait et fissuration des bétons autoplaçants

• Recherche sur les bétons à ultra hautes performances

• La maquette numérique

• Détermination des efforts® et des longueurs de tirants au moyen d'essais non destructifs

• Les pieux rainurés T.Pile

• La paroi CSM

• MEDIAN

• Solbarrière

• Un courant neuf pour les métiers de l'eau chez Sogea Construction

• Un mur antibruit dépollueur

• Le projet PICADA

• Enrobés environnementaux économes en énergie

• Action du ministère de l'Équipement

• Le label IVOR



Recherche et innovation



sommaire

Travaux
numéro 821

juillet-août 2005

Recherche et innovation



Notre couverture

**La passerelle
Bercy-Tolbiac**

© Feichtinger Architectes - Paris

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et André Colson
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83
colsona@fnfp.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) : 180 € TTC
Etranger (11 numéros) : 225 €
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).

Editions Science et Industrie S.A.

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



éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

6

matériels

14

PRÉFACE

Jean-Pierre Ollivier

17

◆ La durabilité des bétons en ouvrages maritimes.
Le port de commerce de Tanger Méditerranée
- *The durability of concretes in maritime structures.*
The Mediterranean Tangier commercial port

18

F. Canteau

◆ Formulation, retrait et fissuration des bétons
autoplaçants. Recherche universitaire et industrie :
un partenariat constructif
- *Mix design, shrinkage and cracking of self-placing
concretes. University and industrial research :
a constructive partnership*

24

Ph. Turcry, A. Loukili, G. Pijaudier-Cabot, Ph. Dubreil

◆ La recherche sur les bétons à ultra hautes
performances : vers un nouveau mode de construction ?
- *Research on ultra-high-performance concretes : toward
a new construction technique ?*

31

Th. Thibaux

◆ La maquette numérique, l'avenir de la construction
et de la maintenance des ouvrages
- *Computer modelling, the future for construction
and maintenance of engineering structures*

35

G. Arthaud, E. Lebègue, A. Anfosso, S. Soubra

◆ Détermination des efforts* et des longueurs de tirants
au moyen d'essais non destructifs
- *Determination of tension member forces* and lengths
by non-destructive testing*

41

C. Horb

◆ Les pieux rainurés T.Pile
- *T.Pile grooved piles*

45

S. Borel, A. Frossard, L. Stansfield

◆ La paroi CSM. Une solution innovante de paroi en sol
traité
- *The CSM wall. An innovative treated soil wall solution*

49

F. Mathieu, S. Borel, X. Jullian

◆ MEDIAN : une foreuse à positionnement intuitif
- *MEDIAN : an intuitive positioning driller*

52

D. Perpezat

◆ Solbarrière : une barrière contre les inondations,
légère et amovible

55

- *Solbarrière : an anti-flood barrier, light and removable*

J. Landrot, A. Marchand

Sommaire

juillet-août 2005

Recherche et innovation

Dans les prochains numéros

- Travaux souterrains
- Route des Tamarins
- Terrassements
- Plates-formes aéroportuaires
- Routes et travaux urbains
- Ponts
- International
- Environnement
- Réhabilitation



◆ Un courant neuf pour les métiers de l'eau chez Sogea Construction
- *A fresh current for the water business at Sogea Construction*

58

D. Haegel, P. Chadoin, Ph. Begou, Th. Mace

◆ Un mur antibruit dépollueur
- *A pollution control and noise attenuation wall*

65

P. Rousseau, E. Toulan

◆ Le projet PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment)
- *The PICADA project (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment)*

69

L. Demilecamps, H. André

◆ Enrobés environnementaux économes en énergie. Une nouvelle conception de Colas pour la fabrication des enrobés bitumineux à chaud

74

- *Low-energy environmentally friendly bituminous mixes.*

- *A new Colas design for the production of hot mix asphalts*

M. Ballié, X. Carbonneau, J.-P. Henrat, Fr. Létaudin

◆ Recherche et innovation en génie civil. Action du ministère de l'Équipement

79

- *Research and innovation in civil engineering. Campaign by the Ministry of Equipment*

Fr. Buyle Bodin

◆ Le label IVOR 12 ans après. 32 innovations labellisées IVOR (Innovations validées sur ouvrages de référence) depuis 1993

82

- *The IVOR label 12 years afterward. 32 innovations with the IVOR label ("innovations validated on reference structures") since 1993*

H. Thuillier

innovation

86

répertoire des fournisseurs

95

ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

| | | | |
|------------------|------------------|------------------------|------------------|
| AMMANN | 11 | HUESKER | 7 |
| BARRIQUAND | 63 | LERM | 13 |
| BELL | 40 | MCCF | 57 |
| COLAS | 2 | PRO BTP | 4È DE COUVERTURE |
| CSTB | 9 | SOGEFORH | 63 |
| EUROVIA | 2È DE COUVERTURE | SOLETANCHE BACHY | 4 |
| HOLCIM | 16 | WIRTGEN | 4 |

Ce numéro spécial est construit autour d'exemples qui démontrent l'apport de la recherche pour l'innovation dans le secteur des travaux publics.

Les articles rendent compte de la diversité thématique de la recherche dans la construction. Pour conduire les projets, les partenariats entreprises - laboratoires publics se sont généralisés et sont maintenant fructueux. Il faut reconnaître que ça ne s'est pas fait sans mal, tant des a priori négatifs pouvaient être nombreux. Les projets nationaux, les projets labellisés par le Réseau Génie Civil & Urbain, les conventions CIFRE sont autant de dispositifs qui ont favorisé les rapprochements entre chercheurs et entrepreneurs. Des efforts restent maintenant à accomplir pour mieux faire connaître les résultats de ces travaux menés en partenariat. Ce numéro spécial de *Travaux* y contribue mais il conviendrait sans doute de prolonger cet effort de communication de manière plus régulière. Aujourd'hui le plus gros handicap à la poursuite de l'action engagée consiste à faire reconnaître le besoin de recherche par les instances qui pilotent la recherche publique.

L'organisation et le financement de la recherche évoluent fortement. L'Agence Nationale de la Recherche, l'Agence pour l'Innovation Industrielle, sont de nouveaux outils qu'il va falloir apprendre à maîtriser. Les enjeux sont d'importance pour le secteur de la construction car les financements de la recherche publique, nationale ou européenne, sont soumis à une vive concurrence entre les secteurs d'activité.

Il faut reconnaître que le secteur de la construction

n'est pas réputé pour ses efforts en matière de recherche. Ses besoins en matière de recherche sont parfois même contestés, le contenu technologique des ouvrages étant souvent considéré comme faible, voire inexistant, par certaines instances. Il y a là matière à révolte lorsque l'on considère de manière objective les progrès accomplis récemment. De manière plus efficace, on peut aussi chercher à mieux faire falloir nos points forts pour mieux combattre cette idée reçue. Les marges de progrès pour le bien être de la société, pour la compétitivité des entreprises et pour l'emploi sont des éléments primordiaux dans l'évaluation des dossiers. Dans ce domaine, nous avons des arguments à faire valoir. Il faut aussi produire des efforts pour mieux traduire les applications visées en terme d'objectifs scientifiques attractifs par certaines instances d'évaluation des projets. Des structures de travail réunissant les intervenants publics et privés de la construction sont en place et cela constitue un atout pour répondre à ces défis.

Dans ce contexte, le partenariat entre l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC) et la FNTP facilite la communication entre universitaires et entrepreneurs et il a pu se concrétiser par le montage d'actions de recherche. Notre proximité doit contribuer à mieux définir les projets de recherche futurs. Les besoins des entreprises sont mieux perçus par les universitaires et mieux pris en compte dans leurs programmes de recherche. Pour un vrai partenariat équilibré et efficace à long terme il faudra aussi que les besoins de recherche exprimés par les universitaires puissent être soutenus par les entreprises.



■ JEAN-PIERRE OLLIVIER

Professeur à l'INSA de Toulouse

Président de l'Association Universitaire de Génie Civil

La durabilité des bétons

Le port de commerce de

La durabilité des bétons est un concept qui est apparu dans les équipes de Bouygues Travaux Publics au début des années 2000. Un chantier a permis le développement d'essais de contrôle de la durabilité aussi bien en phases d'études qu'en phases travaux : le nouveau port de Tanger Méditerranée. Le laboratoire béton de Bouygues Travaux Publics s'est équipé en matériels de mesures de la durabilité par vieillissement accéléré et s'est enrichi d'une base de données permettant de répondre en amont aux critères spécifiés par le client. Ces essais ont ensuite été reconduits sur le chantier pour permettre le contrôle au jour le jour des bétons.

Les exigences de moyens (dosage en liant minimum, Eeff/C maximum...) telles que spécifiées dans les normes, règlements et recommandations ne suffisent pas à qualifier une formule béton vis-à-vis d'ouvrages stratégiques et/ou d'ouvrages dont la durée de vie requise est supérieure à 50 ans. Afin de qualifier un béton pour la construction d'un ouvrage donné et ainsi de généraliser l'approche performantielle avec un niveau d'exigence adapté, des critères de performance vis-à-vis de la durabilité doivent être pris en compte, mais également d'autres paramètres socio-technico-économiques comme l'importance économique, environnementale, politique et sociale de l'ouvrage.

La durabilité d'un ouvrage est de plus en plus un concept retenu par le client pour qualifier une entreprise ou adopté par le constructeur pour se différencier de ses concurrents. Ce concept est apparu chez Bouygues Travaux Publics au début des années 2000, avec le chantier de Groëne Hart en Hollande, mais a connu un réel essor notamment en acquisition de données issues d'essais de laboratoire mais également en application et contrôle sur le terrain grâce au chantier du port de commerce de Tanger Méditerranée au Maroc.

LE PORT DE COMMERCE DE TANGER MÉDITERRANÉE - PRÉSENTATION

A la fin de l'année 2002, un groupement d'entreprises formé de Bouygues Travaux Publics, de Byvaro et de SAIPEM, s'intéresse à la réalisation du lot 1 du nouveau port de Tanger Méditerranée situé au Maroc et décide de répondre au projet en proposant une variante technique, comprenant notamment

la réalisation d'une digue principale de 2053 m et d'une digue secondaire de 565 m, toutes deux alliant caissons préfabriqués en béton armé et accropodes (béton non armé).

La durabilité du béton, que ce soit pour un ouvrage maritime ou terrestre, lorsque tous les paramètres permettant d'avoir le niveau de performances mécaniques ont été ciblés en respect des règles de l'art, dépend alors essentiellement de son acuité à résister à différents facteurs agressifs au cours de sa vie :

- ◆ la corrosion des armatures par action des chlorures et par carbonatation ;
- ◆ l'action chimique des sulfates sur le liant par formation d'hydrates expansifs pouvant induire une détérioration du béton (réaction sulfatique) ;
- ◆ l'action hydrodynamique (érosion du béton).

En ce qui concerne le béton des accropodes, qui ne comprend pas d'armatures en métal, la durabilité dépend essentiellement de son aptitude à résister aux attaques sulfatiques. Pour contrer ce problème il suffit de prescrire l'utilisation d'un ciment type prise mer.

Les caissons sont quant à eux préfabriqués en béton armé, et sont alors soumis à un problème majeur qui est la corrosion des armatures par action des chlorures.

La structure des caissons peut être décomposée en trois zones vis-à-vis de leur exposition aux agents agressifs décrits ci-dessus. Ces différentes zones sont décrites dans le tableau I, les zones les plus exposées comportant de nombreux +.

La résistance du béton aux agressions chimiques des sulfates est obtenue par le choix d'un ciment "prise mer" prévu par le CPS.

La prévention de l'alcali-réaction est traitée conformément aux spécifications du CPS (niveau C des "Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction LCPC 1994"). En particulier, quatre blocs de roche issus du site des carrières de production des granulats béton ont été testés (analyse pétrographique selon les spécifications du fascicule P18-542) et ont été déclarés non réactifs (NR) d'après le fascicule P18-542.

Le problème de corrosion des armatures par pénétration d'ions chlorures est traité par le choix de deux types de béton pour l'édification des caissons, en fonction des classes d'agressivité différentes auxquelles ils seront soumis. La partie située en dessous de la cote - 4,00 mZH est constamment immergée, saturée en eau et soumise au seul phénomène de diffusion des ions dans un milieu moins riche en oxygène, alors que la partie située au-des-

Tableau I
Exposition aux agents agressifs en fonction des zones de décomposition des caissons
Exposure to aggressive agents according to the areas of caisson decomposition

| | Pénétration des chlorures et corrosion des armatures | Action des sulfates | Réaction alcali-granulat |
|---|--|---------------------|--------------------------|
| Zone d'immersion Inférieure à la cote - 4 mZH | + | +++ | +++ |
| Zone de marnage Supérieure à la cote - 4 mZH | +++ | ++ | +++ |
| Zone d'embruns Supérieure à la cote - 4 mZH | +++ | + | +++ |



en ouvrages maritimes Tanger Méditerranée

sus de la cote - 4,00 mZH est soumise à des cycles successifs d'humidification et de séchage, donc à un phénomène d'absorption capillaire puis de diffusion des ions dans le béton.

L'indicateur de durabilité retenu pour caractériser les bétons des caissons est le coefficient de diffusion apparent exprimé en m^2/s et obtenu par un essai de vieillissement accéléré selon la méthode Nordtest NT Build - 492 Tang Luping et Nilsen.

Si le même indicateur de durabilité a été choisi ici pour caractériser et garantir la durabilité du béton, deux valeurs cible de coefficient de diffusion effective des ions chlorures sont spécifiées à l'échéance de 90 jours :

- ◆ $1,5 \times 10^{-12} m^2/s$ maxi pour le béton au-dessus de la zone - 4,00 mZH ;
- ◆ $5,0 \times 10^{-12} m^2/s$ maxi pour le béton en dessous de la zone - 4,00 mZH.

Un autre facteur à prendre en compte pour qualifier la formule béton est la méthode de construction des caissons par coffrages glissants. La difficulté réside dans l'obtention d'un béton de consistance plastique et thixotrope, répondant à la sollicitation mécanique exercée pour un bon remplissage dans le coffrage. Les critères de mise en œuvre par coffrage glissant indiqués par le chantier définissent :

- ◆ une rhéologie initiale à $18 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$;
- ◆ une rhéologie à 90 minutes permettant le mélange intime de deux couches successives par vibration ;
- ◆ un raidissement du béton à l'échéance de 4 heures pour la levée du coffrage, tout en conservant la possibilité d'un surfaçage du béton.

Le béton doit donc être à la fois suffisamment maniable et ouvrable pour éviter tout défaut de surface, pouvant favoriser la pénétration d'agents agressifs et ainsi entraîner une faiblesse au niveau de la durabilité, mais également suffisamment nerveux pour permettre la levée du coffrage glissant 4 heures après la fin de la mise en place. De plus, une fois le coffrage glissant levé, le béton doit être encore maniable tout du moins à sa surface, pour pouvoir venir retalocher celle-ci et ainsi boucher et refermer les inclusions ou pores créés par une éventuelle accroche au coffrage.

■ LES ESSAIS DE LABORATOIRE

Le laboratoire béton de Bouygues Travaux Publics ne pouvait se permettre d'attendre de savoir si le groupement d'entreprises allait gagner cet appel d'offres sur la base de la variante proposée pour

lancer des essais de mesure et de contrôle de la durabilité. En effet, les essais actuels de mesure de la durabilité par vieillissement accéléré nous permettent d'avoir une capacité de contrôle, et donc de réaction, à 90 jours. Il fallait donc rapidement cibler et orienter nos recherches pour que, lorsque l'ordre de service serait donné, une base de données suffisamment complète nous permette de formuler les bétons répondant aux critères spécifiés en un délai assez court.

Le laboratoire béton de Bouygues Travaux Publics a donc choisi de s'équiper en matériels de mesure de la durabilité par vieillissement accéléré. Différents essais ont été lancés, essayant de couvrir le plus largement possible les quantités de liants, types de liants, type de granulats, rapport E/liant, ouvrabilité à la mise en place...

Ces essais ont débuté pendant l'été 2003.

La mesure du vieillissement du béton en ouvrage maritime

Le principe de la corrosion

La corrosion des armatures dans le béton est due à une réaction électrochimique, conséquence de la présence des ions chlorures en phase aqueuse au contact des armatures.

Les chlorures en solution dans l'eau de mer ou contenus dans les sels de déverglaçage pénètrent à partir de la surface du béton par phénomène de convection et de diffusion. Cette attaque se traduit par un profil de pénétration des ions chlorures dans le béton strictement décroissant (courbe concentration-profondeur) à partir de la zone de convection, elle-même liée aux cycles d'humidification séchage s'ils existent.

Lorsque la concentration de chlore au niveau des armatures dépasse le seuil critique fixé approximativement à 0,4 % du poids de ciment (et correspondant à un rapport de concentration $[CL^-]/[OH^-] \approx 0,6$ suivant Hausman), la corrosion des armatures devient possible. Cette corrosion dépend des principaux paramètres suivants :

- ◆ concentration en OH^- ;
- ◆ concentration en chlorures libres ;
- ◆ température et humidité relative.

Les chlorures ayant un impact direct sur la corrosion des armatures et la détermination du coefficient de diffusion des ions chlorures faisant l'objet de modes opératoires, c'est le coefficient de diffusion des ions chlorures qui est ici considéré pour quantifier les possibilités de diffusion des ions en général, dans le matériau béton.

Figure 1
Loi de Fick
Fick's Law

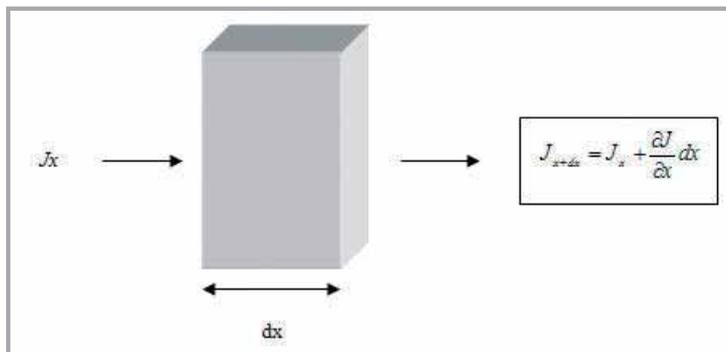


Tableau II
Grille
d'appréciation
Assessment grid

| Quantité d'électricité (C) | Perméabilité aux chlorures |
|----------------------------|----------------------------|
| > 4000 | Haute |
| 2000 à 4000 | Moyenne |
| 1000 à 2000 | Faible |
| 100-1000 | Très Faible |
| < 100 | Négligeable |

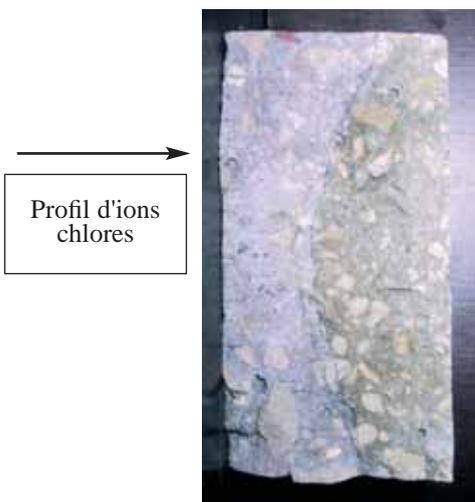


Photo 1
Epreuve à forte
pénétration d'ions chlorures
Test specimen with strong
penetration by chloride ions

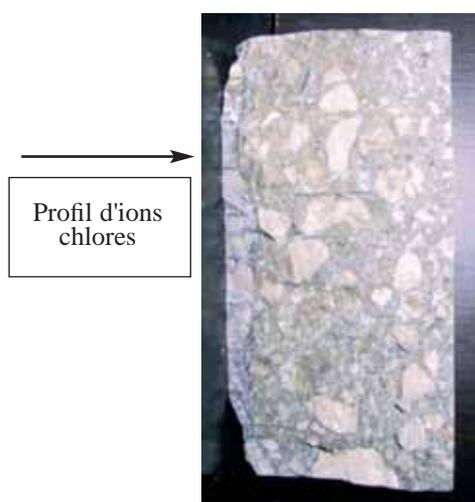


Photo 2
Epreuve à faible
pénétration d'ions chlorures
Test specimen with weak
penetration by chloride ions



Le coefficient de diffusion effectif d'une espèce dans un matériau poreux dépend du coefficient de diffusion de cette espèce en solution et de la géométrie de la structure poreuse du système. La prédiction de la pénétration des chlorures dans le béton s'appuie généralement sur la première loi de Fick :

$$j_e = -D_e \frac{\partial c}{\partial x}$$

J_e : flux de chlorure effectif.
 D_e : coefficient de diffusion effectif du matériau.
Et sur l'équation de conservation de masse (figure 1).

En tenant compte de la loi de conservation de la masse, on obtient la seconde loi de Fick, qui s'écrit, lorsque le coefficient de diffusion ne dépend pas de la concentration en ions :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Le coefficient de diffusion D_a qui intervient ici est le coefficient de diffusion apparent, qui ne tient pas compte des interactions des chlorures avec les hydrates de la pâte de ciment.

Ces interactions sont habituellement décrites par une isotherme d'adsorption qui exprime la quantité d'ions chlorures fixés à l'équilibre sur le solide en fonction de la quantité d'ions chlorures en solution. Les chlorures peuvent se trouver sous différentes formes dans les matériaux cimentaires saturés :

- ◆ les ions chlorures libres dans la solution interstitielle ;
- ◆ les chlorures liés, ceux qui interagissent avec les composés de la pâte de ciment ou encore ceux qui sont adsorbés sur la surface des C-S-H. Les chlorures liés à la matrice cimentaire sont immobilisés et ne peuvent donc plus participer au phénomène de diffusion.

Seuls les chlorures pouvant participer au phénomène de diffusion sont susceptibles de déclencher à partir d'un seuil critique la corrosion des armatures du béton.

Méthodes de mesure utilisées

Méthode ASTM C 1202-97 ou AASHTO 277-831

Cette méthode consiste à mesurer la quantité de courant électrique passant à travers une éprouvette de béton pendant une période donnée. Une différence de potentiel est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette, l'une en contact avec une solution de chlorures de sodium, l'autre en contact avec une solution d'hydroxyde de sodium. La quantité de Coulombs traversant est indicative de la résistance du béton à la pénétration des ions chlorures (tableau II).

Méthode Nordtest NT BUILD – 492 Tang Luping et Nilsen

Cette méthode en régime non stationnaire est basée sur la détermination de profondeur de pénétration des ions chlorures révélée par colorimétrie dans une éprouvette béton.

Une différence de potentiel est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette, l'une en contact avec une solution de chlorures de sodium, l'autre en contact avec une solution d'hydroxyde de sodium. Après une durée déterminée, le spécimen est coupé en deux parties selon son axe. La profondeur de pénétration des ions chlorures est révélée par aspersion d'une solution de nitrate d'argent sur la face fraîchement découpée (couleur blanche

du précipité de chlorure d'argent), puis mesurée. Le coefficient de migration relatif des ions chlorés est calculé à partir de la mesure du front de pénétration des chlorures (photos 1 et 2).

Détermination de la résistivité électrolytique du béton durci. Méthode des deux électrodes TEM.

Cette méthode utilisée en parallèle des méthodes précédente permet pour une composition de béton définie et à la suite d'un étalonnage, d'apprécier la résistance à la pénétration des ions chlore du béton testé de façon rapide et dans les conditions du chantier.

Les électrodes sont placées aux extrémités opposées de l'éprouvette d'essai. Un courant électrique AC est appliqué entre les deux électrodes. Le potentiel électrique enregistré permet de calculer la résistance (électrolytique) de l'éprouvette de béton durci selon le principe de la loi d'Ohm (figure 2).

Les résultats des essais

Le laboratoire béton de Bouygues Travaux Publics a fait varier la quantité de liant total entre 400 kg et 480 kg. Le rapport Eeff/Liant a été limité à 0,35. Quatre types de liants ont été testés :

- ◆ ciment ;
- ◆ ciment + cendres volantes ;
- ◆ ciment + fumées de silice ;
- ◆ ciment + cendres volantes + fumées de silice.

Plusieurs types de ciment, de cendres volantes et de fumées de silice ont été testés.

Les granulats utilisés étaient des granulats locaux, envoyés au laboratoire béton de Bouygues Travaux Publics.

Le tableau III regroupe une partie des différentes formulations testées, ainsi que les résultats des essais AASHTO, NTB 492 et les mesures de résistivité électrolytique.

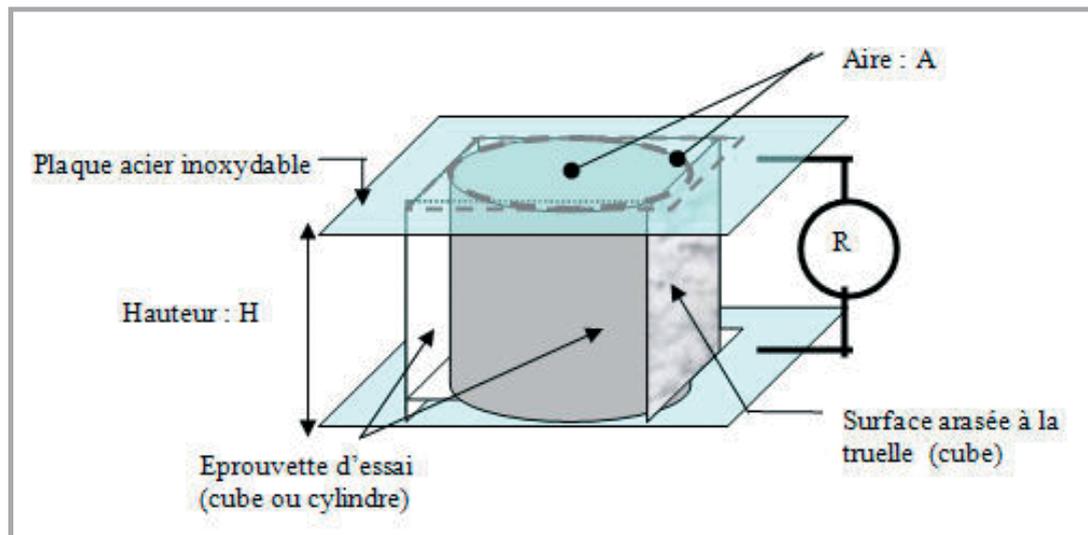


Figure 2
Mesure résistivité électrolytique
Electrolytic resistivity measurement

| N° gâchée | Date de Confection | Composition | | | E _{eff} /Liant | Slump | f _m /90j | 28 j | | | 56 j | | | 90 j | | | exploitation | | |
|-----------|--------------------|---------------|------------|--------------|-------------------------|-------|---------------------|------|-----|------|-------------------------------------|-----|------|-------------------------------------|-------|------|-------------------------------------|----------|----------|
| | | Ciment | Cendre | Fumée silice | | | | 0/D | Ωm | C | 10 ⁻¹² m ² /s | Ωm | C | 10 ⁻¹² m ² /s | Ωm | C | 10 ⁻¹² m ² /s | αD56 | αD90 |
| 7399-01 | 03/06/2003 | CPJ 45 Fez | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 23 | 2.34 | 174 | 1077 | 4.9 | 292 | 608 | 3.0 | 311.5 | 462 | 3.2 | 0.72 | 0.35 |
| 7423-02 | 24/07/2003 | CPA 55 Tanger | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 15 | 2.37 | 121 | 2130 | 10.5 | 154 | | 7.2 | 329 | 1075 | 6.7 | 0.54 | 0.38 |
| 7423-03 | 28/07/2003 | CPJ 45 Temera | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 16 | 2.37 | 134 | 1459 | 9.0 | 223 | | 5.8 | 329 | 771 | 4.5 | 0.63 | 0.59 |
| 7423-01 | 29/07/2003 | CPJ 45 Temera | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 21 | 2.34 | 70 | 4296 | 14.7 | 147 | | 9.7 | 191 | 1440 | 9.2 | 0.60 | 0.40 |
| 7424-01 | 04/08/2003 | CPJ 45 Temera | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 22 | 2.38 | 105 | 2169 | 10.4 | 195 | | 4.8 | 316 | 642 | 4.0 | 1.10 | 0.82 |
| 7424-03 | 12/08/2003 | CPJ 45 Fez | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 21 | 2.36 | 124 | 1911 | 10.1 | 187 | | 5.4 | 388 | 811 | 4.6 | 0.91 | 0.67 |
| 7424-07 | 21/08/2003 | CPA 55 Mknes | V Harnaing | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 20 | 2.37 | 90 | 2069 | 8.3 | 213 | | 3.7 | 273 | 632 | 2.3 | 1.15 | 1.10 |
| 7425-01 | 11/08/2003 | CPJ 45 Temera | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 24 | 2.33 | 62 | 3208 | 15.2 | 85 | | 8.6 | 142 | 1693 | 7.4 | 0.83 | 0.62 |
| 7425-02 | 14/08/2003 | CPJ 45 Fez | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 19 | 2.42 | 46 | 4221 | 18.5 | 75 | | 11.8 | 209 | 1899 | 7.8 | 0.65 | 0.74 |
| 7425-03 | 14/08/2003 | CPA 55 Fez | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 20 | 2.41 | 45 | 4242 | 18.3 | 63 | | 12.1 | 204 | 1614 | 7.7 | 0.69 | 0.75 |
| 7425-04 | 14/08/2003 | CPJ 45 Mknes | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 20 | 2.44 | 47 | 3945 | 17.2 | 75 | | 10.8 | 119 | 1661 | 6.4 | 0.67 | 0.84 |
| 7425-05 | 14/08/2003 | CPA 55 Mknes | V Harnaing | | 0/20 | 0.35 | 20 | 2.39 | 47 | 3910 | 12.7 | 89 | | 9.9 | 113 | 1819 | 5.4 | 0.37 | 0.73 |
| 7427-02 | 29/08/2003 | CPA 55 Mknes | V JLEC | | 0/40 | 0.49 | 13 | 2.39 | 49 | 4722 | 15.2 | 67 | 3901 | 11.4 | 118 | 963 | 8.8 | 0.41 | 0.47 |
| 7431-01 | 12/09/2003 | CPJ 45 Temera | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.30 | 15 | 2.43 | 200 | 857 | 4.3 | 341 | 572 | 2.9 | 568 | 312 | 0.84 | 0.54 | 1.40 |
| 7431-02 | 12/09/2003 | CPJ 45 Temera | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 15 | - | 271 | 636 | 3.9 | 382 | 437 | 2.3 | 695 | 239 | 0.49 | 0.76 | 1.78 |
| 7431-03 | 15/09/2003 | CPJ 45 Temera | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 10 | 2.42 | 308 | 585 | 3.6 | 328 | 328 | 2.2 | 749 | 224 | 0.96 | 0.74 | 1.14 |
| 7431-04 | 15/09/2003 | CPA 55 Fez | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.30 | 16 | 2.41 | 206 | 808 | 3.8 | 318 | 485 | 1.8 | 452 | 346 | 0.81 | 1.07 | 1.32 |
| 7431-05 | 15/09/2003 | CPA 55 Fez | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 15 | 2.43 | 284 | 632 | 2.8 | 386 | 427 | 1.8 | 635 | 248 | 0.80 | 0.64 | 1.07 |
| 7431-06 | 17/09/2003 | CPJ 45 Temera | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 15 | 2.45 | 203 | 855 | 5.0 | 282 | 561 | 2.8 | 412 | 393 | 0.92 | 0.85 | 1.45 |
| 7431-07 | 17/09/2003 | CPJ 45 Temera | V JLEC | | 0/20 | 0.31 | 18 | 2.47 | 95 | 2189 | 9.8 | 103 | 2175 | 6.2 | 132 | 1097 | 4.53 | 0.66 | 0.66 |
| 7431-08 | 19/09/2003 | CPJ 45 Temera | | D Condencil | 0/20 | 0.33 | 8 | 2.47 | 154 | 1210 | 4.9 | 332 | 476 | 2.6 | 388 | 419 | 1.06 | 0.920461 | 1.319673 |
| 7431-09 | 26/09/2003 | CPA 55 Mknes | | D Condencil | 0/20 | 0.35 | 6 | 2.44 | 294 | 693 | 3.5 | 603 | 254 | 1.5 | 1072 | 164 | 0.67 | 1.2737 | 1.424862 |
| 7431-10 | 20/10/2003 | CPA 55 Mknes | V JLEC | DP Condencil | 0/20 | 0.31 | 17 | 2.42 | 211 | 791 | 3.7 | 555 | 299 | 1.15 | 973 | 153 | 0.72 | 1.681987 | 1.401159 |
| 7431-11 | 20/10/2003 | CPA 55 Mknes | V JLEC | DM Condencil | 0/20 | 0.31 | 17 | 2.44 | 194 | 879 | 4.7 | 520 | 312 | 1.53 | 819 | 188 | 0.88 | 1.618056 | 1.454427 |
| 7431-12 | 22/10/2003 | CPA 55 Mknes | V JLEC | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 18 | 2.40 | 189 | 997 | 5.7 | 387 | 409 | 1.86 | 630 | 276 | 1.14 | 1.605499 | 1.373948 |
| 7431-13 | 22/10/2003 | CPA 55 Mknes | V JLEC | | 0/20 | 0.31 | 19 | 2.42 | 95 | 2065 | 9.2 | 148 | 1190 | 3.79 | 236 | 764 | 3.21 | 1.271574 | 0.898147 |
| 7431-14 | 29/10/2003 | CPJ 45 V Fez | | D Condencil | 0/20 | 0.31 | 14 | 2.42 | 430 | 402 | 2.1 | 584 | 258 | 1.03 | 907 | 201 | 0.62 | 1.013939 | 1.037841 |

Tableau III
Mesures au laboratoire
Laboratory measurements



Photo 3
Modélisation
du coffrage glissant
*Modelling of sliding
formwork*



Photo 4
Essai de piquage
Rodding test



Photo 5
Levée du coffrage glissant
et retalochage de surface
*Raising of sliding formwork
and surface refloating*

▶ A la fin des essais de durabilité, des simulations à faible échelle de levée de coffrages glissants ont été effectuées, afin de savoir si les bétons formulés répondaient bien au cahier des charges spécifié (photos 3, 4 et 5).

Les deux formulations retenues en phase d'étude, une pour la zone inférieure à la cote - 4 mZH et une pour la zone supérieure à la cote - 4 mZH, sont conformes aux spécifications client en terme d'indicateur de durabilité, à savoir les deux va-

leurs cibles de coefficient de diffusion effective des ions chlorés spécifiées à l'échéance de 90 jours :

- ◆ $1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ maxi pour le béton au-dessus de la zone - 4,00 mZH ;
- ◆ $5,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ maxi pour le béton en dessous de la zone - 4,00 mZH.

De plus, les bétons proposés répondent aux critères de mise en œuvre par coffrage glissant indiqués par le chantier.

Tableau IV
Mesures
sur chantier
*Measurements
on site*

| E preuve | N° gâchée | Date de Confection | E _g /Liant | Slump | MV | 28 j | | | 56 j | | 90 j | | | exploitation | |
|-----------------|------------|--------------------|-----------------------|-------|------|------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-----|-------------------------------------|--------------|------|
| | | | | | | Ω.m | RC | 10 ⁻¹² m ² /s | Ω.m | 10 ⁻¹² m ² /s | Ω.m | RC | 10 ⁻¹² m ² /s | αD56 | αD90 |
| Zone sup -4 mZH | 4211-01 | 10/07/2004 | 0.35 | 18 | 2.44 | 129 | 70.5 | 2.9 | 214 | 1.4 | 304 | 84 | 1.0 | 1.04 | 0.89 |
| | 5112-01 | 01/09/2004 | 0.35 | 22 | 2.50 | 333 | 78 | 1.1 | 533 | 1.2 | 750 | 86 | 0.4 | -0.10 | 0.81 |
| | 5173-01 | 03/09/2004 | 0.35 | 21 | 2.47 | 339 | 78 | 1.5 | 460 | 0.9 | 631 | 90 | 1.1 | 0.82 | 0.31 |
| | 5237-01 | 06/09/2004 | 0.35 | 21 | 2.47 | 244 | 83 | 1.4 | 347 | 1.5 | 508 | 87 | 1.0 | -0.08 | 0.25 |
| | 5269-01 | 07/09/2004 | 0.35 | 20 | 2.45 | 351 | 72 | 0.8 | 402 | 0.4 | 469 | 82 | 0.5 | 0.95 | 0.45 |
| | 6357-01 | 21/10/2004 | 0.34 | 19 | 2.50 | 464 | 109 | 1.0 | 587 | 0.8 | 750 | 138 | 0.6 | 0.37 | 0.47 |
| 6905-01 | 03/12/2004 | 0.34 | 21 | 2.51 | 121 | 102 | 2.8 | 486 | 1.0 | 763 | 121 | 0.8 | 1.48 | 1.09 | |
| Zone inf -4 mZH | 5206-01 | 04/09/2004 | 0.35 | 21 | 2.47 | 78 | 66 | 3.6 | 158 | 2.1 | 201 | 72 | 1.8 | 0.80 | 0.60 |
| | 3668-02 | 01/11/2004 | 0.34 | 22 | 2.50 | 65 | 70 | 6.2 | 125 | 3.1 | 220 | 97 | 2.7 | 1.00 | 0.72 |
| | 3712-02 | 08/11/2004 | 0.34 | 21 | 2.50 | 61 | 80.5 | 5.7 | 92 | 3.5 | 174 | 102 | 2.6 | 0.71 | 0.67 |
| | 6804-01 | 26/11/2004 | 0.34 | 23 | 2.50 | 78 | 67 | 5.4 | 138 | 3.3 | 158 | 96 | 2.2 | 0.70 | 0.77 |
| | 3896-02 | 06/12/2004 | 0.34 | 23 | 2.50 | 50 | 81.5 | 6.0 | 85 | 3.6 | 158 | 100 | 2.2 | 0.72 | 0.86 |
| | 6987-01 | 08/12/2004 | 0.34 | 22 | 2.51 | 67 | 77 | 6.8 | 107 | 3.6 | 190 | 99 | 2.2 | 0.89 | 0.97 |
| | 3980-02 | 14/12/2004 | 0.34 | 21 | 2.50 | 69 | 82 | 6.3 | 85 | 3.2 | 121 | 99 | 2.3 | 0.96 | 0.88 |



Photo 6
Vue d'un caisson quadrilobé
View of a four-lobe caisson



Photo 7
Vue
d'un caisson
monolobé
View
of a single-lobe
caisson

■ LES MESURES SUR CHANTIER

Les essais retenus pour le contrôle de la durabilité des bétons sur chantier et leurs validations par le client comprenaient l'essai de migration d'ions chlorés par courant imposé selon la méthode NTB 492 ainsi que la mesure de la résistivité électrolytique du béton durci (tableau IV). Quelques réglages et adaptations des deux formulations auront été nécessaires sur site.

Les deux formulations, très pointues, développées en laboratoire, mais néanmoins applicables et contrôlables en phase travaux, ont donné entière satisfaction au client.

Ce chantier aura permis aux différentes équipes de Bouygues Travaux Publics, que ce soit à la direction technique ou sur le chantier, de prendre l'entière mesure de l'aspect durabilité, aussi bien en phase d'étude qu'en phase de production et de contrôle (photos 6 et 7).

ABSTRACT

The durability of concretes in maritime structures. The Mediterranean Tangier commercial port

F. Canteau

The durability of concretes is a concept that appeared in the Bouygues Travaux Publics (public works) teams soon after the year 2000. The project for the new Mediterranean Tangier port enabled the development of durability check tests in both the design engineering phases and the works phases. The concrete laboratory of Bouygues Travaux Publics became equipped with instruments for measuring durability by accelerated ageing and was enriched by a database making it possible to respond upstream to the criteria specified by the customer. These tests were then continued on the site to allow the concrete to be monitored day by day.

RESUMEN ESPAÑOL

Durabilidad de los hormigones en las obras marítimas. El puerto de comercio de Tanger Méditerranée

F. Canteau

La durabilidad de los hormigones constituye un concepto que ha aparecido en los equipos de Bouygues Travaux Publics a principios de los años 2000. Una obra permitió el desarrollo de ensayos de control de la durabilidad tanto en las etapas de estudios como en las etapas de trabajo : el nuevo puerto de Tanger Méditerranée. El laboratorio hormigón de Bouygues Travaux Publics se ha dotado de equipos de mediciones de la durabilidad mediante envejecimiento acelerado y ha aprovechado la ocasión para constituir una base de datos que permite responder en las etapas anteriores a los criterios especificados por el cliente. A continuación, estos ensayos fueron reconducidos en las obras para permitir el control día a día de los hormigones.

Formulation, retrait et autoplaçants

Recherche universitaire et industrie :

Les bétons autoplaçants (BAP), bétons fluides mis en place sans vibration, se démocratisent peu à peu dans le monde de la construction. L'intérêt porté à ces bétons de nouvelle génération par la profession a donné naissance à un projet national (PN B@P), qui a rassemblé des industriels et des laboratoires de recherche, dans le but de faciliter leur développement. Dans ce contexte, l'Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM) s'est associé au groupe VM Matériaux, producteur BPE de l'Ouest de la France, pour concrétiser ses travaux de recherche. Cet article présente certains résultats de la thèse de Ph. Turcry, effectuée en convention Cifre dans le cadre du partenariat entre le GeM et VM Matériaux.



Photo 1
Coulage de la dalle de 950 m²
de la médiathèque de La Roche-sur-Yon
(85) en 2001

*Pouring the 950 sq. m slab
of the Roche-sur-Yon media library in 2001*



Photo 2
Coulage de fondation (béton autoplaçant
fibré) en 2002

*Pouring the foundation (self-placing fibrous
concrete) in 2002*

Les fabricants de bétons prêts à l'emploi se sont lancés ces dernières années dans la production de bétons fluides, caractérisés par une mise en place sans vibration, les bétons autoplaçants (BAP). Même si la production reste minime (de 1 à 4 % du volume total suivant les régions), les BAP se démocratisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment (photos 1 à 3). Cette nouvelle génération de bétons a les atouts nécessaires à la consolidation de son développement actuel. En témoignent les gains de productivité et l'élimination des problèmes liés à la vibration, souvent évoqués à leur propos. A cela s'ajoute aussi un contexte social favorable. Les métiers du génie civil ont du mal à recruter une nouvelle génération d'ouvriers qualifiés. Les BAP figurent parmi les progrès techniques qui rendent plus attractifs ces métiers, parce qu'améliorant les conditions sur chantier. L'intérêt porté aux BAP par la profession a donné naissance à un projet national, intitulé PN B@P, labellisé par le Réseau génie civil et urbain (RGC&U)

et subventionné par l'Etat. Ce projet a rassemblé des industriels et des laboratoires de recherche, avec pour objectif une meilleure maîtrise des bétons autoplaçants.

L'un des intérêts d'un projet national est de faciliter la diffusion des données de la littérature scientifique et technique, tout en prenant en compte les spécificités hexagonales. Dans cet état d'esprit, le GeM, Institut de recherche en génie civil et mécanique de la métropole Nantes - Saint-Nazaire (cf. encadré "GeM"), a souhaité participer au PN B@P en s'associant à un partenaire industriel de dimension nationale. L'appel a été entendu par le groupe VM Matériaux, qui possède une vingtaine de centrales BPE dans l'Ouest de la France (cf. encadré "VM Matériaux").

La collaboration scientifique entre VM Matériaux et le GeM a pris la forme d'une thèse, financée par une bourse Cifre (cf. encadré "Les conventions Cifre"), dont nous présentons dans la suite quelques résultats. Cette collaboration a également permis de créer, au sein du GeM, une équipe de recherche technologique (ERT, label du ministère délégué à la Recherche), avec l'appui d'un second partenaire industriel, EDF, et l'aide de la Région des Pays de la Loire. L'équipe "Rupture et durabilité des ouvrages" (ERT R & DO) s'intéresse à la maîtrise des cycles de vie d'un ouvrage du génie civil - de sa construction à son vieillissement.

Comme la plupart des producteurs de béton, VM Matériaux commercialise des BAP depuis la fin des années 1990. A l'arrivée du GeM, le groupe a exprimé sa volonté, d'une part d'améliorer les techniques de formulation de ces nouveaux bétons,

GeM - INSTITUT DE RECHERCHE EN GÉNIE CIVIL ET MÉCANIQUE (UMR CNRS 6183)

Le GeM a pour vocation de structurer la recherche universitaire en mécanique du solide dans la métropole Nantes - Saint-Nazaire. Sa démarche scientifique part de l'élaboration et la caractérisation des matériaux, pour aboutir aux calculs des structures et ouvrages dans l'environnement. Ses travaux sont menés en étroite collaboration avec le monde industriel, maîtres d'ouvrage ou entreprises spécialisées dans les domaines de la mécanique et du génie civil.

Le GeM regroupe une centaine de chercheurs et enseignants-chercheurs, installés sur trois sites : l'École Centrale de Nantes, la Faculté des sciences et des techniques de l'Université de Nantes et l'IUT de Saint-Nazaire.

Le GeM comprend trois pôles de recherche : le pôle "Matériaux poreux, interactions et ouvrages", le pôle "Structures et couplages" et le pôle "Matériaux et procédés de fabrication". Une ERT (Equipe de recherche technologique), intitulée "Rupture et durabilité des ouvrages", de vocation transversale, complète l'ensemble du dispositif.

Pour plus d'informations : www.ec-nantes.fr/gem

VM MATÉRIAUX

Avec trois domaines d'activité complémentaires - le négoce de matériaux de construction, la fabrication de béton industriel et prêt à l'emploi et la fabrication de menuiseries -, VM Matériaux s'adresse aux professionnels du bâtiment. Situé dans le grand Ouest, le groupe possède 78 agences de négoce (77 % du CA), sept usines de menuiserie (10 % du CA), 22 centrales BPE et cinq usines de préfabrication (13 % du CA). VM Matériaux rassemble 2 000 salariés pour un chiffre d'affaire de 433 millions d'euros en 2004.

Pour plus d'informations : www.vm-materiaux.fr

fissuration des bétons

un partenariat constructif

d'autre part de faire la lumière sur les problèmes ponctuels de fissuration rencontrés sur site. Ce dernier point correspondait aux axes de recherche du PN B@P auxquels participait le laboratoire. Dans cet article, nous présentons quelques résultats de la thèse de Philippe Turcry [1] (disponible sur le site www.ec-nantes.fr/ert).

■ ETUDE DE LA FORMULATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Retour sur le concept des bétons auto-plaçants

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis les années 1980, engendrant une perte de savoir technique, notamment dans le domaine de la mise en place du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit en France par béton

Photo 3
Coulage d'une chape (mortier auto-nivelant pompé) en 2002

Pouring a screed (pumped self-levelling mortar) in 2002



Photo 4
Différence de consistance entre un béton ordinaire ou vibré (à gauche) et un BAP (à droite)

Difference of strength between an ordinary or vibrated concrete (on the left) and a self-placing concrete (on the right)

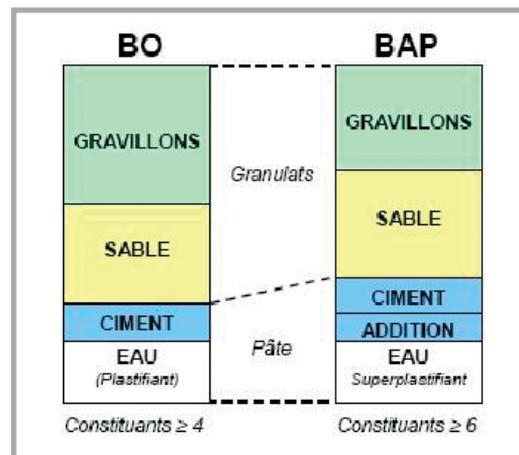


Figure 1
Compositions d'un béton ordinaire et d'un BAP
Composition of an ordinary concrete and a self-placing concrete

auto-plaçant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les BAP se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais (photo 4). Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte (mélange du ciment, de l'eau et d'une addition) est privilégiée au détriment des gravillons (figure 1). C'est principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Le volume important d'éléments fins permet de garantir le compromis entre stabilité et fluidité et l'ajout d'un superplastifiant limite la demande en eau du mélange.

Philippe Turcry



ATTACHÉ TEMPORAIRE
EN ENSEIGNEMENT
ET EN RECHERCHE
IUT de Saint-Nazaire

Ahmed Loukili



MAÎTRE
DE CONFÉRENCES
Ecole Centrale de Nantes

Gilles Pijaudier-Cabot



PROFESSEUR
Ecole Centrale de Nantes

Philippe Dubreil



CHEF DE MARCHÉ BPE
VM Matériaux

LES CONVENTIONS CIFRE

Depuis leur création en 1981, les Conventions industrielles de formation par la recherche (Cifre) sont gérées et animées par l'ANRT (Association nationale de la recherche technologique) pour le compte du ministère de la Recherche. Les CIFRE associent autour d'un projet de recherche et développement, qui conduira à une soutenance de thèse de doctorat, trois partenaires : une entreprise, un jeune diplômé bac + 5, un laboratoire. L'entreprise signe un contrat à durée indéterminée ou déterminée de 3 ans et verse au "jeune CIFRE" un salaire, dont le montant minimal est fixé. Pendant les trois ans que dure la convention, l'entreprise se voit attribuer une subvention forfaitaire annuelle, que lui verse l'ANRT.

Pour plus d'informations :
www.anrt.asso.fr

► Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association française de génie civil [2] : l'essai d'étalement (fluidité), l'essai à la boîte en L (mobilité en milieu confiné), l'essai de stabilité au tamis (résistance à la ségrégation).

Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues de manière empirique. Les méthodes de composition des bétons vibrés (par exemple Dreux-Gorisse) ne sont en effet pas adaptées, car elles ne prennent en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant le travail du formulateur. Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport massique gravillon sur sable proche de 1 ; le volume de pâte varie entre 310 et 400 l/m³ ; la masse de ciment est fixée par les normes, soit dans les cas courants de 300 à 350 kg/m³ ; la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais, effectués souvent en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une formule est rendu difficile par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication (erreur de pesée, etc.). On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Vers une rationalisation de la formulation [3]

Il existe dans la littérature des méthodes scientifiques de composition des BAP. Partant de ce constat, la première année de thèse a été consacrée à l'étude de ces différentes approches, dans le but de rationaliser la formulation chez VM Matériaux.

Après une recherche bibliographique, trois approches de formulation récurrentes dans la littérature ont été sélectionnées. Le principe de chaque approche est résumé ci-après.

Approche japonaise [4] : La première méthode testée est celle développée au Japon par les inventeurs du concept des BAP. Les volumes de gravillon et de sable sont fixés de manière forfaitaire – et donc sécuritaire. La composition de la pâte (eau, ciment, addition, adjuvant) est optimisée par des essais sur mortiers.

Approche par minimisation de la pâte [5] : Les auteurs de la méthode supposent que la pâte sert, d'une part, à fluidifier le béton et, d'autre part, à assurer sa stabilité. Pour chaque fonction, ils proposent un critère permettant d'obtenir un volume de pâte minimal permettant de remplir la fonction. Le volume de pâte retenu doit être supérieur aux deux volumes limites. Le dosage en adjuvant se fait par des essais de calage.

Approche par optimisation du squelette granulaire [6] : Le LCPC a développé un logiciel de formulation, basé sur le calcul de la compacité du squelette granulaire (la plupart des propriétés d'un béton – résistance, consistance – dépendent de l'arrangement des grains solides). A partir de données sur les constituants, le logiciel permet de calculer les propriétés d'une formule de BAP, avec notamment des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité.

Pour évaluer leur efficacité, mais aussi leur faisabilité dans le contexte industriel, ces approches ont été testées sur des constituants de centrales de VM Matériaux. Des formules de béton ont donc été composées, en appliquant à la lettre les méthodes de la littérature, puis vérifiées avec les essais de l'AFGC.

Des conclusions pratiques ont pu être tirées de cette étude. Le tableau I récapitule les principales différences entre les trois approches. Envisagée de la sorte, la composition des BAP présente un besoin d'équipements, informatiques ou de laboratoire, a priori absents chez beaucoup de producteurs de béton. VM Matériaux a néanmoins la chance de posséder un laboratoire Qualité, chargé du contrôle des centrales à la norme NF, du suivi des chantiers spéciaux (ouvrages d'art) et des litiges éventuels avec les clients. A la suite de cette étude, plusieurs outils ont été proposés et mis en place au laboratoire :

◆ le nombre d'inconnues et d'équations à résoudre pour formuler un BAP est tel qu'il n'est pas super-

Tableau I
Comparaison de différentes approches de la formulation des BAP

Comparison of various approaches to self-placing concrete mix design

| | Approche Japonaise | Approche par minimisation du volume de pâte | Approche par optimisation du squelette granulaire |
|---------------------------|--|---|--|
| Inconnues fixées a priori | <ul style="list-style-type: none"> • Répartition entre les gravillons • Masse de ciment | <ul style="list-style-type: none"> • Répartition entre les gravillons • G/S • Masse de ciment • Masse d'eau • Masse d'adjuvant | <ul style="list-style-type: none"> • (Masse de ciment) |
| Essais en amont | <ul style="list-style-type: none"> • Essais sur mortiers • Compacités | <ul style="list-style-type: none"> • Aucun | <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation des constituants (compacités, demande en eau dosage à saturation, etc.) |
| Essais en aval | <ul style="list-style-type: none"> • Vérification (et ajustement) de la formule | <ul style="list-style-type: none"> • Ajustement de la formule | <ul style="list-style-type: none"> • Vérification (et ajustement) de la formule |
| Equipement | <ul style="list-style-type: none"> • Malaxeur à mortier | <ul style="list-style-type: none"> • Ordinateur | <ul style="list-style-type: none"> • Logiciel LCPC • Ordinateur • Malaxeur à mortier • Cône de Marsh • Dispositif de mesure de la compacité |
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> • Optimisation sur mortiers (adjuvants) • Dosage des gravillons | <ul style="list-style-type: none"> • Support informatique | <ul style="list-style-type: none"> • Méthode pédagogique et cartésienne |
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> • Bétons très visqueux • Approche sécuritaire | <ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité | <ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'essais de caractérisation en amont |

flu d'utiliser des moyens informatiques. Dans cet objectif, les critères de la méthode de minimisation de la pâte ont été programmés dans un tableur, pour servir de support à la formulation ;

- ◆ il a été proposé de doser les gravillons à partir de leur compacité (à l'instar de la méthode japonaise). En pratique, il est facile d'évaluer grossièrement cette grandeur par piquage des gravillons secs dans un cylindre 16 x 32 cm ;

- ◆ l'approche du LCPC, qui est sans doute la plus cartésienne des trois testées, présente le désavantage d'un nombre élevé de paramètres d'entrée pour le logiciel (données sur les constituants à mesurer avant la formulation, et souvent non proposées par les fournisseurs). Le logiciel du LCPC a néanmoins servi à la formulation de bétons pour des centrales d'un même secteur géographique (et donc possédant les mêmes matériaux) ;

- ◆ la mise au point d'une formule théorique n'est, à elle seule, pas suffisante. Quelle que soit la méthode utilisée, la formule doit être aussi vérifiée, si possible d'abord en laboratoire, puis en centrale à béton. Le logiciel du LCPC a trouvé là une utilisation intéressante, puisqu'il a permis de proposer une procédure de correction d'une formule de BAP.

■ ETUDE DU RETRAIT ET DE LA FISSURATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Quelques a priori sur les BAP vis-à-vis du retrait

Même en l'absence de chargement extérieur, un élément en béton voit son volume diminuer au cours du temps. Cette contraction, plus connue sous le nom de retrait, a notamment pour causes l'hydratation du ciment et le séchage. Dans une structure, le volume d'un élément en béton ne peut pas changer librement. En conséquence, lorsque son retrait est gêné, le béton est soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration potentielle. Le béton est donc un matériau qui a une tendance naturelle à la fissuration.

Les BAP sont suspectés de présenter un risque de fissuration plus élevé que les bétons ordinaires (BO). Ces craintes se justifient par leur volume de pâte élevé, en comparaison des BO. De fait, c'est la pâte qui, au cœur du matériau, est le siège des contractions d'origine hydrique ou chimique, les granulats courants ne présentant pas de retrait. Par ailleurs, les BAP ont généralement un faible rapport eau sur fines (ciment et addition), paramètre de formulation connu pour augmenter la fissuration au jeune âge.

A la suite de l'étude de la formulation, la thèse a été consacrée au retrait et au risque de fissuration qu'il engendre. La question sous-jacente à ses tra-

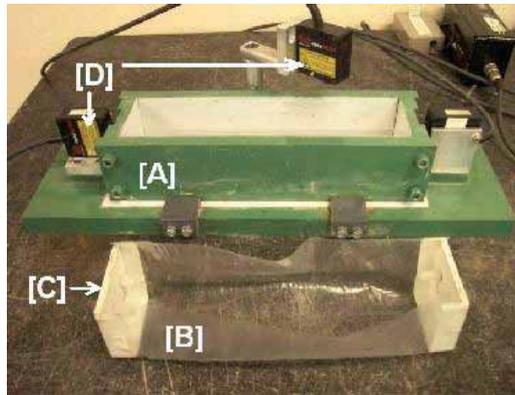


Photo 5
Dispositif de mesure du retrait plastique (contraction du béton frais)

Plastic shrinkage measuring device (contraction of fresh concrete)

vaux est la suivante : un BAP et un BO, formulés avec les mêmes constituants et de résistance équivalente, ont-ils un potentiel de fissuration équivalent ? Notre objectif fut donc de confirmer ou non les a priori cités précédemment, mais également de faire la lumière sur certaines fissures apparues sur site, aux prémices du développement des BAP. Une fois le problème posé, notre démarche a été de considérer deux phases de la vie du béton : l'état frais (période entre le coulage et la fin de prise) et l'état durci (après prise).

Étude du retrait à "l'état frais"

Des dispositifs originaux ont été développés pour étudier le phénomène du retrait à l'état frais, encore appelé retrait plastique. La difficulté de conception de tels appareillages réside dans le fait qu'un béton, et a fortiori un BAP, ne possède pas ou presque de cohésion juste après le coulage. Les solutions retenues pour mesurer la contraction du béton frais sont présentées sur la photo 5. Les éléments du dispositif sont les suivants :

- ◆ un moule : le moule prismatique en acier [A], de dimensions 7 x 7 x 28 cm, repose sur une plaque recouverte de téflon. L'intérieur de ses parois est également recouvert de téflon. Les deux extrémités sont percées en leur centre d'une ouverture circulaire ;

- ◆ une enveloppe : à l'intérieur du moule vient se placer une enveloppe formée par une feuille de polyane [B] et deux plaques minces en PVC blanc [C]. Chacune d'elles est collée sur la feuille avec un ruban adhésif double face. Coulé dans l'enveloppe, le béton n'est pas directement en contact avec le moule ;

- ◆ des capteurs laser : lorsque l'échantillon se rétracte, il entraîne les plaques de PVC. Deux capteurs lasers [D], dont les rayons se réfléchissent comme schématisé sur la figure 2, sont utilisés pour mesurer leurs déplacements.

Le retrait plastique, exprimé en $\mu\text{m}/\text{m}$, est déduit de la somme des déplacements des deux plaques, divisée par la longueur de l'échantillon. Le capteur laser [D], placé au-dessus de l'échantillon, permet de mesurer le déplacement d'un carré de téflon dé-

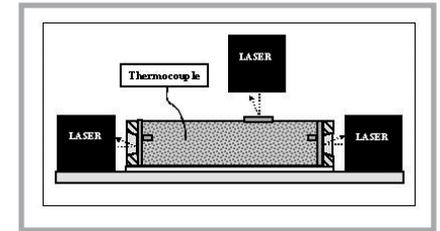


Figure 2
Schéma du dispositif de mesure des déformations plastiques
Diagram of the plastic deformation measuring device

Figure 3
 Comparaison du retrait
 plastique de différentes
 formules de BAP (rouge)
 et BO (bleu)
 Comparison of plastic
 shrinkage for various mix
 designs for self-placing
 concrete (red)
 and ordinary concrete
 (blue)

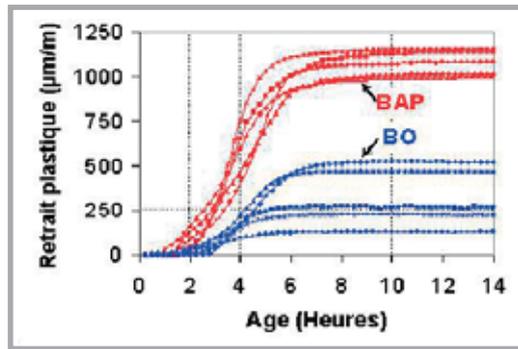
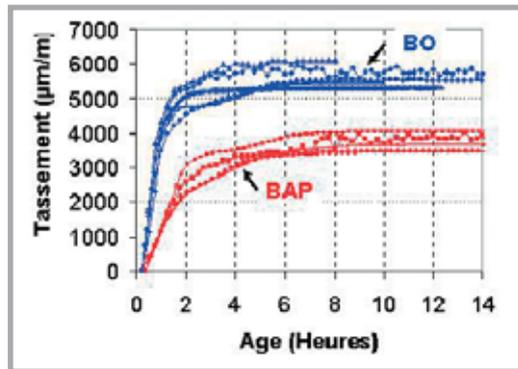


Figure 4
 Comparaison
 du tassement
 de différentes
 de BAP (rouge)
 et BO (bleu)
 Comparison
 of subsidence for various
 mix designs
 for self-placing concrete
 (red) and ordinary
 concrete (blue)



posé à la surface du béton. Le déplacement du carré rapporté à la hauteur de l'échantillon nous donne le tassement, exprimé en µm/m.

Au cours de la mesure du retrait dû au séchage, un essai de perte de masse est réalisé sur un autre échantillon pour déterminer le taux d'évaporation de l'eau du béton (exprimée en kg/m²/h). A l'aide d'un capteur de pression, on suit également l'évolution de la pression de l'eau interstitielle dans un autre échantillon. Celle-ci devient négative (on parle de dépression capillaire) lorsque le séchage, ou la consommation d'eau par l'hydratation du ciment, provoque l'apparition de ménisques à la surface, ou au sein du matériau. C'est une donnée intéressante, puisque c'est le moteur de la contraction du béton.

Ces mesures sont réalisées en ambiance contrôlée, dans une salle climatisée à 20 °C et 50 % d'humidité relative.

A l'aide des dispositifs développés, différentes formules de BAP ont été étudiées : des formules issues du Projet national B@P et des formules produites par VM Matériaux. Pour chaque formule du PN B@P, une formule de béton ordinaire a été dérivée, c'est-à-dire formulée avec les mêmes constituants, avec le cahier des charges suivant : une consistance très plastique, une même résistance à 28 jours que le BAP associé et un dosage en ciment également proche de celui du BAP. Dans le cas des formules de BAP de VM Matériaux, le BO associé est un béton issu de la même centrale de production (donc fabriqué avec les mêmes constituants) et destiné aux dallages.

Cette campagne expérimentale a donné un résultat intéressant : soumis à un séchage (évaporation de 0,10 kg/m²/h), les BAP présentent un retrait plastique systématiquement plus élevé que celui des BO (figure 3). A 10 heures, le retrait des BAP

est supérieur ou égal à 1 000 µm/m ; le retrait des BO est inférieur ou égal à 500 µm/m.

L'analyse des courbes de retrait et des autres phénomènes mesurés (tassement, dépression capillaire, prise) permet d'apporter quelques explications à cette différence de comportement :

- ◆ à l'inverse du retrait, le tassement (déformation verticale qui suit le coulage) est plus élevé dans le cas des BO que dans celui des BAP (figure 4). Les BO présentent donc un ressuage¹ plus important. Le ressuage forme une cure "naturelle" contre le séchage ;

- ◆ les mesures de pression confirment que les BAP sont moins protégés contre l'évaporation. En effet, la dépression capillaire se développe plus rapidement dans leur cas, traduisant une apparition plus rapide de ménisques à leur surface ;

- ◆ l'étude de la prise révèle que les BAP ont tendance à prendre un peu plus tardivement que les BO, à cause de leur dosage en superplastifiant important. Or la prise est un phénomène qui s'oppose au retrait plastique.

De cette étude, il ressort la nécessité, pour les bétons autoplaçants destinés aux applications horizontales, d'être protégés contre le séchage. Dans la pratique, la solution couramment employée contre l'évaporation à la surface du béton frais est l'application d'un produit de cure. La figure 5 montre que l'application d'un produit de cure (de type solvanté) permet de réduire efficacement (d'environ 70 %) le retrait plastique des BAP.

Étude du retrait à "l'état durci" [7]

A l'état frais, le béton a connu une première contraction volumique. Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va subir principalement trois retraits : le retrait thermique lié au dégagement de chaleur de l'hydratation du ciment, le retrait de séchage et le retrait endogène, provoqué également par la chimie du ciment. Dans la troisième étape de la thèse, nous nous sommes intéressés aux deux dernières formes de retrait et au risque de fissuration qu'elles occasionnent pour le béton. Là encore, une approche expérimentale a été privilégiée. Jusqu'à présent, les études du problème se sont concentrées sur certains facteurs de la fissuration, séparément. Dans ce travail, nous avons tenté de considérer le problème dans son ensemble, en définissant la notion de potentiel de fissuration. Les différentes propriétés du béton intervenant dans le mécanisme de fissuration ont été étudiées : retrait (photo 6), fluage, module élastique, résistances, paramètres de rupture (photo 7). Le phénomène de fissuration par retrait a également été étudié de manière frontale, par l'utilisation d'un dispositif de retrait empêché, développé

1. Le ressuage est une remontée d'eau à la surface, le résultat de la compaction du béton sous l'effet de la gravité)

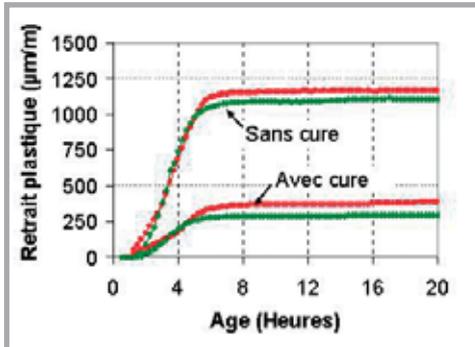


Figure 5
 Effet d'un produit de cure
 sur le retrait plastique
 Effect of a curing product on plastic
 shrinkage

pendant la thèse (photo 8). Ce dispositif est constitué d'un anneau en acier autour duquel est coulé un anneau en béton. L'acier étant beaucoup plus rigide que le béton, l'anneau en béton voit son retrait empêché et est mis en traction. Lors de l'essai, on mesure la déformation de l'anneau en acier, qui permet de remonter aux contraintes dans le béton, et, finalement, l'âge de la fissuration du matériau. Plus le béton fissure tôt, plus il présente un potentiel de fissuration important.

En outre, une modélisation numérique de l'essai à l'anneau a été développée, dans le but de mieux comprendre l'effet des propriétés du béton sur la fissuration, et au final tirer plus d'informations des résultats expérimentaux.

Comme dans l'étude du retrait plastique, nous avons mené une campagne expérimentale portant sur diverses formules de BAP de VM Matériaux et du PN B@P, et les formules de BO dérivées. Pour un BAP et un BO de même résistance et fabriqués avec les mêmes constituants, nous avons obtenu les résultats suivants :

- ◆ le module élastique du BAP est systématiquement plus faible, mais l'écart avec le module du béton ordinaire est inférieur à 10 %, ce qui ne pose pas de problème vis-à-vis des règlements (figure 6) ;

- ◆ le retrait total du BAP est plus élevé que celui du béton ordinaire. L'écart est là aussi minime (figure 7). Cependant, si le BAP présente un défaut de stabilité (ségrégation), mis en évidence par l'essai au tamis, son retrait total peut être significativement plus élevé ;

- ◆ en compression, le fluage total du BAP est identique à celui du béton ordinaire. Nous avons vérifié que le modèle du code CEB-FIP permet bien de prédire la déformation de fluage. Avec ce modèle, nous avons simulé correctement la relaxation de la contrainte dans l'anneau de fissuration. Cela confirme indirectement l'absence de différence de comportement entre les deux bétons ;

- ◆ les paramètres de rupture ont été déterminés par des essais de flexion trois points sur poutres entaillées. Ils nous ont permis de retrouver par le calcul les grandes tendances sur l'âge de fissuration de l'anneau, et ceci malgré l'imprécision des mesures. Aucune différence nette n'a été observée sur les paramètres de rupture entre les deux types de béton.

La comparaison des propriétés des deux bétons nous montre qu'un BAP et un béton ordinaire dérivé présente en théorie le même potentiel de fissuration, si toutefois le BAP présente une bonne résistance à la ségrégation. Ce résultat a été confirmé par les essais à l'anneau de fissuration.

Synthèse des études sur le retrait

A l'état frais, les BAP ne doivent pas présenter un risque de fissuration accrue, à condition d'être pro-



Photo 6
Dispositif de mesure du retrait après prise
Device for measuring post-setting shrinkage



Photo 8
Anneau de fissuration
Cracking ring

tégés par un produit de cure, qui compensera leur absence de ressuage. A l'état durci, les BAP présentent le même potentiel de fissuration due au retrait que des bétons ordinaires, de même résistance et fabriqués avec les mêmes constituants, à condition de rester homogènes une fois en place.

CONCLUSION

S'ils offrent de multiples avantages à leurs utilisateurs, les bétons autoplaçants sont aussi une source de motivation pour les acteurs du BPE, parce qu'ils font du béton un matériau toujours plus innovant. L'association de VM Matériaux et du GeM a en ce sens répondu à une demande de l'industrie de voir le monde de la recherche participer activement au développement de ces matériaux à haute technicité.

Réciproquement, s'associer à un industriel a aussi permis au laboratoire d'orienter et spécifier les



Photo 7
Essai de flexion trois points (détermination de la résistance à la fissuration)
Three-point bending test (determination of cracking strength)

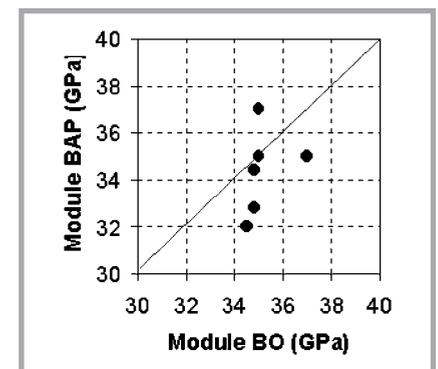


Figure 6
Module élastique de bétons autoplaçants en fonction du module élastique de bétons ordinaires dérivés (même résistance, mêmes constituants), à 28 jours

Modulus of elasticity of self-placing concretes based on the modulus of elasticity of derived ordinary concretes (same strength, same components), at 28 days

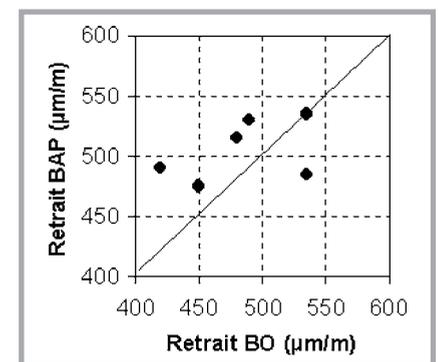


Figure 7
Retrait total de bétons autoplaçants en fonction du retrait total de bétons ordinaires dérivés (même résistance, mêmes constituants), à 100 jours

Total shrinkage of self-placing concretes based on the total shrinkage of derived ordinary concretes (same strength, same components), at 100 days

recherches du projet national B@P. Avec d'autres laboratoires, l'équipe ERT R & DO était chargée de la question des déformations différées. Face aux quelques problèmes rencontrés par VM Matériaux sur les chantiers, nous avons souhaité nous placer dans le cadre plus large de la fissuration du béton aux différentes étapes de son vieillissement. L'exemple de VM Matériaux et du GeM illustre l'intérêt commun, pour l'industrie et les laboratoires universitaires, de s'associer sur des sujets de recherche technologique. La collaboration entre VM Matériaux et le GeM ne s'est d'ailleurs pas achevée avec la thèse de Ph. Turcry. D'autres études, certes à moindre échelle, ont permis de poursuivre le partenariat. Citons, par exemple, une étude récente sur la caractérisation des propriétés de transfert de mortiers fluides (Kalkiss®), destinés notamment aux planchers chauffants.

Références

- [1] Ph. Turcry, "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants - Influence de la formulation". Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2004.
- [2] Association française de génie civil, "Les bétons autoplaçants : recommandations provisoires". AFGC, 2000.
- [3] Ph. Turcry et A. Loukili. "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants". *Revue française de génie civil*, vol. 7, pp. 425-450, 2003.
- [4] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete, development, present use and future". Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [5] V. K. Bui and D. Montgomery, "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume". Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM, 1999.
- [6] F. de Larrard, "Structure granulaire et formulation des bétons". LCPC, 2000.
- [7] Ph. Turcry, A. Loukili, K. Haidar, G. Pijaudier-Cabot, A. Belarbi, "Evaluation of shrinkage cracking potential of self-compacting concrete at the hardened state", à paraître dans *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005.

ABSTRACT

Mix design, shrinkage and cracking of self-placing concretes. University and industrial research : a constructive partnership

Ph. Turcry, A. Loukili, G. Pijaudier-Cabot, Ph. Dubreil

Self-placing concretes, fluid concretes that are placed without vibration, are gradually becoming more widespread in the construction world. The interest shown by the industry for these new-generation concretes has given rise to a national project (PN B@P), bringing together industrial manufacturers and research laboratories, in order to facilitate their development. In this context, the civil engineering and mechanical research institute (GeM) joined forces with the VM Matériaux group, a producer of ready-mixed concrete in western France, to materialise its research work. This article describes some results of the thesis by Ph. Turcry, produced under a "Cifre" scholarship within the framework of the partnership between the GeM and VM Matériaux.

RESUMEN ESPAÑOL

Formulación, retracción y agrietamiento de los hormigones autocompactantes. Investigación universitaria e industria : una colaboración constructiva

Ph. Turcry, A. Loukili, G. Pijaudier-Cabot y Ph. Dubreil

Los hormigones autocompactantes (HAC), hormigones fluidos aplicados sin vibración, vienen a democratizarse poco a poco en el mundo de la construcción. El particular interés que se presta a estos hormigones de nueva generación por este sector de actividad dio lugar a un proyecto nacional (PN B@P), que reunió a los industriales y diversos laboratorios de investigación, con el objetivo de facilitar su desarrollo. En este contexto, el Instituto de investigación en ingeniería civil y mecánica (GeM) se ha asociado al grupo VM Matériaux, productor BPE (hormigones listos para usar) del Oeste de Francia, para concretizar sus trabajos de investigación. Este artículo presenta algu-

nos resultados de la tesis de Ph. Turcry, efectuada en convención Cifre en el marco de la colaboración entre el GeM y VM Matériaux.



La recherche sur les bétons à ultra hautes performances (BFUP) : vers un nouveau mode de construction ?

Depuis le premier projet réalisé en France en Béton fibré à ultra hautes performances (BFUP), à savoir la rénovation des réfrigérants de la centrale nucléaire de Cattenom (1997), huit années de recherche-développement et de réalisation notables se sont écoulées pendant lesquelles les différents acteurs du marché (laboratoires de recherche, organismes publics, entreprises, fournisseurs de matériaux et adjuvants) ont pu capitaliser une précieuse expérience.

Le présent article décrit la démarche de recherche suivie dans ce domaine par le groupe Eiffage, et au travers de ses récentes réalisations, propose quelques pistes dans lesquelles les BFUP pourraient révéler toutes leurs qualités.



Photo 1
Couverture du péage
de Millau - Eiffage TP

Roof covering of the Millau
toll system - Eiffage TP

■ LA MAÎTRISE DU MATÉRIAU BFUP

Suivant le principe qu'il vaut mieux changer un seul paramètre à la fois, les premières applications en France se bornèrent à substituer le béton armé ou BHP précontraint par du BFUP. Il s'agissait de valider le comportement du matériau avant de dessiner de nouvelles formes, attitude prudente surtout lorsque n'existe aucun cadre réglementaire. Le choix des BFUP pour la rénovation des réfrigérants de Cattenom a permis de mettre en œuvre des poutres précontraintes à fils adhérents, nettement plus performantes que le béton armé (poids propre divisé par 3) mais surtout beaucoup plus durables en milieu agressif.

Une deuxième étape fut franchie avec l'appui de la très regrettée Charte Innovation - Ouvrages d'art lors de la construction des ponts innovants de Bourges-Valence construits en BSI®. Ce chantier (cf. *Travaux* n° 783 - Février 2002), outre la validation in situ du matériau, a fait l'objet de très nombreux es-

sais qui permirent au groupe de travail "BFUP" d'élaborer les recommandations françaises de calcul.

■ LA MAÎTRISE RÉGLEMENTAIRE

Le groupe "BFUP", composé de tous les représentants de la profession, a donc élaboré sous l'égide de l'AFGC et du Setra un document traitant d'une part des procédures de qualification des matériaux, mais également des modifications à apporter aux règlements français BAEL et BPEL pour tenir compte du nouveau comportement des BFUP. Munies de ce viatique, certes provisoire et imparfait, les entreprises françaises ont alors pu proposer des solutions innovantes en BFUP à leurs maîtres d'ouvrage et en faire approuver la conception par les bureaux de contrôle.

Nota : Le BSI® est le BFUP développé par le groupe Eiffage. Il est élaboré à partir d'un Prémix appelé Sika-Ceracem préparé dans les usines de Sika France

Photo 5
Auvent en BSI nervuré –
Folly de Sonnestraal
(Pays-Bas) - Hürks Béton.
Détail des bracons

Canopy in ribbed BSI –
Folly de Sonnestraal
(Netherlands) – Hurks
Beton. Detail of brackets



Photo 2
Dalle alvéolaire en BFUP
pour pont mixte.
Projet national MIKTI –
LCPC – Paris

Cellular slab in ultra-high-
performance fibrous
concrete for composite
bridge. National project
MIKTI – LCPC – Paris



► Ce document, publié en janvier 2002, sans équivalent à l'étranger, lors de sa sortie, a connu un vif succès dans de nombreux pays. La rédaction d'un guide international, animée par la FIB (Fédération internationale du béton) est en cours [Task Group 8-6 – Président : Professeur J. Walraven – TU Delft].

■ LA LIBERTÉ DES FORMES

Pour le groupe Eiffage, la construction du viaduc de Millau fut l'occasion de tester le BSI® dans des formes inédites en confiant le projet de la couverture du péage à l'architecte Michel Herbert (photo 1). La surface hélicoïdale de la coque de 2800 m² qui survole les cabines de péage est obtenue par assemblage de 53 voussoirs ne comportant aucun

ne armature (*Travaux* n° 816 – Février 2005). La construction d'un voussoir, pourtant de dimensions exceptionnelles (28 m) ne requiert qu'une journée de préparation. En effet le fibrage, supprimant la notion d'enrobage, élimine également les contraintes de fabrication et de positionnement des armatures, tâche trop délicate pour une structure vrillée. Au bétonnage, effectué le lendemain, le BSI autoplaçant enrobe des blocs de polystyrène pré-découpés pour constituer une structure alvéolaire. Cette nouvelle liberté de forme peut également être illustrée par l'apparition d'éléments nervurés de faible épaisseur (20 à 25 mm) qui ne sont pas sans rappeler la construction métallique (photo 5). Citons enfin l'expérience menée actuellement dans le cadre du projet national MIKTI et consacré aux ponts mixtes. Un des thèmes de recherche consiste à remplacer la dalle supérieure en béton armé d'un tablier bipoutre par un plancher alvéolaire en BFUP beaucoup plus léger et plus durable (photo 2). De la réduction de poids propre est attendu un gain sur le dimensionnement général du tablier, en particulier pour les ouvrages de grande portée.

■ UNE APPROCHE "SYSTÈME"

La substitution pure et simple d'une structure en béton armé ou précontraint par du BFUP divise en général le poids propre par un facteur d'environ 3. Bien que spectaculaire, cet allègement ne peut justifier à lui seul l'utilisation d'un produit aussi élaboré, car proportionnellement beaucoup plus coûteux.

Seule l'approche "système" prônée par Yves Ma-

lier lors de l'apparition des BHP peut justifier le choix d'un BFUP car il engendre des économies dans d'autres parties du projet. On peut citer comme exemple la construction d'un pont-canal en BSI au-dessus du canal de l'Ourcq sur la ligne LGV Est pour le compte de RFF. L'allégement de la structure a permis sa préfabrication et sa mise en place à la grue (poids propre ramené de 140 t à 42 t). Les caractéristiques d'étanchéité et de résistance à l'abrasion du BSI ont permis d'économiser le traitement de surface en résine prévu à l'origine (photo 3).

Toutes ces améliorations ont rendu la solution BFUP compétitive par rapport à une solution traditionnelle.

■ LES APPLICATIONS EN BÂTIMENT

Tout d'abord utilisés pour leurs performances mécaniques dans le domaine des ouvrages d'art, les BFUP ont été également retenus pour la finesse de leurs formes et leur capacité portante dans la fabrication de panneaux ou éléments architectoniques en bâtiment.

La première structure porteuse en BFUP dans le domaine du bâtiment en France a été réalisée en 2004 pour la restructuration du siège social de Gécina, rue Volney à Paris où 84 poteaux préfabriqués en BSI® ont été mis en œuvre. Malgré leur faible section (12 cm à 30 cm) ces poteaux fortement chargés, stables au feu ISO 2 heures, ont été mis en œuvre en lieu et place de poteaux métalliques de forte épaisseur (*Travaux* n° 813 – Novembre 2004).

■ ÉMERGENCE D'UN NOUVEAU MODE CONSTRUCTIF

Quelles perspectives peut-on entrevoir au vu de ces différentes réalisations ? Les BFUP sont-ils simplement des super-bétons ou nous ouvrent-ils un autre domaine, rompant avec le savoir-faire antérieur ?

La possibilité de fabriquer des structures sans cage d'armatures ni nécessité de vibration devrait ouvrir des voies jusqu'alors interdites.

Pour éclairer notre propos, citons la réalisation récente de la Folly de Sonnestraal, auvent en BSI® construit par Hürks Béton (Pays-Bas). Cette élégante structure nervurée de 9 m x 9 m est supportée par un seul poteau et quatre branches (photos 4 et 5). Chaque branche dont la forme évolutive est établie en CAO a été coulée dans un moule préalablement taillé dans la masse par un robot trois axes. La fabrication d'un élément est donc ramenée à une simple opération de remplissage et démoulage, à la manière de la fonte. La rupture avec



Photo 3
Pont-canal en BSI.
LGV Est – Eiffage TP

Canal aqueduct made of BSI. East European High-Speed Train Line – Eiffage TP



Photo 4
Auvent en BSI nervuré – Folly de Sonnestraal (Pays-Bas) – Hürks Béton. Vue d'ensemble

Canopy in ribbed BSI – Folly de Sonnestraal (Netherlands) – Hürks Beton. General view

la technologie du béton armé traditionnel peut donc bien s'accomplir et peut-être rejoindre la démarche de la construction métallique avec ses robots de découpe et de soudage. A quand la fabrication automatisée en grande série de composants en BFUP ?

■ UN EFFORT DE RECHERCHE PERMANENT

La conception et la mise en œuvre de tels produits supposent un effort permanent de recherche. Pour soutenir sa démarche Eiffage a initié et mis en place un projet de recherche européen labellisé Eu-

► réka entièrement consacré au BSI et d'un budget de plus de 4 millions d'euros, avec pour partenaires :

- ◆ Sika France ;
- ◆ LCPC Nantes ;
- ◆ Hürks Béton (Pays-Bas) ;
- ◆ Université de Delft (Pays-Bas).

Beaucoup de chemin reste à parcourir pour voir les BFUP conquérir une part significative du marché. Certaines limites actuelles (temps de malaxage important, résistance à la traction encore modeste, prix élevé) doivent être repoussées pour rendre leur emploi plus compétitif. C'est le prochain défi à relever par les concepteurs et praticiens de ce matériau prometteur.

ABSTRACT

Research
on ultra-high-performance
concretes : toward a new
construction technique ?

Th. Thibaux

Since they were first used in France in 1997, ultra-high-performance fibrous concretes have been used successfully in several projects and in a sufficient variety of fields to be able to present an initial assessment.

The article gives a reminder of the stages passed through : material expertise, production of a regulatory text and finally research on new architectural shapes. Examples of construction with BSI®, a material developed by Eiffage Group, illustrate the article.

A new manufacturing technique, more highly automated, even seems to be taking shape, in an approach recalling that of steel users.

RESUMEN ESPAÑOL

Investigación en los
hormigones de ultra
elevados rendimientos :
¿hacia un nuevo modo
de construcción ?

Th. Thibaux

Desde su primera utilización en Francia en 1997, los Hormigones con fibras de ultra elevados rendimientos (BFUP) fueron utilizados con todo éxito en diversos proyectos y en los ámbitos suficientemente variados para poder levantar un primer balance.

En el presente artículo se recuerda las etapas ya recorridas : control del material, elaboración de un texto regulatorio y, finalmente, búsqueda de nuevas formas arquitectónicas. Diversos ejemplos de realizaciones en BSI®, material desarrollado por el grupo Eiffage, vienen a ilustrar este aspecto.

Un nuevo modo de fabricación, más automatizado, parece incluso vislumbrarse, en un enfoque que recuerda aquel de los usuarios del acero.

La maquette numérique, l'avenir de la construction et de la maintenance des ouvrages

Les travaux publics peuvent bénéficier des derniers progrès des nouvelles technologies de l'information par l'intermédiaire de la maquette numérique. Plus qu'une armoire à plans électronique, elle centralise les données et clarifie les dépendances entre les documents. Les travaux actuels de recherche en matière de comparaison sémantique de modèle rendront la maquette numérique plus robuste en suivant de près son évolution durant le cycle de vie de l'ouvrage associé. De plus, les acteurs peuvent travailler autour des mêmes jeux de données et sur le chantier, la mise à jour de ces informations permettra d'assurer la pérennité du modèle pour éviter les nombreuses pertes d'informations potentielles durant la réalisation du projet jusqu'à la réception et la maintenance de l'ouvrage.

Selon le dictionnaire encyclopédique illustré, la maquette s'apparente à une "Représentation en trois dimensions, à l'échelle réduite mais fidèle dans ses proportions et son aspect, d'un bâtiment, [...]". Cette définition réduit la maquette à un support de visualisation, éventuellement caractérisé par des images de synthèse dans le cadre de la maquette numérique. Sans lien avec le projet de construction, elle ne représente qu'un décor, qu'une vitrine commerciale, certes de plus en plus attirante grâce aux progrès en imagerie, mais portant peu d'intérêt scientifique.

C'est pourquoi la recherche des apports potentiels de la maquette numérique et de ses liens forts avec le projet de construction lui donnerait un rôle tout à fait différent, une aide non négligeable pour optimiser la communication et la réutilisation des données entre les acteurs de projet. Nous dépassons ainsi le cadre de la représentation graphique pour atteindre des problématiques de modélisation de données et de méthodes de projet et de travail collaboratif entre les acteurs.

Si aujourd'hui, l'outil informatique n'est utilisé que pour la CAO et le stockage de données centralisé autour de serveurs web, la maquette numérique de construction et plus particulièrement les IFC représentent une perspective attrayante d'évolution de la profession.

■ CONTEXTE ACTUEL

Les documents de projet

Durant tout le cycle de vie d'un ouvrage, de sa programmation à sa gestion, en passant par sa conception et sa construction, les acteurs de projet communiquent sur la base de documents : cahiers des charges, plans, notes de calcul, nomenclatures,

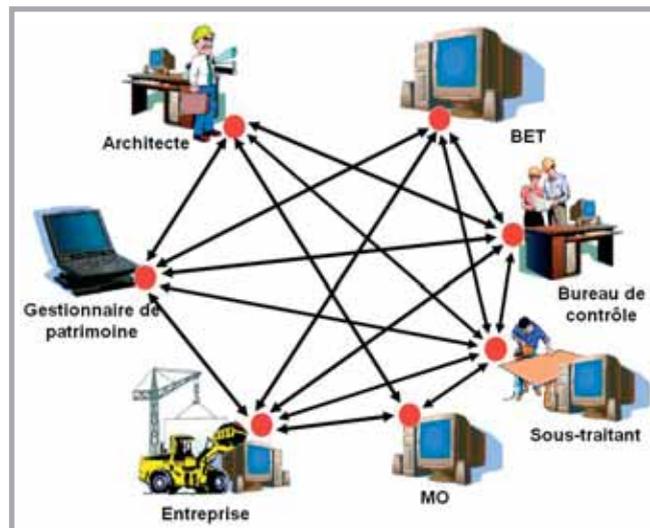


Figure 1
Mode de travail fragmenté à cause de multiples interfaces spécialisées. La communication et donc la collaboration entre acteurs ne sont pas optimales

Fragmented work technique due to numerous specialist interfaces. Communication and hence collaboration between players are not optimum

etc. Les technologies de l'information donnent la possibilité de rassembler ces informations au sein de serveurs de documents sur Internet, représentant alors des armoires à plan électroniques. Malheureusement, l'ensemble de ces documents est une collection hétérogène d'informations, ne rendant pas compte des dépendances complexes entre elles. La représentation d'une telle information est parfois ambiguë, tout au moins pour un système automatisé. Les synthèses se révèlent donc difficiles. Pour contourner la difficulté, les acteurs ne communiquent qu'à travers des interfaces spécialisées, mais les documents issus de métiers différents, architecture et structure par exemple, seront indépendants l'un de l'autre (figure 1). La synthèse et en particulier la vérification de la cohérence se font manuellement.

L'offre concrète actuelle :
AUTOCAD® ?

Aujourd'hui, la référence en matière de CAO est le logiciel AUTOCAD® ainsi que son format de fichier pro-

Geoffrey Arthaud



DOCTORANT DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES CSTB

Eric Lebègue



TECHNICAL LEADER DU PROJET IFC-BRIDGE HANOP

Alain Anfosso



CHEF DE PROJET CSTB

Souheil Soubra



CHEF DE DIVISION CSTB



Figure 2
Solution interopérable autour d'un bus d'intégration qui favorise la collaboration entre acteurs de projet

Interoperable solution around an integration bus which promotes cooperation between project players

```

Définition des objets

SCHEMA IFC_BRIDGE_V1;
...

TYPE IfcAbsorbedDoseMeasure = REAL;
END_TYPE;
TYPE IfcAccelerationMeasure = REAL;
END_TYPE;
TYPE IfcAmountOfSubstanceMeasure = REAL;
END_TYPE;
...

ENTITY IfcBeam
  SUBTYPE OF (IfcBuildingElement);
END_ENTITY;

ENTITY IfcBezierCurve
  SUPERTYPE OF (ONEOF
    (IfcRationalBezierCurve))
  SUBTYPE OF (IfcBSplineCurve);
END_ENTITY;
...

Langage EXPRESS (ISO-10303-11)
    
```

Figure 3
Extrait du code définissant les objets des IFC
Excerpt from the code defining IFC objects

► propriétaire DXF/DWG. Ce logiciel est puissant pour la génération de plans, mais reste peu adapté, malgré son évolution et ses plug-ins variés, à la visualisation tridimensionnelle intensive. Pour preuve, l'import d'un modèle DXF/DWG sur un modèleur tel que 3dsMax® se révèle souvent délicat, principalement à cause de problèmes de jointure ou de faces inversées récurrents. En fait, il n'y a pas de notion de normale de face dans les modèles DXF, la notion de face elle-même n'est pas aussi complète que celle des modèleurs. De toute façon, ce n'est pas l'objectif d'un tel logiciel. L'autre point faible se situe au niveau des modèles de données. Le format DXF n'utilise que des primitives de bas niveau pour la géométrie, comme les points ou les polygones. De plus, ce format permet simplement d'échanger des modèles purement géométriques, ce qui est très réducteur pour une maquette numérique. A cause de ces deux lacunes, le format DXF n'est pas considéré comme un modèle sémantique de données.

Les solutions de transition

Il existe cependant des solutions de transition entre modèle géométrique pur et modèle sémantique. Sous forme de plug-ins de AutoCAD®, des applications permettent d'enrichir un modèle numérique d'ouvrage. En architecture, Architectural Desktop introduit la notion d'objets architecturaux et s'intègre parfaitement dans AutoCAD® car il est vrai que ce produit a été développé par la même société Autodesk. En structure, Advance® de Graitec est un exemple d'application qui permet de modéliser des structures béton armé ou métal et génère automatiquement des plans d'exécution. Grâce à ces deux plug-ins, il est possible, par exemple, d'affecter des matériaux aux objets.

■ LES NOUVELLES PERSPECTIVES OFFERTES PAR LA MAQUETTE NUMÉRIQUE

Les bases de la maquette numérique

La maquette numérique se base sur deux concepts fondamentaux pour apporter des innovations majeures :

- ◆ **les objets de construction** : ils remplacent le concept simple de représentation. Une section rectangulaire possède une représentation : quatre segments et un remplissage par des hachures. Un objet de construction est la donnée d'une représentation enrichie d'un ensemble d'informations intrinsèques à cet objet : son nom, ses matériaux, ses charges, son ferrailage, le coût au mètre carré, etc. Enfin, une maquette numérique est un regroupement hiérarchisé d'objets de construction. Par exemple, un projet contient un site, qui contient un bâtiment, lui-même contenant un étage, etc. jusqu'à détailler les composants les plus élémentaires d'un ouvrage;
- ◆ **les applications interopérables** : si les objets de construction sont standardisés et décrivent suffisamment finement un ouvrage, toutes les applications de construction pourraient exploiter la maquette numérique : logiciels de CAO architecte et ingénieur, logiciels de calculs de structure, de simulation thermique et acoustique, etc. Elles pourraient alors toutes communiquer entre elles autour d'un bus d'intégration qui stocke les données nécessaires sur des serveurs de gestion de projet (figure 2). Ce fameux bus d'intégration existe déjà et définit de manière standardisée la maquette numérique de construction. Il s'agit des Industry Foundation Classes (IFC).

Les IFC, l'extension IFC-Bridge

La question suivante est récurrente : les IFC, qu'est-ce que c'est ? Ils se placent comme une alternati-

ve riche sémantiquement, stable, pérenne et normalisée aux formats propriétaires DXF/DWG. Grâce aux IFC, on échange des vrais objets de construction : poutre, poteau, murs, portes, fenêtres, étages, escaliers, bâtiment, etc. Ces objets décrivent de manière fine un ouvrage entier, à tous les points de vue : architecture, structure, thermique, acoustique. Ce standard est en passe de devenir une norme (ISO/PAS 16739) en 2006.

C'est l'Alliance internationale pour l'interopérabilité (IAI) qui a créé les IFC dont l'objectif est de permettre l'interopérabilité entre logiciels du bâtiment dans l'architecture, l'ingénierie et la gestion de maintenance. Elle a donc pour mission de définir, promouvoir et publier des spécifications pour le partage de données et le cycle de vie global des projets, indépendamment des disciplines et des technologies. L'IAI est une organisation associative à but non lucratif, ouverte à toute l'industrie de la construction civile. Elle est divisée en chapitres nationaux, le chapitre français est porté par l'association Mediaconstruct.

Sur le plan technique, les IFC dérivent d'un projet plus général dénommé STEP qui décrit la façon de définir les objets et la façon de les échanger à travers un format d'échange de données standardisé. Les IFC sont définis dans un fichier conforme à STEP partie 11, comme sur la figure 3, alors que l'échange d'objets compatibles avec IFC se fait par l'intermédiaire de fichiers STEP partie 21.

Si la vocation première de ce modèle est le bâtiment, il existe une extension pour les ouvrages d'art, créée conjointement par le Setra¹ et Graitec, toujours en cours d'évolution. Il s'agit des IFC-Bridge définissant les objets propres au génie civil pour la maquette numérique de l'ouvrage d'art. IFC-Bridge est à l'origine une traduction d'un modèle sémantique précédemment créé par le Setra, et utilisé dans ses logiciels OPERA[®] et PCP, qui se nomme OA-Express.

De la maquette numérique au chantier numérique

La maquette numérique telle que nous l'avons vu précédemment est un outil qui regroupe toutes les informations, tous les documents, toute la sémantique d'un projet de construction. A terme, elle devra devenir l'élément central d'un projet. Pour cela, elle doit trouver son rôle au sein de chaque phase du cycle de vie du projet : programmation, conception, réalisation, et exploitation.

Une grande partie de la maquette numérique sera construite en phase de conception. Les méthodes de conception modernes montrent qu'il est nécessaire de prévoir la construction et la maintenance d'un ouvrage dès cette phase-là, et ce, très

1. Le Setra est représenté par Jean Gual pour le projet IFC-Bridge. E-mail : jean.gual@equipement.gouv.fr

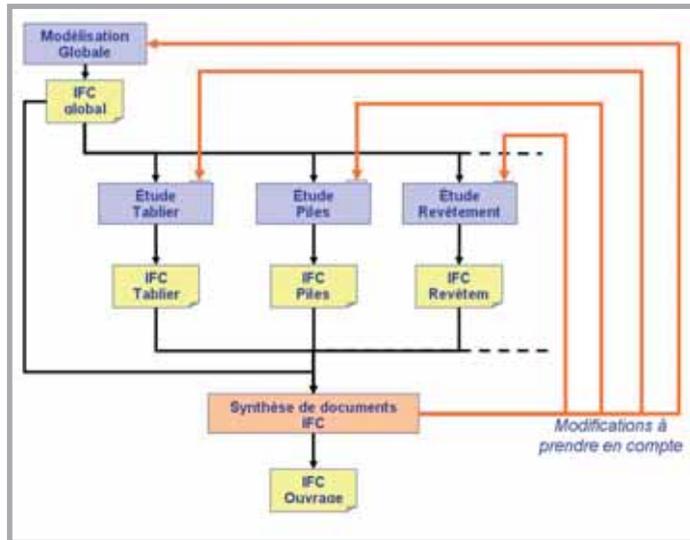
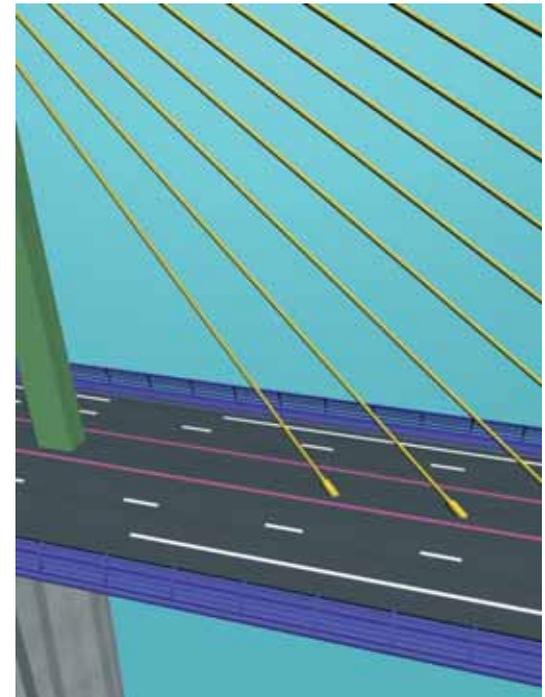
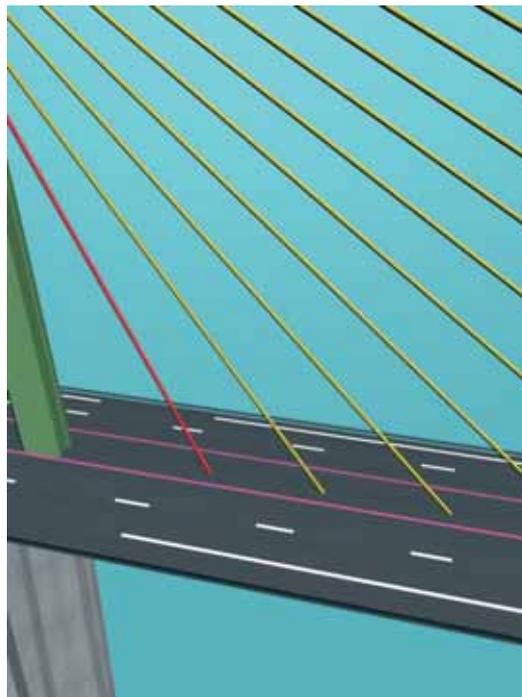


Figure 4
Modèle proposé pour une utilisation rationnelle des IFC. Deux processus s'enchaînent : un travail et des données traitées en parallèle à partir d'un modèle commun, puis synthèse pour la création d'un nouveau modèle commun
Model proposed for rational use of IFCs. Two processes are concatenated : work and data processed in parallel based on a common model, followed by synthesis for the creation of a new common model



précisément. Nos travaux de recherche tentent d'apporter des innovations à la maquette numérique dans ce sens : améliorer la collaboration entre acteurs pour une meilleure gestion des risques, rendre la maquette numérique viable juridiquement en identifiant correctement les responsabilités par partie d'ouvrage et la traçabilité des modifications dans le temps.

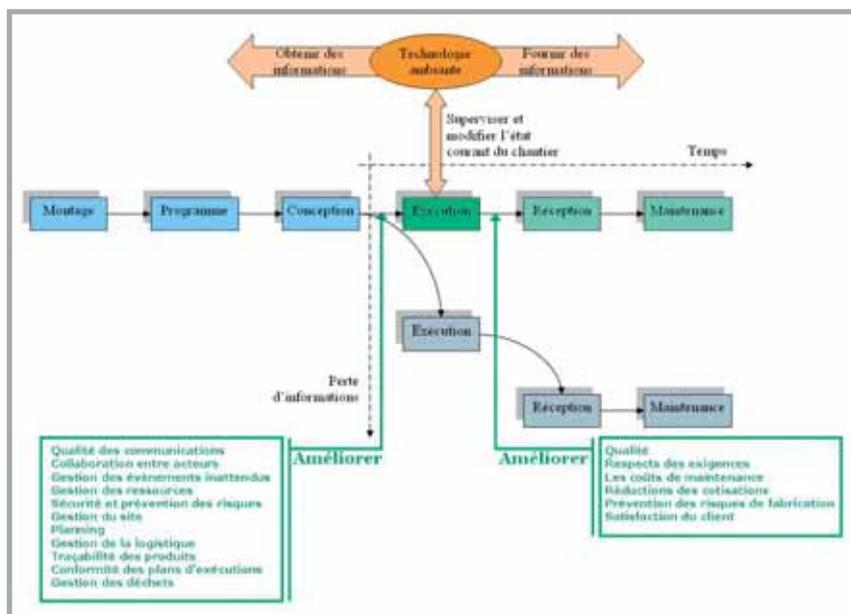
Nous avons analysé les méthodes de conception d'un ouvrage. A partir de là, nous avons créé un modèle d'utilisation des IFC qui sépare nettement deux processus lors de la conception d'un projet (figure 4). Les acteurs travaillent en parallèle selon leur métier et leur lot de projet concerné, et font évoluer des modèles d'ouvrages au cours du temps. Dans le cadre d'un travail de recherche en cours, le premier travail consiste à tracer les modifications effectuées entre deux sauvegardes. Le projet sera donc versionné, et par rapport aux outils classiques du genre, nous serons capables d'identifier quels objets précis auront été ajoutés, supprimés, ou changés. Un exemple de versionnement est donné à la figure 5. Ensuite, des réunions de synthèse ont lieu pour vérifier la cohérence globale du projet et pour redéfinir les objectifs. Un deuxième travail

Figure 5
Exemple de versionnement d'un ouvrage.
A gauche se trouve un modèle architectural du viaduc de Millau. A droite, le même modèle après avoir effectué plusieurs modifications. La comparaison consiste à détecter les éléments supprimés (hauban à gauche et en rouge), les éléments ajoutés (équipements de protection en bleu et à droite), et les éléments modifiés (position du pylône en vert, modélisation des haubans en jaune, sur les deux figures)

Example of structure versioning. On the left is an architectural model of the Millau viaduct. On the right, the same model after making several changes. The comparison involves detecting elements that have been deleted (stay cable on the left in red), elements that have been added (protective equipment in blue on the right), and elements that have been changed (position of the tower in green, modelling of the stay cables in yellow, on both figures)

Figure 6
Utilisation
de la maquette
numérique
et de technologies
ambiantes pour éviter
les pertes
d'information
au cours du cycle
de vie d'un ouvrage

*Use of computer
modelling and ambient
technologies to avoid
losses of information
during the life cycle
of a structure*



tralisée de tous ces éléments communicants : c'est la notion de technologie ambiante.

LES APPLICATIONS DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE AU CSTB

Le séminaire IFC-Bridge

Le vendredi 5 novembre 2004 se déroulait, au CSTB à Sophia-Antipolis, un séminaire organisé conjointement par le Setra et le CSTB de présentation des premiers résultats du projet IFC-Bridge sur l'harmonisation au plan international des données CAO 3D d'ingénierie pour la définition des ouvrages de génie civil et les applications potentielles associées.

Une maquette numérique de Millau, à partir de modèle CAO d'ingénierie, a permis d'illustrer quelques perspectives en matière de réalisation, gestion et suivi de projet. Le challenge principal fut d'intégrer et de restructurer les données provenant de cinq sources différentes, afin d'obtenir une maquette numérique cohérente et fidèle à l'ouvrage inaugurée quelques semaines après le séminaire. Ces sources étaient :

- ◆ Centre national d'études spatiales (CNES) : pour la grande périphérie du viaduc (jusqu'à 30 km), modèle numérique de terrain, précision 25 m et photo aérienne ortho-rectifiée de précision 2,50 m ;
- ◆ Institut géographique national (IGN) : pour la zone du viaduc, une photo aérienne de 10 km x 10 km, de précision 50 cm ;
- ◆ Setec TPI : modèle 3D de structure du viaduc, réalisé avec le logiciel PYTHAGORE ;
- ◆ Eiffage TP : calendrier de synthèse des phases de construction du viaduc ;
- ◆ ACRI-IN : données de simulation des vents, au niveau du tablier, en vue de la mise en place de protection de chantier, réalisée avec le logiciel ANSWER.

La démonstration se déroule en trois étapes. Dans un premier temps, l'utilisateur est appelé à se déplacer librement sur le terrain autour du site du viaduc, de près ou de loin, grâce à l'association de données satellites et de photos aériennes et grâce à la gestion dynamique des niveaux de détails du terrain par le calculateur. Ensuite la construction de l'ouvrage est reconstituée en respectant l'échelle du temps. La visite interactive s'effectue ainsi dans les trois dimensions spatiales mais aussi dans le temps. Enfin, une fois la construction d'ouvrage terminée, il est possible de visualiser l'écoulement de vent autour du tablier de pont et de comprendre l'intérêt de la mise en place de protections de chantier. Il est très important de préciser que la démonstration n'est pas un film mais correspond à une navigation interactive. La figure 7 est une capture d'écran de la démonstration.

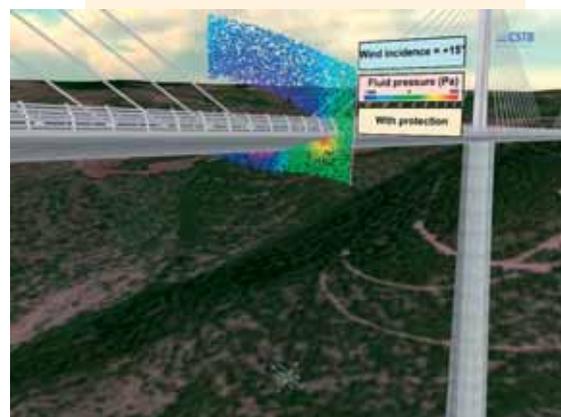


Figure 7
Photos d'écran
de la maquette
numérique du viaduc
de Millau

*Screen photos
of the computer model
of Millau viaduct*

de recherche vise à faciliter cette synthèse grâce à des outils de vérification automatiques ou semi-automatiques. Evidemment, ces travaux de recherche servent aussi aux phases de construction et de maintenance d'un ouvrage car les mêmes processus entrent en jeu.

Une fois conçue, la maquette numérique est une armoire à plans électronique plus conviviale, plus ergonomique, plus accessible. Elle trouve ainsi un rôle important lors de la construction. En effet, de nombreux problèmes de chantier viennent de la perte et du manque d'information lors du passage de la conception vers la réalisation des travaux. Autour de la maquette numérique doivent se développer une batterie d'outils assurant un accès aux informations aussi simple d'utilisation qu'un stylo, des plans, et des notes de chantier. L'avantage est double : la mémoire du projet créée en conception est non seulement bien exploitée en phase de construction mais aussi mise à jour pour la réception et la maintenance de l'ouvrage (figure 6). Ces outils apparaissent sur le marché autour de ce que l'on appelle le chantier numérique.

Cette expression "chantier numérique" englobe non seulement le matériel issu de la technologie de l'information au service du chantier : ordinateur logé dans une ceinture, veste-batterie, casque projecteur, etc. ("Un ordinateur devrait être « porté » sur soi, interagir avec l'utilisateur en continu selon le contexte et agir en tant qu'assistant à diverses tâches" : Thad Starner, Wearable Computing Group, MIT puis Georgia Tech), mais aussi la gestion cen-

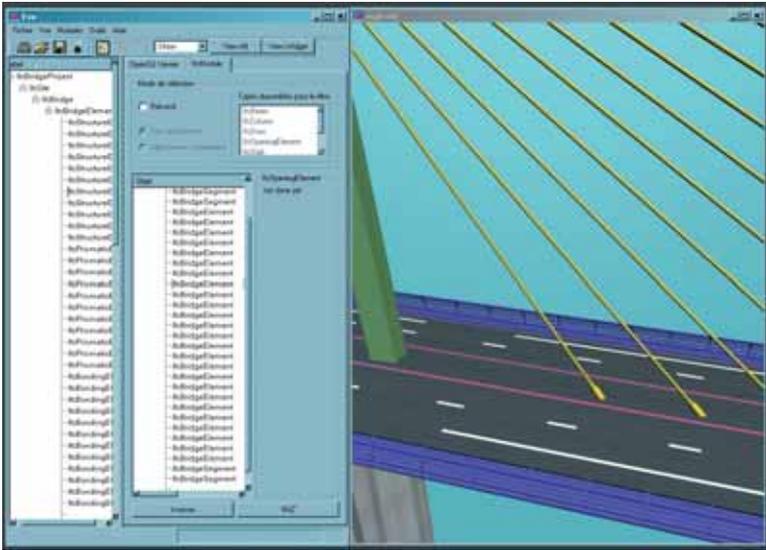


Figure 8
Allure globale de l'outil de synthèse pour la maquette numérique
Overall form of the synthesis tool for the computer model

Un outil de synthèse pour la construction

Depuis plusieurs années, le pôle Environnement virtuel enrichi (EVE) du département Technologies de l'information et développement du savoir (TIDS) du CSTB développe des applications pour associer Réalité Virtuelle et projet de construction ou d'aménagement (urbain, infrastructure). Dans ce cadre, il a conçu et réalisé une salle immersive dédiée aux applications dans la construction : la salle immersive Le Corbusier :

> (<http://salle-immersive.cstb.fr>).

Ces applications sont capables d'exploiter des modèles de données au format IFC, et d'effectuer diverses analyses et simulations par l'intermédiaire de modules (module thermique, acoustique, etc.). La synthèse de plusieurs informations devient possible, en associant et en confrontant immédiatement plusieurs résultats, pour construire une application d'aide à la décision efficace. Nos travaux de recherches actuels sont donc en accord avec les principes de centralisation des données de la maquette numérique, et visent à développer des logiciels clients qui sauront assister les acteurs, à chaque phase de projet. La figure 8 illustre ce futur outil de synthèse.

L'objectif à terme est finalement la création d'une mémoire de projet à la fois précise, neutre, pérenne, et accessible durant tout le cycle de vie d'un ouvrage. Cette mémoire numérique diminuera les pertes d'informations d'une phase de projet à l'autre et constituera une aide à l'expertise non négligeable pour tous les acteurs de projet. La maquette numérique, associée aux progrès du chantier numérique, remplacera avantageusement les armoires à plans "classiques".

ABSTRACT

Numerical Mock-ups, the future of structure construction and management

G. Arthaud, E. Lebègue, A. Anfosso, S. Soubra

Construction works can benefit from breakthroughs in Information Technologies through the use of numerical mock-ups. More than just an electronic dataware for drawings, the numerical mock-ups can centralise information related to a project including documents. Current research work on the topic of semantic comparison between models will support a more robust numerical mock-up that allows to follow the project through its overall life cycle. Moreover, the stakeholders can work in a collaborative way using the same inputs thus allowing to avoid information losses during the construction phase and through exploitation and maintenance phases.

RESUMEN ESPAÑOL

La maqueta digital, el futuro de la construcción y del mantenimiento de las obras

G. Arthaud, E. Lebègue, A. Anfosso y S. Soubra

Las obras públicas pueden aprovechar los últimos progresos de las nuevas tecnologías de la información por mediación de la maqueta digital. Más que un armario de planes electrónicos, esta maqueta centraliza los datos y clarifica las dependencias entre los documentos. Los trabajos actuales de investigación en materia de comparación semántica de modelo harán que la maqueta digital sea más sólida por el seguimiento de su evolución durante el ciclo de vida de la obra correspondiente. Además, los actores pueden trabajar en torno de los mismos grupos de datos y en la obra, la actualización de estas informaciones permitirá garantizar la perennidad del modelo para evitar las numerosas pérdidas de informaciones potenciales durante la ejecución del proyecto hasta la recepción y el mantenimiento de la obra.

Détermination des efforts[®] et des longueurs de tirants au moyen d'essais non destructifs

Corinne Horb
INGÉNIEUR
CHEF DE PROJET
Rincent BTP Services



La technicité des laboratoires français dans l'utilisation des essais non destructifs appliqués aux BTP est ancienne et reconnue. C'est ce type d'activité que Rincent BTP Services poursuit. Forte de son savoir-faire dans le domaine, l'entreprise recherche et développe de nouvelles applications à ces essais. C'est dans ce cadre qu'elle a mis au point une méthode non destructive de diagnostic des ancrages, qui permet de déterminer s'ils sont cassés ou non, leurs longueurs, totale et scellée, et l'effort de tension. Ce type de diagnostic, mis en œuvre sur des chantiers depuis l'année 2000, a été développé avec l'appui de l'Anvar, Agence française de l'innovation, qui lui a attribué le label "technologie-clé".

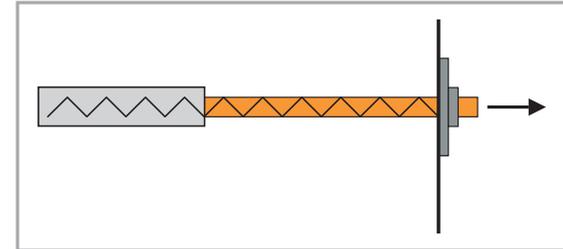


Figure 1
Schématisation du tirant d'ancrage

Schematic representation of the anchor tension member

■ MOYENS ACTUELS DE DÉTERMINATION DE L'EFFORT DE TENSION : ESSAIS STATIQUES

Les moyens actuels pour déterminer la tension dans les tirants existants sont de deux types :

- ◆ les têtes d'ancrage sont équipées de cellules de force indiquant la tension. Cependant, tous les tirants n'en sont pas équipés et le suivi dans le temps est lié à la durée de vie de l'appareillage ;
- ◆ la mise en œuvre d'essais de traction directe, qui consistent à imposer, selon un programme de chargement/déchargement pré-établi, un effort statique à l'extrémité libre de l'armature et à mesurer le déplacement qui en résulte.

Il s'agit là d'essais de mise en œuvre délicate, puisqu'un risque de rupture n'est pas exclu, coûteux en temps passé et en matériel, d'autant plus si les tirants sont situés en hauteur ou sous l'eau. De plus, les résultats de ces essais ne donnent pas d'indication sur les longueurs du tirant.

■ MÉTHODE RINCENT BTP SERVICES : ESSAIS DYNAMIQUES NON DESTRUCTIFS

Les essais proposés par Rincent BTP Services sont des essais dynamiques et non destructifs, basés sur la mise en vibration de l'élément testé dans son environnement, et l'analyse de sa réponse vibratoire.

Le but de ces essais n'est pas de déterminer l'état de corrosion de l'armature qui peut être obtenu par ailleurs à partir de formules existantes. Cette méthode est utilisée depuis longtemps et permet de donner la longueur du tirant, la longueur libre et par différence la longueur scellée. A cela



Photo 1
Tirants d'un rideau mixte en site portuaire testés avec cette méthode

Tension members of a composite curtain on a port site tested by this method



Photo 2
Tirants de paroi moulée testés avec cette méthode

Diaphragm wall tension members tested by this method

vient s'ajouter la détermination de l'effort de tension dans le tirant (procédé breveté).

Une approche pragmatique de ces essais est illustrée par la figure 1.

Depuis 5 ans, la méthode est devenue d'utilisation courante et permet d'enrichir une banque de données de plus en plus importante. Les clients sont les gestionnaires de ports, des fournisseurs d'énergie et des entreprises de BTP (photos 1 et 2).

Figure 2
Instrumentation
de la tête du tirant
*Instrumentation
of the tension member
head*

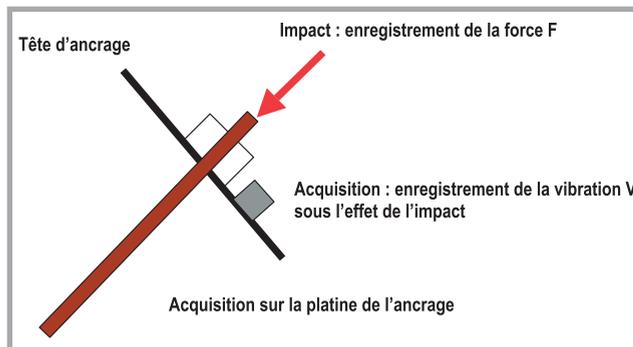


Figure 3
Courbe V/F en fonction
de la fréquence
*V/F curve as a function
of frequency*

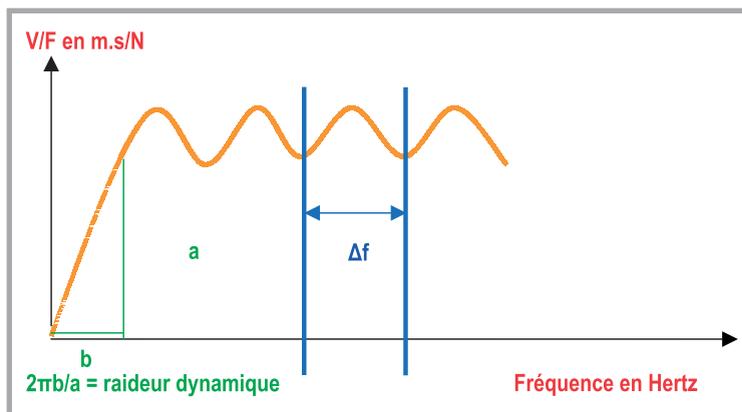
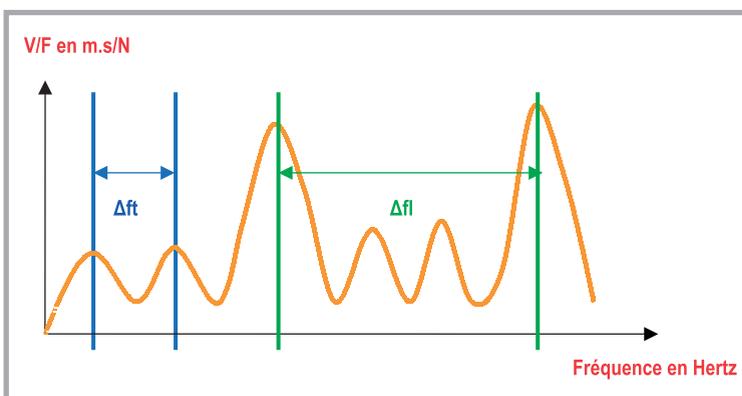


Figure 4
Analyse de la courbe V/F
en longueur
*Analysis of the V/F curve
in length*



► ■ RÉALISATION DES ESSAIS

La préparation de la tête du tirant pour la fixation du capteur de vitesse est essentielle et doit être soignée. Elle nécessite un nettoyage et décapage d'une petite surface plane sur laquelle une pastille métallique est collée. Le capteur est vissé sur cette pastille avec un système dynamométrique pour contrôler le serrage, conformément à la norme NF E 90.152 "Vibrations et chocs mécaniques - Fixation mécanique des accéléromètres".

Le tirant est mis en vibration grâce à un impact dont la force F est connue. L'impact est appliqué sur la tête du tirant ou sur la plaque d'appui, parallèlement à son axe.

La réponse vibratoire V du tirant sous cet impact est enregistrée, à l'aide du capteur de vitesse positionné sur la plaque d'appui (figure 2).

■ RÉSULTATS DES ESSAIS

Les résultats sont sous forme d'une courbe qui représente le rapport vitesse vibratoire V du tirant sur la force d'impact F , dans le domaine fréquentiel (figure 3).

L'analyse de cette courbe porte sur deux paramètres, l'écart de fréquence entre deux pics ou de creux successifs de la courbe, qui dépend directement de la longueur du tirant testé, et la raideur dynamique, qui est proportionnelle à l'inverse de la pente V/F aux basses fréquences.

■ ANALYSE EN LONGUEUR

La première analyse permet de déterminer si le tirant testé est cassé ou non. En effet, la vibration ne peut se propager au-delà de la cassure et les écarts de fréquence mesurés entre les différents pics ou creux successifs de la courbe correspondent à la longueur entre la tête du tirant et sa plaque d'appui, sur laquelle l'essai est réalisé, et la cassure.

L'incertitude du diagnostic à ce niveau est quasiment nulle, d'autant que la confirmation de la cassure est obtenue par l'analyse de la raideur dynamique, qui chute d'au moins une puissance de 10 lorsque le tirant est cassé.

Le ou les régimes vibratoires dominants conduisent à la détermination de la longueur totale du tirant et de la longueur scellée.

Les différents pics ou creux successifs de la courbe sont positionnés en fréquence selon les fréquences propres des vibrations. La longueur correspondante sera $L = V/2\Delta F$, où Δf est l'écart de fréquence entre deux pics ou creux successifs et V la vitesse de propagation des ondes dans le tirant (figure 4).

Ainsi la vibration de la partie libre du tirant donne sur la courbe des pics ou creux successifs distant de Δf_l , soit une longueur $L_l = V/2 \Delta f_l$.

Ainsi la vibration de la totalité du tirant donne sur la courbe des pics ou creux successifs distant de Δf_t , soit une longueur $L_t = V/2 \Delta f_t$.

La différence de ces deux longueurs correspond à la longueur scellée.

Un exemple de détermination de ces longueurs est donné en figure 5.

■ ANALYSE EN RAIDEUR

La raideur est une caractéristique de résistance des matériaux, la raideur, k , est communément utilisée comme une valeur expérimentale pour caractériser les matériaux élastiques et viscoélastiques. Elle est égale à $k = \Delta F/\Delta x$, où ΔF est la force appliquée et Δx le déplacement relatif. La raideur est habituellement exprimée en N/m.

La raideur dépend de la rigidité du système ausculté dans son environnement, c'est-à-dire le tirant, la liaison entre le tirant et le sol, le sol et l'écran. Lorsque l'inertie de l'écran est négligeable par rapport à l'inertie du système, la raideur et l'effort sont directement liés. Lorsque l'inertie de l'écran n'est pas négligeable, il est nécessaire d'en tenir compte dans la relation liant l'effort à la raideur, son influence est quantifiée à partir de notre expérience et de notre banque de données.

Les recherches menées par Rincent BTP Services ont mis en évidence une relation liant la raideur dynamique et l'effort de tension dans le tirant au moment des essais.

La photo 3 et la figure 6 illustrent et synthétisent les travaux réalisés.

La synthèse des résultats des essais réalisés sur environ 20 chantiers et sur sites expérimentaux a permis à Rincent BTP Services d'enrichir une banque de données et de tracer des abaques liant la raideur et l'effort dans le tirant.

Les essais sur le tirant expérimental réalisé par Eurosol Fondations ont permis d'étudier l'influence de l'inertie du tirant pour les basses valeurs d'effort (photo 3 et figure 6).

■ INCERTITUDES SUR LES RÉSULTATS

La détection d'un tirant cassé est certaine à 100 %, il n'y a pas d'incertitude.

L'incertitude sur les résultats en longueur est principalement liée à l'hypothèse faite sur la vitesse de propagation des ondes planes dans le tirant. Une incertitude de 5 % sur cette vitesse entraîne une incertitude de 5 % sur la longueur calculée.

La détermination de l'effort de tension dans le tirant, à partir de la raideur calculée et l'utilisation des abaques de la banque de données est de $\pm 8\%$. La précision des résultats peut être augmentée en effectuant sur un tirant représentatif du site des essais statiques de mise en tension, combinés à des essais dynamiques non destructifs. Ceux-ci permettent d'obtenir la relation liant la raideur et l'effort de tension dans le tirant pour le site, l'incertitude est alors réduite à 5 %.

■ PERFORMANCES

Les résultats des essais permettent de retrouver les longueurs totale, scellée et libre, et l'effort dans le tirant.

Les essais peuvent être réalisés rapidement et dans des conditions économiques plus compétitives que les méthodes jusqu'ici utilisées, sans perturber le fonctionnement du site. Ils permettent d'accéder dans des sites où des essais statiques sont difficilement réalisables.

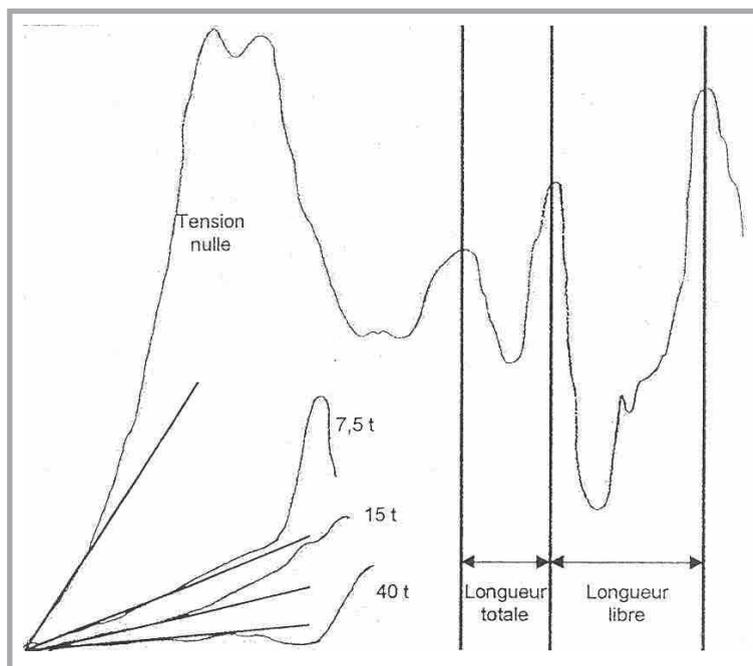


Figure 5
Augmentation de la raideur en fonction de l'effort de tension dans le tirant

Increase in stiffness as a function of the tension force in the tension member



Photo 3
Tirant expérimental Eurosol Fondations. Dispositif d'essai

Eurosol Fondations experimental tension member. Test system

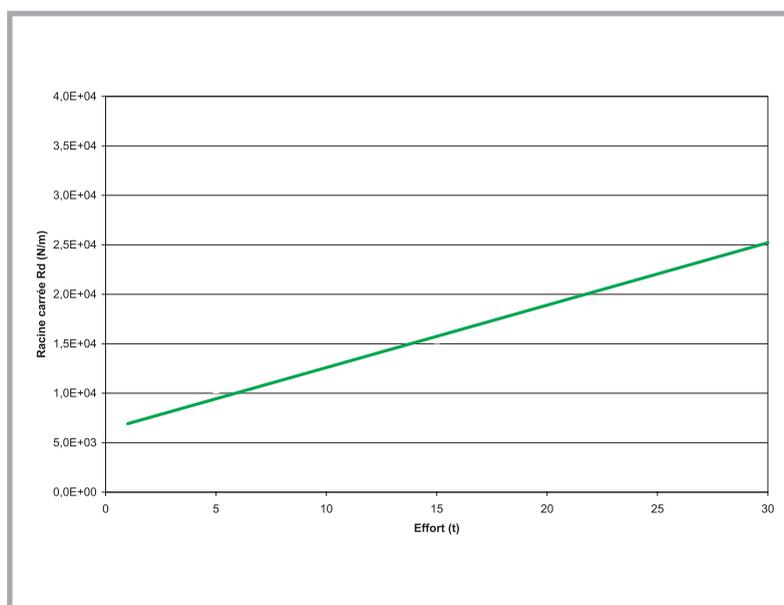


Figure 6
Tirant expérimental Eurosol Fondations. Relation entre l'effort dans le tirant et la raideur dynamique Rd

Eurosol Fondations experimental tension member. Relationship between the force in the tension member and the dynamic stiffness Rd

► Afin de réaliser les essais sous l'eau, la dernière étape du développement de la méthode concerne d'ailleurs le matériel et la finalisation de sa marini- sation.

Ces essais permettent de s'affranchir des problèmes de sécurité liés aux essais de traction directe; ils peuvent être réalisés sur un nombre élevé de tirants d'un même site, ce qui renforce la représentativité et la fiabilité du diagnostic.

L'évolution de la tension dans les tirants peut être suivie dans le temps, en procédant périodiquement à ces essais. Ceux-ci peuvent ainsi être utilisés non seulement dans le cadre d'un sinistre, mais aussi dans le cadre d'une maintenance, sous des sollicitations cycliques.

Les marchés visés sont les tirants, actifs et passifs, les clous, les boulonnages, y compris les ancrages dans les bâtiments et en particulier les monuments historiques.

Un autre marché est celui des fixations industrielles, chevilles précontraintes et scellements chimiques. Les nombreux essais réalisés sur ces fixations ont montré leur intérêt dans le suivi de l'évolution de la tension en fonction des charges cycliques, à partir de la raideur dynamique. Dans la même optique, Rincet BTP Services poursuit ses développements sur l'utilisation de cette méthode à la compréhension des phénomènes de fatigue.

ABSTRACT

Determination of tension member forces[®] and lengths by non-destructive testing

C. Horb

In the frame of its research and development program, Rincet BTP Services has developed a new approach for the tie-rods and other anchors' control, by using a non destructive method, based on the vibration of the tested elements. The method used allows to analyze the V/F curve, versus the frequency and to induce by vibratory analyses the characteristics as follows :

- total length of the tie-rod,
- anchored length of the tie-rod,
- actual force in the tie-rod.

By using a data bank, from the various values got on different sites, in different soil conditions, a chart was established, allowing estimating the various parameters, from the V/F curve.

This method is simple, economical and reliable.

The developments, on the way of completion, are the following :

- analysis of the fatigue phenomena,
- completion of the necessary equipment to carry out the ND tests under water.

RESUMEN ESPAÑOL

Determinación de los esfuerzos[®] y de las longitudes de tirantes por medio de ensayos no destructivos

C. Horb

En el marco de su política de investigación y desarrollo, Rincet BTP Services ha elaborado un nuevo modelo para el control de los tirantes y otros anclajes, mediante el empleo de un método no destructivo de puesta en vibración del elemento sometido a pruebas.

El método utilizado consiste en analizar la curva V/F con arreglo a la frecuencia y deducir mediante análisis vibratorio los elementos siguientes :

- la longitud total del tirante,
- la longitud de sellado del tirante,
- el esfuerzo real en el tirante.

Mediante la utilización de un banco de datos obtenidos en distintos emplazamientos, en condiciones de suelo dife-

rentes, se han establecido diversos gráficos, que permiten calcular los distintos parámetros que se trata de investigar, a partir de la curva V/F.

Semejante método es sencillo, económico y fiable.

Los desarrollos actualmente en curso de finalización corresponden por una parte al análisis de los fenómenos de fatiga y por otra parte a los equipos y materiales necesarios para llevar a cabo los ensayos bajo el agua.

Les pieux rainurés T.Pile

Le procédé T.Pile de Solétanche Bachy permet aux pieux forés de mobiliser pleinement la résistance latérale du sol en créant une rainure de béton de forme hélicoïdale qui s'enroule autour du fût du pieu. A portance égale, la consommation de béton et le volume des déblais à évacuer sont réduits de 20 % à 40 %, permettant de limiter l'impact des chantiers de fondation sur leur environnement : durée des travaux, trafic, etc.

La croissance rapide des zones urbaines est l'un des enjeux majeurs auxquels l'industrie de la construction doit faire face en ce début de XXI^e siècle. Dans un contexte international compétitif et face à des contraintes environnementales toujours plus sévères, il s'agit de développer des solutions performantes et économiques, permettant de réduire les nuisances, tout en augmentant la sécurité et la fiabilité des ouvrages.

En général, les pieux, tout comme les barrettes, transfèrent le poids de l'ouvrage à des couches de sol plus résistantes. Ils exercent une pression sous la pointe et un frottement latéral le long de la paroi verticale du fût. Le plus souvent, et notamment au voisinage de la charge de service, c'est le frottement latéral qui reporte vers le sol la majeure partie des efforts exercés par la structure. Pour être efficaces les pieux doivent donc le mobiliser parfaitement.

Les techniques des pieux forés utilisent des outils qui remanient le terrain sur une épaisseur faible, de quelques millimètres seulement, mais suffisante pour empêcher de mobiliser toute la résistance du sol. La capacité portante des pieux traditionnels à fût lisse s'en trouve ainsi réduite (figure 1).

■ PRINCIPALE INNOVATION DU PROCÉDÉ T.PILE

Partant de ce constat, l'axe principal des recherches à l'origine du procédé T.Pile a été de développer un nouveau procédé de réalisation capable de mobiliser le frottement latéral au-delà de la zone remaniée.

Le procédé T.Pile permet aux pieux forés de mobiliser pleinement la résistance latérale du sol en créant une rainure de béton de forme hélicoïdale qui s'enroule autour du fût du pieu. La rainure, profonde de l'ordre de 75 mm, augmente le diamètre efficace du pieu (figure 2). Elle est réalisée lors de la remontée de l'outil de forage, phase durant laquelle la puissance des foreuses est généralement peu utilisée.

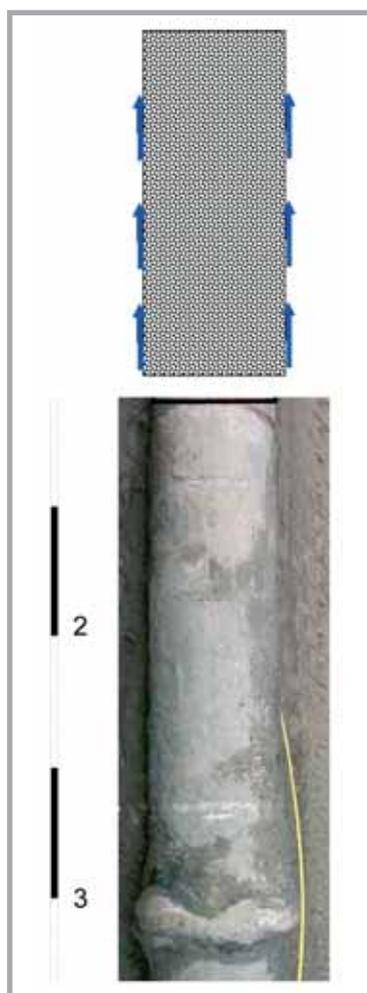


Figure 1
Pieu foré classique à fût lisse, exécuté à la tarière creuse Starsol

Conventional bored pile with smooth shaft, executed by Starsol hollow auger

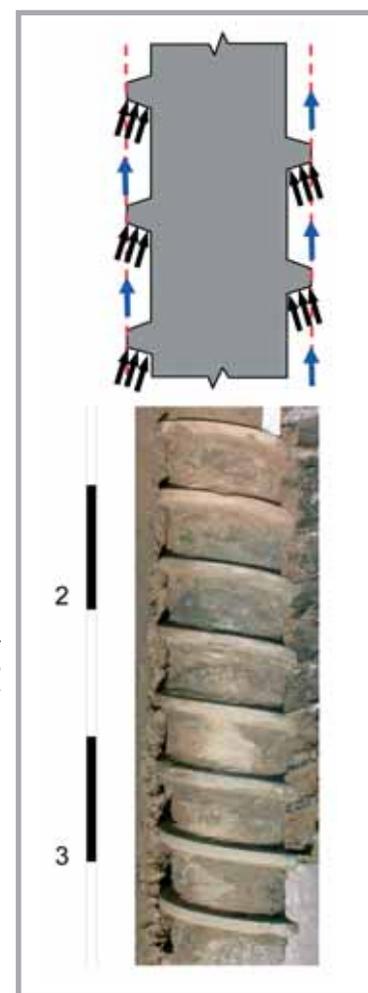


Figure 2
Pieu T.Pile à fût rainuré, exécuté avec le procédé StarT.Pile

T. Pile grooved shaft pile, executed by the StarT.Pile process

Les essais de chargement ont montré que le pieu T.Pile présente une portance supérieure de 30 à 50 % par rapport aux pieux traditionnels à fût lisse de même diamètre. Le remplissage de la rainure ne nécessite qu'une faible augmentation du volume de béton mis en œuvre, généralement de 5 % à 10 %.

A portance égale, le procédé T.Pile permet ainsi de réduire de 20 % à 40 % la consommation de béton et le volume des déblais à évacuer.

Serge Borel



DIRECTEUR RECHERCHE
ET DÉVELOPPEMENT
Solétanche Bachy

André Frossard



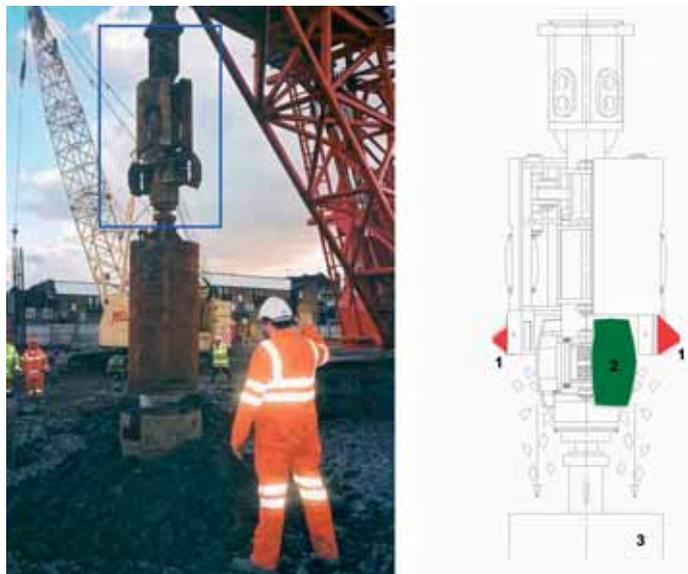
DIRECTEUR ADJOINT
Solétanche Bachy Pieux

Lewis Stansfield



CONSULTANT
Bachy Solétanche Ltd

Photo 1
Outil SolThread
SolThread tool



SolThread : le procédé T.Pile appliqué aux pieux forés traditionnels

L'outil SolThread (photo 1) est constitué d'un outil de coupe escamotable de diamètre légèrement inférieur à celui du forage. L'outil est descendu dans le forage en position fermée. Il est alors mis en rotation et la friction de patins (2) au contact de la paroi du forage provoque la sortie des dents de coupe (1).

Les dents de coupe se rétractent dès que la rotation de l'outil est inversée. Il est ainsi possible de ne réaliser la rainure que dans les couches de sol où l'on souhaite effectivement améliorer la portance.

Les copeaux sont récupérés dans un réservoir (3) situé sous l'outil de coupe dont la présence assure également le centrage et le guidage de l'outil dans le forage. L'outil SolThread permet aujourd'hui de réaliser des pieux rainurés de 900 mm de diamètre à partir d'un forage de 750 mm mais il n'a pas de limite en terme de diamètre.

SolThread a déjà été mis en œuvre et validé dans des argiles raides (argile de Londres) où l'on a mesuré une amélioration de la portance de 45 % par rapport à un pieu foré traditionnel pour une augmentation du volume de béton inférieure à 10 %.

► ■ UN PROCÉDÉ POLYVALENT ET TROIS VARIANTES OPÉRATIONNELLES

Le procédé T.Pile a été conçu pour être adaptable aux principaux types de pieux coulés en place. Afin de couvrir au mieux l'ensemble des besoins du marché, le procédé se décline en trois variantes qui ont reçu pour nom :

- ◆ SolThread pour les pieux forés traditionnels, à la tarière ou au bucket ;
- ◆ StarT.Pile pour pieux forés à la tarière creuse ;
- ◆ Screwsol pour les pieux vissés moulés.

StarT.Pile : le procédé T.Pile appliqué aux pieux forés à la tarière creuse

L'outil StarT.Pile comporte une dent de coupe installée en pied d'une tarière creuse (figure 3). La phase de forage est très similaire à celle d'un pieu à la tarière creuse Starsol traditionnel. Une fois la cote du projet atteinte, la dent de coupe est extraite et le bétonnage commence. La dent de coupe, orientée de façon à refouler le sol, crée alors une rainure hélicoïdale. En ajustant la vitesse de rotation de la tarière et la vitesse d'extraction de l'outil, on peut faire varier le pas de la rainure hélicoïdale pour obtenir la valeur souhaitée qui est normalement de 0,30 m.

Screwsol : le procédé T.Pile appliqué aux pieux vissés moulés

L'outil Screwsol est constitué d'un cône destiné à refouler le sol pendant le forage, sur lequel est assemblée une hélice qui facilite la pénétration par vissage (photo 2). La pointe de l'outil comporte une plaque perdue qui obture la colonne de bétonnage pendant le forage.

Une dent de coupe débordant le diamètre nominal du pieu est placée à la base de l'outil. Actuellement, l'outil Screwsol existe en deux diamètres : outil de 350 mm réalisant une rainure de 500 mm de diamètre extérieur dans le sol et outil de 250 mm



Figure 3
Outil StarT.Pile
StarT.Pile tool

Photo 2
Outil
Screwsol
Screwsol tool





Photo 3
Essai de chargement
sur le plot d'essai
du Havre
*Loading test
on the Le Havre test pad*

formant une rainure de 400 mm, destiné à mettre en œuvre le procédé avec des foreuses plus légères et économiques.

■ PERFORMANCES DES PIEUX T.PILE

Les performances des pieux T.Pile ont été validées sur plots d'essais, en France, au Royaume Uni et en Hongrie.

Le plot d'essai du Havre, destiné à comparer les performances des pieux T.Pile à des pieux de référence déjà inscrits dans les règles de calculs des fondations, a notamment comporté : deux pieux battus moulés, deux pieux à la tarière continue de type Starsol, trois pieux Screwsol et deux pieux StarT.Pile.

Les pieux ont tous été instrumentés au moyen d'extensomètres amovibles, et soumis à un essai de chargement statique (photo 3). On a ainsi déterminé pour chaque type de pieu la portance globale, mais aussi les courbes de mobilisation de la résistance en pointe et du frottement latéral unitaire dans chacune des couches de sol, constituées de remblais hydrauliques (sables fins contenant des lentilles vasardes) surmontant des sables fins en place.

Dans ces terrains, on a montré que le frottement latéral unitaire mesuré pour le pieu StarT.Pile était équivalent aux valeurs observées pour les pieux Starsol, mais appliqué à la surface extérieure à la rainure, conduisant à une amélioration de 30 %

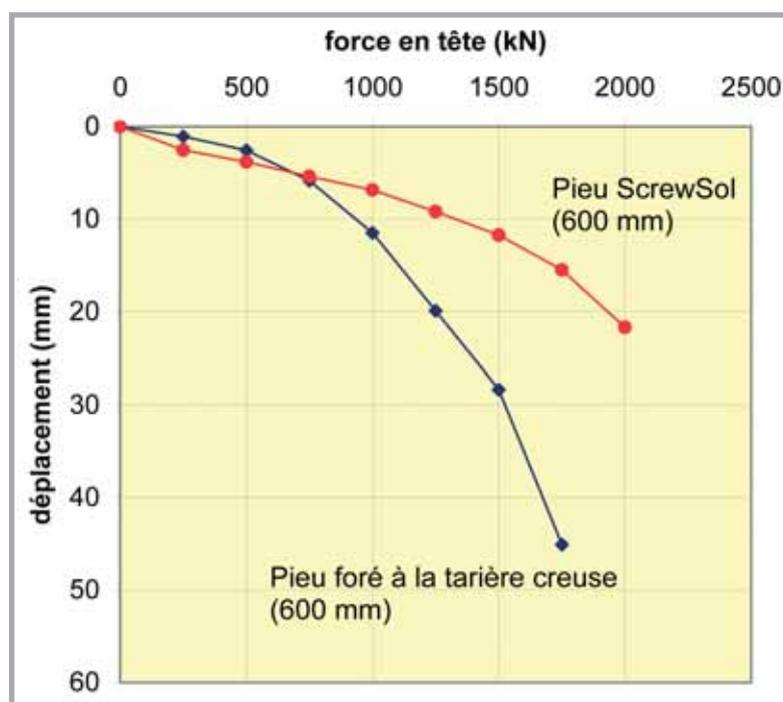


Figure 4
Performances comparées d'un pieu Screwsol et d'un pieu foré à la tarière creuse (essais réalisés en Hongrie)
Comparative performance of a Screwsol pile and a pile bored by hollow auger (tests carried out in Hungary)

pour une consommation supplémentaire de béton inférieure à 10 %.

La figure 4 montre la performance comparée de pieux installés près du lac Balaton en Hongrie. Dans les sables limoneux du site, le pieu Screwsol de diamètre 350/500 mm présente une portance supérieure de 30 % à celle d'un pieu lisse foré à la tarière continue de 600 mm de diamètre.

Au total, 25 pieux T.Pile ont été testés dans différents terrains permettant d'élaborer des règles de

► dimensionnement. Depuis, 15 projets ont été réalisés en Europe, avec un total de plus de 30 000 m de pieux. En France, un cahier des charges est en cours de validation.

■ CONCLUSION

Grâce à la création maîtrisée d'une rainure de béton de forme hélicoïdale qui s'enroule avec un pas régulier autour du fût des pieux, le procédé T.Pile permet de réduire le nombre de pieux à réaliser tout en conservant une grande rapidité d'exécution. Le procédé T.Pile réduit de 20 à 40 % les quantités de béton incorporées à l'ouvrage, la consommation des ressources naturelles et le volume des déblais à évacuer. En diminuant la durée des travaux, il réduit aussi l'impact du chantier sur le voisinage.

Efficacité, performance, sécurité : le procédé T.Pile de Solétanche Bachy fournit aux maîtres d'œuvre qui veulent construire sur du solide les fondations du développement durable.

ABSTRACT

T.Pile grooved piles

S. Borel, A. Frossard, L. Stansfield

Solétanche Bachy's T.Pile process allows bored piles to deploy the lateral soil resistance fully by creating a helical shaped concrete groove which winds around the pier shaft. For equal bearing capacity, the consumption of concrete and the volume of earth cuts to be removed are reduced by 20 % to 40 %, making it possible to limit the impact of foundation works on the environment : length of works, traffic, etc.

RESUMEN ESPAÑOL

Los pilotes acanalados T.Pile

S. Borel, A. Frossard y L. Stansfield

El procedimiento T.Pile de Solétanche Bachy permite a los pilotes forjados movilizar plenamente la resistencia lateral del suelo por la creación de una ranura de hormigón de forma helicoidal que se enrollan en torno del eje del pilote. Según una capacidad de carga equivalente, el consumo de hormigón y el volumen de desmontes a evacuar están reducidos de un 20 % a un 40 %, lo cual permite disminuir el impacto de las obras de cimentaciones en su entorno : duración de las obras, tráfico, etc.

La paroi CSM

Une solution innovante de paroi en sol traité

Le nouveau procédé CSM (Cutter Soil Mixing) de Solétanche Bachy permet de réaliser des parois de soutènement et des écrans d'étanchéité en sol traité en place et mélangé à un coulis de bentonite-ciment.

La paroi CSM, en complétant la gamme des techniques d'amélioration de sols, présente une solution alternative plus économique et plus respectueuse de l'environnement grâce, notamment, à la réduction des ressources naturelles utilisées et à celle des déblais produits.

Les techniques de mélange en place du terrain à un liant hydraulique (en anglais "soil mixing") sont aujourd'hui d'utilisation courante en fondations. Pour autant, les applications de ces techniques à la construction de parois de soutènement ou d'écran d'étanchéité étaient peu nombreuses à ce jour en Europe.

La paroi CSM propose une solution innovante et compétitive de soutènement et d'écran d'étanchéité en sol traité en place qui réduit considérablement le volume de déblais à évacuer par rapport aux solutions traditionnelles. Le CSM développé par Solétanche Bachy avec Bauer Maschinen GmbH permet de réaliser des panneaux rectangulaires jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur. Les outils disponibles aujourd'hui sont conçus pour des sections allant de 2,4 m x 0,5 m à 2,8 m x 1,0 m.

■ DESCRIPTION DU MATÉRIEL

Le CSM de Solétanche Bachy utilise des technologies développées à partir de l'hydrofraise. L'outil est monté sur un kelly qui assure le respect des tolérances de positionnement et de verticalité des panneaux.

Les moteurs compacts sont assemblés sur un patin dont la conception optimise les surfaces de contact entre l'outil et le sol (photo 1). Les tambours ont été calculés pour allier des vitesses de forage élevées à une excellente qualité de mélange du sol au liant, garantissant l'homogénéité du produit final. La qualité du mélange est renforcée par la présence de plaques fixes verticales au niveau des roues, augmentant les effets de cisaillement dans le fluide et permettant le nettoyage de l'outillage entre les pics.

Le CSM de Solétanche Bachy est un matériel complet et polyvalent constitué de l'outil proprement dit, d'un powerpack, d'une supervision dédiée et d'un kelly modulaire dont la longueur est adaptable au projet à réaliser.

Le CSM peut être installé sur une foreuse de pieux



de puissance moyenne pour des profondeurs d'une dizaine de mètres. Le CSM peut aussi être monté sur les principales grues de manutention présentes sur les chantiers, réduisant ainsi les coûts de mobilisation du matériel (figure 1).

■ DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Suivant la profondeur de l'ouvrage, il est possible de réaliser l'ensemble du panneau en injectant un coulis de ciment directement entre les tambours lors des phases de descente et de remontée de l'outil.

Compte tenu de l'expérience acquise jusqu'ici, pour des ouvrages de plus d'une dizaine de mètres de profondeur, il est préférable d'utiliser l'injection de deux fluides différents : d'abord une boue de bentonite lors de la descente, substituée par la suite

Fabrice Mathieu



CHEF DE PROJET
RECHERCHE
ET DÉVELOPPEMENT
Solétanche Bachy

Serge Borel



DIRECTEUR RECHERCHE
ET DÉVELOPPEMENT
Solétanche Bachy

Xavier Jullian



CHEF DU SERVICE
MÉTHODES ET EXPERTS
Solétanche Bachy

Photo 1
Le CSM Solétanche Bachy
utilisé sur le chantier d'essai
du Havre

*The Solétanche Bachy CSM
used on the Le Havre test site*

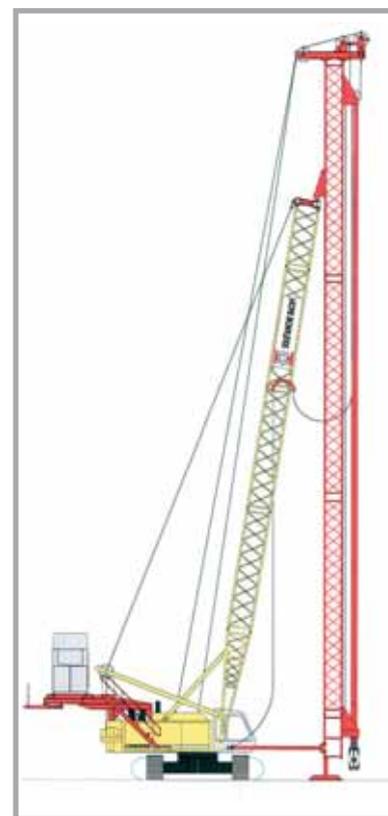


Figure 1
CSM Solétanche Bachy monté sur grue
Liebherr 853

*Solétanche Bachy CSM mounted
on Liebherr 853 crane*

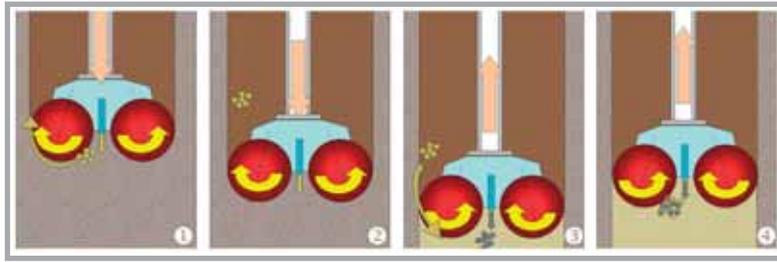


Figure 2
Principe
du procédé CSM
*Principle
of the CSM process*

Photo 2
L'équipement CSM
complet au chantier
d'essai du Havre
*The complete CSM
equipment
on the Le Havre test site*



Photo 3
Fin d'exécution
d'un panneau, remontée
de l'outil
*End of construction
of a panel,
raising the tool again*



▶ par un coulis de ciment injecté lors de la remontée de l'outil (figure 2).
Le choix de la méthode de travail est le fruit d'une optimisation technique et économique, en considérant d'une part les performances réalisables suivant la nature du sol, et d'autre part les possibilités de stockage et/ou de recyclage des fluides ainsi que les contraintes environnementales liées au chantier.
Ainsi, la nature des fluides injectés tient une part

prépondérante dans la réussite d'un panneau réalisé avec la technique CSM. La résistance et la perméabilité du matériau final constituant le panneau, dépendent directement du volume et des qualités rhéologiques du coulis de ciment injecté dans le terrain. Dans ce domaine, l'expertise de Solétanche Bachy concernant les coulis de ciment et les fluides de forage permet de proposer des formulations optimisées et spécifiques à chaque site, permettant d'atteindre des résistances à la compression du sol traité typiques de 4 à 12 MPa et des valeurs de perméabilité de 10^8 m/s à 10^{10} m/s. Le CSM est un procédé dont le résultat final est influencé par l'interaction de nombreux facteurs :

- ◆ paramètres liés au sol en place : notamment la nature et la variabilité du terrain (résistance, perméabilité initiale, granulométrie), le niveau de la nappe phréatique ;
 - ◆ paramètres liés à la conduite des travaux : le volume et caractéristiques des coulis injectés, la vitesse de mélange, la vitesse de pénétration, etc.
- C'est pourquoi, il est particulièrement important de maîtriser en continu la composition et la qualité du mélange. Le CSM Solétanche Bachy est équipé des dernières technologies de monitoring utilisant une supervision dédiée accompagnée d'une série de capteurs en fond et en surface.
Le traitement des paramètres de réalisation fournit aux partenaires du projet une appréciation synthétique complète de la qualité du produit final.

■ APPLICATIONS

La paroi CSM est particulièrement adaptée aux sols granulaires de densité moyenne et aux sols argileux compressibles.
Elle peut être utilisée pour réaliser des ouvrages de grandes dimensions – puits auto-stables, soutènements provisoires pour fouilles urbaines, écrans d'étanchéité, etc. – constitués d'une succession de panneaux primaires et secondaires, à l'image des parois plus traditionnelles.
Il n'est pas nécessaire, contrairement à une paroi en béton, de poser et de retirer des joints entre les panneaux. Egalement, on peut le plus souvent se passer de murettes-guides.
Les panneaux secondaires peuvent être réalisés soit en remordant dans deux primaires durcis, soit dans des panneaux frais. Si nécessaire, une paroi CSM peut être renforcée par des profilés en acier descendus à l'aide d'une simple grue de manutention dans le mélange sol/coulis encore frais.
Le sol étant mélangé en place avec le liant hydraulique, la technique produit peu de déblais, ce qui rend la paroi CSM plus respectueuse de l'environnement, et plus encore lorsqu'il s'agit de traiter un sol contaminé.
Les très faibles valeurs de perméabilité du mélange permettent ainsi d'utiliser la paroi CSM pour

la réalisation de confinements d'anciens sites industriels, ou la réalisation d'écrans d'étanchéité de bonne qualité.

■ PLOTS D'ESSAIS ET CHANTIERS

Après les premières expérimentations faites en Allemagne au cours de l'hiver 2003-2004 et quelques réalisations en Hollande et au Japon, le CSM a été utilisé pour la première fois en France au Havre en 2005 (photos 2 et 3).

Une trentaine de panneaux d'essais ont été réalisés, dont une vingtaine jusqu'à 20 m de profondeur dans le sable fin silteux du Havre. Après avoir réalisé des panneaux isolés, on a construit un puits rectangulaire de 20 m de profondeur comportant un radier d'étanchéité de 3 m d'épaisseur.

Ce puits rectangulaire a fait l'objet d'une importante série de contrôles pendant sa réalisation et après durcissement, puis d'une excavation partielle. Parmi ces contrôles, citons :

- ◆ l'analyse des paramètres enregistrés par la supervision ;
- ◆ des prises d'échantillons et des mesures de densité et de viscosité de tous les matériaux (fluide injecté, déblais, matériau in situ) ;
- ◆ l'insertion de profilés de 18 m de longueur ;
- ◆ des carottages des panneaux sur toute la hauteur de l'ouvrage, le contrôle des recouvrements entre primaires et secondaires (photo 4) ;
- ◆ des mesures en laboratoire des densités, résistances à la compression, teneurs en ciment et perméabilités du matériau de chaque panneau ;
- ◆ des mesures de perméabilité in situ ;
- ◆ un contrôle de l'aspect des panneaux après excavation.

■ CONCLUSION

La paroi CSM présente une nouvelle solution flexible et économique de soutènement qui complète la gamme des techniques traditionnelles : parois au coulis, parois moulées, pieux sécants, palplanches, etc.

Le sol étant traité en place, le volume de déblais est considérablement diminué par rapport aux parois classiques. Le procédé permet aussi de réduire la consommation de ressources naturelles. Polyvalent, le CSM ne requiert pas de porteur dédié et l'équipement peut être monté sur toute foreuse ou grue de puissance suffisante. Enfin, le CSM nécessite la maîtrise de formulations de coulis spécifiques afin de contrôler l'homogénéité, la résistance et la perméabilité du produit fini.



Photo 4
Carotte extraite
entre 14 m
et 15,20 m
dans un panneau
CSM

*Core sample
extracted
at between 14 m
and 15.20 m
in a CSM panel*

ABSTRACT

The CSM wall.
An innovative treated soil
wall solution

F. Mathieu, S. Borel, X. Jullian

Solétanche Bachy's new CSM (Cutter Soil Mixing) process allows supporting walls and waterproofing screens to be constructed with soil treated in situ and mixed with a bentonite-cement grout. The CSM wall, supplementing the range of soil improvement techniques, offers an alternative solution that is more economical and more environmentally friendly due, in particular, to the reduction in natural resources used and in earth cuts produced.

RESUMEN ESPAÑOL

El muro CSM. Una solución
innovadora de muro
en suelo tratado

F. Mathieu, S. Borel y X. Jullian

El nuevo procedimiento CSM (Cutter Soil Mixing) de Solétanche Bachy permite la ejecución de muros de sostenimiento y de pantallas impermeables en suelo tratado in situ y mezclado con una lechada de bentonita-cemento. El muro CSM, como complemento de la gama de las técnicas de mejora de los suelos, presenta una solución alternativa con mayores ahorros y más respetuosa del medio ambiente mediante, fundamentalmente, la reducción de los recursos naturales utilizados y la disminución de los desmontes generados.

MEDIAN : une foreuse à

La prise en compte des réalités de chantier, tant en matière de variété des ouvrages à réaliser que de contraintes humaines et environnementales, fait de la foreuse MEDIAN un modèle d'ergonomie.

Toutes les positions de forages s'obtiennent de manière intuitive par une succession de mouvements simples et indépendants, avec une précision et une sécurité maximales.

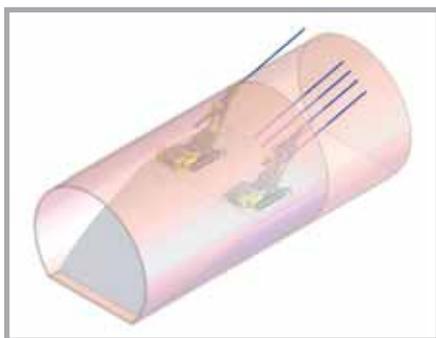
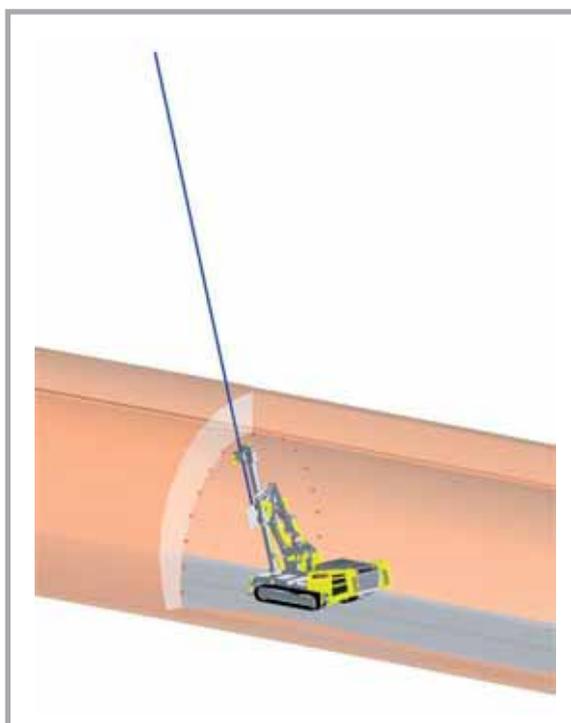


Figure 1
Exemple d'application
en tunnel : voûte parapluie
*Example of application
in a tunnel : umbrella arch*

Figure 2
Exemple d'application
en tunnel : auréoles
*Example of application
in a tunnel : rings*



■ LA PROBLÉMATIQUE

La conception des ouvrages dans le domaine des fondations spéciales conduit très fréquemment à réaliser des forages selon des ensembles de directions, appelés "plans de tir", très complexes. Cela nécessite de positionner le point de départ des forages sur des endroits difficiles à atteindre et de pouvoir orienter le mât de guidage pour respecter les angles d'inclinaison et d'azimut déterminés par le projet.

On peut citer en exemple les tirants d'ancrage, les voûtes parapluie (figure 1), les auréoles d'injection (figure 2), les ancrages de murs de quai.

Jusqu'à présent, le choix d'une foreuse reposait sur une alternative entre une machine facile à positionner mais avec une cinématique limitée et une machine plus complexe comprenant de nombreux degrés de liberté.

■ LES MACHINES SIMPLES MAIS LIMITÉES

Dans ce premier cas, la cinématique est limitée à deux mouvements et permet un positionnement très rapide. Par contre ces machines sont généralement dédiées à un seul type d'activité comme les tirants ou bien les voûtes parapluie.

On sait bien qu'un chantier ne ressemble jamais au précédent. Aussi, pour faire face à toutes les demandes, le gestionnaire du parc de matériel doit-il posséder un grand nombre de machines différentes.

Et lorsque les plans de tir sortent vraiment de l'ordinaire, par exemple pour forer des tirants dans les murs de quai, ce sont des machines spéciales qu'il faut concevoir et fabriquer.

■ LES MACHINES POLYVALENTES MAIS COMPLEXES

Dans le deuxième cas des machines dites polyvalentes, la cinématique est réalisée par une combinaison de bras articulés décrivant des arcs de cercle.

Lors de la mise en position du mât de forage plusieurs de ces mouvements sont nécessaires, mais chacune des rotations élémentaires vient modifier les réglages précédents de sorte que le positionnement final résulte d'actions itératives sur l'ensemble des mouvements et requiert une grande maîtrise de la machine.

La mise en place est longue et laborieuse y compris pour des plans de tir simples. Dans certains cas on se heurte à un problème de géométrie dans l'espace qui est un véritable casse-tête pour les opérateurs.

En outre, les positions extrêmes présentées dans les brochures commerciales ne correspondent pas à la réalité des chantiers.

Enfin, la multiplicité des points d'articulation combinée avec les jeux habituels de fonctionnement aboutit à un positionnement fort peu précis.

■ LA FOREUSE POLYVALENTE À POSITIONNEMENT INTUITIF

La foreuse MEDIAN (photo 1) a été conçue par la société TEC System, filiale du groupe Solétanche Bachy.

L'expérience acquise dans le groupe Solétanche Bachy, entreprise générale de travaux et technologies du sol, sur d'innombrables chantiers présentant des situations très diverses, ainsi que la politique de prévention très volontaire qui anime ce groupe, ont conduit au développement de cette machine innovante.

Les trois objectifs sont : sécurité, efficacité, confort. Ils conduisent à une ergonomie maximale sur un

positionnement intuitif

Daniel Perpezat

CHEF DE PROJET
RECHERCHE
ET DÉVELOPPEMENT
Solétanche Bachy



matériel pouvant être utilisé par le plus grand nombre d'opérateurs et dans les meilleures conditions possibles.

Les spécialistes du forage et de la sécurité savent que la visibilité que peut avoir un foreur sur ses outils de forage est un facteur de sécurité capital. Quand ce n'est pas le cas, on crée des situations dangereuses génératrices d'accidents.

Le pupitre de commande articulé de la MEDIAN permet à l'opérateur de se positionner au mieux et ce, indifféremment de chaque côté de la machine. Un mouvement supplémentaire de pivotement du mât a pour seule fonction de placer celui-ci dans le meilleur angle de vision du foreur.

L'analyse d'un grand nombre de chantiers a permis la conception d'un matériel doté d'une cinématique dite "utile", c'est-à-dire ne cherchant pas des positions extrêmes et improbables mais couvrant les besoins pour une grande majorité des ouvrages à réaliser, avec une grande simplicité d'utilisation (photo 2).

La cinématique est conçue sur la base d'une combinaison originale de mouvements simples de rotations et de translations totalement indépendants. La mise en position se fait par une succession de mouvements élémentaires dans laquelle aucun ne modifie les réglages précédents. Cette cinématique innovante est brevetée.

Ce type de positionnement est qualifié d'"intuitif" tant la prise en main est rapide même dans le cas des plans de tir les plus complexes.

Contrairement aux autres machines, il est possible d'atteindre la plupart des points de tir sans actionner les translations des chenilles. Ceci est un avantage très appréciable puisque les mouvements des chenilles à fin de positionnement sont imprécis, lents, dangereux et surtout parce qu'ils dégradent l'état de la plate-forme ce qui est un facteur d'insécurité reconnu.

Les solutions de guidage et d'articulation mises en œuvre conduisent à une grande rigidité de l'en-

semble. Associée à la qualité des organes de commande cette rigidité assure une excellente précision du positionnement.

Le principe innovant de cette cinématique permet également de supporter rationnellement l'ensemble des conduites hydrauliques qui transmettent l'énergie. Sur les machines classiques, ces conduites s'entassent sur le sol au pied de la machine lorsque la glissière est en position rétractée et risquent à tout moment de s'accrocher à des éléments proéminents de la machine lors de l'extension.

Les risques d'usure et de rupture des flexibles sont de ce fait très fortement diminués.

Le compartiment arrière de la machine offre une grande accessibilité aux organes de puissance pour les opérations de maintenance et d'entretien.

■ QUATRE MEDIAN À L'ŒUVRE

Ce concept très récent est déjà dans sa phase de commercialisation.

Quatre machines ont été livrées et sont actuelle-



Photo 1
Foreuse
MEDIAN
MEDIAN driller



Photo 2
Quelques positions
possibles
de la MEDIAN
*Some possible
positions
of the MEDIAN*

ment en opération sur un chantier de percement de tunnels ferroviaires dans le Sud de la Chine (photo 3).

Elles exécutent des forages subhorizontaux à l'avant du front de taille pour reconnaître d'éventuelles failles et faire un traitement préventif de consolidation si nécessaire.

Les conditions géologiques sont particulièrement difficiles à cause de charges d'eau de l'ordre de 1 000 m dans le terrain obligeant l'emploi de sas de protection très performants, analogues à ceux utilisés dans le forage pétrolier, livrés avec les machines.

Eu égard au saut technologique important que représente ce matériel, le contexte géographique et humain sort lui aussi de l'ordinaire. Le chantier est situé dans une région très reculée. Après une période de formation, le matériel a été confié aux opérateurs chinois tant pour les opérations de forage que pour la maintenance.

Les machines ont été livrées dans une version comportant une double motorisation : thermique pour les déplacements, et électrique lors du forage à poste fixe afin d'éviter les émissions de gaz en fond de galerie.

Cette opération lointaine est un succès qui démontre les avantages de l'avancée technique de la MEDIAN : son fonctionnement est facile à comprendre, sa conduite est aisée et sa fiabilité n'a posé jusqu'ici aucun problème.

Photo 3
Une foreuse MEDIAN
aux mains de son propriétaire
*A MEDIAN driller in the hands
of its owner*



ABSTRACT

MEDIAN : an intuitive positioning driller

D. Perpezat

Its allowance for site realities, with regard to both the variety of structures to be built and human and environmental constraints, makes the MEDIAN driller a model of ergonomics.

All boring positions can be obtained intuitively by a series of simple, independent movements, with maximum precision and safety.

RESUMEN ESPAÑOL

MEDIAN : un perforadora de posicionamiento intuitivo

D. Perpezat

La integración de las realidades en las obras, tanto en el aspecto de la variedad de las obras que se han de ejecutar como de los imperativos humanos y medioambientales, hace de la perforadora MEDIAN un modelo de ergonomía.

Todas las posiciones de perforaciones se obtienen de forma intuitiva mediante una sucesión de acciones sencillas e independientes, con una precisión y una seguridad máxima.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA FOREUSE MEDIAN

- Puissance installée : 110 kW
- Masse totale : 15 t
- Course : 3,6 m
- Force de traction et de poussée : 7 t
- Pompe de circulation embarquée : 160 l/mn à 55 bar
- Polyvalence du mode de forage : rotary, roto-percussion, marteau fond de trou, jet grouting

Solbarrière : une barrière contre les inondations, légère et amovible

Julien Landrot
DIRECTEUR
COMMERCIAL
ET DU DÉVELOPPEMENT
MCCF

Alain Marchand
DIRECTEUR
COMMERCIAL
EUROFRANCE
Solétanche Bachy France

Solbarrière est un procédé de barrage léger et amovible qui permet de se protéger contre des inondations jusqu'à 2 m de hauteur. Simple et économique, facile à monter et à démonter, il peut souvent être mis en œuvre dans le bref délai entre l'annonce de l'inondation et sa surveillance effective.

Fléau naturel de toujours, les inondations restent mal maîtrisées. Les pays développés ne sont pas épargnés, bien au contraire. L'imperméabilisation des surfaces liée à l'expansion des zones construites est, autant que les caprices climatiques, un facteur important du risque d'inondation. Les zones d'épandage naturel sont petit à petit supprimées et les ouvrages régulateurs lourds tels que les barrages et les réservoirs tampons se révèlent souvent insuffisants. Parallèlement, les progrès des dispositifs d'information hydrologique permettent de mieux en mieux de prévoir les crues. Un préavis de quelques jours peut être mis à profit pour prendre des mesures efficaces.

Cette situation conduit à rechercher des stratégies de prévention et de protection spécifiques, suffisamment économiques et faciles à mettre en œuvre pour apporter une réponse raisonnable, rapide et efficace.

Parmi les applications, qui sont extrêmement diverses, figurent les écoles, les monuments historiques, les musées, les sites industriels, les entrepôts, les hôpitaux, etc.

■ LA SOLUTION SOLBARRIÈRE

Solétanche Bachy, entreprise générale de travaux et technologies du sol, propose une nouvelle technique de protection contre les inondations : les barrières anti-inondations amovibles. Ce système breveté appelé Solbarrière est commercialisé par sa filiale MCCF (figure 1).

Le système Solbarrière repose essentiellement sur des voûtes conçues pour une application simple et rapide. Solbarrière se décompose en éléments maniables et légers, le poids d'un élément d'un mètre de hauteur est de 23 kg.

La structure amovible est composée de coquilles en matériaux synthétiques. Les voûtes sont liées entre elles par des éléments d'assemblage assurant leur étanchéité. On peut ainsi créer une re-



Figure 1
Vue d'artiste
d'une protection
Solbarrière
*Artist's view
of a Solbarrière
protection system*



Photo 1
Coques et leurs supports,
vus du côté sec
*Shells and their supports,
seen from the dry land
side*

hausse protectrice jusqu'à 2 m autour d'une zone spécifique, la mettant à l'abri d'une crue. L'ensemble est fixé au sol à l'aide de tiges d'ancrage assurant le serrage vertical des coques. L'étanchéité est assurée par un joint placé sur la base des coques. Les éléments verticaux sont équipés de jambes de force réglables qui assurent la stabilité au renversement (photo 1).

La gamme d'utilisation est très large. La préparation pour la pose de la Solbarrière comprend une semelle en béton armé et le scellement des tiges d'ancrage. La pente admissible du terrain atteint

Photo 2
Le système
après mise en eau
*The system
after placing in water*



Photo 3
Les éléments
Solbarrière
et les outils
nécessaires
*The Solbarrière
elements
and the requisite
tools*



Photo 4
Pose des coques
munies
de leurs joints
d'étanchéité
*Laying of the shells
fitted
with their seals*



Photo 5
Pose des jambes de force
Installing braces

2 %. Le système assure une très bonne étanchéité (photo 2).

Les phases de mise en place

L'outillage nécessaire au montage sur la semelle est rudimentaire : visseuse-dévisseuse, clef dynamométrique et marteau (photo 3).

Le montage est réalisé comme suit :

- ◆ positionnement des coques sur le tracé préparé selon la forme du bâtiment à protéger (photo 4) ;
- ◆ vissage des éléments de serrages verticaux pour assurer la liaison entre ces coques ;
- ◆ vissage des tiges de précontrainte dans les réservations prévues à cet effet ;
- ◆ mise en place des éléments de serrage au-dessus des coques ;
- ◆ serrage normalisé de ces éléments de compression ;
- ◆ fixation des jambes de force et réglage final (photo 5).

CARACTÉRISTIQUES DE SOLBARRIÈRE

L'aspect esthétique est pris en compte au niveau de la teinte des coques. Il est également possible d'insérer dans les coques un logo ou une signalétique identifiant le propriétaire, par exemple une municipalité.

L'installation est possible sur tout type de surface artificielle.

Le montage est extrêmement simple et peut être réalisé sans difficulté par des ouvriers peu qualifiés.

Les supports et les coques sont peu encombrants et faciles à stocker.

Les jambes de force permettent de résister à une hauteur d'eau importante tout en préservant une étanchéité parfaite.

Le système protège efficacement jusqu'à une hauteur de 2,00 m avec débit de fuite inférieur à 0,01 m³/h par mètre de protection.

Les scellements dans le sol pour la fixation des jambes de force sont réalisés à l'avance sur le tracé la barrière.

Le système breveté Solbarrière s'applique à de très nombreux cas :

- ◆ protection du patrimoine ;
- ◆ protection de bâtiments industriels et d'entrepôts ;
- ◆ protection de bâtiments publics sensibles : écoles, administrations ;
- ◆ protection de bâtiments dont l'évacuation serait difficile : hôpitaux ;
- ◆ protection à grande échelle de quartiers entiers ;
- ◆ rehaussement général ou renforcement ponctuel de digues.

Il apporte une solution réaliste parce qu'elle est simple, rapide et économique par rapport aux enjeux.

ABSTRACT

Solbarrière : an anti-flood barrier, light and removable

J. Landrot, A. Marchand

Solbarrière is a light, removable barrier process which can provide protection against floods up to 2 metres high. Simple and economical, easy to assemble and disassemble, it can often be deployed within the short time available between the announcement of the flood and its actual occurrence.

RESUMEN ESPAÑOL

Solbarrière : una barrera contra las avenidas, ligera y amovible

J. Landrot y A. Marchand

Solbarrière constituye un procedimiento de presa ligero y amovible que permite protegerse contra las avenidas hasta 2 metros de altura. Sencillo y económico, fácil de instalación y a desmontar, se puede implementar frecuentemente en plazos muy breves entre el anuncio de la avenida y el momento en que ocurre efectivamente.

Un courant neuf pour les chez Sogea Construction

La politique de Sogea Construction (groupe Vinci) dans le secteur de l'eau est doublement novatrice. Dans le traitement d'eau, l'introduction de nouveaux procédés dans le cadre d'accords de partenariat ou de contrats de licence et les offres intégrées génie civil-process que l'entreprise propose aux maîtres d'ouvrage la démarquent radicalement de ses grands concurrents. Dans les travaux hydrauliques, la recherche et la mise au point de nouveaux outils sont conduits à l'échelle locale et dotent l'entreprise d'une riche palette de solutions allant de la maîtrise des débits dans l'assainissement des eaux pluviales aux travaux sans tranchées et à la réhabilitation de canalisations.

Intervenant depuis sa création dans le secteur de l'hydraulique, Sogea Construction a progressivement élargi son expertise à l'ensemble des savoir-faire propres à ce métier. Constructeur ensemblier, l'entreprise assure ainsi en amont la conception clés en main de réseaux (adduction d'eau potable, assainissement), d'installations de traitement (eaux usées, eau potable), et en aval un service de maintenance, de gestion ou d'exploitation des équipements. Cette offre globale, très représentative du positionnement stratégique d'ensemble de l'entreprise, et la volonté de proposer les solutions les plus performantes conduisent Sogea à s'intéresser à l'ingénierie du traitement d'eau, un de ses métiers historiques, afin de proposer des solutions intégrées génie civil-process tout en menant, via ses entités régionales et ses filiales, une active politique de développement de nouveaux procédés en matière de travaux hydrauliques.

■ TRAITEMENT DE L'EAU : UNE OFFRE UNIQUE, 100 % INTÉGRÉE

"Sur un marché où, traditionnellement, les «traiteurs d'eau» se limitent au process, l'offre unique de Sogea en France est un trait novateur et un atout,

car la maîtrise totale des projets – de l'ingénierie à la construction – permet d'élaborer au mieux et d'optimiser les ouvrages de traitement où le génie civil et le process s'interpénètrent étroitement, explique Didier Haegel, le directeur du traitement de l'eau de Sogea Construction. Et pour le client, cette solution présente l'avantage de n'avoir qu'un interlocuteur unique, garant de la bonne réalisation de l'ensemble de l'unité de traitement."

Pour rendre cette offre opérationnelle dans un réseau où les affaires sont traitées par les centres de profit, l'organisation mise en place se compose d'un échelon central aux compétences générales (ingénierie, achat, assistance à la mise en service, assistance technique, après-vente, audits...) : la Direction du traitement de l'eau, et d'équipes hébergées par les directions régionales, disposant de compétences techniques, managériales et commerciales et ayant pour mission de développer localement ce métier "à part".

Face aux autres traiteurs d'eau, Sogea se distingue aussi par sa politique en matière de procédés : "Il faut savoir que 80 à 90 % des réponses aux appels d'offres reposent sur des techniques qui sont dans le domaine public, poursuit Didier Haegel. Pour prétendre «jouer dans la cour des grands» et s'attaquer aux 10 à 20 % restants, il est indispensable de disposer de techniques innovantes et «différenciantes»."

Plutôt que suivre la voie de ses grands concurrents en se dotant d'un centre de recherche, Sogea a choisi de rechercher sur le marché international les solutions les plus performantes.

"Depuis une quinzaine d'années, les pays d'Europe du Nord, par exemple, ont développé des procédés originaux sous la pression de normes d'épuration très exigeantes ; le Danemark disposait ainsi de procédés de traitement de l'azote et du phosphore dès 1993. Très concurrentielles des solutions des traiteurs d'eau français, ces techniques sont mises en œuvre dans leurs pays d'origine sur le modèle anglo-saxon (conception des installations assurée par des bureaux d'études spécialisés), ce qui leur a interdit jusque-là d'accéder à nos formes de marchés publics en conception construction", souligne Didier Haegel.

La démarche de Sogea a consisté à prendre des licences ou à nouer des partenariats avec les sociétés à l'origine des procédés dans une double optique d'exclusivité et de long terme : "Nous ne nous fixons pas d'objectif de chiffre d'affaires à brève échéance, car ces procédés doivent être adaptés au marché français. Et vis-à-vis de nos partenaires, nous préfé-

R3F : UN CHALLENGER SUR LE MARCHÉ DES CULTURES FIXÉES

Développé par le norvégien AnoxKaldnes, ce procédé de traitement biologique adapté à tout type d'effluent équipe plus de 350 stations d'épuration dans le monde, dont celles de Bergame (Italie), Wellington (Nouvelle-Zélande), Lillehammer et Oslo (Norvège - Photo 1), dont les capacités sont comprises entre 50 000 et 300 000 équ./hab. Basé sur le principe des technologies à biofilm, il présente un haut rendement et il est adapté au traitement du carbone, de l'azote et du phosphore. Il peut être utilisé soit seul, soit "en hybride", c'est-à-dire en combinaison avec une boue activée conventionnelle, ou comme prétraitement à une boue activée. Compact, robuste, simple à utiliser, il permet la conversion de stations biologiques conventionnelles et convient à leur extension ou à leur "dopage" et concurrence directement les procédés de biofiltration couramment utilisés en France grâce à sa compacité.



Photo 1

métiers de l'eau

Didier Haegel
DIRECTEUR DU TRAITEMENT
DE L'EAU
Sogea Construction

Pierre Chadoin
DIRECTEUR
Sogea Rhône-Alpes

Philippe Begou
DIRECTEUR
Barriquand

Thierry Mace
CHEF DE SECTEUR
Sogeforh

rons raisonner dans un esprit « gagnant-gagnant » et dans la durée", indique Didier Haegel.

■ LA PREUVE PAR QUATRE

Depuis un an et demi, Sogea a ainsi acquis une licence du norvégien AnoxKaldnes pour le procédé de traitement biologique des eaux usées R3F (réacteur à flore fixée fluidisée), et un partenariat exclusif a été noué avec une filiale australienne du groupe US Filter pour la distribution de bioréacteurs à membranes Memcor (cf. encadrés "R3F" et "Membranes Memcor"). Dans le domaine de l'eau potable, un accord de partenariat a été signé avec la société suisse Membratéc pour un procédé d'ultrafiltration en traitement d'eau potable, d'ores et déjà retenu pour l'équipement des usines d'eau potable d'Annemasse (Haute-Savoie) et de Baillif (Guadeloupe). Enfin, Sogea propose le procédé de traitement des boues d'épuration OVH (oxydation par voie humide), mis au point par une autre société suisse : Granit (cf. "Procédé OVH" page suivante). Dans ses cartons, Sogea a encore deux ou trois projets d'acquisition ou de rapprochement pour étoffer son offre.

"Le marché se révèle durablement bien orienté sous l'effet de nombreux facteurs", estime Didier Haegel. "De nombreuses villes vont devoir rattraper le retard pris dans la mise en conformité de leurs installations avec la réglementation européenne applicable en 2005 ; par ailleurs, les niveaux de traitement (azote, phosphore) sont revus à la hausse pour l'ensemble des stations d'épuration, et la recherche d'une meilleure qualité pour l'eau potable (turbidité, niveaux de pesticides, qualité bactériologique) va dans le sens d'un recours accru à l'ultrafiltration. Enfin, de très nombreux projets apparaissent à l'échelle locale."

■ TRAVAUX HYDRAULIQUES : UNE INSPIRATION VENUE DU TERRAIN

Sogea Rhône-Alpes : contenir
les eaux pluviales

En ville, l'évacuation des eaux pluviales est généralement assurée par des réseaux de canalisations. Or l'urbanisation croissante et l'accroissement des

MEMBRANES MEMCOR : L'ULTRAFILTRATION HAUT DE GAMME

Exclusivement distribuées par Sogea en France, les membranes Memcor ont été mises au point par une filiale australienne du groupe US Filter et sont la clé du système de traitement R-MeS. Modulaire, ce système associe un bassin biologique de taille réduite (jusqu'à 75 % par rapport aux installations classiques) et un module membranaire installé dans un réacteur séparé (figure 1 et photo 2), adapté au traitement du carbone, à la nitrification, à la dénitrification ou à la déphosphatation. La qualité des eaux traitées au moyen de ce procédé réserve son utilisation aux zones sensibles (eaux de baignade, zones d'irrigation) où de hauts rendements d'épuration et de désinfection sont nécessaires. Sous la forme "Pack", tout en un et totalement automatisée, le procédé offre des capacités de traitement de 300 à 2 000 équ./hab en version acier et de 2 000 à 10 000 équ./hab dans sa version béton.



Photo 2

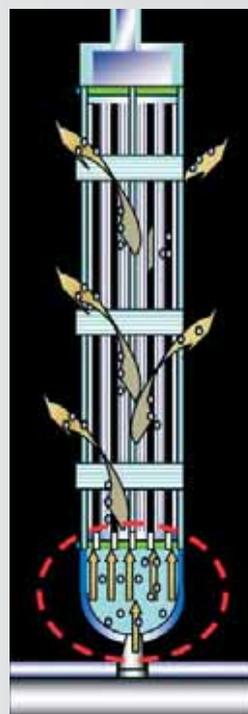


Figure 1

PROCÉDÉ OVH : OXYDER LES BOUES
PLUTÔT QUE LES INCINÉRER

Initialement conçu pour le traitement des effluents industriels et développé par la société suisse Granit, le procédé d'oxydation de boues biologiques par voie humide



Photo 3

OVH est une solution alternative à l'incinération qui ne nécessite pas d'installation classée. Elle équipe actuellement la Papeterie du Léman et la station d'épuration d'Orbe (Suisse). Après avoir été conditionnées (tamisage et épaissement), les boues sont réchauffées (300 °C) et, sous une pression de 100 bars, reçoivent un apport d'oxygène au sein d'un réacteur qui est le cœur du process. Les gaz produits sont traités à 100 % et les résidus peuvent être soit utilisés comme matériau de remblai, soit stockés en décharge de classe III (photo 3).

Photos 4 et 5

Le principe de la tranchée à débit différé s'applique à l'aménagement des fossés (photo 4). Il associe géotextile, drains, événements (prises d'air) et matériaux drainants.

Dans les zones où l'infiltration des eaux pluviales dans le sous-sol n'est pas souhaitable (effluents pollués), le géotextile perméable est remplacé par un complexe étanche (photo 5)

The principle of the deferred flow trench applies to ditch improvement (photo 4).

It involves the combined use of geotextiles, drains, vents (air intakes) and draining materials.

In areas in which rainwater seepage into the subsoil is undesirable (polluted effluents), the permeable geotextile is replaced by a sealed membrane (photo 5)



volumes d'eau provoquent des difficultés en aval, en occasionnant des ravinements ou des inondations qui entraînent des travaux de réparation ou l'aménagement de coûteux bassins de rétention. Une solution alternative permettant de ne pas immobiliser de terrains a été imaginée dans les années 1990 par l'ingénieur lyonnais Alexandre Bancel : la tranchée à débit différé. Depuis 2003, cette technique fait l'objet d'un programme de recherche mené par Sogea Rhône-Alpes en partenariat avec l'Insa de Lyon et la Direction de l'eau du Grand-Lyon. En lieu et place des fossés ou des canalisations, ce procédé consiste à aménager, à l'aide de drains, d'un matériau poreux d'enrobage et de géotextile, un système assurant la rétention de l'eau au moment de la pluie, et son écoulement à débit réduit, voire son infiltration dans le sol. Depuis mai 2004, un programme de mesures est en cours sur un site expérimental à Vaulx-en-Velin (Rhône), afin de valider le modèle mathématique du procédé et de définir ses constantes et variables. L'objectif est de pouvoir ensuite adapter le dispositif à différents profils ou qualités de terrain. Parallèlement à ce travail de développement, Sogea Rhône Alpes a entrepris de faire connaître cette nouvelle offre à ses publics – collectivités locales, maîtres d'œuvre, aménageurs de lotissements, etc. – et l'a présenté au Prix de l'Innovation VINCI 2005 (photos 4 et 5).

Barriquand : maîtriser le chemisage

Assise sur la région Picardie pour son activité canalisations, l'entreprise Barriquand, qui a rejoint Sogea en 2002 déploie sur l'ensemble de l'Hexagone ses savoir-faire en travaux spéciaux : l'assainissement sous vide et la réhabilitation de canalisations, pour lesquels elle a conçu et continue de développer un ensemble de procédés innovants.

Quand l'environnement ne permet pas l'aménagement de réseaux gravitaires (zones rurales dépourvues de relief, terrain rocheux, nappes phréatiques, ou sous-sol urbain saturé de réseaux), l'assainissement sous vide s'impose. Connue de longue date, la technique a bénéficié au cours des dix dernières années des avancées de l'électronique en matière de performances et de fiabilité. La dernière version du système Vacuflow® proposé par Barriquand associe ainsi au réseau proprement dit un système de télésurveillance permettant de localiser en temps réel tout dysfonctionnement et de programmer des interventions de maintenance préventive.

Plus encore que l'assainissement sous vide, la réhabilitation de canalisations sans tranchée est un domaine d'application de techniques innovantes, en diagnostic comme en réparation (robot de fraissage Prokutter®, chemisage partiel, chemisage conti-

nu Photoliner®). Derniers-nés des procédés proposés par Barriquand, les systèmes Everpipe® et Foreverpipe® (gaine renforcée de fibre de verre) permettent le chemisage continu de canalisations en diamètre 200 à 1 500 et jusqu'à 300 m de long par réversion d'une gaine imprégnée d'un type nouveau. Soucieuse de maîtriser le procédé dans toutes ses dimensions et d'assurer l'autonomie de son approvisionnement, l'entreprise a mis en chantier sur son site une usine de fabrication de gaine. En parallèle, elle a lancé un programme de recherche sur les résines d'imprégnation avec l'université de Compiègne (photos 6 et 7 et figure 2).

Sogeforh : réhabiliter à neuf

Au tournant des années 2000, la prise en compte des contraintes environnementales ouvre de nouveaux horizons à des procédés spéciaux de pose de canalisations. Développées pour franchir des obstacles (autoroutes, cours d'eau, voies ferrées, etc.) incompatibles avec l'ouverture de tranchées, des techniques comme le forage horizontal à la tarière, spécialité de l'entreprise Sogeforh, permettent d'intervenir en milieu urbain en respectant les sites et les riverains et en réduisant au maximum l'impact des travaux sur la circulation. Pour faire face à tous les besoins et compléter les techniques traditionnelles offertes aux clients par Sobea en Île-de-France et par le réseau de Sogea en province, Sogeforh a élargi sa gamme de savoir-faire et s'est équipée de nouveaux outils : trousse coupante hydraulique pour la pose de canalisations en acier de 600 à 800 mm de diamètre ; mini- et micro-tunneliers (diamètre 600 à 1 200 mm) adaptés au forage guidé, etc.

Plus récemment, une nouvelle application du forage horizontal, le forage destructif, a permis à Sogeforh d'aborder une nouvelle facette du métier : la réhabilitation de canalisations.

"C'est le plus innovant de nos procédés, affirme Thierry Mace, chef de secteur chez Sogeforh, car il permet de substituer une canalisation toute neuve à une installation dégradée."

Alternative de choix aux techniques de chemisage, le forage destructif consiste à "grignoter" la conduite à réhabiliter au moyen d'une tête de destruction actionnée par une centrale hydraulique et à mettre en place par poussage la canalisation neuve en grès ou en PVC, d'un diamètre qui peut atteindre 500 mm. Couramment utilisé depuis trois ans, le forage destructif permet à des équipes de quatre opérateurs de réhabiliter jusqu'à 30 m de canalisation par jour. En 2004, deux mois ont suffi à Sogeforh pour refaire en totalité le réseau d'assainissement (soit 400 m de tuyaux en grès en diamètre 300 mm) du Val de Beauté, un quartier résidentiel de Nogent-sur-Marne aux voiries particulièrement exigües. Et la technique s'est aussi illustrée comme solution de complément aux mé-



Photos 6 et 7
Procédés de chemisage Everpipe® et Foreverpipe® (Barriquand). Stockée dans un camion réfrigéré, la gaine de chemisage est mise en œuvre depuis une plate-forme surélevée, nécessaire pour former la colonne d'eau qui assure la réversion de la gaine à l'intérieur de la conduite (voir détail). Une fois mise en place, la gaine est polymérisée

sur la conduite à réhabiliter par chauffage de l'eau (dans d'autres procédés, comme Photoliner®, cette opération s'effectue par rayonnement UV)

Everpipe® and Foreverpipe® lining processes (Barriquand). Stored in a refrigerated truck, the liner pipe is laid from an elevated platform, necessary to form the water column which ensures reversion of the liner inside the conduit (see detail). Once it has been inserted, the liner is polymerised onto the conduit to be renovated by heating water (in other processes, such as Photoliner®, this operation is performed by UV radiation)

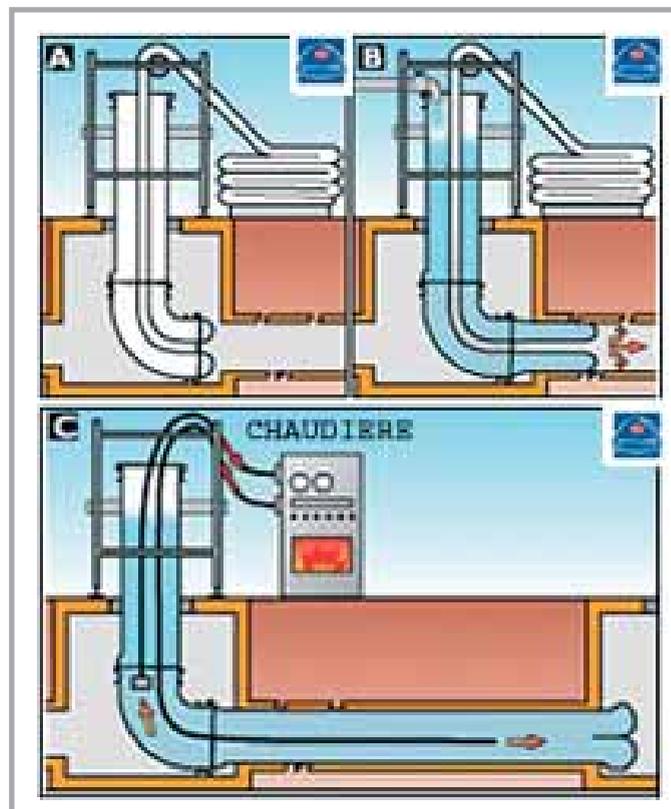


Figure 2
Schéma de principe des trois étapes de la réhabilitation par réversion Everpipe® et Foreverpipe®

Schematic diagram of the three stages of renovation by Everpipe® and Foreverpipe® reversion

thodes classiques en permettant le franchissement d'un préau d'école à Ézanville (Val-d'Oise).

"Aujourd'hui, poursuit Thierry Mace, afin de prévenir les futurs besoins de nos clients, généralement désarmés devant ce type de matériau, nous travaillons à définir les procédures (formation du personnel, exécution, gestion des déchets) qui nous permettront de nous attaquer aux canalisations en amiante ciment..." (photos 8, 9 et 10).



Photo 8

Le forage destructif de Sogeforh en action côté "départ" sur le chantier du quartier Val de Beauté de Nogent-sur-Marne (2004). Introduite dans la canalisation à réhabiliter, la tarière guide la tête de destruction. L'ensemble est mu par une centrale hydraulique

Sogeforh destructive drilling in action on the "starting" side on the site of the Val de Beauté district in Nogent-sur-Marne (2004). Inserted in the pipeline to be renovated, the auger guides the destructive drill head. The whole system is driven by a hydraulic power unit

Photo 10

Les outils de base du forage horizontal : tarière, têtes de forage, systèmes d'entraînement, centrales hydrauliques

The basic tools for horizontal drilling : auger, boring heads, drive systems, hydraulic power units



ABSTRACT

A fresh current for the water business at Sogea Construction

D. Haegel, P. Chadoin, Ph. Begou, Th. Mace

The policy of Sogea Construction (Vinci Group) in the water sector is doubly innovative. In water treatment, the introduction of new processes within the framework of partnership agreements or licensing agreements and the integrated civil engineering/process offerings that the company proposes to clients radically distinguish it from its major competitors. In hydraulic engineering works, research and development of new tools is carried out on the local level and provides the company with a rich range of solutions, from flow control in rainwater drainage system to trenchless work and pipeline renovation.

RESUMEN ESPAÑOL

Nuevo enfoque para las actividades del agua en Sogea Construction

D. Haegel, P. Chadoin, Ph. Begou y Th. Mace

La política de Sogea Construction (grupo Vinci) en el sector del agua constituye una doble innovación. Para el tratamiento del agua, la introducción de nuevos procedimientos en el marco de convenios de asociación o de contratos de licencia y las ofertas integradas de ingeniería civil-proceso que la empresa propone a las empresas contratantes la destacan radicalmente de sus importantes competidores. Para las obras hidráulicas, la investigación y el desarrollo de nuevas herramientas se llevan a cabo en el ámbito local y permiten a la empresa disponer de una muy importante línea de soluciones que empiezan por el dominio de los caudales en el saneamiento de las aguas pluviales hasta las obras sin zanjas y la rehabilitación de canalizaciones.

Photo 9

Forage destructif côté "arrivée". Le matériau rouge est le grès désintégré de l'ancienne conduite. Immédiatement en arrière de la tête destructrice apparaît l'extrémité de la conduite neuve, ici, une canalisation PVC de 300 mm de diamètre

Destructive drilling on the "arrival" side. The red material is the disintegrated sandstone of the old conduit. Immediately to the rear of the destructive drill head appears the end of the new conduit, here a PVC pipe 300 mm in diameter



Un mur antibruit dépollueur

Développé grâce à la collaboration entre Eurovia, Sysa et le département recherche de Mitsubishi Materials, Noxer est une technique de destruction de l'oxyde d'azote (NOx) dans l'air ambiant. Le procédé se base sur une réaction de photocatalyse des oxydes d'azote avec du dioxyde de titane (TiO₂). Les NOx transformés en composés azotés stables sont évacués par les eaux de pluie. La technologie Noxer s'appliquant sur les murs antibruit permet de réduire à la fois la pollution atmosphérique et la pollution sonore dues aux trafics routiers.

Le bruit et la pollution atmosphérique font partie des principales préoccupations environnementales des pays industrialisés. La lutte contre leurs méfaits est devenue une priorité européenne de telle sorte que de nouvelles directives fixent désormais un cadre d'actions et des objectifs ambitieux en matière de lutte contre le bruit et d'amélioration de la qualité de l'air. Au-delà de ces exigences imposées, Sysa, filiale d'Eurovia et le Centre de Recherche et Développement d'Eurovia, ont su partager une démarche commune de recherche visant à la réduction de ces pollutions principalement issues de l'augmentation croissante du nombre de véhicules en une seule technique, appelé NOxer.

LA POLLUTION SONORE

La prise de conscience est relativement récente, et c'est avec le code de l'environnement (article L571) et l'intégration de la loi du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit, que la France a pris conscience de ce problème. Cette loi a notamment instauré des mesures préventives pour limiter les émissions sonores, réglementer certaines activités bruyantes et fixé de nouvelles règles en matière d'infrastructures de transports terrestres. Elle contient aussi des dispositions visant à protéger les riverains contre le bruit. Au niveau européen, la directive 2002/49/CE du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement impose un cadre commun aux états membres pour la lutte contre les nuisances sonores des infrastructures de transports terrestres. Deux des principaux objectifs de cette directive sont l'établissement de cartes d'exposition aux bruits et, sur la base de ces cartes, l'adoption de plans d'action en matière de prévention et de réduction du bruit dans l'environnement. L'adoption de ces deux mesures se fera pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants en 2007-2008, dans un premier temps, et pour les agglomérations de plus de



100 000 habitants en 2012-2013, dans un second temps. La transcription de cette directive en droit français est en cours de validation.

Dans ce contexte environnemental, les recherches de moyens de protections sont multiples :

- ◆ étude des bruits intrinsèques des véhicules (bruit dû au contact des pneumatiques sur la chaussée);
- ◆ étude pour le développement d'enrobés à forte porosité, limitant le bruit;
- ◆ étude des écrans acoustiques dont le principal avantage réside dans leur grande efficacité (de l'ordre de 8 dB (A) pour un écran correctement dimensionné et positionné).

Le mode de conception et les techniques de fabrication des murs antibruit se sont multipliés depuis les années 70. Parmi ces techniques, le béton de bois s'est révélé au fil des ans comme étant un procédé majeur dans la fabrication de murs antibruit aux caractéristiques pérennes (photos 1 et 2). Le béton de bois est un mélange homogène de granulats de bois et de ciment. Il présente les meilleures performances acoustiques connues en absorbant le bruit. Le choix de cette technique permet une intégration architecturale avancée du mur antibruit grâce à une grande liberté dans le design des panneaux et des faces arrières de plus en plus

Pascal Rousseau
CENTRE DE RECHERCHE
ET DÉVELOPPEMENT
Eurovia - Bordeaux Mérignac



Emmanuel Toulan
CHEF D'AGENCE DOURDAN
Sysa



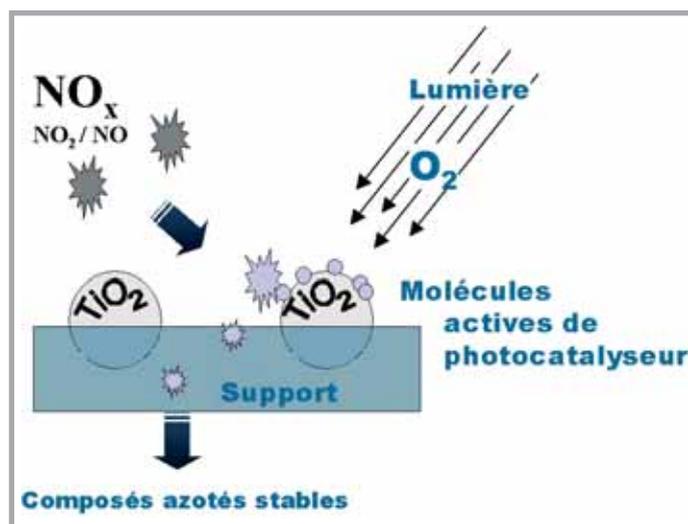
Photos 1 et 2
Exemples de murs antibruit
en béton de bois Sysa

*Examples of noise
attenuation walls
in Sysa wood fibre
concrete*

Photo 3
Exemple de limitation
de vitesse
due à la pollution
Example of speed limitation
due to pollution



Figure 4
Principe
de fonctionnement
des NOxer
Operating principle
of NOxer



► attractives pour les riverains. La coloration facile du béton de bois permet une parfaite intégration du panneau dans son environnement.

■ LA QUALITÉ DE L'AIR

Chaque année, un million de tonnes d'oxydes d'azote (NOx = NO et NO₂) sont produites en France. Ces gaz sont néfastes à la santé même à de faibles concentrations. Ils sont essentiellement responsables d'irritations cutanéomuqueuses entraînant une altération de la fonction respiratoire, une hyper réactivité bronchique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections. Ils rentrent aussi dans un processus complexe participant finalement à la formation des pluies acides, d'ozone troposphérique et ainsi à l'augmentation des gaz à effet de serre. L'Union européenne a fixé des concentrations de référence, reprises par la législation française avec un seuil d'alerte à 400 µg.m³ en moyenne sur une heure (200 ppb). L'Union Européenne a pris une nouvelle disposition qui, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2005, impose aux villes traversées par un fort trafic d'adopter des mesures qui vont de la réduction de la vitesse jusqu'à l'interdiction de rouler lorsque les niveaux de NOx ou de poussières augmentent (photo 3). Quant au

gouvernement français, il s'est engagé dans le cadre d'accords internationaux (protocole de Göteborg en 1999 et directive européenne sur les plafonds nationaux d'émission du 23 octobre 2001) à réduire de moitié d'ici 2010 les émissions de dioxyde d'azote. Ces émissions de NOx sont régies par la directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999 qui fixe les valeurs limites dans l'air ambiant pour le NO₂ et les NOx :

- ◆ limite horaire pour la protection de la santé humaine (NO₂) : 200 µg/m³ (100 ppb) ;
- ◆ limite annuelle pour la protection de la santé humaine (NO₂) : 40 µg/m³ (20 ppb) ;
- ◆ limite horaire pour la protection de la végétation : 30 µg/m³ (15 ppb).

Pour respecter ces engagements, il a été approuvé un programme national de réduction des émissions polluantes en juin 2003. De nombreux efforts doivent cependant encore être effectués pour arriver à tenir ces échéances.

Partant de ce constat, Eurovia et Sysa, soucieux de s'inscrire dans une démarche qualité de protection de l'environnement, ont alors associé leurs savoir-faire et leurs connaissances et, à partir d'une collaboration avec Mitsubishi Materials, ont développé un procédé connu sous le nom de NOxer permettant de garder l'ensemble des caractéristiques des murs antibruit tout en y associant une lutte efficace contre la pollution de l'air par les oxydes d'azote, les NOx. La pollution par les NOx (monoxyde et dioxyde d'azote) est principalement générée par la combustion à hautes températures de combustibles fossiles (charbon, fuel, pétrole...). La présence systématique d'oxydes d'azote près des grandes voies de circulation est de nos jours avérée. A titre d'exemple, au niveau de l'échangeur de Bagnole, à Paris, la pollution aux NOx se fait ressentir à plus de 400 m du périphérique atteignant des niveaux préoccupants (étude réalisée par l'organisme AirParif, chargé de la surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France).

■ PRINCIPE NOXER

Le principe développé par Eurovia et Sysa repose sur l'utilisation d'un mortier spécial contenant une phase active à base d'oxyde de titane, TiO₂. Ces matériaux ont été optimisés pour convenir exactement aux applications de murs antibruit, et notamment ceux fabriqués en béton de bois. Son fonctionnement est assez simple : sous l'action de lumière ultraviolette, l'oxyde de titane libère des électrons, ce qui a pour conséquence d'activer l'oxygène de l'air. Cet oxygène actif va ensuite se recombinaison avec les oxydes d'azote pour former des composés azotés stables. Ceux-ci seront neutralisés par la chaux du ciment et éliminés par simple lavage à l'eau (l'eau de pluie, par exemple). Le fait que l'oxyde de titane intervienne par photocataly-

se¹ permet de conserver une efficacité permanente du revêtement puisque celui-ci n'est ni consommé, ni modifié par la réaction d'élimination des NOx (figure 4).

Le taux d'ultraviolet nécessaire à l'activation du procédé est très faible : il suffit de très peu de cette lumière qui est abondante dans la lumière du soleil et présente dans de nombreuses sources lumineuses artificielles. Quant à l'oxyde de titane, il n'implique aucune contrainte au niveau législatif : oxyde inerte chimiquement et biologiquement et non toxique, son emploi ne pose aucun problème au même titre que son éventuel recyclage ultérieur.

■ OPTIMISATION DES MATÉRIAUX

L'optimisation des formules a été obtenue au Centre de Recherche et Développement d'Eurovia grâce à deux techniques de mesures distinctes. Un premier dispositif original de contrôle en ligne de l'efficacité des matériaux à détruire les oxydes d'azote permet de montrer simplement et efficacement l'aptitude de revêtements à éliminer la pollution. Le principe est de recréer un air pollué à un taux similaire à ceux mesurés sur sites et d'en contrôler les concentrations en sortie (figure 5). Ce gaz passe par un réacteur où se trouve un échantillon de revêtement NOxer. Il est alors simple de suivre l'évolution des oxydes d'azote. Ici, par exemple, sont présentés les résultats pour une formulation de béton de bois contenant sur sa surface une partie NOxer (figure 6). La tenue et les caractéristiques du béton de bois n'ont pas été modifiées et sa structure permet d'augmenter la surface efficace de traitement des oxydes d'azote. La première diminution rapide des oxydes d'azote correspond à l'activation du procédé par la lumière. La diminution est immédiate, sans cinétique de mise en route, et montre qu'avec une lumière correspondant à une journée nuageuse, les taux obtenus montent à plus de 70 % d'élimination et qu'avec une lumière correspondant à une journée ensoleillée, ces taux de destruction montent à 90 %. Cet essai permet ainsi de mesurer simplement l'efficacité du produit et permet l'optimisation des formules employées. Une simulation à plus grande échelle en milieu confiné de l'élimination des oxydes d'azote permet alors dans un deuxième temps de déterminer le comportement de différentes parois face aux oxydes d'azote (figure 7). Ce dispositif expérimental se pré-

1. Catalyseur : Substance utilisée lors d'une réaction chimique pour influencer la vitesse de la réaction (la plupart du temps pour l'accélérer). Le catalyseur n'est pas consommé au cours de la réaction ; par conséquent, au terme de la réaction, il est encore présent dans le récipient de réaction ou bien il peut être récupéré du mélange réactionnel.
"Photo" catalyse, parce que l'activation se fait grâce à la lumière.

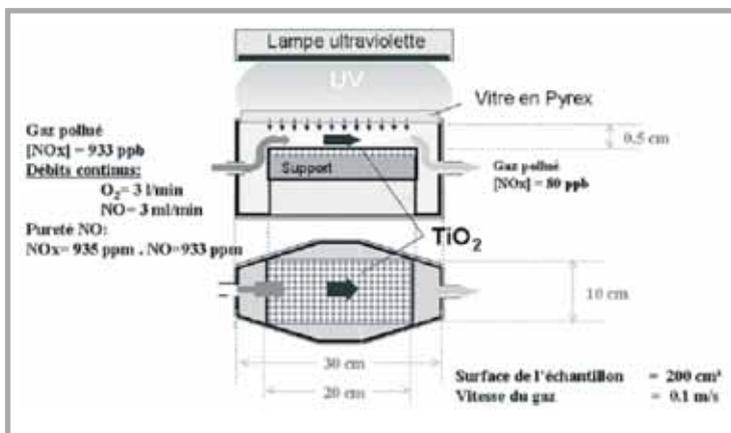


Figure 5
Schéma du réacteur d'optimisation des matériaux de construction. Grâce à ce dispositif, on peut suivre le taux en oxyde d'azote en fonction du temps

Diagram of the building materials optimisation reactor. Thanks to this device, the nitrogen oxide level can be monitored versus time

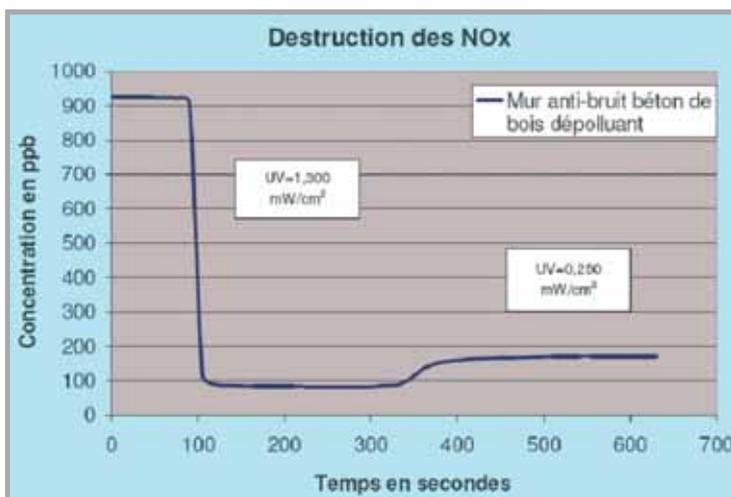


Figure 6
Taux d'élimination des NOx par un revêtement NOxer. La première diminution correspond à l'activation du catalyseur par la lumière semblable à celle du soleil

Rate of NOx elimination by a NOxer coating. The first decline corresponds to activation of the catalyst by light similar to the light of the sun

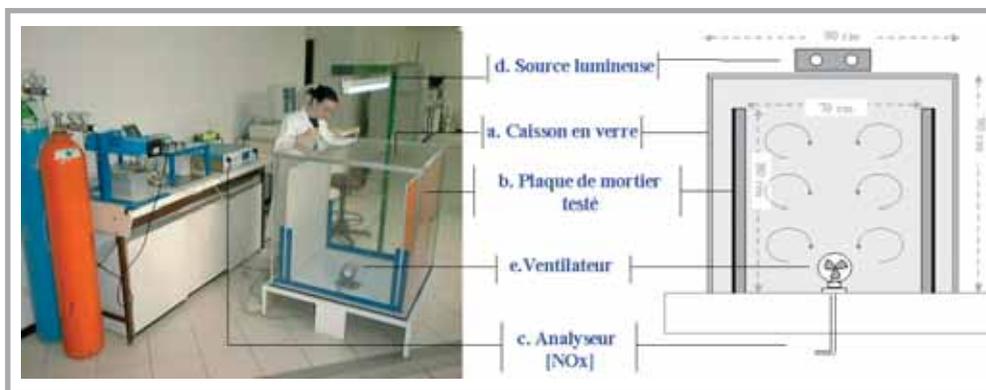


Figure 7

Méthode de simulation de l'efficacité des parois NOxer. Ce dispositif permet de suivre en continu le taux en oxyde d'azote et de montrer l'élimination des NOx en fonction du temps

Method for simulation of the effectiveness of the NOxer walls. This device allows continuous monitoring of the nitrogen oxide level and can show NOx elimination versus time

sente sous forme d'un caisson en verre dans lequel un air à teneur connue en oxyde azote est introduit et homogénéisé par un ventilateur de faible puissance. Les plaques d'essais sont placées à l'intérieur du caisson. L'analyse en ligne des concentrations en oxyde d'azote et des paramètres physiques tels que la température, l'hygrométrie ou l'éclairage permet de déterminer l'efficacité des revêtements NOxer à éliminer ces polluants dans différentes conditions.

L'analyseur d'oxydes² d'azote permet de suivre en fonction du temps la teneur en polluant jusqu'à complète disparition (figure 8). Le temps plus ou moins rapide d'élimination fournit une idée concrète de l'efficacité des revêtements testés.

2. AC32M de la société Environnement SA est l'analyseur utilisé en général par les organismes chargés du contrôle de la qualité de l'air (méthode normalisée (NF X 43-018 : 1983)).

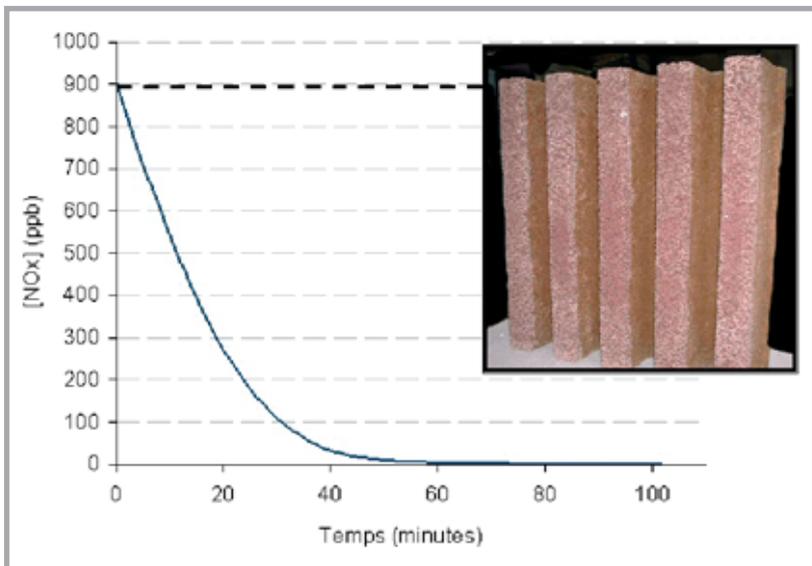


Figure 8
Diminution du taux en oxyde d'azote grâce aux parois NOxer. Parois exposées à une pollution contrôlée

Reduction in the nitrogen oxide level due to the NOxer walls. Walls exposed to controlled pollution

PREMIERS CHANTIERS

L'impact environnemental des différents polluants est de plus en plus contrôlé par les organismes de surveillance de la qualité de l'air. Les évolutions régulières des taux admissibles de certains polluants montrent la prise de conscience du législateur de réglementer les rejets de polluants. Le traitement spécifique des oxydes d'azote rejetés est ainsi une priorité dans la politique environnementale des zones urbaines. Notre démarche environnementale a donc permis de développer la technologie NOxer. Elle fournit un exemple de technique de dépollution à long terme avec un objectif de développement durable luttant sur un même site, et une même technique contre la pollution sonore et chimique.

Le succès de l'introduction sur le marché de ces nouvelles constructions multifonctionnelles apparaît probable devant l'ampleur du marché potentiel et devant la crédibilité technique et environnementale obtenue. Les premiers chantiers sont prévus début 2005 avec notamment 700 m² de protection phonique à Lannion (début des travaux : mars 2005) et surtout 1 000 m² à Paris en couverture du boulevard périphérique dans le secteur de la porte des Lilas (photo 9). D'autres chantiers sont prévus sur ce même boulevard très prochainement. D'autre part, des études de validation in situ sont en cours de réalisation sur le chantier de Lannion avec différents moyens (échantillonneurs passifs, analyses en ligne...) en collaboration avec le Setra et le Conseil général.

A l'étranger, Teco, la filiale allemande d'Eurovia spécialisée en murs antibruit avec qui nous travaillons a la même démarche qui s'intègre dans la politique générale d'innovation d'Eurovia, tournée vers le développement durable.

ABSTRACT

A pollution control and noise attenuation wall

P. Rousseau, E. Toulan

Developed through collaboration between Eurovia, Sysa and the research department of Mitsubishi Materials, Noxer is a technique for destruction of nitrogen oxide (NOx) in the ambient air. The process is based on a photocatalysis reaction of nitrogen oxides with titanium dioxide (TiO₂). The NOx converted into stable nitrogenous compounds are removed by rainwater. The Noxer technology applying to noise attenuation walls makes it possible to reduce both atmospheric pollution and noise pollution due to road traffic.

RESUMEN ESPAÑOL

Un muro antirruido descontaminador

P. Rousseau y E. Toulan

Desarrollado mediante la colaboración entre Eurovia, Sysa y el departamento investigación de Mitsubishi Materials, Noxer corresponde a una técnica de destrucción del óxido nitroso (NOx) en el aire ambiente. El procedimiento se funda en una reacción de fotocatalisis de los óxidos nitrosos con el dióxido de titanio (TiO₂). Los NOx transformados en compuestos de nitrógeno estables se evacúan por las aguas pluviales. La tecnología Noxer puede aplicarse a los muros antirruido y permite reducir simultáneamente la contaminación atmosférica y la contaminación acústica procedentes del tráfico vial.



Photo 9
Configuration choisie de mur antibruit dépollueur pour la première phase de recouvrement du périphérique de Paris

Pollution control and noise attenuation wall configuration selected for the first stage of covering of the Paris ring road

Le projet PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment)

Louis Demilecamps
DIRECTEUR TECHNIQUE,
COORDINATEUR
DU PROJET PICADA
GTM Construction

Hélène André
CHARGÉE D'ÉTUDES
TECHNIQUES
GTM Construction

Les problèmes de pollution des façades sont probablement aussi vieux que les villes elles-mêmes. Mais la pollution industrielle et automobile de ce dernier siècle a exacerbé ce phénomène touchant à la fois à la qualité de l'air en milieu urbain, à l'entretien des bâtiments et à la santé des citoyens.

C'est dans ce contexte difficile qu'un groupement de recherche s'est formé au niveau européen autour du projet PICADA, regroupant centres de recherche, industriels de la chimie, des matériaux et du bâtiment pour travailler à la mise au point de matériaux facilement applicable en façades et ayant des propriétés autonettoyantes et dépolluantes.

L'usage de revêtements contenant du dioxyde de titane (TiO₂), catalyseur bien connu pour son aptitude à dégrader par oxydation les composés organiques, s'impose alors comme une solution innovante, d'autant que le marché de la photocatalyse par le dioxyde de titane, atteint le milliard d'euros dans le monde et propose déjà des utilisations écologiques multiples.

■ LE DIOXYDE DE TITANE : QUAND LA CHIMIE TRAVAILLE POUR L'ENVIRONNEMENT

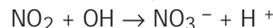
L'irradiation par les UV de semi-conducteurs sous forme de très fines particules comme le dioxyde de titane, TiO₂, en suspension ou fixés dans divers supports, mène à une réaction d'oxydoréduction capable de dégrader les polluants organiques présents dans l'environnement.

Ce principe appliqué aux supports en béton est illustré figure 1.

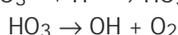
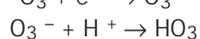
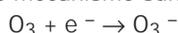
En pratique, les polluants de type oxyde d'azote (NO_x) sont transformés en résidus non toxiques : l'oxyde d'azote (NO) présent à la surface est oxydé en dioxyde d'azote (NO₂) par l'action de radicaux OH présents dans le béton :



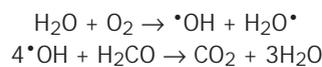
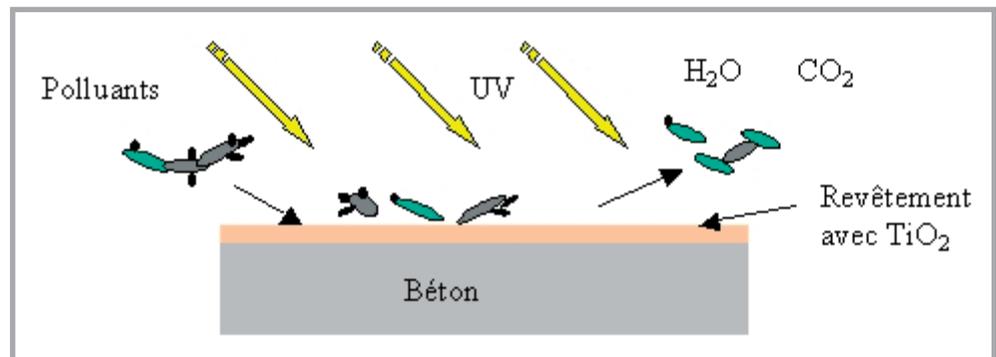
Le NO₂ créé est oxydé de la même manière en nitrates qui sont neutralisés par les composés basiques du béton (chaux), ce qui a l'avantage de ne pas relâcher d'acide nitrique dans l'atmosphère.



Le dioxyde de titane permet aussi d'éliminer l'ozone de la basse atmosphère en le transformant en oxygène selon le mécanisme suivant :



Enfin, les composés organiques volatiles (COV) pénètrent à la surface des revêtements grâce à la porosité de ceux-ci. Le TiO₂ transforme alors l'eau et l'oxygène en radicaux qui vont dégrader les COV et les transformer en dioxyde de carbone et eau selon les réactions suivantes :



Réaction photocatalytique du formaldéhyde H₂CO

Ainsi, le dioxyde de titane permet par sa présence, d'apporter au support auquel il est ajouté des propriétés de dépollution. Afin de tirer avantage de ce phénomène, le projet PICADA a développé une gamme complète de revêtements de façades qui ont été vérifiés à l'échelle du laboratoire, à macro échelle et en test extérieur.

■ UN CONSORTIUM EUROPÉEN INNOVANT

Le projet PICADA, pour Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment, né en 2001 du rassemblement d'industriels et de chercheurs dans le cadre du programme européen baptisé Competitive and Sustainable Growth, a pour but d'optimiser et de valider une gamme de revêtements de façades autonettoyants et dépolluants par incorporation du dioxyde de titane.

Figure 1
Principe de la photocatalyse par le TiO₂
Principle of photocatalysis by TiO₂



Figures 2 et 3
Gamme de couleurs potentielle
Potential colour range

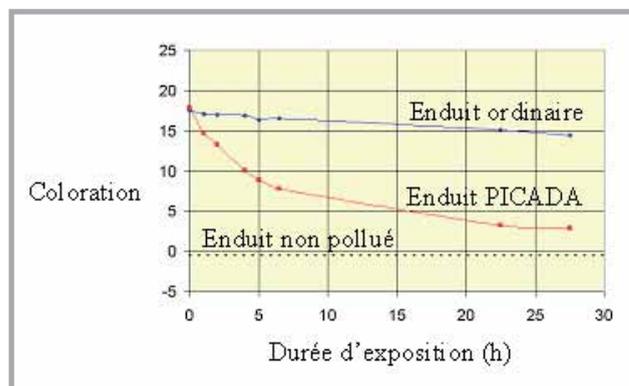


Figure 4
Evolution du changement de couleur en fonction du temps pour les échantillons d'enduit

Evolution of the change in colour versus time for coating samples

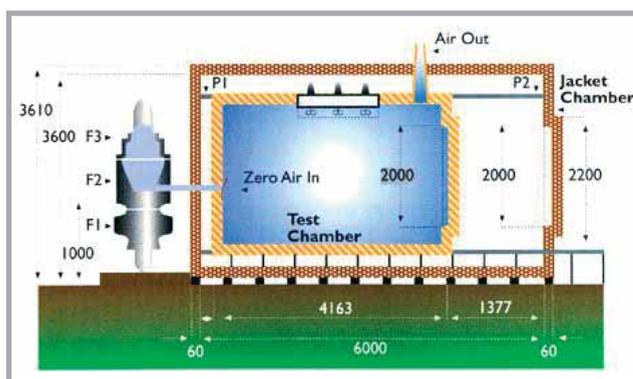


Figure 5
Schéma de la chambre Indoortron
Diagram of the Indoortron chamber

► Cette volonté commune d'apporter des solutions aux problèmes croissants de pollution a permis de regrouper pour 4 ans huit industriels et laboratoires de recherche chacun tête de file dans un domaine d'excellence.

GTM Construction, en tant que coordinateur du projet, est chargé du management et de l'organisation générale. GTM Construction a également un rôle technique, intervenant dans un certain nombre de tâches dont la détermination des applications possibles, la validation à échelle réelle et l'évaluation du marché.

Le Centre technique du groupe Italcementi (CTG) est en charge de la mise au point et de la fourniture des matériaux à base de ciment ainsi que d'une grande partie des expérimentations en laboratoire. Le CTG participe grandement à la collecte et la diffusion de connaissances.

Millennium Chemicals intervient essentiellement dans l'approvisionnement en TiO_2 et dans la détermination des formulations des enduits transparents. Ses spécialistes sont également sollicités pour la collecte d'informations, la diffusion des résultats et la mise en place d'un réseau de connaissances.

L'Université Aristotle de Thessalonique (AUT) intervient spécifiquement dans le traitement des données de l'expérimentation in situ et la modélisation de dépollution en milieu urbain.

Le Centre national de recherche scientifique Demokritos (NCSRDI) intervient principalement dans la validation à grande échelle des résultats obtenus dans les laboratoires en ce qui concerne l'effet dépolluant de l'enduit en recourant aux installations européennes.

La grande partie de l'action du Conseil national de recherche de l'Institut des technologies de construction (CNR ITC) pour PICADA est l'évaluation du comportement du ciment photocatalytique dans la dégradation des composés organiques volatiles (COV) adsorbés depuis l'atmosphère.

Le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) réalise l'évaluation de l'aptitude à l'emploi des produits photocatalytiques en tant que revêtements de finition, la validation des performances autonettoyantes des matériaux et l'analyse du cycle de vie des mélanges photocatalytiques.

Dansk Beton Teknik (DBT) est essentiellement impliqué dans l'organisation, le suivi des expérimentations et des essais in situ. DBT participe aussi activement à la réflexion sur les applications possibles (produits et procédés) et à l'évaluation de l'influence de l'enduit sur la qualité de l'air urbain.

Tous ces efforts mis en commun ont permis d'atteindre les objectifs principaux à savoir mieux connaître les mécanismes de réaction photocatalytique et leur effet de nettoyage et de dépollution pour développer et optimiser les formulations des produits. Un des défis de cette gamme de produits a été de développer non seulement des enduits et peintures, mais aussi un revêtement translucide pour toutes les applications pour lesquelles on ne veut pas dénaturer l'apparence du support, comme la pierre. Les tests à différentes échelles de caractère technique innovant tant par les protocoles que par les moyens mis en œuvre ont validé les performances attendues de la gamme de revêtements. De plus, le projet a permis la création d'un logiciel de simulation de dépollution en 3D qui permet d'évaluer les niveaux de pollution dans des configurations réelles simulées et ainsi d'offrir un outil d'aide à la décision performant.

■ UNE GAMME DE PRODUIT QUI S'INSCRIT DANS LA LOGIQUE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Dans un contexte d'amélioration de la qualité de l'environnement urbain, l'utilisation de ces produits autonettoyants et dépolluants ne peut se restreindre aux constructions neuves. Pour que des résultats

significatifs soient obtenus, il doit être appliqué aussi sur les bâtiments déjà existants.

Aux vues de la variété des supports référencés en milieu urbain, l'approche du projet PICADA s'est orientée vers une gamme complète de produits qui permet de choisir ainsi le produit le plus adapté en fonction du support, des différents moyens de mise en œuvre.

Les deux industriels présents dans le projet, Italcementi et Millennium Chemicals ont permis d'obtenir une gamme de revêtements de façade autonettoyants et dépolluants allant de l'enduit cimentaire à la peinture et d'apporter en plus le revêtement translucide, défi hautement technique. Les moyens de mise en œuvre de ces produits sont les mêmes que ceux utilisés couramment pour ces types de produits. Afin d'offrir une gamme la plus complète possible, il sera même possible de choisir la couleur de son enduit ou de sa peinture (figures 2 et 3). Du beige à l'ocre rouge, en passant par des gris, le choix s'offre au client, comme pour une peinture ou un enduit ordinaire. Les pigments colorants, inorganiques, sont choisis pour leur résistance par rapport à l'activité photocatalytique. Ainsi, si les salissures et la pollution partent, les couleurs, elles, resteront !.

■ DES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES PROBANTS

D'importants moyens ont été mis en œuvre pour conduire le programme scientifique. De nombreux protocoles et essais ont été mis en place afin de valider les propriétés d'autonettoyance et de dépollution.

La méthode pour évaluer la capacité autonettoyante des produits PICADA est en cours de certification par le CSTB. Elle consiste à contrôler le taux de décomposition photocatalytique d'une salissure organique, la rhodamine B, en mesurant l'évolution de la couleur d'un échantillon pollué exposé aux UVs pendant 30 heures. L'efficacité photocatalytique est validée par la capacité de l'échantillon à recouvrer sa couleur initiale plus ou moins rapidement. Un moyen efficace d'exprimer et comparer les niveaux d'activité obtenus est d'utiliser la vitesse de destruction, calculée entre 0 et 3 heures. Les tests ont montré que les échantillons pollués retrouvent 65 % de leur couleur initiale en moins d'un jour contre 5 % pour les échantillons ordinaires testés simultanément (figure 4).

Concernant les tests de dépollution, ils ont été réalisés à plusieurs niveaux en laboratoire : à petite échelle sur des échantillons de 78,5 cm² et à macro-échelle sur 4 m².

Ce dernier test a été réalisé dans le laboratoire de 30 m² "Indoortron" construit par le Centre commun de Recherche de la commission européenne à Ispra en Italie (figure 5).

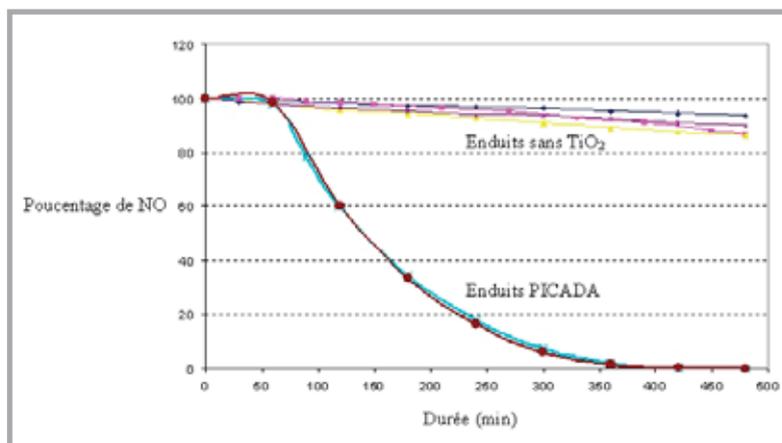


Figure 6
Evolution de la disparition du NO en fonction du temps pour les échantillons d'enduit dans la chambre Indoortron

Evolution of the disappearance of NO versus time for coating samples in the Indoortron chamber

Cette installation a permis de tester les différents produits dans des conditions d'humidité, de température et de rayonnement ultraviolet (UV) expérimentales afin de simuler un environnement réel. L'activité photocatalytique de dégradation des NO_x et COV en présence par le TiO₂ est ainsi mesurable en comparant les périodes d'éclairement et d'obscurité. Les résultats obtenus montrent que la dégradation du NO peut atteindre 80 % (figure 6) ce qui rejoint les résultats du laboratoire à petite échelle.

■ MIMO OU L'ART DE PRÉDIRE LA DÉPOLLUTION EN 3D

Afin de mieux comprendre les phénomènes de dépollution dans des situations réelles de flux dynamiques et de pouvoir prédire un abattement de pollution dans une zone traitée avec les produits PICADA, le consortium a développé un programme tridimensionnel de modélisation de flux. Ce logiciel, Mimo pour Micro-scale MOdel, est un modèle de pronostic à micro-échelle pour la simulation numérique de la dispersion d'air dans les zones construites, en particulier dans les rues canyons. Il permet d'évaluer, dans différentes configurations géométriques, dont les rues canyons, les écoulements d'air et de polluants selon différents paramètres. Il intègre aussi un module de température qui permet d'évaluer les échanges thermiques entre l'air de la rue et les bâtiments.

Une étude de nombreuses configurations de rues canyon a permis de mieux appréhender les différents paramètres ayant un impact sur les flux tels que : le rapport largeur sur hauteur de la rue, la longueur de la rue, les conditions météorologiques comme l'éclairement, la vitesse du vent et son orientation ou encore la rugosité des surfaces. Pour illustration, la figure 7 met en évidence les perturbations de flux en présence de balcons. Face à la complexité et l'importance de ces nombreux paramètres, il est apparu que l'ensemble des données obtenues par simulation sera l'outil in-

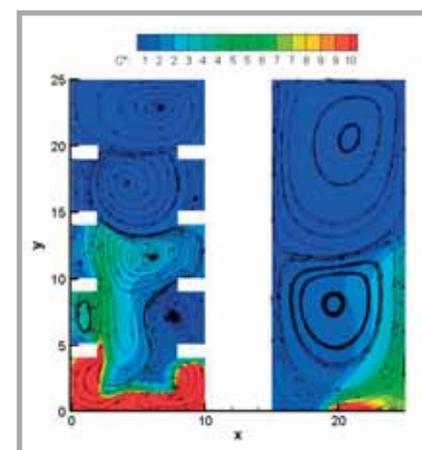


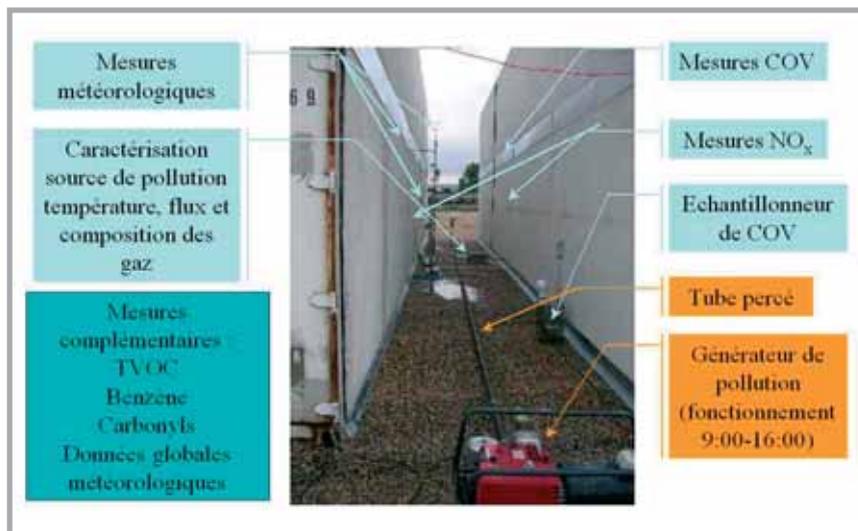
Figure 7
Concentration des flux d'air dans une rue avec et sans balcons

Concentration of air flows in a street with and without balconies

Photo 1
Les trois rues parallèles
de Guerville
*The three parallel streets
of Guerville*



Figure 8
Instrumentation
d'une rue
sur le site
de Guerville
*Instrumentation
of a street
on the Guerville
site*



dispensable à la valorisation des produits et à la mise en place de leur commercialisation.

■ LES RUES CANYON DU SITE PILOTE DE GUERVILLE

D'un point de vue scientifique, il était nécessaire de créer un site où les conditions expérimentales et les effets des produits PICADA sont contrôlés et par là même optimisés dans une situation d'exposition vraie documentée. Ainsi sont nées les rues canyon du site de Guerville (92).

Leur géométrie urbaine caractéristique, à savoir des rues plus hautes que larges, dites canyon, a permis de tenir compte du phénomène aérodynamique qu'elles impliquent, soit deux vortex, et qui influence la dépollution "réelle".

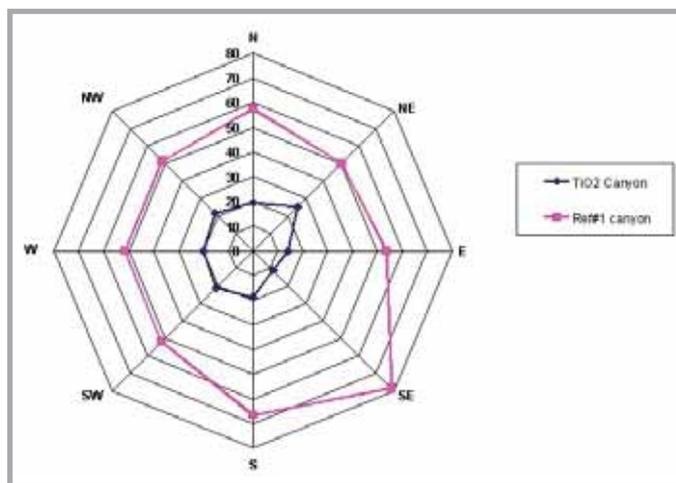
Réalisées à l'échelle 1/5^e par des rangées de containers parallèles, les trois rues sont chacune de 20 m de long par 2,5 m de large pour 5 m de haut, soit un rapport largeur sur hauteur de 0,4 (photo 1).

Les différents paramètres tels que la pollution, l'orientation, la vitesse du vent ou encore l'ensoleillement sont ainsi mesurés avec plus de précision que dans de vraies rues. Lors de l'expérimentation, la pollution est dispersée dans la rue par un tuyau percé connecté à la source d'émission de gaz (figure 8).

Les façades recouvertes d'enduits avec ou sans produit PICADA, permettent de mettre en évidence

Figure 9
Concentrations moyennes
en NO_x (ppb) selon l'orientation
du vent sur le mur de droite
pour les rues avec TiO₂
et de référence sans TiO₂
(pollution de fond en NO_x
supprimée)

*Mean NO_x concentrations (ppb)
according to the direction of the
wind on the right-hand wall for
the streets with TiO₂ and on the
reference wall without TiO₂
(background NO_x pollution
eliminated)*



| Météo | TiO ₂ | Date / Heure | Mur Gauche | | Mur Droit | |
|-------------------------|------------------|-------------------|------------|------|-----------|------|
| | | | Pilote | MIMO | Pilote | MIMO |
| U = 1,5 m/s φ = 270° | Oui | 12/07/04 13:30 | 5,5 | 4,8 | 14,6 | 13,4 |
| | Non | 21/08/04 12:30 | 45,7 | 46,2 | 50,8 | 52,1 |
| U = 1 m/s φ = 225° | Oui | 20/07/04 13:00 | 6 | 5,1 | 10,3 | 9,7 |
| | Non | 2/09/04 15:44 | 40 | 40,6 | 86,1 | 87,4 |

Tableau I

Comparaison des concentrations en NO_x (ppb) obtenues par simulation avec MIMO et lors de la campagne de mesures sur le site pilote (U : vitesse du vent, φ : orientation du vent)

Comparison of NO_x concentrations (ppb) obtained by simulation with MIMO and during the measurement campaign on the demonstration site (U : wind speed, φ : wind direction)

l'activité dépolluante des enduits PICADA dans une situation réaliste.

La comparaison des niveaux de pollution dans la rue traitée avec l'enduit cimentaire PICADA et dans celle avec le mortier sans TiO₂ montre que selon l'orientation du vent, l'abattement des concentrations en NO_x peut atteindre 80 % pour les cas favorables (figure 9).

De plus, la modélisation de ces rues par MIMO a mis en évidence une reproductibilité de ces estimations par comparaison avec les données acquises lors de la campagne de mesures (tableau I).

Les rues de Guerville ont ainsi pu confirmer la capacité dépolluante des enduits développés dans le cadre de PICADA.

CONCLUSION

Le développement de nouveaux matériaux, auto-nettoyants et dépolluants est un pas significatif pour l'amélioration de la qualité de l'air de nos villes et s'inscrit dans la politique de développement durable des villes, en attendant des agglomérations sans voitures ou avec des véhicules propres. Cette nouvelle génération de produits ouvre des perspectives significatives vers l'amélioration de la qualité de l'air et donc de la santé des habitants tout en participant à l'embellissement de nos villes.



Organigramme du projet
Project organisation chart

ABSTRACT

The PICADA project (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment)

L. Demilecamps, H. André

The aim of the European Project PICADA, (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment), is actually to develop a range of facades coatings and to evaluate large-scale effect (typically in a canyon street). The self-cleaning and depolluting abilities arise from the photocatalytic properties of titanium dioxide which can be introduced either in the building matrix or surface coatings. Such materials, when exposed to solar UV rays, will act as a catalyst for the photo-induced decomposition of organic molecules adsorbed or occluded on its surface.

Two binders were considered in the objectives of this project. These were cement-based materials and organic-based coatings.

This paper presents results obtained on the coatings formulations containing nano-particle composites of titanium dioxide.

It also describes the framework of this partnership between research centers and industrials face new demands of "civil society".

RESUMEN ESPAÑOL

El proyecto PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment)

L. Demilecamps y H. André

El objetivo del proyecto europeo PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment) consiste en el desarrollo de una gama de revestimientos de superficie fotocatalíticas y evaluar sus efectos a escala real y en particular en las calles canyon.

Las capacidades autolimpiantes y descontaminadoras se derivan de las propiedades del dióxido de titanio que se puede introducir, ya sea en la matriz, o bien en la superficie del revestimiento. Semejantes materiales, si se exponen a la radiación solar UV, desempeñan un papel de catalizador y descompo-

nen las moléculas orgánicas absorbidas o incluidas en la superficie.

Para este proyecto se han estudiado dos matrices de revestimiento : los materiales a base de cemento y los revestimientos orgánicos.

En este artículo se presenta los resultados obtenidos en los revestimientos con un aumento del contenido de nanopartículas de dióxido de titanio. También se describe el marco de esta asociación entre investigadores e industriales con el propósito de responder a las demandas de la empresa.

Recherche et innovation en génie civil

Action du ministère de l'Équipement

Ces deux dernières années ont été marquées à la fois par la continuation des actions engagées de longue date, mais dans un contexte de thématiques en évolution, et par la mise en place d'un cadre nouveau de soutien à la recherche incitative.

■ ÉVOLUTION DES THÉMATIQUES PRIORITAIRES DU RÉSEAU GÉNIE CIVIL ET URBAIN RGC&U

Les thématiques orientées vers les domaines d'application de 2003 étaient :

- ◆ les matériaux et les méthodes constructives ;
- ◆ risques liés au sol et à l'hydrologie ;
- ◆ suivi, diagnostic et entretien des constructions ;
- ◆ construction et environnement : réduction des déchets et des polluants ;
- ◆ réduction des nuisances sonores et des vibrations ;
- ◆ suivi, diagnostic et entretien des réseaux urbains ;
- ◆ conception et entretien des voiries et des aménagements urbains ;
- ◆ instrumentation et outils informatiques.

Le RGC&U, après bilan et évaluation de son action des cinq premières années, a redéfini ses principales orientations autour de trois grandes préoccupations socio-économiques :

- ◆ développement durable (environnement, économie d'énergie et de matières premières, sécurité, gestion durable du patrimoine d'ouvrage collectif) ;
- ◆ innovation et compétitivité des entreprises ;
- ◆ amélioration de la gestion des connaissances et de son partage (utilisation des nouvelles technologies de l'information).

Ces orientations se traduisent aujourd'hui en trois thématiques prioritaires, qui sont :

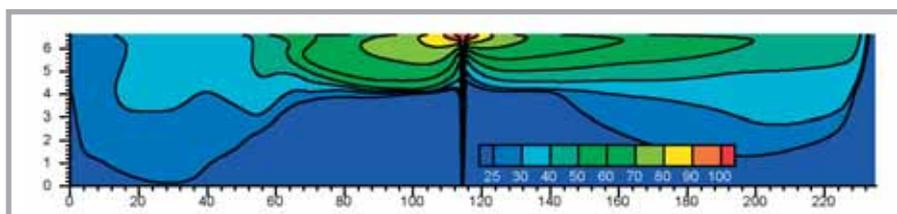
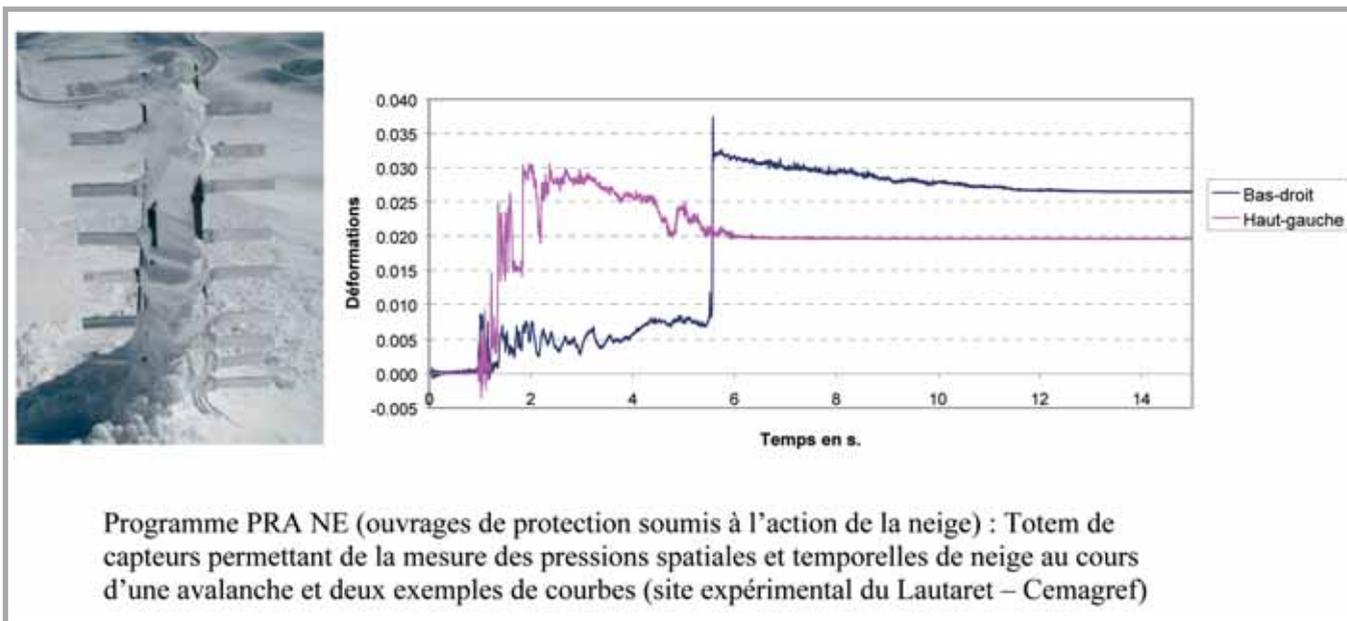
- le développement durable (I) dans ses dimensions environnementales, économiques et sociales (gérer l'espace, la ressource et le patrimoine, dans le temps ainsi que faire jaillir, transcrire et satisfaire les attentes et besoins des acteurs) ;
- la ré-ingénierie de la construction (II) (revisiter les processus de conception, de réalisation, maintenance et réhabilitation),
- les NTIC (III) insérer le génie civil et urbain dans l'économie de la connaissance).

■ ACTIONS DE CES DEUX DERNIÈRES ANNÉES

Dans la continuité, le Réseau génie civil et urbain (RGC&U) a poursuivi grâce au FRT du ministère de la Recherche le soutien de projets proposés par des associations d'acteurs de l'innovation en génie civil : laboratoires, centres de recherche, bureaux d'études, entreprises et industriels, PME... Citons par exemple :

- ◆ ADEQUA : aménagement durable d'un quartier. Elaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation d'un quartier résidentiel ;
- ◆ BMV : validation des modèles de vieillissement des ouvrages en béton armé atteints par la corrosion des aciers. Benchmark sur les poutres de La Rance ;
- ◆ DISCOBOLE : dimensionnement des structures côtières et des ouvrages de bord de mer à longue échéance. Etude de l'impact du changement climatique sur le dimensionnement des ouvrages côtiers à l'horizon 2050 ;
- ◆ EOLBUS : extensomètres à fibre optique longue base uniformément sensibles ;
- ◆ GeRicl : gestion des risques liés au changement climatique pour les infrastructures ;
- ◆ HydroDetect : système de filtration géotextile équipé d'un dispositif de détection et de localisation des dysfonctionnements hydrauliques précurseurs de ruptures contre les crues et les tempêtes ;
- ◆ MTU : étude des impacts et apports de la méthode des microtranchées urbaines mécanisées pour les riverains, les usagers et les gestionnaires de chaussées ;
- ◆ RGA : incidence des changements climatiques sur les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux - Méthodologie d'étude à différentes échelles. Des projets engagés antérieurement se sont terminés et certains d'entre eux ont donné lieu à des valorisations remarquables :
- ◆ béton d'enrobage : évaluation de la dégradation

PRANE programme (protective structures subjected to the action of snow). Sensor totem pole capable of measuring the space and time pressures of snow in the course of an avalanche, and two examples of curves (Lautaret experiment site - Cemagref)



Champ thermique calculé après 3 mn 30 s d'incendie (simulation des essais d'incendie du tunnel de Toulon) projet "Ventilation tunnels"

Thermal field calculated after 3 min. 30 s of fire (simulation of fire tests in Toulon tunnel), "Tunnel Ventilation" project



du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages ;

- ◆ PRANE : comportement mécanique d'ouvrages de protection soumis à l'action de la neige ;
- ◆ renforcement parasismique du bâti existant : élaboration d'un guide ;
- ◆ RoboA : réalisation d'un démonstrateur de plateforme volante instrumentée pour l'inspection des ouvrages d'art ;
- ◆ ventilation tunnels : optimisation de l'apport de la ventilation pour la sécurité lors d'un incendie en tunnel.

Par ailleurs rappelons que le RGC&U avait lancé des appels à proposition sur des thématiques ciblées qui lui semblaient prioritaires et pour lesquelles une impulsion particulière était nécessaire :

- ◆ appel à propositions "Technologies des infrastructures urbaines" ;
- ◆ appel à propositions "Vulnérabilité des infrastructures vis-à-vis de l'impact du changement climatique".

La moitié des projets cités ci-dessus relèvent de ces appels à proposition.

Parallèlement le RGC&U a labellisé plusieurs projets nationaux pilotés par l'IREX, au stade de l'étude de faisabilité, de l'étude de montage ou de la mise en œuvre.

Ces projets nationaux sont soutenus par le ministère de l'Équipement.

■ VALORISATION

Parmi les actions de valorisation que le ministère de l'Équipement soutient, citons la poursuite des entretiens du RGC&U, devenus le lieu de rencontre de la profession avec les chercheurs universitaires et les doctorants.

Ces entretiens sont parrainés par le ministère de la Recherche, le Réseau doctoral génie civil, et la FNTF, qui décerne des prix pour les meilleurs posters présentés par des jeunes doctorants en 2^e année de thèse.

Il convient également de rappeler le rôle important joué par les fiches IVOR (cf. article suivant).

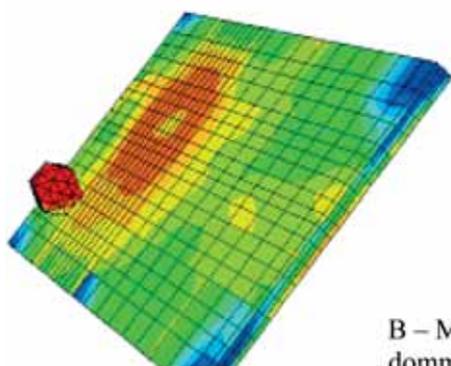
■ MISE EN PLACE D'UN NOUVEAU CADRE

Un nouveau cadre juridique et financier se met en place dans le secteur de la recherche et de l'innovation.

L'organisation budgétaire de l'État se transforme sous l'effet de la LOLF (loi organique des lois de finances), qui a conduit à la création de programmes interministériels dont l'un se consacre à la recherche dans plusieurs domaines nous concernant, dont le transport et le génie civil. Ce programme est dirigé par le directeur de la DRAST (devenue depuis peu Direction de la recherche et de l'animation scientifique et technique). Parmi ses thématiques prioritaires, ce programme a retenu le développement durable dans la construction et la ville.

Le ministère de la Recherche et son FRT viennent depuis peu d'être relayés par l'Agence nationale de la recherche (ANR), qui fonctionne par appels à projets AAP. Le RGC&U vient de lancer le sien sur deux de ses thématiques prioritaires : "risques na-

**PROGRAMME « PREVENTION DES
INSTABILITES ROCHEUSES » :
DALLES PARE-BLOCS
STRUCTURELLEMENT DISSIPANTE (PSD)**



**B – Modélisation par éléments finis des
dommages provoqués par une chute de
bloc- RNVO Grenoble**



**A- Expérimentation sur maquette
échelle 1/3 – Locie Chambéry**

*"Prevention of rock instability" programme :
Slabs structurally designed
to attenuate falling block impacts ("psd")*

*A. Experiment on model to scale 1:3 –
Locie Chambéry.*

*B. Finite-element modelling of the damage
caused by a falling block – RNVO Grenoble*

turels et comportement des ouvrages" et "conservation et évolution du patrimoine existant". Des recherches concernant le génie civil peuvent également se positionner dans des appels à projets lancés par d'autres réseaux.

Toutes informations sur cette nouvelle agence et ses programmes de recherche peuvent être consultées sur le site : www.gip-anr.fr

Signalons également la création de la plate-forme européenne de la construction ECTP, qui semble réussir à faire inscrire le secteur de la construction dans les thématiques soutenues par le prochain programme cadre de recherche européen 7^e PCRD. Une plate-forme miroir française, NTP-FR, dont le secrétariat est assuré par la MGC (mission génie civil) de la DRAST, a vu le jour conjointement avec

le soutien de la FNTP et de la FFB. Ses instances, groupe support et groupe de haut niveau, décalquées sur celles de ECTP, comprennent conformément à l'esprit des plates-formes technologiques européennes une majorité d'industriels. Elles commencent à travailler pour apporter la contribution française à la définition des grandes orientations de recherche futures. NTP-FR a comme autre ambition d'être l'instance nationale de coordination de la recherche et de l'innovation dans le secteur de la construction pris en son sens le plus large. Informations sur le site : www.ectp.org

Toute personne désireuse d'être membre de la plate-forme française peut contacter : monique.itta@equipement.gouv.fr et disposer d'un accès à la partie réservée du site.

Le label IVOR 12 ans après 32 innovations labellisées sur ouvrages de référence

Après dix ans d'existence du label IVOR, la DRAST (Direction de la recherche et de l'animation scientifique et technique) a souhaité mesurer l'intérêt des fiches et du label IVOR, d'abord auprès des "inventeurs" des 25 innovations labellisées entre 1993 et 2003, et ensuite auprès des destinataires habituels des fiches IVOR.

La première enquête (auprès des candidats labellisés) a été effectuée au moyen d'un questionnaire ciblé, au premier trimestre 2004. Vingt-deux réponses sont parvenues au secrétariat IVOR après relance des retardataires au bout de deux mois.

Les candidats ayant reçu le label IVOR sont en grande majorité satisfaits des textes des fiches IVOR (quelques remarques sur la description de l'innovation (face recto des fiches) et un souhait d'une traduction des fiches en anglais).

Les fiches IVOR sont utilisées surtout en France, pour présenter l'innovation, mais aussi pour un tiers en Europe.

connaissance, motivation pour tous, "bon point vis-à-vis des actionnaires!".

Afin d'obtenir un retour quantitativement significatif, le questionnaire de la **seconde enquête** était présenté à questions fermées (affirmations vraies/fausses) concentrées sur une page, que les destinataires pouvaient faxer par retour.

7740 questionnaires ont été envoyés fin juin 2004 avec les trois fiches IVOR 03.1 à 03.3 (système "parachute" en géosynthétique pré-tendu, Coulipac et poutre Japy).

L'exploitation des 301 réponses à l'enquête nationale fournit les résultats suivants :

- ◆ les fiches IVOR sont un outil d'information très apprécié ; certains destinataires souhaitent avoir plus d'exemplaires des fiches IVOR pour les diffuser dans leur structure ;
- ◆ les informations contenues dans les fiches sont suffisantes, compte tenu de la possibilité de consulter les dossiers techniques de validation au secrétariat du comité ;
- ◆ parmi les fiches déjà reçues par les destinataires avant l'enquête, la fiche qui a suscité le plus d'intérêt est la 00.3 :

- le **remblai léger Plastbloc®** a été labellisé en septembre 2000. Ce dossier avait été présenté en septembre 1999 au comité IVOR, mais celui-ci avait demandé un complément d'instruction.

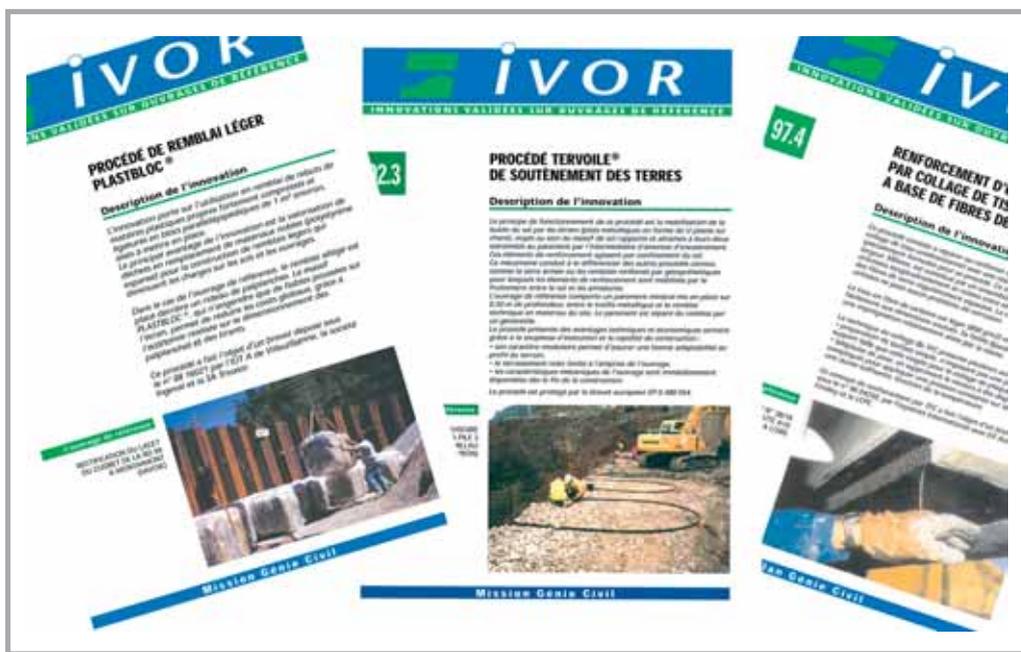
Cette innovation est couverte par un brevet (IUT A de Villeurbanne, société Ingéval, société Trivalor). Elle porte sur l'utilisation de déchets de matières plastiques propres compressés en blocs pour constituer des remblais légers. Placé derrière un rideau de palplanches comme dans le cas de l'ouvrage de référence, le remblai en Plastbloc® diminue les efforts de poussée sur ce rideau.

L'ouvrage de référence est un élargissement en remblai du Lacet du Cudret sur la RD 99 à Montaimont (Savoie),

Puis, par intérêt décroissant, la fiche 97.4 : **Réparation d'ouvrage d'art par collage de tissu à base de fibres de carbone – TFC**, mise en œuvre sur le franchissement de l'autoroute A10 par la RD 142 entre Allainville et Allaines (Eure-et-Loir).

Et la fiche 02.3 : **Procédé Tervoile®**, dont le principe de fonctionnement est la mobilisation de la butée du sol par les étriers, utilisé pour construire le mur de soutènement provisoire de la plate-forme de la pile P3 du viaduc de l'autoroute A75 à Millau (Aveyron),

- ensuite dans une moindre mesure la fiche 95.3 :



La moitié des répondants joignent la fiche aux courriers et/ou l'utilisent pour présenter leur société en France (presque un quart l'utilisent pour présenter leur société en Europe)... ou comme support d'exposé ou de cours.

Une société ayant obtenu un label IVOR en 1999 considère que c'est une fiche technique de qualité, très appréciée en Europe. Elle demande la possibilité de label IVOR sur une nouvelle technique qui va être mise en œuvre en Angleterre.

En ce qui concerne l'apport du label IVOR, les termes de "crédibilité" et de "reconnaissance" (technique, du produit, du savoir-faire ou du système) reviennent le plus souvent.

La moitié des répondants apprécie l'apport de la fiche IVOR en terme de management à l'intérieur de leur société : encouragement, validation, re-

IVOR (Innovations validées depuis 1993

utilisation du clouage pour réaliser un mur de soutènement sur l'autoroute A12,

- et la fiche 00.2 : L'AUTORIPAGE® qui a permis de déplacer un ouvrage d'art complet de 5 600 t depuis son aire de fabrication à côté des voies à franchir jusqu'à son emplacement définitif sous les voies ferrées Paris/Clermont-Ferrand à Boismorand (Loiret).

◆ Parmi les fiches envoyées avec l'enquête, celle qui a suscité nettement plus d'intérêt est la 03.2 (Coulipac).

◆ Près d'un tiers des destinataires qui ont répondu à l'enquête, découvre les fiches IVOR avec cet envoi.

◆ La labellisation par un comité d'experts donne confiance :

- le label peut constituer une référence intéressante pour les entreprises (78 %) ;

- il est considéré avec attention et confiance par les maîtres d'ouvrage (81 %).

◆ Sur les 301 réponses, 29 destinataires des fiches ont inclus une innovation IVOR dans un chantier. En particulier 14 collectivités ont déjà utilisé des labels IVOR. Il s'agit essentiellement du label 99.1 :

- le **procédé de construction EPI/PB** de mur de soutènement de déchetterie par éléments préfabriqués et clavetage bénéficie d'atouts économiques, notamment une durée réduite d'intervention sur site, un transport et une manutention facilités, et permet d'obtenir des parements de qualité.

L'innovation de M. Dutel consiste à supprimer la traditionnelle semelle du mur en L et à assurer l'équilibre du mur en reliant entre eux les différents éléments de base d'une déchetterie : dallage bas, garde-roues et voiles perpendiculaires se sollicitent les uns les autres.

L'ouvrage de référence est la déchetterie de Bressuire (Deux-Sèvres), réalisée par l'entreprise Préfa. Bressuirais avec les conseils techniques de ABAC (Activités Béton Armé Constructions) et de Coulais Consultant pour le compte du Syndicat du Val de Loire.

Et un label (le Coulipac, label 03.2) va être utilisé prochainement sur des branchements d'assainissement.

Huit entreprises ont utilisé un label IVOR, en particulier le label 01.1 :

- la **couverture pare-pierres à forte capacité de dissipation énergétique** a été construite par Campenon Bernard sur la RN212, dans les gorges de l'Arly, au lieu-dit Les Essariaux (Savoie).

La structure mise au point par Tonello Ingénieurs



Conseils présente deux caractéristiques innovantes :

- la contribution (par plastification des aciers passifs) de la dalle de couverture à la dissipation de l'énergie des blocs ;

- l'utilisation d'appareils d'appui métalliques fusibles, disposés tous les 3 m ; leur rôle est d'écrêter les efforts atteignant les fondations pendant les chutes de très gros blocs sur la dalle de couverture, ce qui est essentiel puisque ces parties ne peuvent pas être réparées ; ils limitent également les efforts dans la dalle, en autorisant, à l'ELU, des déplacements supplémentaires.

Une société d'autoroute a déjà utilisé un des labels IVOR dans un chantier : L'AUTORIPAGE® "mais sans savoir qu'il s'agissait d'une innovation labellisée IVOR".

Un grand bureau d'études a essayé le label 99.2 : **l'amélioration du drainage par application de la chasse automatique aux drains siphons.**

L'ouvrage de référence est le drainage profond gravitaire par drains siphons régulés par chasses automatiques, construit à Oingt (Rhône) pour stabiliser un glissement de terrain sous la RD 96, le département du Rhône étant maître d'ouvrage.

IVOR
INNOVATIONS VALIDÉES SUR OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

04.1

CONTRÔLE CONTINU PAR SATELLITES D'UN ENROCHEMENT PORTUAIRE

Description de l'innovation

Le guidage instrumental par GPS est en œuvre sur les pelles hydrauliques côtières à positionner en temps réel, l'outil de la machine dans un repère géographique et à comparer à tout moment, la position réelle de l'outil avec la position de consigne correspondant à la cote de la couche à mettre à l'endroit ou se trouve la machine, provenant des fichiers de la CAO.

L'utilisation d'un tel système permet un contrôle en continu par le "tailleur" de la qualité de son travail, qui peut être atteint ainsi non seulement aux profils contractuels, mais aussi en continu sur toute la surface. Ce travail extrêmement précis (précision atteinte à ± 4 cm) est réalisé effectivement sans aucun jaugeur, sans aucune référence matérielle liée à la station de base GPS, installée à demeure pour toute la durée du chantier.

La machine est d'abord localisée en X, Y, Z et en angle de direction grâce à un récepteur GPS muni de 2 antennes. La direction du bras est ainsi déterminée. Les différentes articulations du bras sont également équipées de capteurs, de rotation ou de déplacement, permettant de connaître à tout moment la cinématique et de calculer les coordonnées X, Y, Z de la dent pendule du point point de l'outil localisé sur l'interface.

Ce procédé et dispositif de détermination instantanée d'orientation, à base de capteurs de positionnement par satellites a fait l'objet d'un brevet publié sous le n° 00 01 183 par Thales navigation.

L'ouvrage de référence

DIQUE DE PORT 2000 LE HAVER (DEPARTEMENT DE LA MAYENNE)



Mission Génie Civil

IVOR
INNOVATIONS VALIDÉES SUR OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

04.2

PONT MÉTALLIQUE MODULABLE MULTI-POUTRES UNIBRIDGE®

Description de l'innovation

Les poutres latérales sont constituées de caissons autoportants, assemblés par un double axe en partie basse et un simple appui en tête. Cette disposition originale permet d'éviter tout soudage (et les travaux de peinture consécutifs) sur chantier. Elle permet également de donner une contre-fliche à l'ouvrage en adaptant la cale trapézoïdale de contact en partie haute.

En phase prévision de grutage ou de lancement, les poutres sont faiblement positionnées en tête par des Dign Dividag, démontées après pose sur appuis. La forme en caisson évite le déversement des poutres au montage.

Ces dispositions permettent de gruter les poutres une par une et donc de limiter la puissance des engins de levage nécessaires.

Chaque caisson (fermé et étanche) comporte sur ses flancs des platines sur lesquelles sont boulonnées soit des pièces de pont reliant les poutres, soit des cornues pour brasseurs. Ce système a fait l'objet d'un brevet déposé sous le n° 03 09 522 par la SCI de Brevets MATIERE.

L'ouvrage de référence

FRANCHISEMENT DE LA VALLÉE PAR LA RD 46 A MONTEBONNEN (SÈVE)



Mission Génie Civil

IVOR
INNOVATIONS VALIDÉES SUR OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

04.3

CAGE D'ARMATURE COFFRANTES 3DR STRUCTURAL FORMWORK®

Description de l'innovation

Le produit 3DR structural Formwork® est constitué d'un outil coffrant solide des armatures. Il est préfabriqué en usine à la demande, ce qui garantit son adaptabilité aux conditions du chantier.

Les nappes de treillis de la cage d'armature sont disposées de chaque côté du voile à réaliser et reliées par des crochets en acier treillis autour des aciers HA principaux et disposés dans des plans sécants (structure 3D) : le treillage ainsi réalisé assure un ferraillage optimal indépendant de la qualité des soudures.

Le peau rigide filtrante a pour fonction principale la réduction de la pression hydrostatique de coulage. Elle comporte des câbles en plastique pour garantir l'empilage minimal réglementaire des aciers HA.

Les peaux filtrantes sont réalisées en métal galvanisé pour les ouvrages courants en atmosphère sèche, ou en composite s'il existe un risque particulier de corrosion.

Les cages 3 DR sont livrées en panneaux de hauteur d'étage dont la mise en œuvre ne nécessite pas d'engin de levage.

Le parc filtrant a fait l'objet d'un brevet publié sous le n° 2.841.920 par Cofihorm.

L'ouvrage de référence

HALL D'EXPOSITION MERCEDES PUTEAUX (HAUTE-NORMANDIE)



Mission Génie Civil

IVOR
INNOVATIONS VALIDÉES SUR OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

04.4

PROCÉDÉ SILTEX®-RESOPACK® POUR L'ENFOUSSEMENT DES CABLES HTA

Description de l'innovation

Le SILTEX® est constitué d'une matrice fibreuse saturée de sable fin de quartz entourée d'un géotextile tissé polypropylène qui lui sert d'emboîtement. Cette bande préfabriquée, de 37 cm de large et 15 mm d'épaisseur, est ensuite mise en œuvre directement sur chantier, autour du réseau de câbles à protéger par la machine RESOPACK® équipée d'un "système". Le cadencé de production est de l'ordre de 1500 à 2000 mètres.

Les opérations d'enfouissement sont ensuite réalisées au moyen d'un atelier traditionnel (tranchée ou pelle mécanique) en récupérant les terres extraites pour le remblaiement de la tranchée.

Le système est couvert par les brevets n° 2832818 pour SILTEX® (Laffaille/Puig - 1993) et n° 0124501 pour RESOPACK® (Laffaille/Puig/Mézarotte).

L'ouvrage de référence

RESEAU HTA 20 KV SOUTERRAIN ALIMENTANT LA STATION DE SAUZE CEPIUS (BARCELONNETTE SAUVE-DE-HAUTE-PROVENCE)



Mission Génie Civil

◆ 17 % des réponses (essentiellement 17 collectivités, 11 entreprises, 6 offices et 5 DDE) avouent n'avoir pas compris ce qu'est le label IVOR.

◆ Quelques commentaires complémentaires viennent conforter la politique mise en place pour la diffusion des labels : les fiches sont téléchargeables sur le site du ministère (en page Recherche et Innovation www.equipement.gouv.fr/recherche).

" Bref, si les fiches n'existaient pas, il faudrait les inventer ! " écrit un destinataire.

■ LE COMITÉ IVOR

Créé en 1994 par les ministres chargés de l'Équipement et de la Recherche, le comité IVOR (ou comité des ouvrages de référence) est maintenant présidé par Jean-Pierre Giblin, président de la 3^e section du Conseil général des Ponts et Chaussées. Il est composé de dix personnalités de compétence et d'impartialité reconnues et se réunit au moins deux fois par an pour décider des labellisations. La Mission Génie Civil de la DRAST assure le secrétariat du comité.

Le comité IVOR a pour objet de faciliter la validation des innovations techniques mises en œuvre avec succès dans des ouvrages de référence, et d'en encourager la diffusion. A cette fin, il attribue son label aux innovations jugées intéressantes sur la base d'une expertise réalisée majoritairement par le réseau scientifique et technique du ministère de l'Équipement. Tous les types d'innovations (matériaux, procédé, méthode de calcul,...) intéressant le génie civil sont concernés par cette labellisation.

A l'appui de ces labels, les fiches IVOR, qui contiennent les éléments techniques de validation des in-

▶ La simple technique des drains siphons permet de rabattre la nappe à 10 m de profondeur environ, sans pompage. Lorsque le débit est faible, le fonctionnement des drains siphons est amélioré en utilisant le procédé de chasse automatique mis au point par M. Gress : stockage de l'eau dans un réservoir, puis vidange rapide déclenchée automatiquement par la mise en pression d'une bulle d'air. Les avantages principaux du procédé sont : rusticité (pas de pièce mécanique), coûts d'investissement et d'entretien faibles.

Mais " cela n'a pas marché parce qu'on n'a pas trouvé d'eau à drainer, mais ce n'est pas la faute de la 99.2, qui peut dans certains cas particuliers apporter un plus".

novations, sont publiées par la DRAST et diffusées à 8 000 exemplaires aux acteurs du génie civil (maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre publics et privés, architectes, entreprises, bureaux d'études, industries).

Une appréciation sur l'innovation et un dossier technique de validation sont associés au label et constituent le dossier de référence, mis à disposition des maîtres d'ouvrage publics ou privés.

■ LES SEPT DERNIERS LABELS IVOR

Attribués en 2003

◆ **Le système "Parachute" en géosynthétique prétendu** : une protection contre les effondrements localisés de cavités.

L'ouvrage de référence est le renforcement du raccordement de la RD 923 au giratoire de l'Europe à Segré (Maine-et-Loire), construit par la société Husker et l'entreprise Juge pour le Conseil général du Maine-et-Loire.

◆ **Le Coulipac** : un coulis auto-compactant et réexcavable pour remblayage de tranchée.

L'ouvrage de référence est la rue du Faubourg Saint-Antoine, dans le XII^e arrondissement de Paris. Une tranchée a été ouverte, puis remblayée, dans cette rue par la société Suburbaine pour la pose d'une conduite GdF. Le maître d'ouvrage est la Mairie de Paris, direction de la voirie et des déplacements.

◆ **La poutre Jappy à section triangulaire en bois massif**.

Cette panne de couverture a été mise en œuvre dans un bâtiment de la Communauté de communes du Monpaziérois (Dordogne) par la SARL Chansard.

Attribués en 2004

◆ **Le contrôle continu par satellites d'un enrochement portuaire**.

L'ouvrage de référence est la digue de Port 2000 au Havre (Seine-Maritime), construite par GTM Terrassement avec les récepteurs GPS de Thalès-Navigation pour le Port Autonome du Havre.

◆ **Le pont métallique multi-poutres modulable Matière Unibridge®**.

L'ouvrage de référence est le franchissement de la Varèze par la RD46 à Monsteroux (Isère), construit par la société Matière pour le Conseil général de l'Isère.

◆ **Le procédé 3DR Structural Formworks® : cage d'armatures coffrantes**.

L'ouvrage de référence est le cône d'exposition Mercedes à Rueil-Malmaison (Hauts-de-Seine), construit par l'entreprise Sicra pour Daimler Chrysler France.

◆ **Le procédé Siltex® - Resopack®**.

L'ouvrage de référence est le raccordement entre

Barcelonnette et Enchastrayes (Alpes-de-Haute-Provence) en réseau HTA souterrain. Ce chantier EdF, de 6,4 km, illustre le cas type d'utilisation du procédé Siltex® - Resopack® en zone montagneuse par la société Mecaroute.

■ L'INSTRUCTION DES CANDIDATURES

Elles sont le plus souvent déposées à l'initiative de l'inventeur du procédé, ou du maître d'œuvre. Cependant, une candidature a été présentée en 2003 par le Conseil général du Maine-et-Loire, maître d'ouvrage, qui avait demandé à l'inventeur de se renseigner sur le label IVOR.

Le secrétaire du comité reçoit les candidatures à n'importe quel stade de réalisation de l'ouvrage contenant l'innovation :

◆ si les travaux n'ont pas encore commencé (mais il faut que le maître d'ouvrage soit connu), l'expert nommé par le secrétaire peut intervenir, le cas échéant, dans l'instrumentation à mettre en place. Ceci lui permet de cerner encore plus complètement les paramètres liés à l'innovation ;

◆ si les travaux sont en cours, les contrôles ou des mesures complémentaires sont encore possibles, mais souvent plus difficiles à obtenir ;

◆ après la réception des travaux, l'expert utilise les documents disponibles et demande au candidat les informations nécessaires à son expertise. Mais le dossier de candidature et le rapport de validation ne sont présentés au comité IVOR qu'après réalisation complète et mise en service de l'ouvrage de référence.

Toutes les candidatures n'aboutissent pas automatiquement à un label. Il arrive en effet que le comité refuse de délivrer son label ou reporte sa décision à une réunion ultérieure en demandant un complément d'instruction.

■ LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU LABEL IVOR

Le comité IVOR étudie aujourd'hui la possibilité pour les candidats de présenter comme ouvrage de référence une réalisation dans un autre pays européen...

Toutes les informations utiles pourront être recueillies auprès de :

> **Hervé Thuillier**

Comité IVOR

Tél : +33 (0) 1 40 81 29 47

Tour Pascal B 92055 - La Defense Cedex 04

Herve.Thuillier@equipement.gouv.fr

LE LABEL IVOR

Le label IVOR constitue une référence pour les rapports entre inventeurs et maîtres d'ouvrage, en France mais aussi à l'exportation. En effet, grâce au dossier technique de validation et à l'appréciation du comité sur l'innovation, qui accompagne le label, l'utilisateur futur dispose d'éléments de jugement indépendants du concepteur de l'ouvrage et de l'inventeur de l'innovation.

Le label IVOR est ainsi un outil d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage, en leur donnant des informations utiles à l'exercice de leur responsabilité quant à l'acceptation d'une innovation dans un ouvrage à construire.

innovation

Palmarès des 15^{es} prix de l'Innovation L'innovation dans les Travaux publics

Les 15^{es} prix de l'Innovation du Syndicat des entrepreneurs des Travaux publics de France

Le Syndicat des entrepreneurs de Travaux publics a remis le vendredi 27 mai 2005, ses quinze prix de l'Innovation. Ce prix est remis tous les deux ans depuis 1982. Au cours des 14 premières compétitions les jurys successifs ont examiné 240 dossiers, soit 18 en moyenne par concours, avec un maximum de 33 dossiers en 1987, et primé 47 dossiers, présentés par 149 lauréats.

Tous les produits et procédés primés, ou presque, ont connu de bons développements, en France, et souvent à l'étranger.

Ils sont ainsi répartis dans les spécialités de la profession :

- ◆ Routes : 13
- ◆ Fondations : 7
- ◆ Travaux souterrains : 3
- ◆ Ouvrages d'art : 9
- ◆ Canalisations : 2
- ◆ Terrassements : 4
- ◆ Travaux maritimes : 3
- ◆ Electricité : 1
- ◆ Divers : 5
- ◆ Total : 47

Cette édition met en relief quatre caractéristiques, applicables de façon générale à l'innovation dans les Travaux publics :

◆ **la diversité des entreprises et des innovations primées** : de la création d'un nouveau produit (1^{er} prix pour le pont industriel et évolutif Unibridge) à l'amélioration d'un process existant (mention spéciale au "Gravillonneur"), de la multinationale à la TPME de sept salariés ;

◆ **l'amélioration des conditions de travail** qui est au centre de trois des innovations primées : automatiser le geste de l'ouvrier, réduire la température des enrobés bitumineux ;

◆ **la préoccupation environnementale** : diminution de la consommation de matériaux, réduction de la consommation d'énergie et réduction des gaz à effet de serre ;

◆ **la réduction des coûts et des délais, les gains de productivité** que l'on retrouve aussi bien dans le pont Unibridge que dans le procédé T.Pile ou le Gravillonneur sur fourche.

■ LES LAURÉATS 2005

1^{er} Prix : Pont industriel et évolutif Unibridge

Promoteurs de l'innovation

– **L'entreprise** : l'entreprise **Matière** est basée à Arpajon-sur-Cère. Elle est spécialisée dans les canalisations et les ouvrages d'art préfabriqués,

avec pour principaux marchés les ouvrages d'art en béton pour autoroutes et les ouvrages d'art métalliques.

Son chiffre d'affaires est de 35 millions d'euros pour 250 salariés.

– **Les hommes** : Philippe Matière, directeur général de l'entreprise ; Claude Valdenaire, ingénieur en chef des ouvrages métalliques, Serge Lestrade, chargé d'affaires.

Partenaires de l'innovation

Bureau d'études Jean Muller International avec Jean-Marc Tanis, son directeur et Frédéric Manuel, ingénieur.

Objet de la réalisation primée

La réalisation d'un pont préfabriqué à montage très rapide pour répondre à des situations d'urgence (telles les catastrophes naturelles) ou à des besoins locaux dans des conditions de prix et de délais adaptées aux moyens et aux besoins des collectivités concernées.

1^{er} Prix : Pont industriel et évolutif Unibridge. Au second plan, de gauche à droite : Jean-Marc Tanis, Christophe Lesniak, Jean Berthier. Au premier plan, de gauche à droite : Frédéric Manuel, Serge Lestrade, Philippe Matière, Patrick Bernasconi, Claude Valdenaire



Les caractéristiques de l'innovation

Le pont Matière type Unibridge est un concept innovant de pont métallique, industriel et évolutif, à montage très rapide.

Ce sont des ponts multipoutres métalliques destinés à la réalisation d'ouvrages définitifs ou provisoires.

Leurs tabliers peuvent être métalliques, en béton armé préfabriqué ou coulé en place, ou en bois. Ils peuvent porter une voie unique ou une double voie de circulation.

Leurs culées peuvent être, selon les circonstances dictées par l'urgence :

- ◆ soit composées de blocs béton armé préfabriqués liaisonnés entre eux ;
- ◆ soit réalisées à l'aide de gabions, soit en ancrant les culées sur des palplanches préalablement fichées ;
- ◆ soit coulées en place.

Les poutres sont constituées de caissons de longueur unitaire de 11,60 m, qui s'assemblent au moyen d'un double axe métallique en partie basse et d'un simple appui en partie haute.

Chaque caisson unitaire comporte sur chacun de ses flancs cinq platines sur lesquelles sont boulonnées :

- ◆ soit des pièces de pont de liaison entre poutres d'un côté ;
- ◆ soit des consoles pour trottoirs et les éléments de garde-corps ou rambardes de l'autre côté.

Les caissons, livrés en containers de 40 pieds avec leurs pièces de pont et leurs garde-corps éventuels, sont raboutés en poutres sur plateforme.

Chaque poutre ainsi reconstituée, peut être posée indépendamment sur les appuis, puis liaisonnée aux poutres par boulonnage des pièces de pont sur les platines latérales. Dans le cas d'un tablier métallique, deux poutres permettent de constituer un pont à une voie, "N" poutres permettent de constituer un ouvrage à "N-1" voies. La pose peut se faire par grutage ou par lançage.

Dans ce cas l'ouvrage, muni d'un avant-bec et de contrepoids est lancé soit poutre par poutre, soit intégralement.

Si le tablier est métallique, la circulation routière peut se faire directement sur chaque poutre, revêtue en usine d'un revêtement strié antidérapant. L'espace entre poutres est constitué soit d'un caillebotis métallique (ouvrage provisoire), soit en tôle striée. Dans ce cas, il est possible de recouvrir la totalité du tablier métallique d'un revêtement routier (tracouche ou enrobé).

Il est innovant par sa conception base de caissons élémentaires de 11,60 m de long, transportables en containers, emboîtables par grutage ou manutention au sol. L'utilisation des caissons réduit le nombre d'éléments susceptibles de se



Pont Unibridge : vue des détails d'assemblage



Pose des dalles préfabriquées

perdre, de se tordre ou de ne plus pouvoir se désaccoupler (ovalisation des bagues, déformation des axes, etc.).

Il est innovant par sa facilité de reconstruction sur place, à partir des caissons élémentaires. Celle-ci s'opère grâce à l'emboîtement des axes inférieurs et à la mise en compression de cales de réglages de contre-flèche en partie supérieure par barres Dywidag ou Macalloy.

Il est innovant par sa modularité longitudinale ou transversale :

- ◆ longitudinale avec des portées par travée allant jusqu'à 46 m (4 x 11,60 m) ;
- ◆ transversale avec la possibilité de faire varier la largeur du tablier.

Dans ce cas on pourra utiliser :

- soit la juxtaposition de plusieurs poutres si le tablier est métallique,
- soit un tablier en béton armé préfabriqué.

Il est innovant par sa facilité et sa rapidité de montage :

- ◆ par grutage ;

◆ par lançage, (à propos du lançage, il est important de noter que celui-ci peut se réaliser éventuellement poutre par poutre, compte tenu du caractère non déversant d'une poutre caisson).

Il est innovant par son nombre restreint de composants (22 accessoires, se transportant en containers maritimes, par poutre élémentaire seulement) et par sa simplicité de conditionnement en cas de chantier à l'international.

Il est innovant par son caractère évolutif, car il peut devenir un vrai pont définitif, grâce à la mise en place d'un tablier béton coulé en place,

Il est innovant par le fait que l'assemblage des poutres caissons en partie basse autorise un pré-cintrement provisoire dans l'attente de la prise du béton coulé en place du tablier (ou des joints de clavage des dalles préfabriquées du tablier) au moyen de boîtes à sable en tête de poutres caissons. Ces boîtes à sable sont vidées pour mise en compression du tablier.

► *En quoi le système Unibridge est-il différent de ses concurrents ?*

Par sa conception utilisant des poutres métalliques situées sous la voie circulée, l'Unibridge n'est pas limité en gabarit transversal. S'il est installé dans une courbe prononcée, des camions en hauteur peuvent prendre des virages serrés à son entrée et à sa sortie.

Le nombre de composants de l'ouvrage est infiniment plus restreint que celui d'un pont Bailey ou Mabey Johnson équivalent (22 accessoires par caisson élémentaire seulement).

Après avoir soudé des connecteurs sur la face supérieure des caissons métalliques, on peut mettre en œuvre un tablier béton coulé en place, ou préfabriqué. L'ouvrage devient, si le client le souhaite un ouvrage définitif.

Sa conception basse de caissons élémentaires, son nombre restreint de composants, la facilité de reconstruction sur place, sa rapidité de montage, sa modularité enfin son caractère évolutif, pont provisoire ou définitif font du pont Unibridge un système particulièrement unique et innovant.

Il en résulte un colisage optimisé, un nombre de pièces à coliser, décoliser ou recoliser très inférieur, et par ce fait une simplicité accrue et un gain de temps de montage.

Enfn, le risque de vandalisme sur les composants élémentaires des ouvrages est considérablement réduit (vols fréquents de boulonnerie, axes et petits profilés sur les ponts de type "membres latérales").

Sa modularité transversale permet à l'Unibridge d'accroître sa largeur circulaire utile au cours de la vie de l'ouvrage, ce qui est impossible avec un ouvrage à membrure latérale.

Un pont Unibridge peut devenir un vrai pont définitif par adjonction d'un tablier béton armé coulé en place.

Le nombre réduit des composants de l'Unibridge rend sa maintenance plus aisée et beaucoup moins coûteuse que pour un pont à membrures latérales.

Il est, de plus, plus facile de repeindre un caisson qu'une infinité de composants profilés.

Leur industrialisation peut être délocalisée grâce à l'utilisation de bancs d'assemblage de caissons. Dans ce cas, comme dans le cas du conduit Matière, les industriels intéressés par la fabrication des Unibridge pour leur pays travailleront sous licence Matière.

Par opposition aux ponts de type "tablier monobloc" ou "Monodeck" ou "V.M.D.", le poids du tablier est décomposé et aucune pièce hors gabarit routier ou maritime n'est à transporter. Le poids raisonnable des poutres et de leurs accessoires permet donc l'utilisation de moyens de manutention de capacité limitée.

La conception articulée des ponts Matière type



Unibridge permet de transformer ces ouvrages isostatiques en ouvrages hyperstatiques (S'appuyant sur des piles intermédiaires) par l'ajout d'axes en tête de caisson en sus des axes inférieurs.

> **Contact :**
Philippe Matière : +33 (0) 4 71 46 50 00

2^e Prix : Procédé T.Pile (forage de pieu)

Promoteurs de l'innovation

– **L'entreprise :** **Solétanche Bachy Pieux** est la filiale spécialisée dans les fondations profondes de type pieux du groupe Solétanche Bachy, entreprise générale de travaux et technologies du sol, ayant un chiffre d'affaires supérieur à 700 millions d'euros, et employant 4 000 collaborateurs permanents, de plus de 60 nationalités.

– **Les hommes :** André Frossard, directeur adjoint de Solétanche Bachy Pieux, Lewis Stansfield, consultant auprès de Bachy Soletanche Ltd.

Partenaires de l'innovation

Le Laboratoire central des Ponts et Chaussées avec Michel Bustamante.

Objet de la réalisation primée

Un procédé technique de forage qui amplifie la capacité portante des fondations profondes.

Les caractéristiques de l'innovation

Ce procédé (T.Pile) permet de réaliser des pieux ayant une portance de 30 à 50 % supérieure à celle d'un pieu d'un même diamètre ce qui, à portance égale, permet de réduire de 20 à 40 % la

2^e Prix : Procédé T.Pile. Au deuxième plan, de gauche à droite : Christophe Lesniak, Jean Berthier. Au premier plan, de gauche à droite : Michel Bustamante, Michel Glandy, Lewis Stansfield, Patrick Bernasconi

Procédé T.Pile





3^e Prix partagé : Enrobés tièdes à l'Aspha-Min. Au deuxième plan, de gauche à droite : Christophe Lesniak, Jean-Pierre Marchand. Au premier plan, de gauche à droite : Samir Soliman, Philippe Martinet, Jean Berthier, Patrick Bernasconi, Luc-Amaury George

responsable matériel d'agence pour l'entreprise Jean Lefèbvre Grands Travaux.

Partenaires de l'innovation

Cofiroute avec son chargé de mission au sein du département gestion du patrimoine, Luc-Amaury George.

Objet de la réalisation primée

Une technique d'enrobage bitumineux à basse température par adjonction d'un additif qui maintient la maniabilité.

Les caractéristiques de l'innovation

Le principe de l'enrobage tiède à l'Aspha-Min permet de diminuer de 30° C la température nécessaire pour la fabrication du béton bitumineux, ce qui a comme conséquence de réduire la consommation d'énergie et les nuisances associées aux émissions de fumées et de poussières, ainsi que les gaz à effets de serre.

Les tests et réalisations

Une douzaine de chantiers d'enrobés tièdes ont été menés avec succès en Allemagne, aux Etats-Unis et en France.

> **Contact :**

Jean-Pierre Marchand : +33 (0) 1 47 16 38 00



Application de l'enrobé tiède à l'Aspha-Min

consommation de béton et le volume de déblais à évacuer. Outre la réduction du temps d'exécution d'environ 20 %, ce procédé permet de contrôler la réalisation du pieu et de vérifier en temps réel ses performances.

Les tests et réalisations

Douze projets ont été réalisés en Europe, avec un total de plus de 30000 m de pieux.

> **Contact :**

Serge Borel : +33 (0) 1 47 76 55 94

3^e Prix partagé : Enrobés tièdes à l'Aspha-Min

Promoteurs de l'innovation

– **L'entreprise** : la société **Eurovia** est la filiale du groupe VINCI spécialisée dans les travaux routiers. Elle emploie 35 000 salariés, son chiffre d'affaires est de 5,3 milliards d'euros ; 42 % de son activité concerne les routes et autoroutes.

– **Les hommes** : Jean-Pierre Marchand, directeur technique d'Eurovia ; Samir Soliman, responsable de la cellule innovation et Philippe Martinet, res-

COMPOSITION DU JURY

Prix de l'Innovation 2005

Président :

Jean Berthier : Président de la Commission Génie civil du CNISF, ancien directeur des Routes

Membres :

• **Jacques Allemand** : Secrétaire du bureau du Syndicat de France

• **Rémi Pochat** : Directeur scientifique du LCPC

• **François Buyle-Bodin** : Chef de la Mission génie civil de la DRAST

• **Alain Pecker** : Président de l'AFTES

• **Jean-Pierre Ollivier** : Président de l'AUGC

• **Philippe Ramondenc** : Responsable des ouvrages d'art à la SNCF

• **Paul Scherrer** : Directeur technique du Port Autonome du Havre

• **Christian Bernardini** : Délégué général, Irex

3^e Prix partagé : Enrobés à basse énergie (EBE)

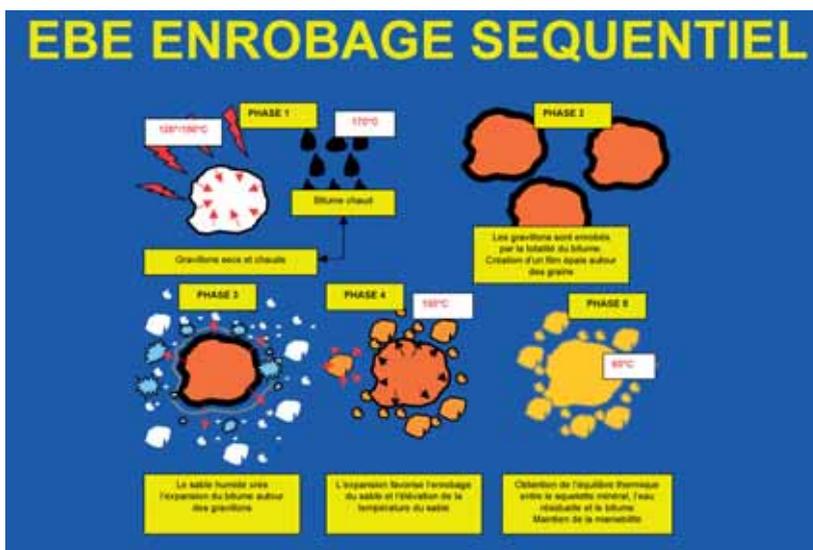
Promoteurs de l'innovation

– **L'entreprise** : la société de services **Fairco**, basée à Nozay (91), est spécialisée dans le domaine routier. Elle emploie sept personnes pour un chiffre d'affaires de 1,26 million d'euros. Elle travaille principalement avec 15 sociétés routières, par le biais de conventions. Elle dispose d'une cellule permanente consacrée à l'innovation pour laquelle elle consacre 100 000 euros par an (soit 7 % de son chiffre d'affaires).

– **Les hommes** : Alain Romier, P.-D.G. de Fairco, Maurice Audéon, Jacques David et Yves Martineau, consultants auprès de Fairco.



3^e Prix partagé : Enrobés à basse énergie (EBE). Au deuxième plan, de gauche à droite : Christophe Lesniak, Jean Berthier, Jacques David. Au premier plan, de gauche à droite : Yves Martineau, Patrick Bernasconi, Maurice Audéon, Alain Romier



Principe de l'enrobage à basse énergie

Mention spéciale : le gravillonneur sur fourche

Promoteurs de l'innovation

– **L'entreprise** : la société **Cortambert TP** est basée à Macon. Elle est spécialisée dans les travaux aux particuliers (notamment la démolition et le recyclage). Elle emploie 35 personnes pour un chiffre d'affaires de 3 millions d'euros. 80 % de ses marchés sont privés ce qui nécessite d'être continuellement innovant.

– **Les hommes** : Alain Cortambert, P.-D.G. de Cortambert TP et Thierry Cortambert, directeur de l'entreprise.

Objet de la réalisation primée

Le gravillonneur est un dispositif d'épandage par gravité de matériaux pulvérulent et gravillonneux.

Objet de la réalisation primée

Une technique d'enrobage bitumineux à basse température par chauffage séparé des composants et sans mise en jeu de la chaleur latente d'évaporation de l'eau.

Les caractéristiques de l'innovation

Le principe de l'enrobage à basse énergie permet une fabrication et une mise en œuvre à une température inférieure à 100 °C. Les objectifs de ce procédé sont d'économiser l'apport d'énergie complémentaire nécessaire à l'enrobage et parallèlement de réduire l'émission de gaz (notamment à effets de serre).

Les tests et réalisations

Un test a été réalisé en novembre 2003. Trois chantiers ont été réalisés et quatre sont en cours.

> Contact :

Alain Romier : 0 820 300 070

Mention spéciale : Le gravillonneur sur fourche. Au deuxième plan : Jean Berthier. Au premier plan, de gauche à droite : Thierry Cortambert, Christophe Lesniak, Patrick Bernasconi, Alain Cortambert



Les caractéristiques de l'innovation

Ce système, positionné sur le kit fourche d'une mini-chargeuse, remplace le "coup de pelle" particulier donné par les ouvriers lors de la mise en place d'un revêtement. Les gravillons sont, de la même façon, répartis uniformément sur le sol.

Les tests et réalisations

Le gravillonneur est utilisé régulièrement sur de nombreux chantiers et fait l'unanimité. Il permet par exemple de traiter actuellement plus de 800 m² par jour, soit un gain de productivité de 40 %.

> Contact :

Alain Cortambert : +33 (0) 3 85 20 98 20



Le gravillonneur sur fourche

L'innovation dans les Travaux publics

La cérémonie de remise des prix de l'Innovation du Syndicat des Entrepreneurs de Travaux publics de France, le 27 mai 2005, a été précédée d'une table ronde présidée par Jean-Pierre Lamoure, président de Solétanche Bachy, président de la Commission Technique et Innovation de la FNTF, animée par Bertrand Fabre du *Moniteur*, et qui a réuni :

- ◆ Philippe Bisch : président de la commission Innovation de Syntec-Ingénierie ;
- ◆ Vincent Melacca : direction technique marketing de la SMA BTP ;
- ◆ Philippe Gresset : président de l'USIRF ;
- ◆ Thierry Louis : adjoint au directeur des Routes. Ministère de l'Équipement ;
- ◆ Jean-Marie Beauthier : président de JMB Méthodes ;
- ◆ Bruno Dupety : président de Freyssinet ;
- ◆ Bernard Theret : président d'ETPO ;
- ◆ François Perdrizet : directeur de la Recherche et de l'Animation scientifique et Technique au ministère de l'Équipement.

Intervention conclusive par Christophe Lesniak, adjoint au directeur des technologies industrielles à la direction de la Recherche de la Commission européenne.

Les interventions ont mis en valeur les objectifs et illustré les actions de la FNTF dans le domaine de l'innovation.

■ LES OBJECTIFS DE LA FNTF

Être présent sur le terrain européen

Le Programme cadre de recherche et développement (PCRD) est destiné à rehausser la capacité d'innovation des pays membres de l'Union européenne, par le développement de la recherche à partir de structures existantes. Ce programme cadre met en place des outils qui permettent de faire des propositions de participation aux programmes de recherche.

Le lancement du 7^e PCRD, d'une durée élargie à six ans (1^{er} janvier 2007 – 31 décembre 2013), et son contenu, sont soumis à la codécision du Parlement européen et du Conseil. La Commission européenne a proposé pour ce 7^e PCRD, un budget de 72,7 milliards d'euros, avec un objectif de doublement annuel de financement par rapport au 6^e PCRD, ce dont se réjouit la FNTF.

La préparation du PCRD se fait notamment en s'appuyant sur des plates-formes technologiques thématiques qui rassemblent entreprises, organismes de recherche, institutions financières et autorités publiques en vue de définir un calendrier commun de recherche. La FNTF se félicite de la place accordée à ces plates-formes, et notamment à celle de la construction. Le programme-cadre devra spécifiquement contribuer à la mise en œuvre de ce calendrier commun de recherche, au titre du programme "Coopération". Les coopérations transnationales se développent dans neuf thèmes dont cinq pour lesquels des projets BTP peuvent être présentés :

- ◆ technologies de l'information et de la communication (12,67 milliards d'euros envisagés) ;
- ◆ énergie (2,95 milliards d'euros) ;
- ◆ nano-sciences, nano-technologies, matériaux et nouvelles technologies de production (4,865 milliards d'euros) ;
- ◆ environnement (changements climatiques inclus : 2,552 milliards d'euros) ;
- ◆ transports (aéronautique comprise : 5,981 milliards d'euros).

La plate-forme technologique européenne "Construction" étant expressément citée dans les trois derniers.

La FNTF contribue activement à l'animation de la plate-forme "Construction" française, en liaison avec la plate-forme européenne et avec la FIEC notamment. Elle espère que ses propositions de thématiques de recherche seront retenues.

Ainsi mobilisée en amont, elle entend faire prévaloir la dimension hautement technologique du secteur, tout au long du processus d'adoption du 7^e PCRD qui devrait aboutir en juin 2006.

* * *

Dans sa conclusion à la table ronde, Christophe Lesniak a rappelé le déroulement des opérations de préparation du 7^e programme-cadre de recherche développement européen et notamment la création d'une plate-forme technologique entièrement dédiée à la construction (bâtiment et travaux publics). Ainsi la profession participera directement à la définition des thèmes de recherche des six prochaines années. Il a également annoncé que, dans la continuité de cette action, la commission a décidé de proposer au

► Parlement européen de lancer un appel d'offres spécifique à la construction, ce qui représente un progrès considérable par rapport au programme cadre précédent.

Encourager les réseaux d'innovation

L'objectif aujourd'hui est d'améliorer le dialogue entre entrepreneurs et chercheurs afin d'offrir plus de souplesse dans l'utilisation des compétences. Cette démarche requiert la création de partenariats (formation, transfert de technologie, recherche coopérative) et de groupes de projet pour des missions très précises. La profession relève en effet depuis quelques années la nécessité d'organiser de réelles passerelles entre entreprises et enseignants-chercheurs. A cet égard, le Pôle Génie Civil Ouest créé en octobre 2003 est un exemple.

Avec la présence d'établissements de formation divers (bacs professionnels, IUT, IUP, universités, écoles d'ingénieurs), d'établissements publics de recherche (CSTB, LCPC), une composante de recherche académique forte (GeM, CERMA), la métropole Nantes - Saint-Nazaire est la deuxième région française en matière de potentiel de formation et de recherche en génie civil après la région parisienne.

La prise de conscience de cette spécificité a conduit des représentants des différentes catégories d'acteurs concernés par le génie civil à engager une démarche d'association avec l'objectif de valoriser cette richesse scientifique et technique auprès de la profession et de faire apparaître le Pôle Génie Civil Ouest comme l'un des pôles nationaux dans le domaine.

Le pôle a concouru à l'appel du gouvernement pour les pôles de compétitivité, à dominante technologique, tout comme celui de Marne-la-Vallée sur la thématique "Ville et mobilité durable".

Le Pôle Génie Civil Ouest a pour objectif principal de soutenir l'innovation technologique. Une fois que seront établies les passerelles entre professionnels et enseignants-chercheurs, il sera possible de développer l'innovation technologique dans la profession, y compris les PME-PMI sous des formes très diverses : contrats de recherche, contrats CIFRE, journées technologiques, service SVP...

En animant des groupes de travail, le Pôle Génie Civil Ouest est un creuset de réflexion et d'actions sur les grandes préoccupations de ceux qui construisent ou maintiennent dans les meilleures conditions ouvrages d'arts, routes et bâtiments. Les membres du Pôle ont mis en place quatre groupes de travail, ouverts aux professionnels du Génie Civil Ouest :

- ◆ un groupe Bâtiment, animé par un maître d'œuvre ;

- ◆ un groupe Génie civil, animé par un entrepreneur ;

- ◆ un groupe Terrassement - Voirie - Routes, animé par un maître d'ouvrage ;

- ◆ un groupe VRD Canalisations, animé par un entrepreneur.

La présentation du Pôle Génie civil Ouest a été faite par Bernard Théret.

Favoriser la mise en œuvre de l'innovation dans le domaine routier

Ainsi que l'a exposé Philippe Gresset, les entreprises routières parce qu'elles disposent pour la plupart de leurs propres laboratoires, ont en permanence des idées de nouveaux produits ou de procédés. Elles ont toutefois davantage de difficultés à expérimenter leurs découvertes, à les classer afin de n'en retenir que les meilleures et de les commercialiser. Elles ont besoin pour cela de références d'application et il leur faut :

- ◆ pouvoir expérimenter leurs innovations sur des chantiers grandeur nature ;

- ◆ que ces chantiers soient suivis (contrôles) et fassent l'objet d'observations validées (certificats) ;

- ◆ que le mode de passation de ces marchés "d'innovation" soit conforme à la réglementation (code des marchés publics).

En résumé, les entreprises souhaitent bénéficier d'une procédure simple permettant de tester leurs innovations sur chantiers, dans un contexte réglementaire sécurisé.

Dans ce cadre, l'USIRF et la FNTF se sont rapprochées de la direction des Routes afin de définir les modalités pratiques de passation des marchés permettant, dans le respect du code des marchés publics, de répondre aux souhaits de ses adhérents. La méthodologie suivante a été envisagée mais n'a pas encore fait l'objet d'une validation de la part de l'administration :

- ◆ une structure informelle direction des Routes/Profession routière définit des axes de recherches innovants ;

- ◆ un groupe de travail met au point un dossier de consultation type permettant aux maîtres d'ouvrage d'inclure une expérimentation de processus innovant dans la réalisation d'une route.

La profession attend aujourd'hui la validation de cette méthodologie qui serait à même de faire tester les innovations avec plus de facilité.

■ LES ACTIONS DE LA FNTF

Les entreprises françaises et européennes de travaux publics exportent très bien leur savoir-faire et nombre d'entre elles figurent en tête du classement mondial (les deux premières entreprises

de construction dans le monde sont françaises). Un positionnement qu'elles ont acquis et qu'elles conserveront grâce à leur capacité à innover. Répondre à un appel d'offres international nécessite d'être compétitif à la fois sur les prix et sur le plus technologique qui permettra des gains de productivité.

La FNTF agit en faveur de l'innovation aussi bien financièrement que qualitativement :

- ◆ par le financement direct de projets de recherche, via notamment l'IREX ;

- ◆ par l'organisation de concours et la mise en place de labels ;

- ◆ par la mise en place d'outils d'aide à la coopération ;

- ◆ par la participation active de certains de ses acteurs dans le choix des thèmes à retenir pour la plate-forme de la construction, dans le cadre du 7^e PCRD.

Le financement direct de projets de recherche

La profession finance des projets de recherche à la demande des entreprises sous le contrôle de la Commission Technique et Innovation. L'objectif est d'entreprendre des recherches qui intéressent les entreprises en général et de défendre leurs intérêts. Certains projets sont réalisés en collaboration avec d'autres organismes (maîtres d'ouvrage, fournisseurs, laboratoires...) dans le cadre des projets nationaux, généralement gérés par l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil).

L'IREX

Créée à l'initiative de la FNTF et des ministères de l'Équipement et de la Recherche, cette association loi 1901 a pour but de rassembler les acteurs (entrepreneurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, fournisseurs, laboratoires, centres universitaires...) intéressés par un thème de recherche appliquée aux travaux publics. Chaque projet est monté et géré par l'IREX avec des fonds provenant des cotisations et apports en nature de ses membres et d'une participation des ministères de l'Équipement et de la Recherche de l'ordre de 20 % du montant total après avis du comité d'orientation du RGC&U.

Le réseau génie civil et urbain (RGC&U)

Le Réseau génie civil et urbain est un réseau de recherches et d'innovations technologiques. Ce type d'actions de soutien à l'innovation a pour but de favoriser le couplage entre la recherche publique et les entreprises. Les réseaux rassemblent des professionnels, des industriels et

des équipes de recherche publique autour de projets de recherche dans des domaines technologiques bien identifiés jugés prioritaires par le gouvernement. Le RGC&U est consacré à la conception, à l'exécution, à l'entretien et à la gestion des constructions et infrastructures. Il s'intéresse aussi aux technologies nécessaires à l'aménagement et à la gestion de la ville. Il associe les ministères chargés de la Recherche et de l'Équipement. Au cours des entretiens annuels organisés par le RGC&U, la FNTF récompense les thésards pour leurs travaux sur un thème donné.

Le prix de l'Innovation

Ces prix ont été créés en 1982. Renouvelés tous les deux ans, ils sont dotés de 30 000 euros de prix et récompensent les auteurs d'une invention originale susceptible de contribuer à l'amélioration des performances et de la productivité dans le domaine des Travaux publics.

Le prix "Chercheurs"

Créé en 2001, par la Fédération, ce concours, doté de 15 000 euros de prix, récompense un ou plusieurs chercheurs pour les résultats d'une recherche directement applicable aux travaux publics et susceptible de contribuer à l'amélioration des performances et de la productivité dans le domaine des travaux publics. L'objet de la recherche peut être relatif à la conception des ouvrages ou aux procédés d'exécution.

Les outils d'aide à la coopération

La FNTF souhaite développer un service interactif d'assistance aux entreprises (le service SVP), un système d'aiguillage géré par la Fédération et permettant aux entrepreneurs de trouver les compétences dont ils ont besoin pour développer une innovation.

Dans le même ordre d'idée, la FNTF souhaite créer, en partenariat avec l'Association universitaire de génie civil, un annuaire des compétences, base de données à disposition des entrepreneurs sur laquelle figureront les coordonnées et le domaine de compétence des enseignants-chercheurs.

* * *

Dans son intervention François Perdrizet a notamment rappelé le rôle de la DRAST, devenue la Direction de la recherche et l'animation scientifique et technique, et a rappelé les principales orientations du RGC&U autour de trois grandes préoccupations socio-économiques :

◆ développement durable (environnement, éco-

INTERVENTION DE JEAN-MARIE BEAUTHIER

Entré dans l'entreprise Drouard Frères en 1964, nous avons mis au point un système de ripage de pont, en 1965, appelé "Système Drouard" avec lequel nous avons ripé une centaine de tabliers de pont, passages souterrains ou ponts ; nous avons également participé à la mise au point des systèmes de ripage sur coussin d'air.

La portée commerciale de ces méthodes n'a jamais dépassé le cadre de la région parisienne et de sa périphérie. De plus, les limites techniques de ces deux systèmes ont rapidement été atteintes : le glissement sur longrine apporte une pression au sol importante ne permettant pas de riper sur n'importe quel type de terrain d'où l'idée du glissement des ouvrages à même le sol et la recherche de l'autonomie des points d'ancrage.

De plus, ces systèmes ne permettaient pas le ripage de très gros ouvrages. Nous avons donc cherché un système plus innovant permettant de s'affranchir des inconvénients précités. L'occasion nous en a été donnée lors d'un appel d'offres lancé par la SNCF Paris Est à Champigny où nous avons créé la méthode de L'AUTOFONCAGE®, méthode qui nous a valu d'être, en 1984, l'un des lauréats du prix de l'Innovation. Cet encouragement à la création donne au lauréat une réelle simulation et l'envie de découvrir d'autres procédés innovants. C'est ainsi que L'AUTORIPAGE® est la suite logique de L'AUTOFONCAGE®. Nous avons de même, rapidement créé la société JMB Méthodes, grâce à ce prix dont l'impact commercial a été très important en donnant une grande crédibilité à nos procédés. Nous avons été encouragés et soutenus par la SNCF puis par la RATP et très vite, grâce également à des articles dans la revue *Travaux* (1), la notoriété de nos procédés a franchi les frontières.

A ce jour nous avons ripé 101 ponts d'un poids de 400 t à plus de 8000 t dans le monde entier, Argentine, Israël, Pologne, Angleterre, Belgique, Espagne, France, Hollande, Irlande, Luxembourg, Portugal. Nous avons dix ponts en construction à ce jour.

L'innovation est indispensable et la remise en question doit être permanente, Elle apporte du travail aux bureaux d'études, elle facilite le travail des hommes sur les chantiers, c'est un gage de sécurité, elle permet d'aller de plus en plus vite dans la réalisation des ouvrages et, en l'occurrence, diminue les perturbations des trafics ferroviaires et routiers ce qui représente des économies très importantes sur les pertes d'exploitation. Ce prix a pu être également l'occasion d'une collaboration fructueuse entre le monde de l'entreprise et celui des écoles d'ingénieurs qui souvent nous sollicitent.

Enfin, ce prix n'est sans doute pas étranger au fait que nous fassions, depuis janvier 2005, partie du groupe Freyssinet.

(1) N.D.L.R. : cf. par exemple n° 814 de décembre 2004, pages 6 à 9.

nomie d'énergie et de matières premières, sécurité, gestion durable du patrimoine d'ouvrages collectifs) ;

- ◆ innovation et compétitivité des entreprises ;
- ◆ amélioration de la gestion des connaissances et de son partage (utilisation des nouvelles technologies de l'information).

Ces orientations se traduisent en trois thématiques prioritaires, qui sont :

- (I) le développement durable dans ses dimensions environnementales, économiques et sociales (gérer l'espace, la ressource et le patrimoine, dans le temps ainsi que faire jaillir, transcrire et satisfaire les attentes et besoins des acteurs),

- (II) la ré-ingénierie de la construction (revisiter les processus de conception, de réalisation, maintenance et réhabilitation),
- (III) les NTIC (insérer le génie civil et urbain dans l'économie de la connaissance),



INTERVENTION DE BRUNO DUPETY

Freyssinet a obtenu le prix de l'Innovation FNTP 2003 pour un système tendu à hautes performances avec câbles composites en fibres de carbone (1). En clair, il s'est agi de réaliser des haubans en fibres de carbone sur une passerelle piétons à Laroin au-dessus du gage de Pau. L'ouvrage d'une portée de 100 m comporte 16 haubans constitués de 16 à 21 joncs de 6 mm de diamètre, et répartis en deux nappes ancrées sur deux pylônes. A ce jour, cette opération est un succès technique et le comportement du système est très sain.

Pour autant les applications qui ont suivi sont peu nombreuses. Il existe un facteur 8 entre le coût des solutions composites et des solutions acier, alors qu'à l'inverse le facteur poids entre les deux n'est que de 6. Pour que le carbone soit économique, il faut donc des ouvrages pour lesquels le poids du tablier soit plus faible que celui des câbles qui le supportent. C'est le cas de Messine, avec un poids pour les câbles porteurs de 167 000 t pour un tablier qui pèse 66 500 t. Le poids équivalent de carbone pour porter la structure est de 12 000 t ! Soit un rapport de réduction de 15 ! Il va de soi que le recul nécessaire par rapport aux expériences actuelles, les essais accomplis, sont très loin d'être suffisants pour imaginer aujourd'hui faire Messine avec des câbles porteurs en fibre de carbone. Dans ce cas, sa pertinence est toute théorique. A titre indicatif, le poids du tablier de Millau est de l'ordre de 40 000 t, le poids des haubans de 1 500 t, la solution composite était donc totalement inadaptée. Quelles sont donc les domaines où le carbone peut se placer ?

Comme il avait été envisagé avant le lancement de l'essai de Laroin, l'idée est de proposer d'utiliser des câbles en fibre de carbone pour l'ancrage des plates-formes offshore, situé en grandes profondeurs, au-dessus de 1 500 m. Le carbone est en effet deux fois plus résistant à la fatigue que l'acier, et à ces profondeurs le poids de l'acier, il s'agit

de tubes métalliques soudés, est tel qu'il faut augmenter les tonnages pour porter son propre poids. Le milieu pétrolier est très conservateur et la barrière à l'entrée très importante. Nous avons fait un dossier de qualification intégrant tous les paramètres depuis la conception, fabrication, installation, mais aussi surveillance, maintenance, afin de promouvoir cette nouvelle technologie et trouver une première application en mer. Finalement, les suites les plus prometteuses de Laroin sont celles qui ont trait à l'utilisation des joncs de fibre de carbone pour renforcer des structures tubulaires en acier (pylônes, charpentes...).

L'innovation est au cœur de la stratégie de Freyssinet, parce que :

- les trois sociétés qui constituent le groupe Freyssinet, Terre Armée, Ménard sont nées d'inventions qui ont, en leur temps, créé des ruptures technologiques dans le génie civil, l'innovation donc est fortement ancrée dans la culture de ces trois entités ;
- l'innovation est le processus qui rend possible ce qui ne l'était pas auparavant ;
- c'est aussi le processus vital pour s'adapter aux changements permanents de notre environnement ;
- l'enjeu est la survie, la prospérité et le développement de l'entreprise.

La fibre de carbone est utilisée dans l'aéronautique, ainsi un Airbus A 380 contient 30 t de carbone, versus 6 t dans les autres. Grâce à une bonne combinaison d'une technologie venant d'une autre industrie, avec le génie civil, nous sommes capables d'étendre nos activités, produits et services en leur donnant de la valeur ajoutée, et cela pour le plus grand bénéfice de nos clients.

(1) Titre du 1^{er} Prix 2003 "Système tendu avec câbles à hautes performances" (cf. *Travaux* n° 800 de septembre 2003, page 66).