

La revue technique des entreprises de Travaux Publics

# Travaux

n°843  
Juillet/Août 2007



 **RECHERCHE ET INNOVATION**

- **Projet Orthoplus**
- **Protection au feu des câbles extradossés et des haubans**
- **Mobydic**
- **TIMBY**
- **Étude de la fabrication de blocs de béton sodé**
- **Geomix**  
Les chantiers pilotes du Havre et de Miami
- **La pince Accropode®**
- **Ostrea®, le marquage qui vient de la mer**
- **Ouvrages en béton : apports de l'expérimentation et de la modélisation numérique**
- **Construction virtuelle**

**Recherche  
et innovation**



# À propos de la Recherche : pour un langage de vérité !



Yves Malier  
Académie des Technologies

**A**près un quart de siècle de participation ou de présidence des différents jurys de la FNTP, je veux témoigner de la qualité du dialogue que j'ai toujours eu avec les quatre présidents : Jean-Louis Giral, Philippe Levaux, Daniel Tardy et Patrick Bernasconi. Cette qualité est pour moi la meilleure preuve de l'attachement que notre profession devrait porter, dans l'avenir, à la recherche, à l'innovation et aux rôles stratégiques de leurs applications dans nos métiers.

Dans ce contexte, félicitons Daniel Tardy d'avoir, en 1999, créé le prix du chercheur de la FNTP, prix destiné à récompenser un chercheur français de notoriété internationale et dont les travaux scientifiques présentent une véritable applicabilité pour le secteur des travaux publics. On doit aussi féliciter Patrick Bernasconi d'avoir poursuivi dans la même voie, installant ainsi définitivement dans notre secteur économique des pratiques usuelles en électronique, chimie, informatique, aéronautique, biotechnologie, métrologie, etc., pratiques permettant à un jury à multi-compétences d'exprimer avec solennité ce qu'un secteur économique attend d'un chercheur confirmé de son champ.

C'est l'occasion aussi de rappeler ce que trop de professionnels ignorent. La communauté des chercheurs de notre secteur compte plus de mille docteurs dont une très grande part travaille dans les laboratoires d'écoles et d'universités, en général bien équipés et performants. Dans de nombreux cas, ces chercheurs – le plus souvent ingénieurs – ont une excellente reconnaissance de la communauté scientifique internationale... Dans le même temps, nos entreprises, à quelques heureuses exceptions près, les sollicitent très peu. En conséquence, nombre d'entre eux ont pris l'habitude, en l'absence de cet aiguillon, d'auto-orienter leurs travaux et/ou de les « caler » prioritairement voire exclusivement sur la réponse aux appels d'offres européens ou internationaux.

Dans le même temps où l'on se réjouit de l'excellence de cette image internationale, on s'interroge sur les conséquences nationales de cette singularité très française.

Aller plus loin dans la réflexion pose de nombreuses questions. Citons-en, quelques-unes.

- Comment créer et faciliter le dialogue entre ingénieurs et chercheurs (souvent issus des mêmes écoles) quand, dans notre secteur, moins de 1 % des ingénieurs embauchés par les entreprises depuis 10 ans a reçu une formation par la recherche ?
- Comment changer le discours de trop de nos DRH qui, en visite dans nos écoles, ne cessent de clamer, auprès des meilleurs diplômés, l'inutilité de toute formation par la recherche ? Dans la plu-

part des pays comparables au nôtre, leurs collègues profitent des périodes de fort développement, pour investir sur le long terme et embaucher de très brillants jeunes ingénieurs docteurs qui, après avoir été immergés une décennie en production dans l'entreprise, seront ses experts techniques de demain, experts que nous ne renouvelons plus guère en France depuis 15 ans.

- Comment faire, à l'échelle de chaque région, pour qu'il n'y ait pas qu'une minorité d'entreprises qui, avec une compréhensible discrétion, sache utiliser à son bénéfice le potentiel de recherche qui existe localement ?
- Quand il s'agit de parler de recherche, alors que nos professions ont un passé si brillant en termes d'innovations et un potentiel d'avenir si porteur en termes de marchés, comment se satisfaire de l'action isolée de comités « Théodule », certes tous plein de sincérité mais comptant bien peu d'ingénieurs en activité et encore moins de patrons de nos équipes de recherche ?
- Constatant la difficulté qu'ont les ingénieurs français à se libérer pour siéger dans les commissions internationales, comment expliquer qu'ils ne délèguent jamais aux chercheurs les plus appliqués ces fonctions plutôt que de laisser la chaise française vide ? Tous nos voisins européens, nord-américains ou asiatiques le font très intelligemment et utilisent cette fonction pour obliger le chercheur à mieux connaître les besoins et les contraintes de la profession.
- Avec raison, beaucoup d'ingénieurs reconnaissent aux Projets Nationaux (PN) et à l'excellent IREX, sorte de « start-up » de la FNTP, le grand mérite d'avoir conduit à des avancées déterminantes. Parfois, certains regrettent, toujours avec raison, que ces avancées, bloquées par la nécessité de recherches plus fondamentales, n'aient pas pu aller plus loin... ou aient été poursuivies avec bonheur dans d'autres pays. Depuis 1983, date de lancement du premier PN, il en a existé plus de trente. Ils ont donc été « managés » par plus de 60 personnalités (un président + un directeur par PN). Sur ces 60, j'ai eu l'étrange privilège d'être le seul universitaire appelé à l'une et à l'autre de ces deux fonctions. Pourquoi un tel déséquilibre quand on vise à la connaissance réciproque des ingénieurs et des chercheurs... et quand on veut faire des sauts technologiques nécessitant parfois de vaincre, en amont, des verrous scientifiques forts ?

Je laisserais si je poursuivais ! Ma conclusion est pour dire, sans langue de bois, que, s'agissant de la recherche et de l'innovation, la FNTP a mille fois raison de poursuivre ses efforts sans fléchir. Je veux dire aussi que ces efforts, remarquablement ou partiellement prolongés au sein d'entreprises pour moi exemplaires, doivent être compris et repris par l'ensemble des professions de la construction. Une prise de conscience générale quant au positionnement de la recherche est nécessaire.

Sauf à risquer un retard sur nos concurrents, retard qui pourrait être dramatique pour certains en cas de crise même partielle, il est temps de suivre l'exemple que certaines entreprises, grandes ou petites, nous montrent en ayant, à l'égard de la recherche, une stratégie ambitieuse, réaliste. Il est temps aussi d'adapter bien des comportements à cette stratégie.

## Projet Orthoplus : ingénierie et de leur revêtement

**Le projet Orthoplus fait partie des cinq projets retenus en novembre 2006 par l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre de l'appel à propositions du RGC&U (Réseau génie civil et urbain). Prévu pour une période de trois ans (2007-2010), ce projet réunit sept partenaires publics et privés avec pour but de développer des outils théoriques et méthodologiques permettant un calcul réaliste de la durée de vie d'une dalle orthotrope en prenant en compte la participation du revêtement, et conduisant si possible à des solutions innovantes optimisées.**

### ■ Les dalles orthotropes

Une dalle orthotrope présente par définition une anisotropie orthogonale, c'est-à-dire des rigidités de flexion différentes dans le sens longitudinal et dans le sens transversal. Comme en construction navale, les dalles orthotropes sont constituées, dans le domaine des ponts, d'éléments de charpente d'abord en bois puis aujourd'hui généralement en acier, utilisés comme tabliers. Pour les structures en acier, on renforce la tôle métallique de platelage en soudant en sa sous-face des raidisseurs de forme trapézoïdale en U souvent appelés augets. Cette forme assure à ces raidisseurs une grande rigidité de torsion uniforme. Ces raidisseurs sont habituellement disposés dans le sens longitudinal. L'ensemble platelage + augets repose sur les poutres principales et sur les pièces de pont qui assurent un raidissage transversal. L'expérience a montré qu'une dalle orthotrope robuste comporte des augets continus et des pièces de pont découpées pour leur passage (figures 1 et photo 1).

Actuellement, le réseau routier et autoroutier national compte une vingtaine de grands ponts à dalles orthotropes, soumis pour la plupart à de forts trafics, à laquelle viennent s'ajouter une vingtaine de gros ponts dans les zones portuaires et de nombreux ponts de petite portée. Le grand intérêt des dalles orthotropes réside dans leur faible poids. Elles sont ainsi choisies préférentiellement pour les ponts mobiles (ponts dans les ports, pont Gustave Flaubert à Rouen, viaduc de Millau...) et quand la facilité et la rapidité de mise en place sont des critères importants (photo 2).

### ■ Problématique de fatigue

Les dalles orthotropes sont des structures sensibles en fatigue. Sous l'effet des variations de contraintes dues au passage des véhicules lourds sur l'ouvrage, des fissures de fatigue sont susceptibles de se développer en plusieurs endroits critiques : à la soudure entre platelage et auget en partie courante et au droit des pièces de pont (figures 2 et 3).

### ■ Influence du revêtement

Or, il est connu depuis de nombreuses années que le revêtement joue un rôle déterminant dans ces phénomènes de fatigue. En effet, le revêtement participe mécaniquement à la flexion locale (sa raideur s'ajoutant à celle du platelage) et il joue également un rôle de diffusion des charges concentrées supportées par l'ouvrage (roues de camion). À ce titre, des réparations ont récemment été conduites avec adjonction d'un

Figure 1

Description d'une dalle orthotrope  
Description of an orthotropic slab

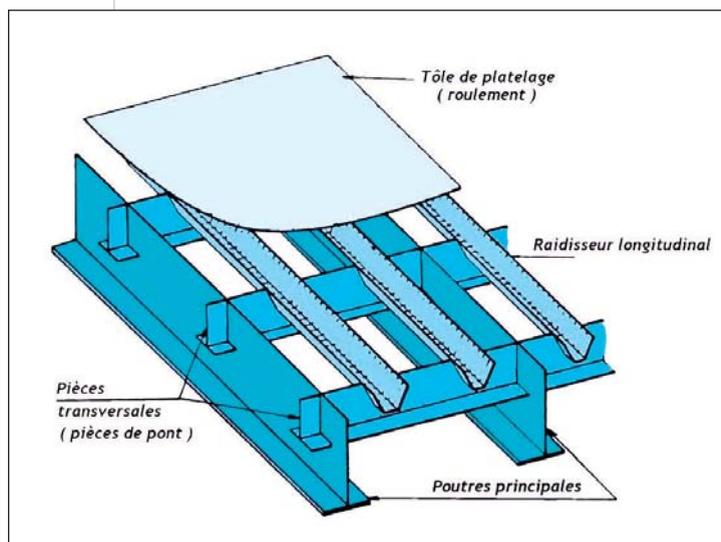


Photo 1

Augets de la dalle orthotrope du viaduc de Millau (2004)

Troughs on the orthotropic slab of Millau viaduct (2004)



# avancée des dalles orthotropes



**Claude Le Quéré**  
Responsable d'études  
Division des grands  
ouvrages  
Sétra

revêtement rigide (dalle BHP armée) pour un pont néerlandais à dalle orthotrope présentant des dégradations importantes dues à la fatigue.

Toutefois, cette participation du revêtement n'est pas bien quantifiée du fait de la complexité du comportement de la structure. Des dispositions constructives ont été adoptées qui tiennent compte partiellement et forfaitairement de la participation du revêtement. Dans le cas d'un revêtement classique, les règlements actuels sont pessimistes puisqu'ils sous-estiment la participation du revêtement. En revanche, lorsque l'on souhaite s'écarter des dispositions constructives classiques, ces règlements présentent des lacunes.

Dans le cas d'ouvrages d'art où l'optimisation du poids propre est primordiale (ponts mobiles, grandes et très grandes portées), le recours à des revêtements de chaussées ultra-minces (d'une épaisseur de quelques millimètres) constitue un choix naturel, mais soulève des problèmes de durabilité. En effet, le rôle mécanique de ces revêtements est quasiment négligeable, ce qui conduit à une réduction très significative des durées de vie calculées pour les ouvrages à dalle orthotrope munis de revêtements ultra-minces.

Une solution doit toutefois être trouvée pour remédier à la réduction conséquente de la durée de vie de la dalle orthotrope, et il est nécessaire, pour sa mise au point, de pouvoir quantifier précisément le comportement mécanique et l'apport en termes de durée de vie d'un revêtement de nature et épaisseur quelconques. Une telle approche est aujourd'hui rendue possible par les progrès significatifs des moyens numériques mis à la disposition de l'expérimentateur d'une part, et du concepteur d'autre part.



Photo 2

Tablier du pont de Cheviré (1990)

Deck of Cheviré bridge (1990)

## ■ Objectifs du projet Orthoplus

L'objectif principal du projet Orthoplus est de mettre au point les outils théoriques et méthodologiques de prise en compte de l'épaisseur et de la nature du revêtement dans le calcul en fatigue d'une dalle orthotrope. Ces outils seront utilisés dans un second temps pour optimiser les revêtements bitumineux épais existants et pour développer une solution innovante de revêtement mince en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP).

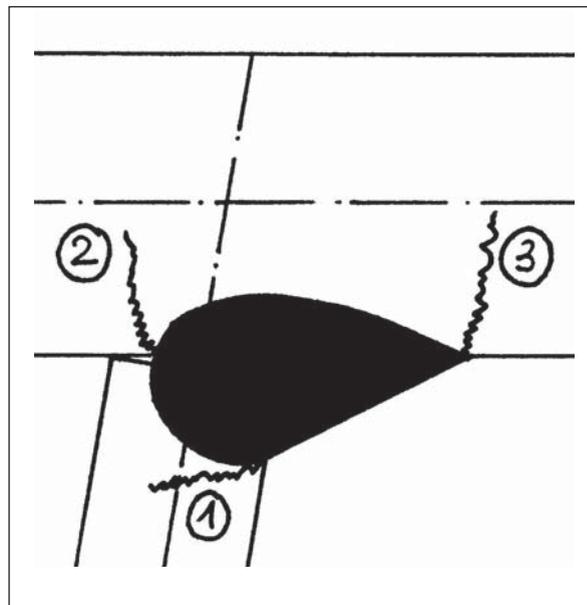


Figure 2

Fissures observées en section courante à l'intersection platelage-auget

Cracks observed on a continuous section at the decking-trough intersection

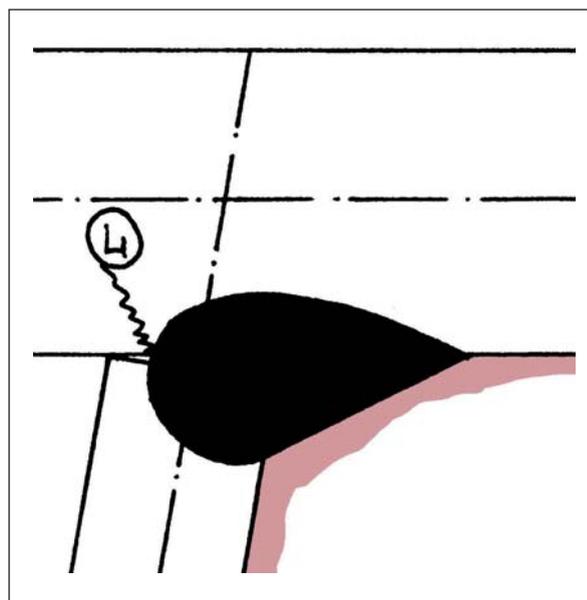


Figure 3

Fissures observées à l'intersection platelage-auget au droit d'une pièce de pont

Cracks observed at the decking-trough intersection on a floorbeam

## Projet Orthoplus : ingénierie avancée des dalles orthotropes et de leur revêtement



### ■ Travaux attendus

#### Une synthèse des pratiques de dimensionnement et des retours d'expérience

Dans un premier temps, un état de l'art permettra de recenser l'ensemble des données existantes concernant les méthodes de calcul en fatigue des dalles orthotropes et les pathologies constatées sur les ouvrages existants et sur les propriétés mécaniques des revêtements de chaussée.

#### Une modélisation fine du comportement mixte platelage-revêtement

Ensuite, il s'agira de décrire finement, au moyen de modèles de calcul aux éléments finis et parallèlement par la mise en œuvre d'un modèle homogénéisé, le comportement du revêtement et les interactions mécaniques entre ce revêtement et la structure métallique, et ainsi de mieux comprendre le comportement composite en flexion de l'ensemble platelage-revêtement. La modélisation devra permettre une estimation fiable des contraintes dans le platelage et dans le revêtement pour différents cas de charge. La mise au point du modèle s'accompagnera d'un programme de validation expérimentale.

### Composition du groupe de travail

Ce groupe de travail réunit les sept partenaires suivants :

- le bureau d'études Arcadis ESG
- le Centre technique industriel de la construction métallique (CTICM)
- l'entreprise Eiffage Travaux Publics
- l'entreprise Eiffel Construction Métallique
- l'École nationale des Travaux publics de l'État (ENTPE)
- le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC)
- le Service d'études techniques des routes et autoroutes (Sétra)
- le Centre d'études techniques de l'Équipement de Lyon (CETE)

L'Agence nationale de la recherche (ANR), reconnaissant le caractère « scientifiquement large et novateur » de ce projet, lui a accordé une subvention dans le cadre de l'appel à propositions 2006 du RGC&U (Réseau génie civil et urbain). Le Sétra est coordinateur de ce projet vis-à-vis de l'ANR. L'essentiel du financement proviendra toutefois des partenaires eux-mêmes.

Ce projet de recherche a par ailleurs été labellisé par les pôles de compétitivité Pôle génie civil Ouest (PGCO) et Ville et mobilité durables (VMD).

### Application à l'optimisation de la durée de vie des dalles orthotropes

À l'aide de ce modèle précis et calibré, une étude sera menée pour optimiser la conception de dalles orthotropes munies d'un revêtement classique en béton bitumineux d'une part. Il faudra alors considérer à la fois la durée de vie de la structure métallique mais aussi celle du revêtement lui-même. Cette dernière est en effet à ce jour mal maîtrisée, et le remplacement prématuré de l'enrobé sur un ouvrage généralement très circulé constitue un coût et une gêne à l'utilisateur non négligeables (on peut citer l'exemple récent du pont de Cheviré, situé dans l'agglomération nantaise).

### Développement d'une solution en BFUP

Dans le même temps, une étude sera menée pour optimiser l'utilisation d'un revêtement en béton fibré ultra-performant (BFUP) qui permettrait, sur une faible épaisseur, d'apporter au platelage une rigidité importante et indépendante de la température. Cette solution pourrait faire l'objet d'un dépôt de brevet.

### Des outils pour une conception intégrée des dalles orthotropes

Par la suite, le groupe Orthoplus souhaite mettre au point des méthodes de calcul simplifiées, utilisables par le projeteur, que ce soit pour la conception ou la réparation d'ouvrages existants, afin de prendre en compte dans les calculs l'effet bénéfique du revêtement. Ces travaux pourront se traduire par des méthodes de dimensionnement simplifiées (abaques, formules, etc.) ou des conseils de modélisation (modèles aux éléments finis simplifiés) et par la production d'un guide technique.

Bien que simplifié, le cadre méthodologique mis en place devra rester suffisamment riche et réaliste pour permettre une optimisation (que ce soit en phase de conception, ou en phase d'entretien-réparation) multicritères : coût initial, coût d'entretien, poids, durée d'interruption...

### ■ Conclusion

Si l'on parvient à prendre en compte plus finement le comportement mécanique du revêtement, celui-ci devient véritablement un élément de structure, que l'on peut donc chercher à optimiser. On peut alors de nouveau parler de « conception » d'une dalle orthotrope, pour laquelle les paramètres sont la géométrie

des augets, leur entraxe ainsi que celui des pièces de pont, l'épaisseur du platelage, mais également la nature du matériau constitutif du revêtement ainsi que son épaisseur. On voit donc apparaître la notion de conception intégrée du couple dalle orthotrope-revêtement, qui constitue la grande nouveauté du projet Orthoplus. ■

**ABSTRACT**  
**Orthoplus Project :**  
**Advanced engineering for**  
**Orthotropic bridge decks**  
**and surfacing solutions**

---

*Cl. Le Quéré*

*November 2006 was the Orthoplus project selected by the French ANR (National Research Agency) for a 2007 to 2010 research period. This project gathers seven public or private entities with the aim of optimising the design of orthotropic bridge decks. With a fine modelling of the composite action of the surface layer and the steel deck plate and of the fatigue mechanism in the steel plate, new theoretical and methodological tools are expected for a realistic calculation of the lifetime for orthotropic decks according to the type and thickness of the surfacing, possibly leading to new optimised solutions.*

**RESUMEN ESPAÑOL**  
**Proyecto Orthoplus :**  
**ingeniería avanzada de las**  
**losas ortótropas y de su**  
**revestimiento**

---

*Cl. Le Quéré*

*El proyecto Orthoplus forma parte de cinco proyectos adoptados en noviembre de 2006 por la Agencia nacional de la investigación (ANR) en el marco de la licitación a propuestas del RGC&U (Red ingeniería civil y urbana). Previsto para un período de tres años (2007-2010), este proyecto reúne siete socios públicos y privados con el objetivo de desarrollar diversas herramientas teóricas y metodológicas que permiten un cálculo realista de la duración útil de una losa ortótropa teniendo en cuenta la participación del revestimiento, y desembocando de ser posible en soluciones innovadoras optimizadas.*

# Protection au feu et des haubans

À l'occasion de la réalisation de l'ouvrage du viaduc de la ravine des Trois Bassins sur la Route des Tamarins à la Réunion, l'entreprise Eiffage TP a mis au point un système innovant de protection au feu des câbles extradossés. Ce système breveté est également valable pour les haubans.

Il fait appel à des matériaux respectueux de l'environnement. Un gain de poids important est obtenu par rapport à des systèmes plus classiques (tubes métalliques par exemple).

Ce système de protection s'avère économique tant en fourniture qu'en mise en œuvre; son montage est simple et se dissocie de la mise en œuvre des câbles et haubans proprement dits.

La réparation d'une zone touchée par un incendie est aisée à réaliser.

L'entretien de cette protection est quasi nul (pas de corrosion dans le temps).

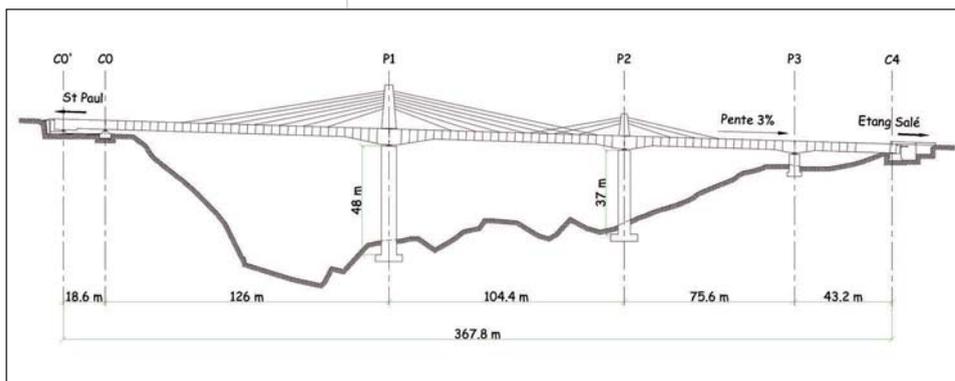
Ce système de protection au feu a fait l'objet d'essais très concluants au CSTB, dépassant les exigences du cahier des charges.

La réalisation du câblage extradossé du viaduc de la ravine des Trois Bassins, sur la Route des Tamarins à la Réunion, a été l'occasion de mettre au point un système de protection au feu des câbles efficace, simple de mise en œuvre, économique, facile à remplacer en cas d'incendie et respectant les règles environnementales (figure 1 et article page 55 de la revue *Travaux* n° 839, mars 2007).

Figure 1

Vue d'ensemble de l'ouvrage viaduc de la ravine des Trois Bassins

General view of the viaduct structure in the Trois Bassins ravine



## ■ Les unités à protéger

Les câbles extradossés (trois unités sur la pile P2; 14 unités sur la pile P1 en double nappe) sont constitués de 37 torons T15S - 1860 MPa - TBR - galvanisés, cirés, gainés.

Aucune réglementation existant en France sur ce type de câbles, l'entreprise a préféré avoir recours à une technologie type haubans en matière d'ancrage notamment (ancrage 37 T 15S de type Dyna Grip® du système Dywidag), les haubans bénéficiant des recommandations du Séttra.

La partie supérieure des mâts de haubanage est équipée de selles de déviation propres au système DSI (double tubage galvanisé avec tenon de blocage); la partie du câble dénudée en partie supérieure est injectée au coulis de ciment Superstresscem (Holcim).

L'ancrage du câble dans la partie supérieure du caisson est prolongé vers l'extérieur par un tube galvanisé qui permet le transfert des efforts à la structure et le passage des torons au travers du tablier.

L'extrémité des tubes est munie d'une bride permettant la mise en place des pièces de transition à la partie courante du gainage PEHD décrit plus loin.

Un système d'amortisseurs est installé à la sortie de chaque câble au niveau du tablier.

## ■ Le contexte réglementaire

Le cahier des clauses techniques particulières du marché prévoit qu'une température dans le câble de 100 °C ne soit pas atteinte avant une heure, sous un feu extérieur de 1000 °C.

Il est à noter que la résistance au feu des haubans et des câbles extradossés devient une préoccupation de plus en plus marquée chez les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre.

Cet aspect sécuritaire, s'inscrivant dans le cadre du développement durable, a motivé l'entreprise dans le sens de la recherche et de l'innovation vers ce nouveau produit.

On notera également que les exigences architecturales et environnementales du projet ont aussi contribué au choix du système de protection (couleur blanche, faible diamètre des câbles).

## ■ Description du système de protection au feu des câbles

Le système de protection au feu mis en œuvre est protégé par un brevet Eiffage TP.

La protection au feu est réalisée par une double épaisseur d'un matelas isolant directement installé autour

# des câbles extradossés



**Patrick Charlon**  
 Directeur  
 de département  
 ouvrages d'art  
 et précontrainte  
 Eiffage TP



**Jérémie Baumgartner**  
 Responsable études  
 et travaux  
 Précontrainte – Pôle  
 Réunion  
 Eiffage TP

des torons. Les couches sont montées en décalant transversalement et longitudinalement les joints afin d'obtenir une protection homogène sans point faible. Une fois cette protection installée, un gainage étanche en demi-coquille PEHD est mis en œuvre.

Le principe détaillé de la protection est décrit figure 2. La protection étant souple, elle reste mécaniquement indépendante de la gaine PEHD et permet donc la dilatation de l'ensemble des composants.

La flexibilité du système de protection permet notamment une protection des organes de transition et de l'amortisseur en sortie de selle de tablier, la fabrication de matelas pouvant se faire sur mesure.

## ■ Description des produits

### Matelas isolant

C'est un produit directement issu de l'industrie de l'isolation thermique. L'isolant est une structure microporeuse constituée de particules de silice, d'oxydes métalliques et de filaments de verre. L'isolant est placé dans une enveloppe en tissu de verre permettant notamment la fabrication des éléments sur mesure.

Il est conçu pour résister à 1 000 °C en régime continu et peut supporter 1 200 °C pour de brèves expositions au feu.

### Gaine PEHD en demi-coquille

C'est une gaine alvéolaire de diamètre intérieur de 195 mm et de diamètre extérieur 225 mm avec des parois de 4 à 5 mm d'épaisseur. Les tronçons sont fournis en longueur de 4 ml, ils sont emboîtés, assemblés par soudure au miroir. Une fois montés, ils sont étanches à 3 bars.

Ces gaines PEHD sont de couleur blanc pur (RAL 9010) et munies d'une protection UV qui répond aux spécifications des recommandations sur les haubans.

Le principe de gaines en demi-coquilles a déjà été utilisé pour des haubans, par exemple, au pont de Normandie et au Stade de France.

## ■ Mode opératoire d'installation

### Installation des torons

L'installation des torons et leur mise en tension sont réalisées de manière habituelle, mais sans gaine PEHD. Les torons sont tractés à l'aide de treuils et tendus au fur et à mesure de leur installation selon le phasage prévu par le bureau d'études, avec une bonne visibilité lors de la mise en œuvre.

### Installation des matelas de protection

L'installation est réalisée une fois mis en place l'ensemble des torons tendus et les amortisseurs. Elle est réalisée le long du câble avec une nacelle par deux ouvriers. Aucun matériel spécifique n'est nécessaire à l'installation des matelas.

### Installation de la première couche

À l'aide d'une nacelle, les matelas sont enroulés, fermés bord à bord et scotchés à l'aide d'un scotch en fibre de verre renforcé.

### Installation de la deuxième couche

La deuxième couche est installée selon la même méthode mais avec un décalage d'une demi-longueur de matelas afin d'assurer un recouvrement correct des joints de montage. De plus, le matelas est enroulé et collé sur lui-même avec un recouvrement de 10 cm. La colle permet d'assurer le maintien de la protection pendant l'incendie. La figure 3 et la photo 1 décrivent la mise en place des couches d'isolant.



Photo 1  
 Essai de montage grandeur nature  
 Full-scale erection test

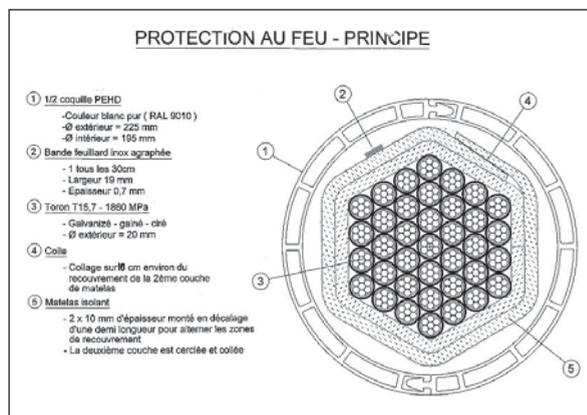


Figure 2  
 Principe de protection au feu  
 Fire protection technique

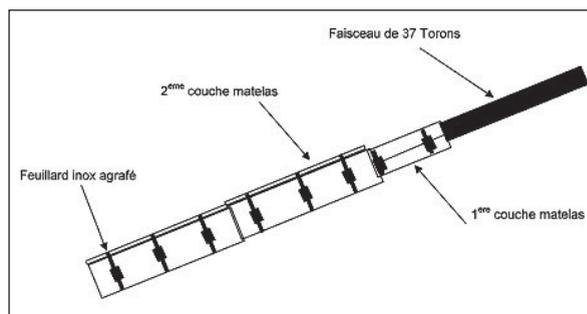


Figure 3  
 Principe de pose du matelas de protection  
 Technique for laying protective mattresses

Protection au feu des câbles extradossés et des haubans

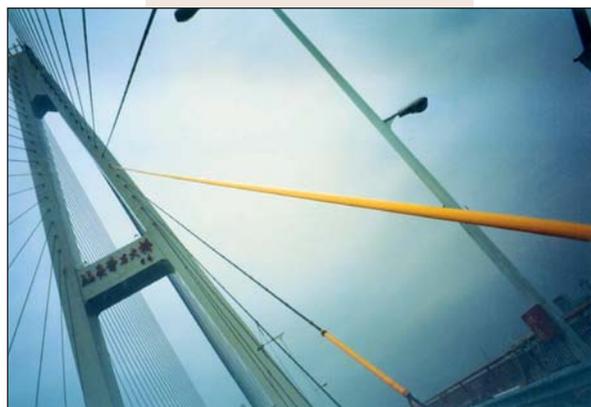
Photos 2 et 3

Soudure des gaines PEHD  
Welding HD polyethylene ducts



Photos 4 et 5

Montage des gaines PEHD  
in situ  
Assembly of HD polyethylene ducts  
in situ



■ Installation des demi-coquilles PEHD

Elles sont installées après mise en œuvre de la protection au feu.

Les demi-coquilles sont soudées au miroir au tronçon précédent.

L'ensemble est tracté le long du câble jusqu'au sommet du déviateur.

La soudure miroir permet d'obtenir un aspect continu de la gaine; quant au joint longitudinal des demi-coquilles celui-ci est placé verticalement afin de limiter son impact visuel. Pour le montage on se reportera aux photos 2, 3, 4 et 5.

Des dispositions particulières sont prévues aux extrémités pour le raccordement de la selle de déviation et au niveau de l'ancrage côté tablier.

Il est à noter que le montage de la protection au feu peut se réaliser indépendamment du montage et de la mise en tension des câbles.

L'atelier de protection devient un chantier indépendant, décalé des autres opérations de haubanage; ceci n'est par exemple pas le cas des protections par tubage métallique qui doivent être mises en œuvre en même temps que le câblage.

■ Calculs thermiques et essais au feu

Ce système de protection tout à fait innovant ne pouvait être mis en œuvre sur chantier sans justification par des calculs complémentaires et des essais en laboratoire. C'est ce à quoi s'est employée l'entreprise sur une période d'environ un an.

Tableau I

Tableau de calcul tiré du logiciel du fournisseur de matelas

Calculation table produced by the software of the mattress supplier

Protection (mm)	Vent (m/s)	T° face chaude (C°)	T° face froide à t=∞ (1)
20	0	1000	122
20	3	1000	89
20	0	1100	132
20	3	1100	95
30	0	1000	96
30	3	1000	69
30	0	1100	103
30	3	1100	74

## Calculs thermiques

Des simulations ont été réalisées à l'aide de logiciels internes à l'entreprise, et externes (le fournisseur de matelas isolants). En effet, aucun logiciel ne correspond actuellement exactement au type de protection au feu étudié. Le tableau I résume l'ensemble des résultats calculés par le fournisseur de matelas isolants dans le cas de l'isolation d'un tuyau.

## Essai au feu

Un essai au feu a été réalisé en grandeur nature dans le laboratoire du CSTB le 21 janvier 2006 à Marne-la-Vallée. Les essais ont porté sur des câbles protégés par deux ou trois couches d'isolant (épaisseur d'une couche : 10 mm).

L'essai au feu a été réalisé sur trois échantillons de 4,6 ml : un échantillon avec 2 x 10 mm de protection et deux échantillons avec 3 x 10 mm. La protection a été installée sur un faisceau cerclé de 37 torons gainés cirés représentatifs du câble à protéger.

Sept sondes de températures ont été installées sur un toron extérieur.

Sur l'échantillon à deux un tube PEHD de diamètre 225 mm ép. 13,4 mm a été installé sur une demi-longueur.

Les photos 6 à 10 montrent ces installations.



Photo 10

Vue d'ensemble des haubans avant essai thermique  
*General view of the cable stays before thermal testing*



Photo 6

Mise en œuvre des panneaux isolants

*Placing insulating panels*

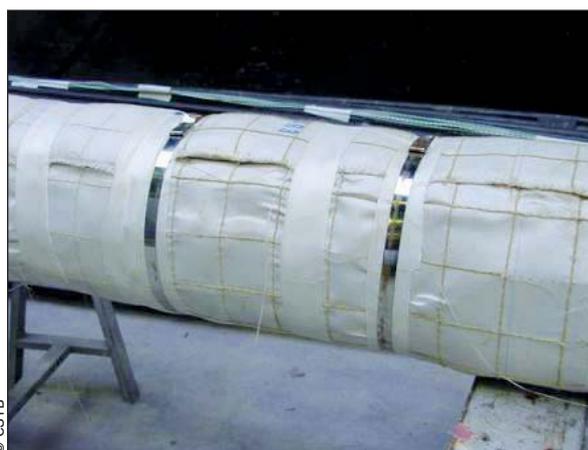


Photo 7

Cerclage de la dernière couche d'isolant

*Banding the final layer of insulating material*



Photo 8

Mise en place du tube en PEHD sur la demi-longueur du hauban n° 2

*Placing the HD polyethylene tube over half the length of cable stay No. 2*



Photo 9

Mise en place des haubans en laboratoire

*Setting up cable stays in the laboratory*

Protection au feu des câbles extradossés et des haubans

Figure 4  
Position des prises de températures  
Position of temperature meters

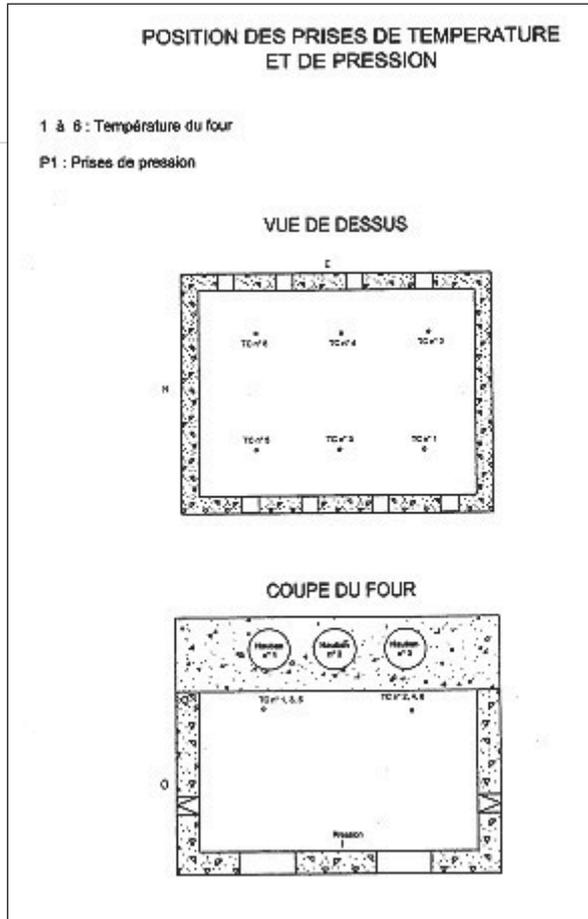


Figure 5  
Conduite du feu  
Fire control

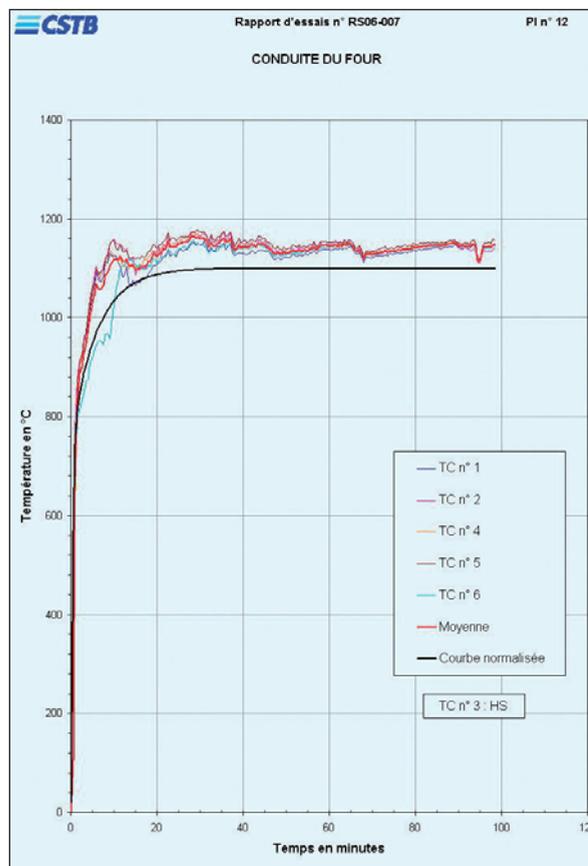
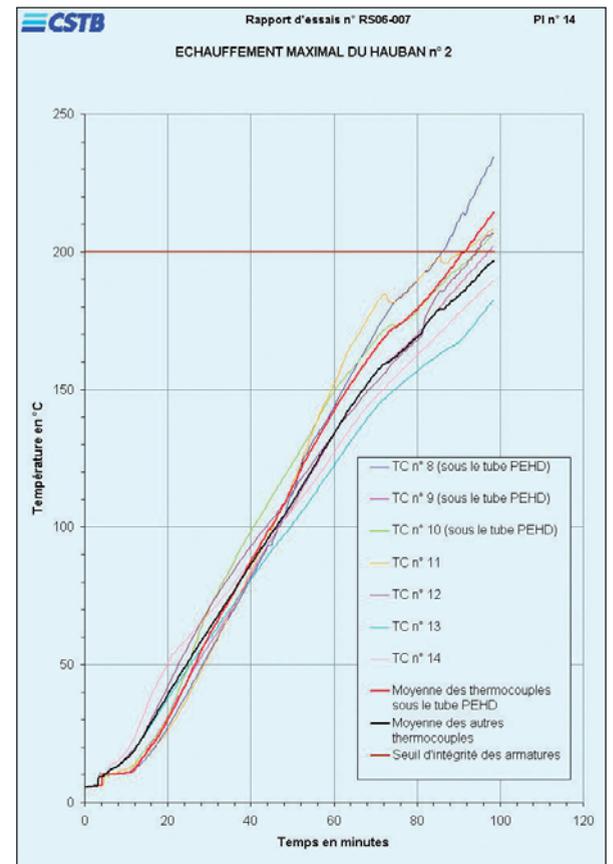


Figure 6  
Échauffement maximal du hauban n° 2  
Maximum temperature rise for cable stay No. 2



La figure 4 montre le descriptif schématique des prises de températures.  
Le hauban n° 2 est équipé de deux couches d'isolant; les haubans n° 1 et 3 sont équipés de trois couches d'isolant.  
L'essai a été réalisé avec un feu d'hydrocarbure normalisé ayant une valeur maximale de 1 100 °C et dont la montée en température est donnée par la formule :

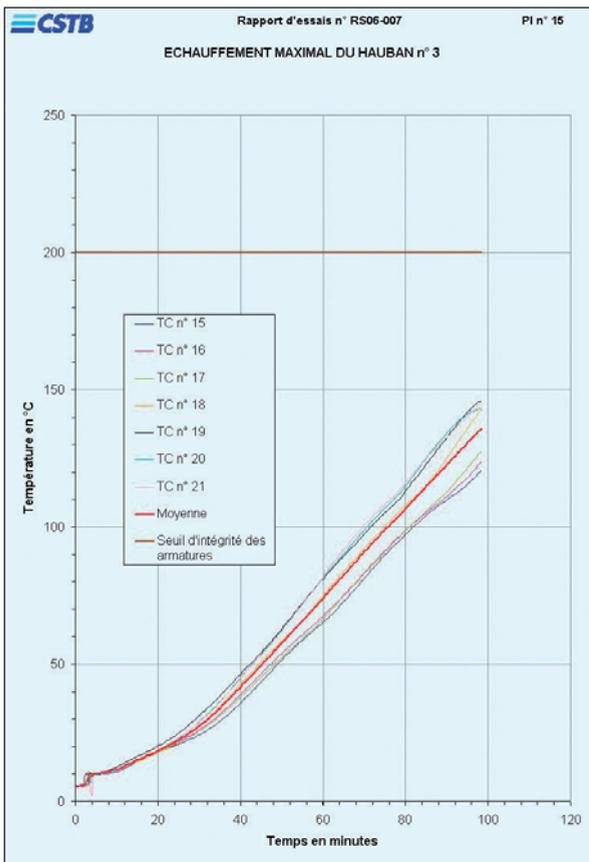
$$T = [1 - 0,325 e^{-0,167 \tau} - 0,67 e^{-2,5 \tau}] + 20.$$

Les figures 5, 6 et 7 montrent la conduite du four et l'évolution de la température en différents points des haubans 2 et 3.  
L'essai prévu initialement pendant 1h00 a été prolongé jusqu'à 1h45 au vu des bons résultats observés.

■ Résultats des essais

L'ensemble des essais et des résultats sont décrits dans le rapport CSTB n° RS 06.007.  
La figure 8 résume l'ensemble des valeurs importantes observées.

Figure 7  
Échauffement maximal du hauban n° 3  
Maximum temperature rise for cable stay No. 3



On peut noter que la protection a un comportement relativement linéaire qui permet de bien définir la température quel que soit le temps d'exposition; il permet même une relativement bonne extrapolation des résultats à 2h00.

On note sur la figure 8 que l'élévation de température est de l'ordre de 2,30 °C/min pour 20 mm de protection et 1,3 °C/min pour 30 mm.

### Observations après essai

Après démontage du banc d'essai de nombreuses observations ont été faites.

#### Aspect extérieur

- Les protections sont toujours en place; seuls quelques écartements de joints entre matelas de la couche externe sont observés.

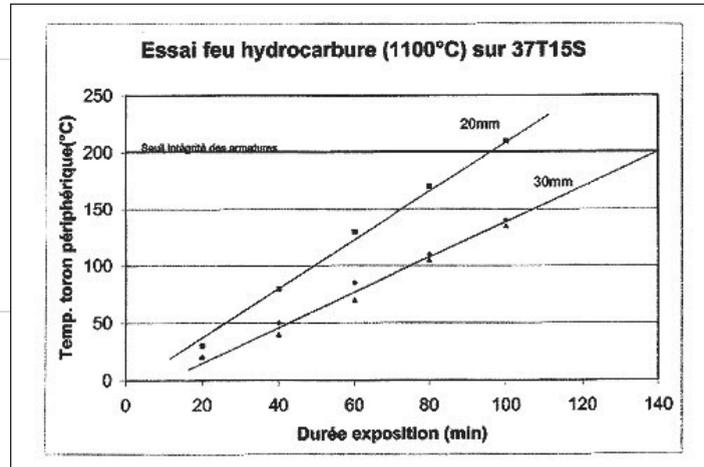


Figure 8  
Tableau des essais au feu  
Fire test table



Photo 11  
Destruction de la gaine de protection des torons du hauban n° 2  
Destruction of the duct protecting the strands of cable stay No. 2



Photo 12  
Fusion de la gaine des torons du hauban n° 3  
Melting of the duct protecting the strands of cable stay No. 3

- La couche externe est vitrifiée; la protection se casse en morceau lorsqu'on essaie de la retirer.
- Les cerclages en feuillard sont en place et les zones de recouvrement sont toujours collées.

#### Aspect intérieur

- La protection à deux couches, se désagrège complètement jusqu'à l'apparition des torons; on constate que la gaine PEHD des monotorons a disparu.
- Les échantillons à trois couches se désagrègent jusqu'à la troisième couche mais la face intérieure de cette dernière reste collée sur le PEHD des monotorons partiellement fondus.

Les photos 11 et 12 illustrent ces résultats.



## Protection au feu des câbles extradossés et des haubans

## ► ■ Conclusion

La protection montre un bon comportement dans le temps, avec une montée régulière des températures. L'essai a été réalisé par feu d'hydrocarbure, pour une température plus élevée que celle de l'essai demandé au CCTP. Le seuil d'intégrité des armatures (200 °C) a été atteint au bout de 1 h 40 pour la protection deux couches et, par extrapolation, au bout de 2 h 30 pour la protection trois couches.

Le CCTP prévoit une température de 100 °C au bout d'une heure sous un feu de 1000 °C; la protection à deux couches permet d'obtenir 135 °C au bout d'une heure à 1100 °C, ce qui correspond à un niveau de protection sensiblement équivalent.

Toutefois, le critère le plus significatif reste le seuil d'intégrité des armatures périphériques à 200 °C qui, lui, est assuré pendant plus de 1 h 30 avec la protection deux couches, ce qui est sécuritaire pour la protection des câbles extradossés et des haubans.

Au-delà du critère de température demandé, ce principe de protection apporte les avantages suivants :

- poids diminué : par rapport à une solution type « mortier réfractaire + tube inox », une telle protection permet d'économiser un poids linéaire de 25 à 30 kg au ml soit 40 à 50 t pour l'ensemble de l'ouvrage viaduc de la ravine des Trois Bassins (tonnage des câbles : 94 t);
- entretien facilité : l'utilisation d'une gaine PEHD pour le gainage extérieur ne nécessite pas d'entretien et évite tout risque de corrosion dans le temps. De plus le matelas est un produit minéral qui possède une grande durée de vie;
- en cas d'incendie : le matelas étant un produit conçu pour fonctionner en régime permanent à 1000 °C, il reste donc très stable dans le cas d'un feu moins important. De plus, ses caractéristiques font qu'il change de couleur au-dessus de 800 °C, ce qui facilite l'inspection et le diagnostic de la zone exposée après un incendie;
- facilité de montage : ce système de protection est facile à mettre en œuvre à la fois dans la phase de construction mais également lors d'une éventuelle opération d'entretien ou de réparation.

Son montage se dissocie totalement de lui des câbles extradossés ou des haubans.

Cette protection s'inscrit dans le cadre du développement durable, de la protection de l'environnement, de la sécurité des usagers et du personnel de mise en œuvre. ■

## ABSTRACT

**Fire protection of curved cables and cable stays**

P. Charlon, J. Baumgartner

*For construction of the viaduct structure in the Trois Bassins ravine on Route des Tamarins highway on Reunion Island, the company Eiffage TP developed an innovative fire protection system for the curved cables.*

*This patented system is also valid for the cable stays.*

*It employs environmentally friendly materials. A major weight saving is achieved by comparison with more conventional systems (steel tubes for example).*

*This protection system proves economical in terms of both supply and installation; it is easy to erect and is separate from installation of the cables and stays properly speaking.*

*An area affected by fire can be easily repaired.*

*Maintenance on this protection system is virtually zero (no corrosion over time).*

*This fire protection system has undergone very conclusive testing at building scientific and technical research centre CSTB, exceeding the requirements of the purchase specifications.*

## RESUMEN ESPAÑOL

**Protección contra incendio de los cables extradossados y de los tirantes**

P. Charlon y J. Baumgartner

*Con motivo de la ejecución de la obra del viaducto del barranco de Les Trois Bassins en la Carretera de los Tamarindos en La Reunión, la empresa Eiffage TP ha elaborado un sistema innovador de protección contra incendio de los cables extradossados.*

*Este sistema patentado también es valedero para los tirantes.*

*Recorre a diversos materiales respetuosos del medio ambiente. Una importante ganancia de pesos se obtiene por comparación a los sistemas más convencionales (tubos metálicos, por ejemplo).*

*Este sistema de protección demuestra ser económico tanto para el suministro como para su implementación; su montaje es sencillo y va separado de la implementación de los cables y tirantes propiamente dichos.*

*La reparación de una zona alcanzada por un incendio se puede realizar muy sencillamente.*

*El mantenimiento de esta protección es casi nulo (ninguna corrosión en el tiempo).*

*Este sistema de protección contra incendios ha sido objeto de ensayos sumamente positivos en el CSTB, y que sobrepasan las exigencias del pliego de condiciones.*

# Mobydic : un outil révolutionnaire pour la maîtrise en temps réel des conditions de coupe d'un tunnelier en terrain difficile



**Pierre Moulin**  
Chef de service adjoint,  
direction technique  
Bouygues Travaux  
Publics

**Mobydic est un outil révolutionnaire donnant la connaissance en temps réel des conditions d'abattage d'un tunnelier à partir des données acquises sur ses outils de coupe. Le système repose sur des instrumentations sans fils embarquées dans les outils de coupe transmettant les informations nécessaires à un ordinateur de supervision qui affiche et présente les résultats des divers traitements en cabine de pilotage.**

**À partir des informations acquises sur les outils, le système permet la détection instantanée de bris de molettes et l'organisation de leur réparation immédiate avant qu'ils n'engendrent des dommages structurels coûteux voire irréversibles de la roue de coupe. Dans les environnements sévères, (confinement hyperbare, tenue de terrain difficile) où la présence humaine au niveau de la tête du tunnelier est pénible et limitée, le système s'avère être un outil décisionnel pour la maintenance préventive. Il fournit le niveau d'usure et l'état des divers outils. Il permet ainsi la décision et l'optimisation des interventions de maintenance dans la roue de coupe. De plus, il optimise l'avance du tunnelier grâce à un suivi efficace de la géologie du front.**

**Ce système breveté est désormais proposé en phase commerciale des projets difficiles.**

La tendance des projets tunnels est d'évoluer dans des environnements les plus sévères limitant l'accès à la tête de coupe des tunneliers. L'auscultation du front de taille ainsi que la maintenance des outils de coupe n'en devient que plus difficile.

Bouygues Travaux Publics a eu la volonté affirmée de se doter d'un outil permettant l'optimisation de la foration par la maîtrise des conditions d'abattage. En 2003, suite à quelques premières expériences menées sur le chantier DB320 à Hong Kong, Bouygues Travaux Publics démarre le projet de recherche interne Mobydic (MONitored BouYgues DIsc Cutter ou système Bouygues d'instrumentation de molettes).

Mobydic repose sur des instrumentations sans fils embarquées dans les outils de coupe transmettant les informations nécessaires à un ordinateur de supervision. Ce dernier, situé en cabine de pilotage, affiche et présente les résultats des traitements sur les données acquises.

Les atouts d'un tel système sont multiples : une détec-

tion immédiate de casse d'outils (évitant ainsi le risque de dégâts structurels irréversibles sur la roue de coupe), un suivi en temps réel de la géologie du front de taille optimisant ainsi les paramètres de creusement, et également une optimisation de la maintenance préventive du front de taille par un contrôle permanent de l'usure des molettes.

## ■ Les enjeux du système Mobydic

### Un moyen de détection de casse et de prévention

Le traitement des différentes informations acquises par le système Mobydic permet d'alerter en temps réel le pilote sur les détériorations des molettes.

La connaissance immédiate de tels dysfonctionnements (photos 1 et 2) permet une maintenance instantanée des molettes défectueuses et ainsi de se prémunir de dommages structurels irréversibles sur la tête de coupe. En terrain dur, lorsqu'un outil est défectueux, c'est le terrain qui usine la roue de coupe du tunnelier et non l'inverse (photo 3).



Photo 1  
Ébrèchement  
Nick



Photo 2  
Méplat observé sur un anneau  
Flat spot (on the right)  
observed on a ring

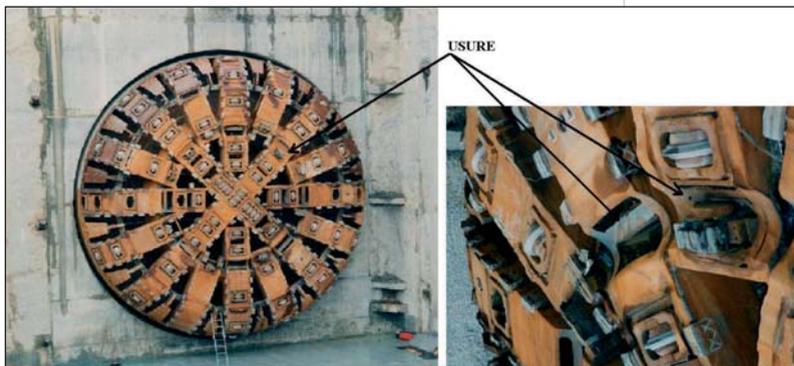


Photo 3  
Tête de coupe endommagée d'un tunnelier  
Damaged cutting head of a TBM

Mobydic : un outil révolutionnaire pour la maîtrise en temps réel des conditions de coupe d'un tunnelier en terrain difficile

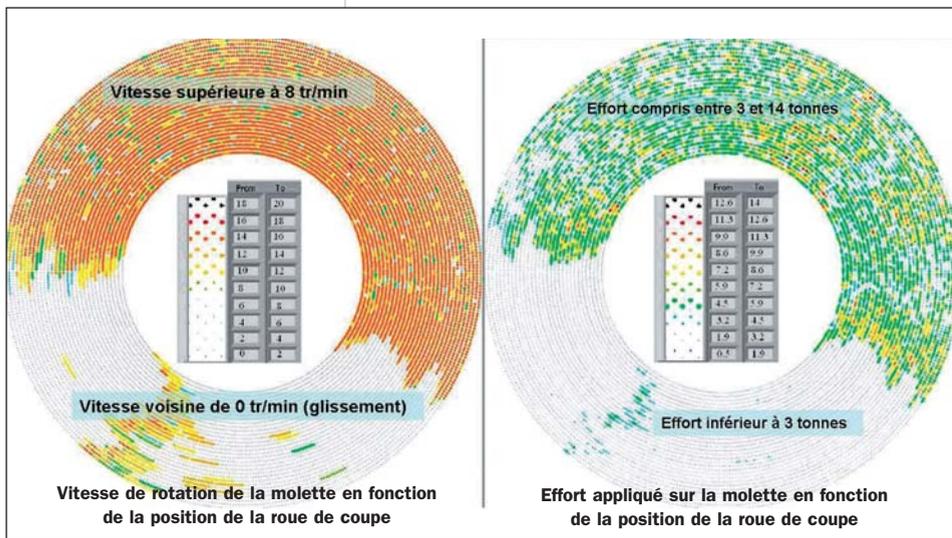


Figure 1  
Visualisation radar de l'hétérogénéité du front  
Radar view of tunnel face heterogeneity

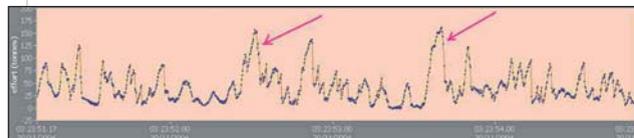


Figure 2  
Visualisation des pics (mesures à 300 Hz). Chantier LMC Hong Kong  
View of peaks (measurements at 300 Hz). LMC project in Hong Kong

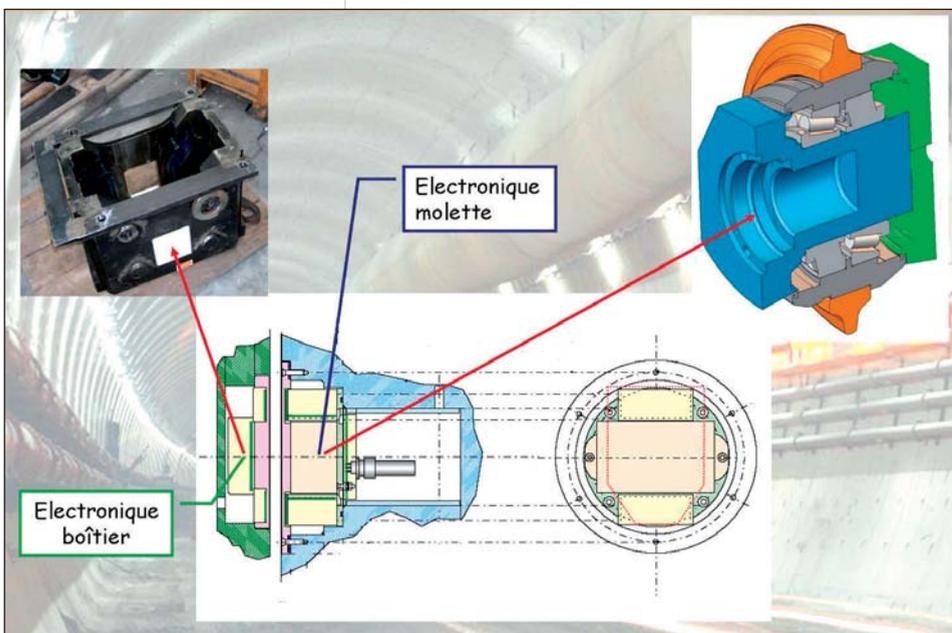


Figure 3  
Détail d'une molette instrumenté et de son boîtier  
Detail of an instrumented disc cutter and its control unit



Une assistance à la maintenance

Dans les environnements sévères où la maintenance du front de taille est rendue difficile par une mauvaise tenue du terrain et des conditions hyperbariques astreignantes, il est important de connaître l'état et l'usure des divers outils afin de décider d'une intervention de maintenance et d'en optimiser la durée. Par ses instrumentations diverses (effort, vitesse de rotation, température...) Mobydic permet d'afficher en cabine les informations nécessaires à l'équipe de maintenance afin d'optimiser la sélection des outils à changer ainsi que la séquence de remplacement.

Une meilleure connaissance du milieu

Mobydic, par son système d'instrumentation innovant a pour but premier d'apporter une meilleure connaissance des conditions de coupe d'un tunnelier. Les électroniques de l'instrumentation Mobydic ont été installées sur le chantier de Lock Ma Chau à Hong Kong en 2003. Les objectifs initiaux étaient de ramener un maximum d'informations en cabine de pilotage à haute fréquence d'acquisition. Les campagnes de mesures ainsi effectuées ont permis l'acquisition de dizaines de gigaoctets de données. Le système d'acquisition embarqué dans la molette est cadencé à 300 Hz. Il renvoie en cabine les informations provenant de capteurs divers (jauges de contrainte, accéléromètres, capteur de vitesse, températures...). Des corrélations entre les divers paramètres ont pu ainsi être observées par post-traitement. Les figures 1a et 1b sont issues de post-traitement de données acquises sur le chantier de LMC (Hong Kong 2004).

Les spirales représentent l'historique des données d'une molette périphérique de la tête de coupe sur plusieurs tours de roue consécutifs. Les données sur l'extérieur de la spirale sont les plus récentes. On représente ainsi selon une perspective 3D, le cylindre creusé par une molette durant 25 minutes de foration dans un terrain hétérogène. Ici, la machine avance avec une faible force de poussée. Dans la zone inférieure où le matériau est plus tendre (effort inférieur à 3 t), le couple appliqué sur la molette est insuffisant pour entraîner sa rotation. La rémanence de cette observation, la comparaison avec la coupe géologique du terrain ainsi que les enregistrements du système d'acquisition de données du tunnelier ont validé ces courbes et les mesures réalisées par Mobydic. Dans ce cas de poussée limitée, la corrélation effort-vitesse de rotation de la molette est parfaite.

Il a été possible de caractériser le mécanisme de rupture de la roche en terrain dur (granit non fracturé) par des acquisitions d'effort à 300 Hz (figure 1b).

Figure 4

Architecture du système sur A41  
Architecture of the system on A41

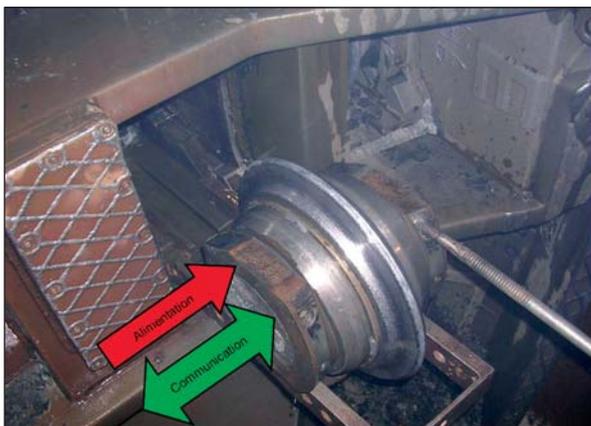


Photo 4

Une alimentation et une communication bidirectionnelle entièrement sans fil pour les besoins de la production  
*Power supply and fully wireless two-way communication for production requirements*

Dans le cas de la formation d'un éclatement de roche, la montée de l'effort est plus lente que la chute qui correspond à la fracture brutale du terrain. En outre, l'effort se rapproche de zéro, puisque la molette ne rencontre plus de terrain une fois l'éclat dégagé (flèches rouges, figure 2).

### ■ De l'innovation aux défis techniques et technologiques

Les molettes d'un tunnelier évoluent dans un milieu très hostile. Elles sont soumises aux chocs, vibrations, températures élevées ainsi qu'à des écarts de pression pouvant atteindre 10 bars avec des taux d'humidité saturée.

Ces conditions sévères de fonctionnement ont nécessité un choix particulièrement sélectif des composants des électroniques embarquées ainsi qu'un packaging adapté (figure 3).

Le système a dû être adapté aux contraintes des changements de molettes : à savoir, aucun fil entre la tête de coupe (boîtiers) et les molettes. L'alimentation des électroniques d'acquisition embarquées ainsi que la communication sont réalisées sans fil par un procédé d'induction spécifique (photo 4).

Un réseau câblé est cependant déployé dans la structure de la tête de coupe. Il relie les transducteurs inductifs logés dans les caissons de molettes au joint tournant. Ce dernier est muni d'un collecteur à bagues permettant la continuité du réseau de la tête coupe (partie tournante) avec le réseau tunnelier (partie fixe). Des choix technologiques ont été imposés afin de pouvoir véhiculer de manière fiable les informations des molettes jusqu'à la cabine de pilotage du tunnelier.

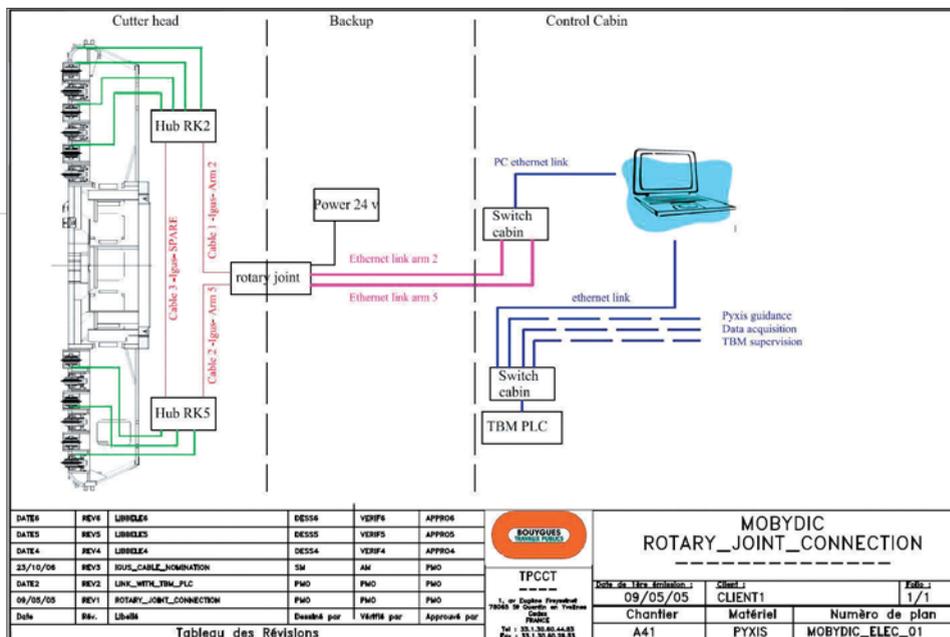


Photo 5

Un concentré de technologies dans le creux de la main  
*A compendium of technology in the palm of the hand*

Le système Mobydic communique avec l'automate machine, le système de guidage de tunnelier, ainsi que le système d'acquisition de données (figure 4).

Les électroniques embarquées dans les molettes sont le fruit des dernières technologies. Elles comportent un module d'acquisition élaboré qui numérise les informations des capteurs depuis la source. Un processeur embarqué très puissant permet d'appliquer des prétraitements et des algorithmes sophistiqués sur des milliers de données acquises à la seconde. Tous les résultats ainsi obtenus sont transmis à haut-débit à l'ordinateur de supervision diffusant les informations en cabine de pilotage.

Des composants de dernière génération tels que les « supers-capas » (condensateurs à très fortes capacités développés récemment pour les véhicules hybrides) ont été incorporés dans les systèmes embarqués.

Ce concentré de technologie a nécessité une batterie de tests rigoureux afin de satisfaire aux critères de performance exigés, tout en résistant aux dures contraintes environnementales. De plus, toutes ces fonctionnalités s'intègrent dans un encombrement très réduit (photo 5).

La mesure d'effort a nécessité l'installation d'une dizaine de jauges de contrainte spécialement choisies. Leur

Mobydic : un outil révolutionnaire pour la maîtrise en temps réel des conditions de coupe d'un tunnelier en terrain difficile

Figure 5

Simulation numérique de la molette Mobydic  
Numerical simulation of the Mobydic disc cutter

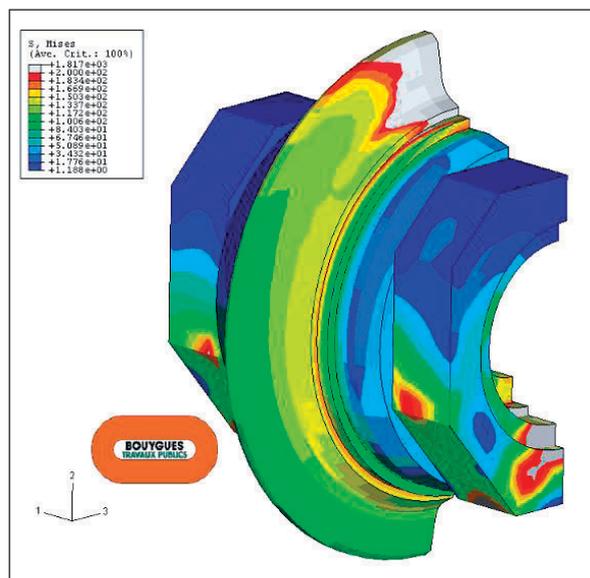


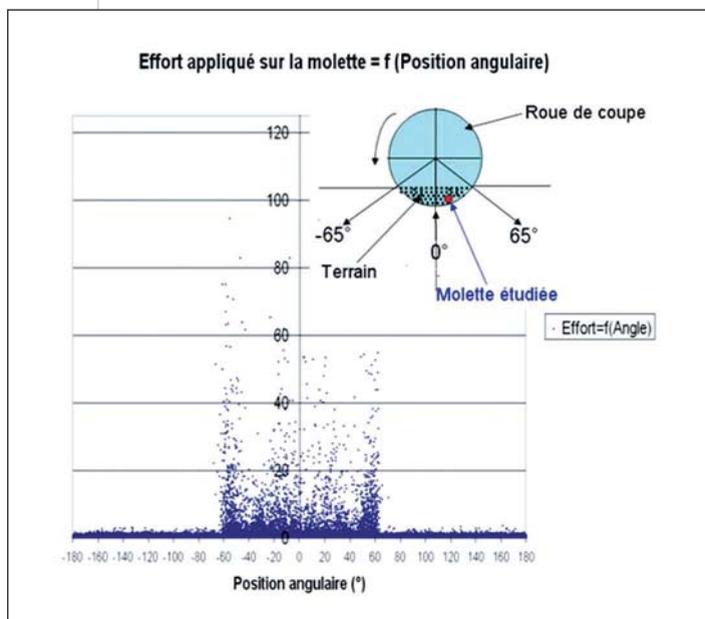
Photo 6

Tunnelier « Adélaïde » du chantier A41  
"Adélaïde" TBM on the A41 project



Figure 6

Résultats des premiers enregistrements  
Results of the first recordings



positionnement a été élaboré avec précision grâce à une étude par éléments finis pour divers cas de charges (figure 5).

Une fois instrumentée en effort selon les résultats de la modélisation, chaque molette passe sur un banc de calibration. Après cette étape, la modélisation est alors vérifiée et les courbes d'étalonnage sont entrées dans l'algorithme de traitement embarqué. L'électronique Mobydic est capable de mesurer l'effort appliqué sur la molette avec une précision inférieure à la tonne. La molette instrumentée est alors prête à être montée sur la tête de coupe du tunnelier.

■ Un système prototype qui donne déjà des résultats

Ce système est actuellement installé sur le tunnelier du chantier A41 (photo 6) (mont Sion, France) à titre de test longue durée et de validation industrielle. Ce tunnelier de 12 m de diamètre creuse deux tubes de 3100 m pour la traversée du mont Sion par la future autoroute A41.

Les interfaces nécessaires à l'installation du système Mobydic ont été prévues dès la conception de la machine en usine.

Deux molettes périphériques ont été instrumentées pour le démarrage de la machine. Ceci a permis de réaliser les premières mesures en septembre 2006 dans un terrain et une section calibrée.

Les données acquises ont été validées par la géométrie du front de taille. Elles ont servi de données tests pour le développement de l'actuelle supervision en cabine du tunnelier A41 (figure 6). Celle-ci permet au pilote du tunnelier de visualiser en temps réel la diaggraphie du front de taille en fonction des différentes informations acquises par les molettes instrumentées sur la roue de coupe (actuellement au nombre de quatre). Dès septembre 2007, ce nombre sera porté à sept. Ceci augmentera considérablement la résolution de la diaggraphie affichée (figure 7).

Cette diaggraphie représente chaque point du front par une couleur indiquant la valeur de l'effort mesuré ou calculé suivant l'échelle indiquée sur la partie gauche. Ainsi, sur cette vue, on visualise des zones vert clair (peu sollicitées 0 t) et des zones rouge vif où la molette reçoit des pics de 60 t.

L'utilisateur peut modifier librement son échelle et ainsi adapter le contraste de la vue à la situation observée.

Chaque molette décrit un cercle. Entre les quatre cercles ainsi affichés, des points intermédiaires sont calculés à partir de lois polynomiales.

L'utilisateur peut configurer la diaggraphie frontale à partir d'une trentaine de paramètres calculés et remon-

tées par les molettes instrumentées. Il peut de ce fait également visualiser la diagraphie du front en fonction de la vitesse de rotation des molettes.

*Nota* : lors de la visualisation du front en fonction de la vitesse de rotation des molettes, un traitement d'homogénéisation des données est nécessaire (la répartition du champ de vitesse étant étroitement liée au rayon d'implantation de chaque molette) (figure 8).

De par ces diagraphies, il est possible d'adapter les paramètres « machine » (tels que vitesse d'avance, poussée) en fonction de la géologie présente. Selon les situations et les terrains, le système est capable de détecter des rochers, des cavernes, failles, strates ou autres accidents géologiques.

En partie haute de l'écran, est affichée la température de chaque molette instrumentée.

Une surchauffe anormale affichée en cabine indique un dysfonctionnement de la molette considéré. Cela a déjà permis de déceler un comportement anormal sur une des molettes instrumentées du chantier A41.

L'application est également dotée d'un module d'enregistrement qui sauvegarde toutes les données acquises dans des fichiers d'archivage.

Un applicatif additionnel permet grâce à ses fonctions magnétoscopes de rejouer les situations archivées. Il est possible de ce fait de rejouer entièrement un creusement en choisissant les paramètres à afficher mais également, en modifiant les échelles de visualisation. Cet outil très pratique permet par rejeu la connaissance du terrain excavé. Il pourra être d'une aide considérable pour un chantier bi-tube dans un terrain difficile.

Le barycentre des efforts appliqués sur les molettes instrumentées est calculé sur la section. Il peut être un bon indicateur à l'excentration de la charge appliquée au roulement de la tête de coupe (figure 9).

Le système Mobydic sur A41 sera équipé en septembre de nouveaux modules permettant notamment de suivre l'usure des molettes en temps réel.

Grâce à la connaissance des vitesses instantanées des molettes, il est possible de recalculer le diamètre de la molette et donc d'estimer son usure. Une vue de l'application présentera le niveau d'usure de chaque outil instrumenté.

En abscisse est repéré le numéro de l'outil considéré, en ordonnée sous forme d'histogramme est représentée en temps réel l'usure relative au seuil admissible attaché à l'outil. Ceci facilitera la maintenance de la roue de coupe. L'équipe de maintenance peut anticiper la meilleure séquence de changement de molettes. Ceci est d'autant plus appréciable quand le tunnelier fonctionne en mode fermé et que les interventions sur la tête de coupe du tunnelier se font en condition hyperbare (figure 10).

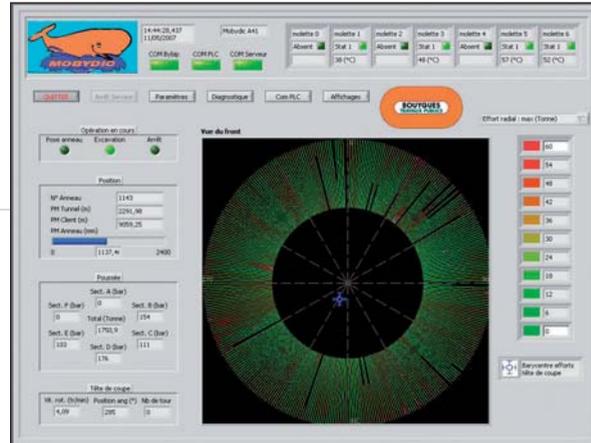


Figure 7  
Supervision Mobydic A41 : diagraphie du front en fonction de l'effort radial mesuré sur les diverses molettes  
*Mobydic A41 supervision : tunnel face logging according to the radial force measured on the various disc cutters*

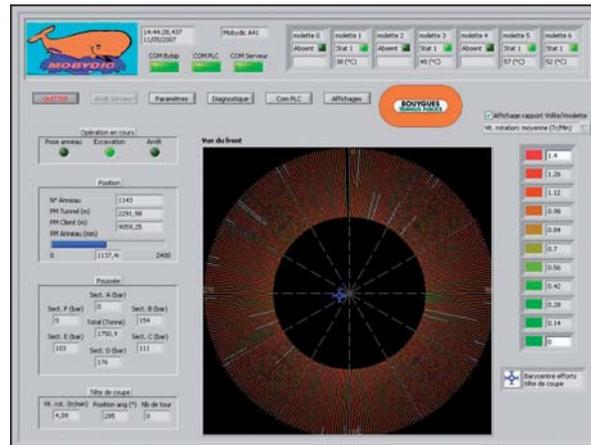


Figure 8  
Supervision Mobydic A41 : diagraphie du front en fonction de la vitesse mesurée sur les diverses molettes  
*Mobydic A41 supervision : tunnel face logging according to the speed measured on the various disc cutters*

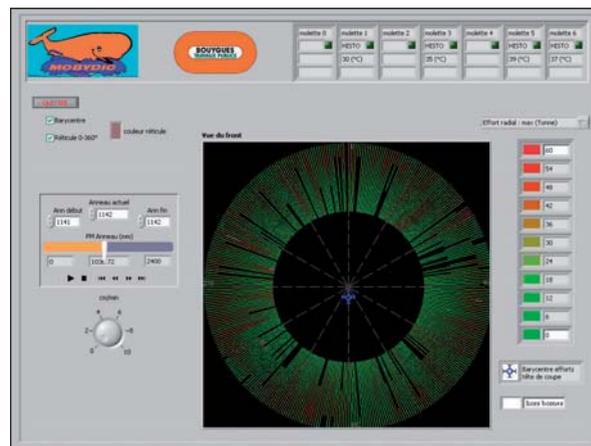


Figure 9  
Supervision Mobydic A41 : vue historique avec ses fonctions magnétoscopes  
*Mobydic A41 supervision : historic view with its videotape recorder functions*

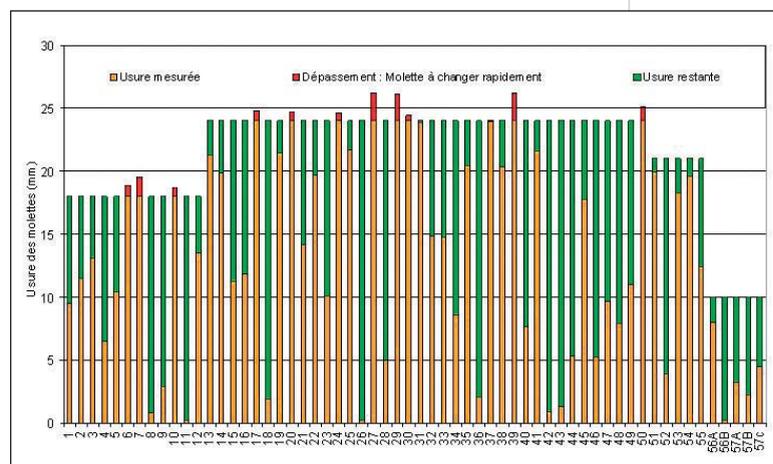


Figure 10  
Supervision Mobydic A41 : vue de suivi d'usure des molettes  
*Mobydic A41 supervision : view of disc cutter wear monitoring*

## Mobydic : un outil révolutionnaire pour la maîtrise en temps réel des conditions de coupe d'un tunnelier en terrain difficile

### ► Conclusions

L'instrumentation est en plein essor dans le monde du BTP. Elle permet une meilleure connaissance de l'environnement et de ce fait contribue à l'amélioration des process. Le système Mobydic en est un bon exemple. Il prend sa place en cabine de pilotage comme l'ont fait en leur temps les systèmes de pilotage, d'acquisition de données et d'autres systèmes automatisés embarqués sur les tunneliers. Ces systèmes étaient observés au départ avec un certain scepticisme et considérés bien souvent comme des bêtes curieuses. Ils sont aujourd'hui de véritables outils de production ou de maintenance dont la nécessité n'est plus mise en cause.

Le système Mobydic pour sa part équipera le tunnelier du chantier de Gautrain en Afrique du Sud. Ce tunnelier démarrera en décembre 2007. La tête de coupe sera équipée de 16 molettes instrumentées.

Ce système breveté est maintenant proposé en phase commerciale des projets difficiles.

#### Remerciements

Une partie de ce travail (visualisation du front de taille en cabine de pilotage) a été réalisée dans le cadre du projet de recherche européen TunConstruct partiellement financé par la Commission européenne (<http://www.tunconstruct.org>). ■

#### ABSTRACT

### ***Mobydic : a revolutionary tool for real-time control of the cutting conditions of a tunnel boring machine in difficult ground***

P. Moulin

*Mobydic is a revolutionary tool giving a real-time knowledge of cutting conditions for a tunnel boring machine through instrumentation of the cutting tools. The system is based on instrumentation without on-board wires in the cutting tools sending the necessary information to a computer displaying the various processing results in the driver's cab.*

*Based on the information acquired on the tools, it allows instant detection of disc cutter breakage and organisation of their immediate repair before they can cause costly or even irreversible structural damage to the cutting wheel. In severe environments (hyperbaric confinement, resistance of difficult ground) where human presence at the TBM head level is painful and limited, the system proves to be a decision-making tool for preventive maintenance. It gives the level of wear and the condition of the various tools and thus allows decision making and optimisation of maintenance operations on the cutting wheel. It also optimises TBM advance by effectively monitoring the geology of the tunnel face.*

*This patented system is now proposed in the commercial stage of difficult projects.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

### ***Mobydic : una herramienta revolucionaria para controlar en tiempo real las condiciones de corte de una tuneladora en terreno difícil***

P. Moulin

*Mobydic es una herramienta revolucionaria que permite conocer en tiempo real las condiciones de excavación de una tuneladora a partir de los datos procedentes de las herramientas de corte. El sistema se funda en diversas instrumentaciones inalámbricas embarcadas en las herramientas de corte que transmiten las informaciones necesarias a una computadora de supervisión que permite visualizar y presentar los resultados de los diversos tratamientos en cabina de pilotaje. A partir de las informaciones adquiridas en las herramientas, el sistema permite la detección instantánea de las roturas de los discos de roscar y la organización de su reparación inmediata antes de que puedan originar daños estructurales costosos e incluso irreversibles de la rueda de corte. En los entornos severos, (confinamiento hiperbárico, comportamiento de terreno difícil) donde la presencia humana a nivel de la cabeza de la tuneladora resulta fastidiosa y limitada, el sistema demuestra ser una herramienta decisional para el mantenimiento preventivo. Este sistema provee el grado de desgaste y el estado de las diversas herramientas y asegura, de este modo la decisión y la optimización de las intervenciones de mantenimiento en la rueda de corte. Además, este sistema optimiza el avance de la tuneladora mediante un seguimiento eficaz de la geología del frente. Este sistema patentado se propone de ahora en adelante para la etapa comercial de los proyectos difíciles.*

# TIMBY. Un nouveau concept de tunnel immergé



**Pierre Longchamp**  
Directeur technique  
ouvrages souterrains  
Bouygues TP

**Philippe Autuori**  
Directeur adjoint bureau  
d'études tunnel  
Bouygues TP



**Patrick Palbras**  
Chef de groupe  
méthodes  
Bouygues TP

**Rivières et détroits sont des obstacles à la circulation spécialement dans les zones à forte densité de population.**

**Ponts et tunnels forés ou immergés lèvent cette contrainte et forment des éléments clés en termes de développement régional.**

**Avec le concept « TIMBY » Bouygues TP et son partenaire désigné Herrenknecht AG présentent ici une nouvelle méthode de construction de tunnel immergé, certes innovante, mais aussi basée sur des techniques parfaitement maîtrisées dans d'autres natures de construction.**

## ■ Introduction

Pour les franchissements de cours d'eau ou de bras de mer, la solution des tunnels immergés est souvent attractive en termes de coût et de réduction de l'impact sur l'environnement.

Cependant, la technique de construction traditionnelle au moyen de grands caissons préfabriqués dans un « bassin à sec », amenés par flottaison puis immergés, requiert des conditions techniques souvent difficiles à réunir sur un même projet. Parmi celles-ci on peut citer :

- les emprises nécessaires à la création d'une darse de très grandes dimensions;
- les conditions de stockage et de navigation des caissons;
- les perturbations de la navigation et même pour certaines phases comme l'immersion des caissons, l'arrêt total du trafic fluvial ou maritime.

Fortes de la maîtrise technique de la solution traditionnelle mise récemment en œuvre à Rostock (Allemagne), les équipes techniques de Bouygues Travaux Publics ont imaginé et développé un nouveau concept de construction de tunnel dit « immergé » en vue de :

- d'élargir le champ de faisabilité de tels ouvrages;
- de réduire les coûts et délais de construction.

Cette nouvelle technologie décrite ici est innovante mais présente l'avantage de reposer sur des concepts connus et donc maîtrisés par l'entreprise tels que la technologie des boucliers en terrains meubles et aquifères, la précontrainte, les systèmes de traction temporaire issus des levages lourds.

La méthode de construction associée au concept étant très mécanisée, il fallait, pour valider le concept, développer une machine. La société Herrenknecht a

apporté à cet égard son savoir-faire, au travers d'un accord de partenariat de développement technique et commercial.

## ■ Structure des tunnels

L'idée de base de la nouvelle méthode étant de construire le tunnel immergé à l'aide d'une machine dérivée des boucliers pour tunnels forés en terrain meuble et aquifère, la structure de l'ouvrage est constituée d'un revêtement d'anneaux de voussoirs.

Le concept de celle-ci a été gouverné par deux contraintes principales :

- assurer en toutes phases, de construction et opérationnelle, l'équilibre de la poussée d'Archimède avec les coefficients de sécurité usuels de 1,05 (construction) et 1,10 (opérationnelle);
- assurer la stabilité de la structure quelle que soit la charge hydrostatique et de couverture appliquée à l'ouvrage.



Ces contraintes ont induit le choix de section de formes arrondies et la mise en œuvre d'une précontrainte transversale des anneaux.

Le lestage de l'ouvrage est assuré par le poids propre du revêtement de voussoirs ( $e = 900$  mm) et un ballastage interne réalisé de façon intégrée à la technique et aux cycles de la construction.

Trois sections types ont été développées sur la base des réglementations française et européenne, selon le nombre de voies de circulation des projets, à savoir :

- monotube de 2 voies avec galeries de sécurité (figure 1);

**Figure 1**  
Franchissement  
de rivière  
River crossing

TIMBY. Un nouveau concept de tunnel immergé

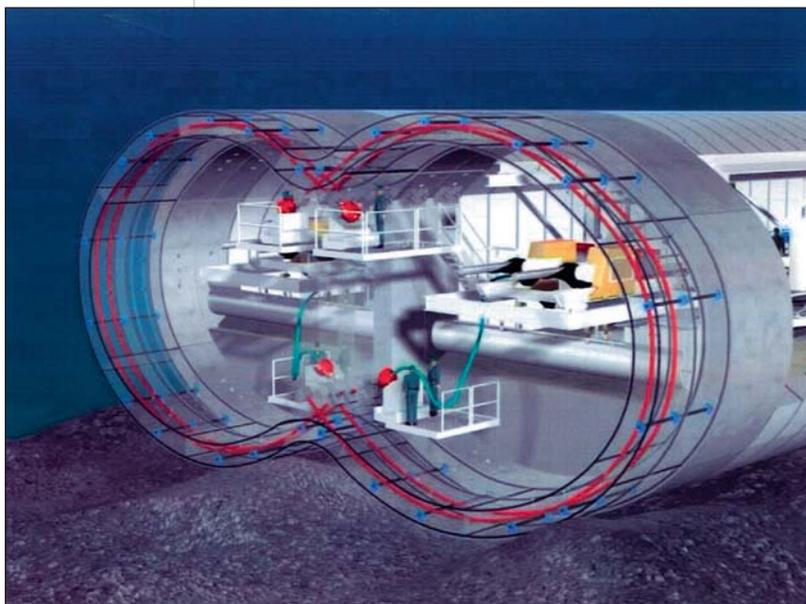


Figure 2  
 Vue de la section bitube et de la précontrainte  
 View of the double-tube section and prestressing

- monotube de 3 voies avec galeries de sécurité (figure 2);
  - bitube de 2 x 2 voies avec mur central, un tube servant de galerie de sécurité à l'autre (figure 3).
- Pour optimiser les sections, des formes ovoïdes ont été conçues, et l'insuffisance de pression hydrostatique aux

extrémités du tunnel a conduit à prévoir une précontrainte transversale avec des câbles croisés, soit dans des bossages (monotubes), soit dans les goussets de jonction entre le mur et les voûtes (bitube).

Une précontrainte longitudinale est également prévue à l'aide de barres, pour garantir tout d'abord la stabilité de l'ouvrage en phase construction. Ultérieurement, cette précontrainte peut-être maintenue ou détendue selon les besoins.

Au vu des sections de tunnel, les anneaux ne peuvent être de type « universel ». Pour réaliser le tracé du projet, ceux-ci sont néanmoins « pincés » mais de façon indépendante dans le plan horizontal et vertical.

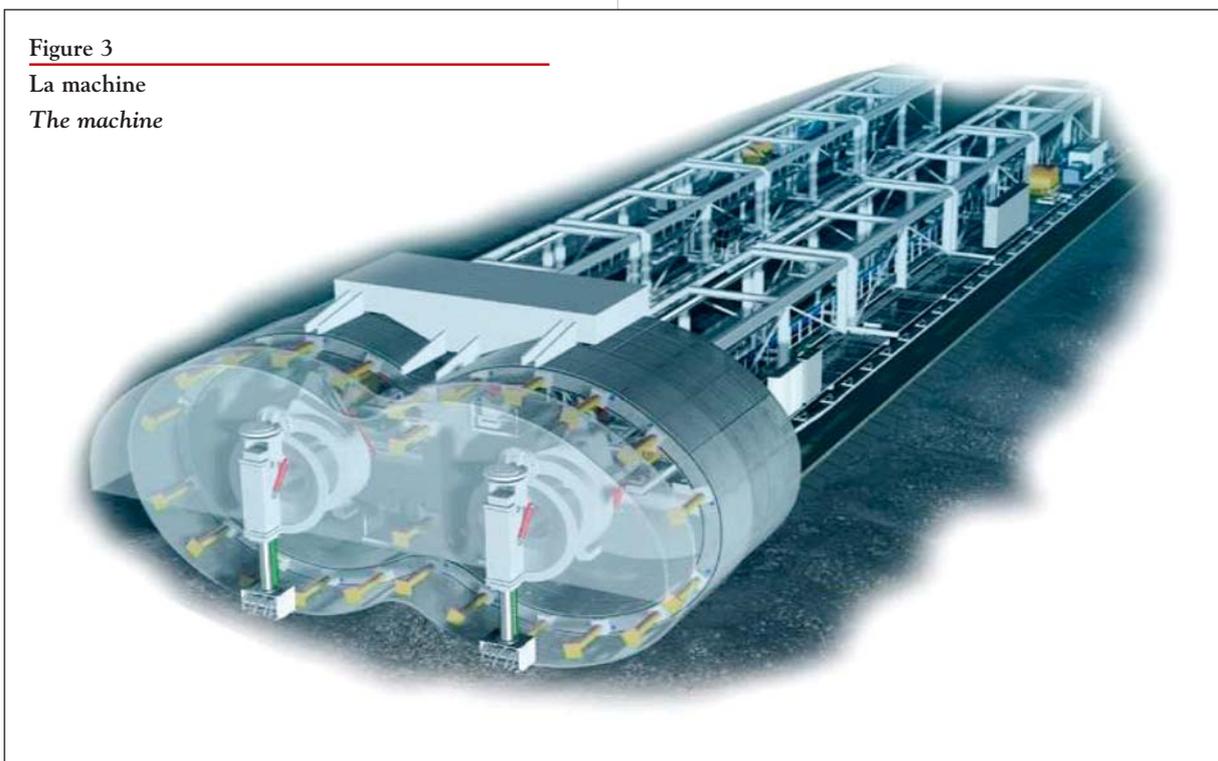
Enfin, pour tenir compte du contact direct avec l'eau libre, l'étanchéité du revêtement est assurée par deux barrières compartimentées de joint élastomère compressible.

■ La méthode de construction

Principes généraux de construction

On vient de le voir, la construction fait donc appel à une machine dérivée des boucliers à l'intérieur de laquelle le revêtement de voussoirs est érigé. Toutefois, cette machine ne creuse pas car, face aux quantités de déblais dégagés par la tranchée, la solution de dragage préalable reste plus économique (à noter qu'une version capable de creuser la tranchée est

Figure 3  
 La machine  
 The machine



possible dans certains cas). Des sondes relèvent en permanence la géométrie du fond de forme, en avant et dans la zone de nivelage.

Si nécessaire un fond de forme en gravier est « clappé » en vrac sur le fond de souille, selon les quantités requises par un relevé bathymétrique de celle-ci et le profil du tunnel.

La machine intervient alors et nivelle le fond de forme naturel ou rapporté à l'aide de bras télescopiques et articulés équipés d'une tête rotative de régilage. Ces bras repoussent l'excédent de matériaux vers l'avant et/ou les côtés. Ils décrivent des surcouples ou des sous-profilés selon des géométries programmées pour faciliter le guidage de la machine tant dans le plan vertical que dans le plan horizontal.

En cas d'excédent trop important devant la machine, une partie peut être évacuée vers l'arrière à l'aide de pompes suceuses, les bras de nivelage faisant office d'éclindes.

À l'arrière, le schéma classique des boucliers est repris avec un ou deux érecteurs de voussoirs adaptés à la géométrie des anneaux et des vérins de poussée assurant la propulsion et le guidage de la machine ainsi que la stabilité de l'anneau en phase de construction.

À cet égard, il faut noter que la machine, partant du rivage se situe partiellement hors d'eau, et ne subit donc pas, aux extrémités de l'ouvrage, une charge hydrostatique suffisante pour créer sur sa face avant une force de réaction indispensable à cette stabilité. Cette absence a été compensée par un « brélage » de retenue, réalisé à l'aide de câbles temporaires et de vérins de précontrainte directement dérivés du système de levage lourd « heavy lift » (système utilisé avec succès à Dublin pour d'autres raisons).

Enfin, l'équilibre de la poussée d'Archimède est assuré de la façon suivante :

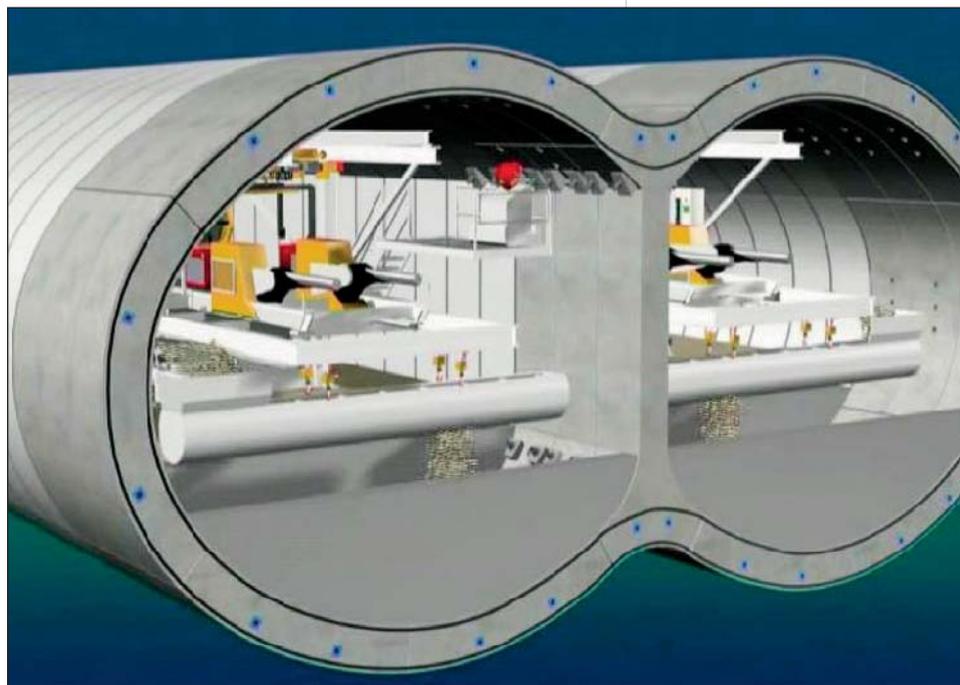
- au niveau de la machine : surcharge externe sur le dessus de l'arrière du bouclier;
- au niveau du tunnel : surcharge interne de remblais mis en œuvre par séquences de trois (ou plus) longueurs d'anneau;
- dans la zone de mise en œuvre du remblai, un lestage roulant sur le tunnel lui-même et tracté par la machine, garantit temporairement l'équilibre de la zone en l'attente de celle-ci.

À l'arrière, le vide annulaire sous-jacent au tunnel est injecté entre deux coffrages latéraux également tractés par la machine.

Un partenariat avec la société de tunneliers Herrenknecht a permis de développer à un stade très avancé, les tâches de base comme les tâches connexes telles que les approvisionnements et mise en œuvre des systèmes de précontrainte ou encore du remblai de lestage.

Le remblaiement de la structure du tunnel est tout à

fait similaire à celui de la méthode conventionnelle. Comme le dragage de la souille, il est réalisé sans interface directe avec la construction du tunnel proprement dite.



### Lancement et fin de construction du tunnel

Aux extrémités de l'ouvrage, des tranchées ouvertes d'accès au tunnel sont réalisées et prolongées par des puits de lancement et d'arrivée sous forme de batardeaux. Ces derniers permettent l'installation et le retrait du bouclier et la réalisation des connexions entre les extrémités du tunnel et ses tympans.

Le train suiveur, quant à lui, est installé dans ladite tranchée ouverte.

Une fois accomplies les tâches préalables au lancement, le batardeau est noyé et démantelé pour faire place à la progression de la machine et du tunnel.

À l'extrémité de celui-ci, les opérations inverses sont effectuées.

### ■ Les intérêts du concept

Outre des économies très significatives de coût et de durée de construction, se dégagent du concept (face à la méthode traditionnelle des grands caissons immergés) les intérêts suivants :

- absence d'interruption de la navigation inhérente aux séquences d'immersion;
- absence de darse et de besoin d'emprise pour en créer une le cas échéant;

Figure 4

Lestage interne du tunnel

*Internal ballasting of the tunnel*

### TIMBY. Un nouveau concept de tunnel immergé

- travaux de nivellement du fond de forme de la souille automatisés et intégrés à la machine;
- simplification des ouvrages d'accès, réduits à de simples tranchées ouvertes;
- environnement préservé;
- sécurité de construction;
- techniques mises en œuvre déjà éprouvées.

Pour ces travaux de développement, l'équipe Timby a obtenu le premier prix de l'Innovation attribué par le syndicat des entrepreneurs de travaux publics de France (FNTP).

Par ailleurs, il recueille un écho très positif auprès des donneurs d'ordre et ingénieries, en France comme à l'international. ■

#### ABSTRACT *TIMBY. A new submerged tunnel concept*

*P. Longchamp, Ph. Autuori, P. Palbras*

*Rivers and straits are limiting the mobility and therefore the growth especially in areas with dense population. Bridges and Tunnels – build as immersed tube or bored tunnel – overcome these restriction, therefore they are a key element for further development of a region.*

*Such infrastructure projects are a significant challenge under technical, economical and environmental aspects.*

*With TIMBY (Tunnel IMmersed BY Bouygues) Bouygues together with Herrenknecht AG are presenting a new concept to overcome these challenges. The following describes the based on experienced solutions but nevertheless in total innovative nature of the TIMBY concept.*

#### RESUMEN ESPAÑOL *TIMBY. Nuevo concepto de túnel sumergido*

*P. Longchamp, Ph. Autuori y P. Palbras*

*Ríos y estrechos constituyen obstáculos para el tráfico, especialmente en las zonas de elevada densidad de población.*

*Puentes y túneles excavados o sumergidos permiten salvar estos obstáculos y forman elementos clave en términos de desarrollo regional.*

*Mediante el concepto "TIMBY" Bouygues TP y su asociado Herrenknecht AG presentan un nuevo método de construcción de túnel sumergido, innovadora sin duda alguna, pero además fundada en diversas técnicas perfectamente dominadas en otros contextos de construcción.*

# Environnement et industrie nucléaire : étude de la fabrication de blocs de béton sodé



**Marie-Claire Magnié**  
Directeur adjoint  
Inertec

L'activité de la centrale de Creys-Malville, prototype industriel de la filière à neutrons rapides, a été arrêtée définitivement en 1998 sur décision gouvernementale. Électricité de France (EDF) procède à sa déconstruction.

Pour cette opération de déconstruction il faut éliminer le sodium utilisé comme fluide caloporteur. L'orientation retenue à ce jour par EDF - Ciden consiste à procéder en deux étapes : une étape d'hydrolyse pour transformer le sodium liquide en soude et une étape de stabilisation-solidification pour transformer la soude faiblement active en un solide compatible avec un stockage à long terme.

La stabilisation-solidification a fait l'objet d'études de faisabilité depuis 2000, par le laboratoire interne EDF - Ceidre/TEGG, puis, à partir de 2002, conjointement avec Inertec (filiale de Solétanche Bachy et de Sita). L'article décrit le processus de mise au point et les conditions de mise en œuvre d'une telle solution.

## ■ Introduction

Dans le cadre de la déconstruction de la centrale de Creys-Malville s'est posée très rapidement la question de l'élimination du sodium liquide utilisé comme fluide caloporteur dans les circuits primaire et secondaire pour ce type de filière.

L'orientation retenue par EDF - Ciden consiste à éliminer ce sodium en deux phases; une phase d'hydrolyse, afin de transformer le sodium liquide en solution aqueuse de soude de molarité 10 N, puis une phase de stabilisation-solidification, afin de transformer la soude faiblement active en un produit solide stabilisé compatible avec un stockage pour déchets très faiblement actifs.

La stabilisation/solidification de soude concentrée pose plusieurs problématiques : exothermicité lors du mélange et pendant la prise, rhéologie, vitesse de prise, rétention de la soude. Dans ce contexte, des études de faisabilité ont été entreprises depuis 2000 par le laboratoire interne d'EDF - Ceidre/TEGG et depuis 2002 en collaboration avec le laboratoire d'Inertec afin :

- de développer et mettre au point des formules pour le traitement de la soude, permettant de maximiser le taux d'incorporation du sodium, tout en respectant les critères d'industrialisation du procédé;
- de valider ces formules à l'échelle industrielle par la réalisation de blocs pilotes de 1 m<sup>3</sup>;
- d'étudier le domaine de validité des formules, en testant l'influence des principaux paramètres, pouvant

varier à l'échelle industrielle, sur les caractéristiques du mélange et ses performances.

## ■ Méthodologie

### Cahier des charges et orientation du projet

La nature du résidu à traiter a conduit EDF à prendre un certain nombre d'orientations :

- l'unité de transformation du sodium en soude aqueuse ainsi que l'unité de stabilisation-solidification seront sur le même site et doivent donc avoir des cadences de production compatibles;
- pour permettre une décroissance naturelle de l'activité des blocs, ils seront préalablement entreposés à Creys avant leur transfert vers des filières de stockage adaptées; cette orientation fixe donc pour le traitement un certain nombre de spécifications :
  - > la réversibilité de l'entreposage impose le conditionnement de la soude traitée en blocs permettant l'évacuation vers les filières de stockage adaptées,
  - > l'admission de déchets sur les filières de stockage adaptées est soumise au respect de critères chimiques, similaires aux critères d'acceptation sur les centres de stockage de déchets dangereux, qui reposent sur un essai de lixiviation, dont la nature dépend des caractéristiques physiques du déchet considéré (résistance à la compression),
  - > de façon générale dans le domaine nucléaire, un confinement maximal de tous les produits actifs est recherché, ce qui conduit à des critères spécifiques de mise en œuvre (par exemple contrôle de la ressuée).

En tenant compte de ces spécifications mais de façon à limiter le nombre de blocs à manipuler, EDF s'est orienté vers la confection de blocs massifs de 1000 litres. Cependant, compte tenu de la réactivité d'une solution aqueuse de soude de molarité 10 N, l'élaboration de tels blocs n'est pas aisée. Les difficultés de mise en œuvre concernent en particulier :

- la viscosité du coulis et son évolution à court terme, évaluées par la détermination d'une *durée pratique d'utilisation* (DPU);
- l'obtention dès les premiers jours (moins de 7 jours) de performances mécaniquement suffisantes pour permettre une évacuation des blocs de la zone de fabrication vers la zone d'entreposage;
- la limitation de la température maximale lors de la prise, pour permettre le bon déroulement des réactions d'hydratation des liants;
- l'absence ou au moins la limitation de l'exsudation (gage de la stabilité du coulis et de maîtrise de la propriété radiologique des installations);

**Jean-Yves Cojan**  
Directeur technique  
Inertec

**Marie-Armelle Aubry**  
Chef de projet  
Inertec

**Patrick Guichard**  
Ingénieur  
Inertec

**Gaëtan Gallo**  
Ingénieur  
EDF - Ciden

**Christian Jacquemmoz**  
Ingénieur  
EDF - Ceidre/TEGG

**Alain Jeanpierre**  
Ingénieur  
EDF - Ceidre/TEGG

**Philippe Teixeira**  
Technicien  
EDF - Ceidre/TEGG

Environnement et industrie nucléaire : étude de la fabrication de blocs de béton sodé



Photo 1  
Mesure de la fluidité  
*Fluidity measurement*



Photo 2  
Mesure de la ressuée  
*Bleeding measurement*

Photo 3  
Remplissage d'éprouvettes  
*Filling test tubes*



Photo 4  
Essai de lixiviation  
*Leaching test*



- le respect des critères d'acceptation sur les filières de stockage adaptées concernant la lixiviation (en particulier fraction soluble inférieure à 10 %).

Ainsi, dans le cadre des études de faisabilité, en plus des critères réglementaires d'acceptation sur les filières de stockage adaptées, des valeurs limites ont été fixées pour les autres paramètres : une résistance à la compression mesurable dès 1 jour et suffisante pour la manutention après une semaine, une DPU minimale de 60 minutes, une température maximale à cœur du bloc de 85 °C, une ressuée inférieure à 1 %.

**Étude préliminaire au laboratoire**

Plusieurs formules faisant appel à des principes de traitement différents ont été proposées à l'issue de premiers essais menés par le laboratoire EDF - Ceidre/TEGG. Étant donné le manque de retour d'expérience sur la stabilisation-solidification d'une solution aqueuse de soude aussi concentrée, le choix a été fait de tester rapidement ces formules à une échelle préindustrielle, pour mieux évaluer leur comportement surtout par rapport aux problèmes d'échauffement lors de la prise.

À l'échelle pilote, les tout premiers essais ont conduit à des difficultés sur plusieurs paramètres : les principes de traitement ont été revus en conséquence et un second plan expérimental a été mis en place au laboratoire, avec la définition de critères pour chacun des paramètres apparus comme importants au cours de ces premiers essais.

Compte tenu du caractère innovant de l'objectif recherché, du manque de retour d'expérience et des difficultés de l'extrapolation des résultats obtenus au laboratoire pour estimer ceux de l'échelle pilote, le développement de formules a été effectué par itérations en travaillant sur des quantités différentes et en réalisant des allers-retours en fonction des observations réalisées pour ajuster le traitement.

Au fur et à mesure de la réalisation des différents essais, une méthodologie a été élaborée pour sélectionner les coulis fabriqués au laboratoire. Chaque coulis a été caractérisé au minimum par :

- la fluidité, estimée en mesurant des temps d'écoulement de 1,5 litre de coulis dans le cône de Marsh selon la norme NFP 18358 (photo 1);
- la masse volumique du mélange frais, déterminée à 15 minutes;
- les mesures de ressuée réalisées sur tube après 3 heures et 24 heures de maturation selon la norme NFP 18359 (photo 2);
- l'échauffement maximal déterminé en enregistrant l'évolution de la température (température maximale et délai d'obtention) au cœur d'une éprouvette cylindrique 160 mm x 320 mm lors de sa prise (photo 3);

- les mesures de résistance à la compression ( $R_c$ ) après 7, 28 et 91 jours de maturation sur les cylindres de 40 mm x 80 mm, conservés fermés jusqu'à l'échéance, ainsi que l'obtention du caractère solide massif après un délai de maturation d'au maximum 91 jours (mesure de  $R'_c$ ,  $R'_t$ );
- la réalisation d'essais de lixiviation selon la norme X 31-211 (photo 4) après au maximum 91 jours de maturation sur les cylindres de 40 mm x 80 mm, conservés fermés jusqu'à l'échéance et analyse, sur les lixiviats, des paramètres réglementaires d'acceptation sur les filières de stockage adaptées; les essais de lixiviation ont été adaptés en cours d'étude après la publication de l'arrêté ministériel du 30 décembre 2002 concernant le stockage de déchets dangereux (essai d'une durée de 24 heures, avec un ratio liquide/solide de 10 par rapport à la matière sèche).

### Étude du domaine de validité

La deuxième étape du développement du procédé de traitement concerne l'étude du domaine de validité des formules sélectionnées suite à l'étude préliminaire au laboratoire, dites formules nominales : il s'agit en effet d'étudier quelles sont les conséquences sur les performances du traitement de variations de paramètres du procédé industriel tels que la température ou les incertitudes de dosages des constituants, la concentration de la solution aqueuse de soude et le taux d'incorporation du sodium. Pour chaque formule sélectionnée, une série de « formules dérivées » a été réalisée et caractérisée pour estimer l'influence de différents paramètres, tels que :

- température des constituants;
- plage de molarité de la soude, conformément aux spécifications de l'unité d'hydrolyse du sodium;
- incorporation d'eau correspondant au lavage de l'installation;
- incertitude sur la pesée des différents constituants du mélange.

Compte tenu de la radioactivité de la soude, il est impératif d'obtenir un produit traité sans ressuage en surface du bloc. Ce paramètre a été particulièrement étudié en réalisant des formules « dérivées » combinant deux variables, aux valeurs a priori considérées comme les plus pénalisantes pour le ressuage, à savoir des incertitudes de pesées conduisant à une augmentation du rapport constituants liquides/constituants solides, et une introduction maximale d'eau de lavage.

### Validation à l'échelle préindustrielle

Dans un troisième temps, des essais ont été réalisés à l'échelle préindustrielle pour valider la mise en œuvre du traitement.



Photo 5

Prise en masse du mélange dans le mélangeur

*Bodying of the mixture in the mixer*

Les objectifs de ces essais étaient :

- d'acquérir des données permettant de caler les résultats obtenus au laboratoire à ceux obtenus lors de la fabrication des blocs de 1 000 litres à l'échelle préindustrielle;
- de définir un mode de mise en œuvre industriel, facteur aussi essentiel que la définition des réactifs pour assurer la qualité d'un traitement.

Ces essais ont été réalisés sur le site expérimental d'Inertec à Vernon (Eure - 27). Les blocs ont aussi été caractérisés selon la même méthodologie, présentée plus haut.

## ■ Principaux résultats

### Étude préliminaire

Lors des tout premiers essais, des difficultés de mise en œuvre ont été rencontrées, avec des mélanges qui figeaient très rapidement et qui conduisaient à un échauffement important :

- certaines des formules figeaient dès l'arrêt de l'agitation dans le mélangeur, ce qui ne permettait pas de les vidanger, donc a fortiori de les couler dans un coffrage (photo 5);
- en parallèle, un échauffement important était observé (par exemple, dans un bloc de 380 litres, une température maximale de 120 °C a été mesurée).

Il a donc fallu ajuster les formules pour ralentir le début de prise.

Après de nombreux essais en laboratoire (sur l'ensemble du projet plus de 200 essais ont été réalisés), plusieurs formules ont été retenues satisfaisant à l'ensemble de ces critères de mise en œuvre et d'acceptation réglementaire (hors critères radiologiques, ces essais étant réalisés avec de la soude inactive).

Réalisées au laboratoire à 20 °C ( $\pm 3$  °C), ces formules, à base de liants hydrauliques, sont faciles à mettre en œuvre avec un outil de mélange de type Rayneri.

Environnement et industrie nucléaire : étude de la fabrication de blocs de béton sodé

Critères mesurés		Formule a	Formule b	Valeurs limites
T°C des constituants (°C)		20.0 °C	19.6 °C	
Taux d'incorporation Na (kg/m <sup>3</sup> )		147.5	151.6	
Fluidité NFP18358	T <sub>0</sub> +60 min	13''3	30''5	< 1'
Fin de prise	Rc à 1 jour (MPa)	1.4	0.7	
Mv du mélange frais (kg/m <sup>3</sup> )		1650	1830	
Ressuage sur tube	24 h	0	0	<1%
Echauffement maximum sur éprouvette 11 cm x 22 cm	T° max (°C)	51.6	54.7	< 85.0
	Temps	T <sub>0</sub> + 8h35	T <sub>0</sub> + 11h50	
Rc 7 j	MPa	3.6	9.9	
Rc 28 j	MPa	4.4	10.0	
Rc 91 j	MPa	4.2	12.0	> 1
Rt 7 j	MPa	0.4	0.9	
Rt 91 j	MPa	0.5	0.7	< 0.1
XP X 31-211 à 28 jours	pH	12.6	12.8	
	FS (%)	7.9	5.5	
XP X 31-211 à 91 jours	pH	12.4	12.8	4-13
	FS (%)	7.4	5.5	<10

Tableau I

Tableau des caractéristiques principales

Table of main properties



Photo 6

Mise en place de thermocouple pour suivre l'échauffement lors de la prise d'un bloc d'environ 250 l de coulis sodé

Installation of a thermocouple to monitor temperature rise during setting of a block of about 250 litres of soda-base grout



Photo 7

Acquisition automatique de la température pendant la prise  
Automatic temperature acquisition during setting



Photo 8

Démoulage d'un bloc après 24 heures

Demoulding a block after 24 hours



La caractérisation des coulis a été effectuée à 20 °C (± 3 °C). Le tableau I présente les résultats obtenus pour deux des formules testées ensuite à l'échelle pré-industrielle.

Domaine de validité

Suite aux études réalisées, il apparaît que la température des constituants et la concentration de la solution ont une influence importante sur la DPU et sur les critères d'acceptation en centre de stockage :

- une augmentation de la température de la soude limite la durée pratique d'utilisation du mélange obtenu (le temps d'écoulement mesuré est jusqu'à deux fois plus important que celui mesuré à 20 °C) ;
- une solution de soude très concentrée conduirait au dépassement du seuil de fraction soluble fixé pour l'acceptation sur les filières de stockage adaptées.

Les autres paramètres testés relatifs à la dilution et aux incertitudes de pesée ont une influence moindre sur les caractéristiques des coulis frais et durcis.

Les tendances observées sont les mêmes quelle que soit la formule testée, ce qui permet de préciser des plages admissibles pour différents paramètres opérationnels.

Essais pilotes

Lors des premiers essais réalisés, il avait été envisagé de réaliser un colis de 1000 litres en plusieurs (2 ou 3) gâchées afin de limiter l'échauffement du cœur du bloc. L'objectif de ces essais était de déterminer le volume maximal d'une gâchée permettant de respecter une température maximale à cœur inférieure à 85 °C. Un suivi de la température a été mis en place en plusieurs points des blocs fabriqués (photos 6 et 7).



Photo 9

Vue d'un bloc démoulé  
View of a demoulded block

Les améliorations des formules permettent à présent de fabriquer un bloc de 1 000 litres en une fois en respectant les critères de DPU et d'échauffement.

Des blocs de 1 m<sup>3</sup> ont été fabriqués (photos 8 et 9) suivant les formulations retenues à la suite des essais de laboratoire, qui reposent sur des principes différents. Les essais sur coulis frais ont été repris à l'identique à ceux réalisés précédemment lors de l'étude au laboratoire.

Des éprouvettes conservatoires ont également été confectionnées lors du coulage des blocs. Des mesures de résistance à la compression (Rc) ont été réalisées sur ces éprouvettes, ainsi que des essais de lixiviation selon la norme X 31-211 après 28 et 91 jours de maturation. Les résultats confirment le respect des objectifs recherchés.

### ■ Conclusion - Avancées technologiques

Cette étude a permis de développer deux formules références assurant l'incorporation de 150 kg de sodium dans un bloc de 1 m<sup>3</sup> conditionné dans un big-bag. Ces blocs ayant obtenu une acceptabilité de la part de l'Andra, la solution a été retenue par EDF - Ciden comme solution de référence pour la cimentation de la soude 10 N. Un brevet commun EDF-Inertec a été déposé en 2005, recouvrant l'ensemble des formules développées.

Le projet de traitement du sodium est actuellement en phase de fin d'études d'exécution et les premiers travaux de génie civil ont débuté pour l'installation de cimentation, en salle des machines de Creys.

La mise en service industrielle de l'installation est prévue en 2008. ■

### ABSTRACT Environment and nuclear industry : research on the manufacture of soda-base concrete blocks

Various authors

The Creys-Malville power station, an industrial prototype for the fast neutron process, was shut down permanently in 1998 upon a decision by the government. Électricité de France (EDF) is carrying out its deconstruction.

For this deconstruction operation, the sodium used as heat-transfer fluid must be eliminated.

The approach currently adopted by EDF - Ciden is to proceed in two stages : a stage of hydrolysis to convert the liquid sodium into soda, and a stage of stabilisation/solidification to convert the weakly active soda into a solid compatible with long-term storage.

Stabilisation-solidification has been the subject of feasibility studies since 2000, performed by the EDF - Ceidre/TEGG internal laboratory, and then, from 2002 on, jointly with Inertec (subsidiary of Solétanche Bachy and Sita). The article describes the development process and the conditions of application of such a solution.

### RESUMEN ESPAÑOL Medio ambiente e industria nuclear : estudio de la fabricación de bloques de hormigón a base de sodio

Autores diversos

La actividad de la central de Creys-Malville, prototipo industrial de la familia de reactores de neutrones rápidos, fue parada de forma definitiva en 1998 por decisión gubernamental. Électricité de France (EDF) procede a su desmantelamiento.

Para esta operación de desmantelamiento es preciso eliminar el sodio utilizado como fluido de refrigeración. La orientación adoptada en la fecha actual por EDF - Ciden consiste en proceder en dos etapas : una etapa de hidrólisis para transformar el sodio líquido en sosa y una etapa de estabilización/solidificación para transformar la sosa de reducida actividad en un sólido compatible con un almacenamiento a largo plazo.

La estabilización-solidificación ha sido objeto de estudios de factibilidad desde 2000, por parte del laboratorio interno EDF - Ceidre/TEGG, y a continuación, a partir de 2002, conjuntamente con Inertec (filial de Solétanche Bachy y de Sita). En el presente artículo se describen el proceso de elaboración y las condiciones de implementación de semejante solución.

# Geomix, technique pilotes du Havre et

Le procédé Geomix est un nouveau procédé de soil mixing profond qui en étend considérablement le champ d'application : paroi d'étanchéité, paroi de soutènement, amélioration, stabilisation, dépollution des sols et des nappes en place.

Le procédé Geomix consiste à mélanger le sol en place au moyen d'un outil, le CSM (Cutter Soil Mixing) issu des techniques Hydrofraise, qui peut être monté sur une large gamme de porteurs.

Une famille de matériaux optimisés associée à des moyens de supervision et de contrôle spécifiques a été développée de façon à garantir l'homogénéité et les caractéristiques mécaniques et chimiques du mélange obtenu.

Le procédé Geomix a reçu le prix de l'innovation de la FNTP en 2007.

Le développement et la rénovation des grands centres urbains constituent le premier marché du secteur de la construction et l'adaptation des techniques traditionnelles des fondations profondes aux exigences particulières de ce marché est l'un des axes prioritaires de R&D de Solétanche Bachy. On peut distinguer trois grandes classes d'exigence :

- les nuisances à l'environnement de la ville doivent être minimales : poussières, bruit, vibrations, impact sur les nappes phréatiques. Ces contraintes spécifiques s'ajoutent aux exigences de respect de l'environnement en général : réduction des consommations en énergie, en matériaux, réduction des gaz à effet de serre ;
- les emprises sont exigües et difficiles d'accès : les outillages doivent être de petite taille, les équipements annexes doivent être réduits. Un minimum d'outillages doit être utilisé pour effectuer les travaux. Les déchets sont difficiles à évacuer et doivent être réduits ;
- la performance des outillages doit être excellente afin de réduire la durée des chantiers et satisfaire les exigences économiques, en particulier lorsque la perforation rencontre des blocs ou des obstacles enterrés dans le sol.

Depuis plusieurs années, Solétanche Bachy effectue des recherches permettant de définir de nouvelles méthodes polyvalentes de construction de fondations en milieu urbain, plus économiques et plus respectueuses de l'environnement. Le procédé Geomix est l'un des résultats de cette stratégie de développement.



Photo 1

L'outil CSM conçu et fabriqué par Solétanche Bachy

The CSM tool designed and manufactured by Solétanche Bachy

La littérature montre que les résultats obtenus dans la pratique sont loin de remplir réellement cet objectif. La diversité des outillages actuels reflète cet état de fait et montre bien qu'aucune solution réellement satisfaisante n'a été obtenue.

L'hétérogénéité et la variété des terrains rencontrés jusqu'ici ont également sensiblement ralenti le développement de la méthode en Europe de l'Ouest, et notamment en France. Les outillages généralement entraînés depuis la surface par un ou plusieurs axes de rotation sont peu adaptés pour le forage de terrains durs ou pour la traversée d'obstacles enterrés.

Ces difficultés de forage et de malaxage, liées principalement à l'utilisation de tarières d'axe vertical, peuvent être résolues par l'emploi de machines à tambours horizontaux tels que ceux qui sont utilisés sur l'Hydrofraise.

C'est ainsi que le procédé Geomix étend le deep mixing au moyen de trois innovations principales :

- un outil, le CSM (Cutter Soil Mixing) ;
- un système de supervision et de pilotage ;
- une gamme de matériaux incorporés dans le sol.

## ■ L'outillage CSM

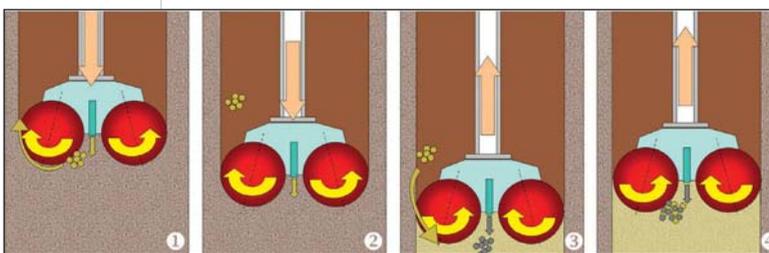
La conception de l'outillage Cutter Soil Mixing reprend la technologie de l'Hydrofraise développée pour le forage des parois moulées, caractérisée par :

- une perforation assurée par deux paires de tambours rotatifs munis de pics ;
  - des moteurs hydrauliques intégrés dans les tambours.
- Cependant, le procédé Geomix introduit deux caractéristiques bien différentes :

Figure 1

Principe du procédé Geomix

Principle of the Geomix process



## ■ Geomix, une nouvelle génération de soil mixing profond

Parmi les enjeux spécifiques au développement des techniques de fondations en milieu urbain, il apparaît en particulier que celles-ci doivent s'affranchir au mieux des contraintes liées aux boues de forage et à l'élimination des boues excavées. Le soil mixing profond répond à ces enjeux, en laissant le sol en place et en le mélangeant avec un liant.

L'obtention d'un mélange uniforme et intime entre le liant et le sol en place est le point critique de la technique du soil mixing profond. Les données disponibles

# innovante. Les chantiers de Miami



**Serge Borel**  
Directeur Recherche  
et Développement  
Solétanche Bachy



**Jean-Pierre Hamelin**  
Chef du service  
Techniques Avancées  
de Production  
Solétanche Bachy



Photo 2  
Geomix sur ABI 18/20  
Geomix on ABI 18/20

- les débris de sol ne sont pas évacués. Cette caractéristique simplifie considérablement l'outillage puisqu'il n'est plus nécessaire de remonter ces déblais en surface ni de les évacuer en décharge.

On supprime ainsi le circuit de retour de boue et le circuit de dessablage;

- les débris de sol sont malaxés dans la tranchée avec un liant. Les tambours doivent être conçus spécialement pour assurer de façon optimale les deux fonctions de forage et de malaxage.

Ainsi, ces recherches qui ont été menées ont conduit au principe général suivant (figure 1) :

- lors de la perforation, le terrain est déstructuré par l'action de l'outillage CSM et les produits d'excavation sont ensuite déplacés vers le dessus de la tête de coupe;
- lors de la remontée, le mouvement de la machine permet de déplacer le mélange du dessus vers le dessous de l'outillage où il est mélangé au liant injecté via un système de buses situées entre les deux tambours.

La configuration de l'outil est particulièrement compacte et ouverte (photo 1), notamment grâce à la



Photo 3  
Geomix sur Casagrande B 250  
Geomix on Casagrande B 250

position des moteurs hydrauliques qui sont situés à l'intérieur des tambours. Le rendement énergétique est optimal, favorisant un mélange efficace du sol et réduisant les risques de coincement, notamment lors de la remontée de l'outil.

L'outillage CSM est compatible avec de nombreux types de porteurs :

- foreuses de pieux de puissance moyenne (photos 2 et 3);
- pelles hydrauliques équipées de mât télescopique;
- grues de manutention du type de celles fréquemment utilisées sur les chantiers (photo 4).

## ■ Le système de supervision

Le système de supervision, développé pour le procédé Geomix, est un élément essentiel pour garantir la qualité de l'ouvrage construit. Il a pour fonction principale de contrôler simultanément et en temps réel les deux paramètres clés du procédé : l'homogénéité du mélange sol-liant hydraulique et la quantité de liant injectée dans le volume de sol traité.



Photo 4  
Geomix sur Liebherr 855  
Geomix on Liebherr 855

Geomix, technique innovante. Les chantiers pilotes du Havre et de Miami

Photo 5  
Supervision Geomix  
Geomix supervision

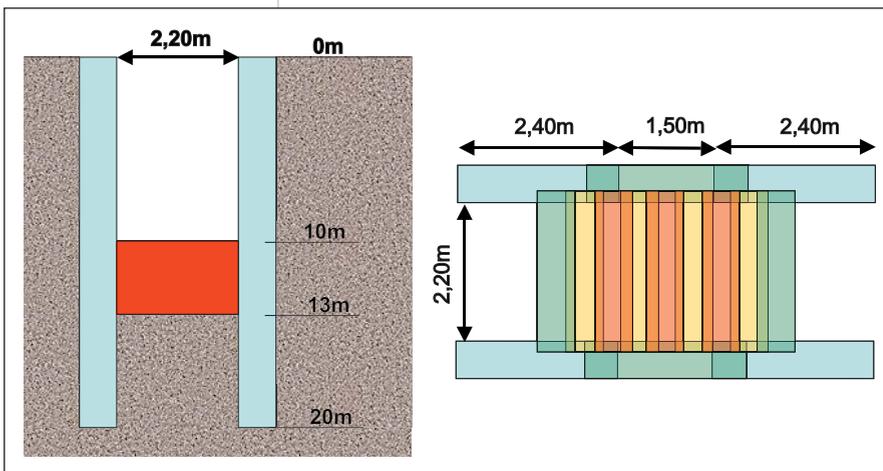


Figure 2  
Puits Geomix sur le chantier du Havre  
Geomix shaft on the Le Havre project

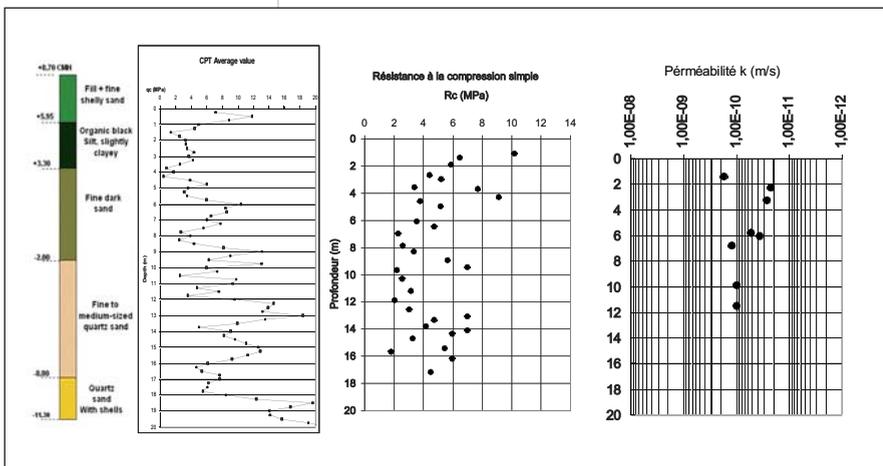


Figure 3  
Caractéristiques du Geomix - Chantier du Havre  
Geomix characteristics - Le Havre project



Le système de supervision utilisé dans le procédé Geomix inclut une série de capteurs (une vingtaine, suivant le type de porteur) embarqués sur la tête de forage et en surface, pilotés par un ordinateur installé en cabine, permettant l'acquisition et l'affichage des paramètres opératoires essentiels à la conduite du procédé, et l'enregistrement de ces paramètres sous forme de fichiers de données (photo 5).

En fonction des caractéristiques du sol en place (résistance, perméabilité, granulométrie, niveau de la nappe phréatique...) et des propriétés attendues du mélange final (résistance, étanchéité...), le système de supervision permet d'introduire des consignes de traitement selon la profondeur :

- la quantité de fluide injectée dans le panneau, ce qui influe principalement sur la qualité, l'homogénéité et la fluidification de la colonne de sédiments au-dessus de l'outillage ainsi que les caractéristiques finales du matériau ;
- le nombre minimal de rotations de tambours par mètre linéaire de panneau, garantissant une bonne homogénéité du mélange réalisé.

Ces consignes sont représentées graphiquement et comparées en permanence avec les valeurs mesurées en temps réel. Par ailleurs, le système affiche en permanence les déviations de l'outillage dans les directions gauche-droite et avant-arrière. Les premières peuvent être corrigées en jouant ponctuellement sur le sens ou la vitesse de rotation des tambours. Les secondes sont en relation directe avec la qualité du guidage et la rigidité du kelly et peuvent être corrigées en modifiant par exemple l'inclinaison du mât de guidage. Le traitement au bureau des paramètres de réalisation permet de fournir aux partenaires du projet une appréciation synthétique complète de la qualité du produit final.

■ La gamme de matériaux Geomix

L'intérêt principal de Geomix est de réutiliser le sol excavé pour l'incorporer dans l'ouvrage final. Plusieurs possibilités sont offertes pour transformer les caractéristiques du sol en fonction de la finalité de l'ouvrage :

- deux buses d'injections placées au niveau des tambours permettent d'incorporer simultanément deux produits tels qu'un liant hydraulique, des additifs, un réactif chimique ou biologique ;
- à la fin de chaque panneau, il est possible d'introduire une armature : le plus souvent un profilé métallique ou un panneau préfabriqué.

Ainsi, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage final et du sol en place, le procédé Geomix permet de mettre en œuvre une large gamme de matériaux :

- coulis plus ou moins dosés en ciment, avec additifs ou non ;

- boue de bentonite ou de polymères;
- réactifs chimiques;
- incorporation de fibres ou d'armatures métalliques.

Le choix de la méthode de travail et des matériaux adaptés à chaque projet est le fruit d'une optimisation technique et économique.

Dans ce domaine, l'expérience 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 2 à 12 MPa et des valeurs de perméabilité de  $10^{-8}$  m/s à  $10^{-10}$  m/s.

Ces valeurs sont directement en relation avec la quantité de liant hydraulique présent au final dans le mélange. Lorsque des valeurs de résistance à la compression élevées sont visées, l'utilisation de coulis à haute teneur en ciment permet de réduire fortement les volumes de fluide mélangés au terrain et limite ainsi la quantité de déblais produits lors de la construction dans une fourchette allant de 0 % à 30 % du volume de sol traité.

### ■ Le plot d'essai du Havre

Le procédé Geomix a été expérimenté pour la première fois en France en 2005, sur le site du chantier Port 2000 du Havre. Le plot d'essai était situé dans l'enceinte du Port Autonome du Havre, dans une zone constituée de remblais hydrauliques qui comportent des sables fins avec des lentilles de limon noir surmontant des sédiments marins en place.

Ce test a en outre été l'occasion de vérifier que le procédé Geomix permet de maîtriser les propriétés rhéologiques du mélange sol/fluide, en particulier en présence de phénomènes d'essorage dans les couches de terrain perméables.

Lors de ce test sur chantier, une trentaine de panneaux Geomix ont été réalisés, dont une vingtaine jusqu'à 20 m de profondeur.

Après exécution des panneaux préliminaires, un puits rectangulaire profond de 20 m comportant un radier d'étanchéité de 3 m d'épaisseur a été construit en matériau Geomix (figure 2).

Ce puits rectangulaire a fait l'objet de nombreux contrôles pendant sa réalisation et après durcissement, puis d'une excavation partielle permettant notamment de montrer un recouvrement parfait entre primaires et secondaires et un bon aspect des panneaux après excavation.

Des essais réalisés à la suite de carottages dans la paroi ont démontré une résistance à la compression simple supérieure à 2 MPa et une perméabilité de l'ordre de  $10^{-10}$  m/s (figure 3).

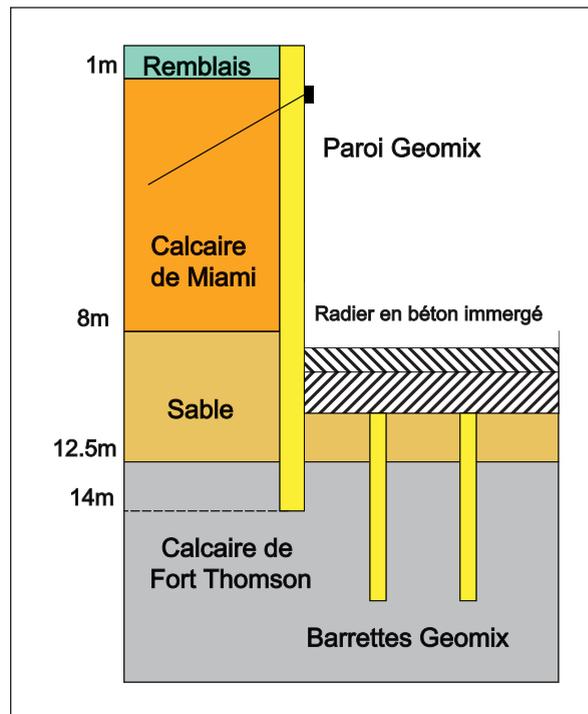


Figure 4

Coupe de principe de la paroi Geomix - Chantier de Miami  
Schematic cross section of the Geomix wall - Miami project

### ■ Le chantier pilote de Miami

Une seconde validation du procédé a été effectuée en milieu urbain lors de la préparation d'un chantier Geomix dans la banlieue de Miami en février et mars 2006. Il s'agit d'un projet de parking souterrain de trois niveaux situé dans le centre de Miami (figure 4). Le site du chantier de Miami présente des caractéristiques inhabituelles : en effet, il est constitué d'une couche de calcaire tendre et friable, surmontant une couche de sables lâches entre 8 et 12 m de profondeur, puis le calcaire de Fort Thomson, nettement plus résistant. La difficulté particulière résulte de la porosité des deux couches de calcaire, qui rend problématique l'exécution de travaux sous nappe. Plus spécifiquement, cette particularité interdisait jusqu'à maintenant la réalisation de structures souterraines profondes dans des conditions de fiabilité et d'économie satisfaisantes : pertes de boue excessives avec les parois moulées; impossibilité de battre des palplanches sans préforage préalable.

L'outillage Geomix est particulièrement adapté à la stratigraphie de Miami, car la conception de l'outil le rend peu vulnérable aux aléas liés aux pertes de boue. En effet, d'une part les matériaux denses présents en permanence dans la tranchée favorisent le colmatage des vides rencontrés, d'autre part l'outil n'est pas sujet au coincement car il est capable de forer vers le haut comme vers le bas.

Le plot d'essais a permis de démontrer :

- la capacité du procédé Geomix à réaliser dans les terrains calcaires hétérogènes, un ouvrage de soutè-

Geomix, technique innovante. Les chantiers pilotes du Havre et de Miami

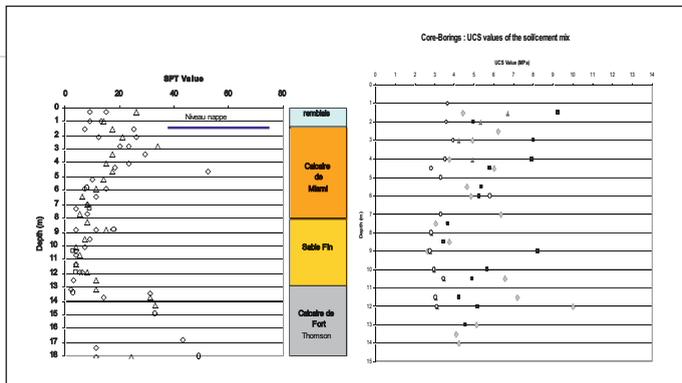


Figure 5  
Caractéristiques du Geomix - Chantier de Miami  
Geomix characteristics - Miami project

- nement pour la construction d'un des premiers parkings souterrains de Miami;
- la mise en œuvre particulièrement simple de l'outillage sur un porteur équipé d'un mât télescopique, et la rapidité de la mobilisation dans un délai de moins de 48 heures;
- le volume de déblais produit représentait moins de 10 % du volume excavé.

La résistance à la flexion de la paroi est obtenue au moyen de profilés en acier, mis en place dans des panneaux Geomix à l'aide d'une simple grue de maintenance, sans l'aide d'aucun dispositif de vibration. Des carottages réalisés dans la paroi ont permis de contrôler que les résistances et perméabilités obtenues sont conformes aux spécifications du projet, avec en particulier une résistance à la compression simple de 2,5 MPa au minimum (figure 5).

■ Conclusion

Simple en apparence, le principe du soil mixing requiert, dans sa mise en œuvre, une grande rigueur, un matériel éprouvé et un tour de main infallible. Il ne souffre pas l'improvisation hâtive. La difficulté, qui croît évidemment avec la profondeur et la variabilité du sol, réside essentiellement dans l'homogénéité du mélange et dans la continuité entre panneaux. Geomix, procédé innovant de Solétanche Bachy désormais entré dans sa phase industrielle, associe un outillage CSM dérivé de la technologie Hydrofraise, un système de supervision très élaboré et une gamme de liants variée. Geomix s'inscrit dans la stratégie d'innovation et de développement durable de Solétanche Bachy. ■

ABSTRACT  
Geomix, an innovative technique. The pilot projects of Le Havre and Miami

S. Borel, J.-P. Hamelin

The Geomix process is a new deep soil mixing process which considerably extends its scope of application : cutoff walls, retaining walls, and in-situ soil and groundwater amendment, stabilisation and decontamination.

The Geomix process involves mixing the in-situ soil using a tool, the CSM (Cutter Soil Mixing), based on the hydro-cutter technology, which can be mounted on a wide range of carriers. A family of optimised materials together with special supervision and monitoring facilities has been developed to ensure the homogeneity and mechanical and chemical properties of the mixture obtained.

The Geomix process received the Prize for Innovation of the French Public Works Federation (FNTP) in 2007.

RESUMEN ESPAÑOL  
Geomix, técnica innovadora. Las obras piloto de Le Havre y de Miami

S. Borel y J.-P. Hamelin

El procedimiento Geomix es un nuevo procedimiento de soil mixing profundo que permite ampliar considerablemente el campo de aplicación : pared de hermeticidad, pared de contención, mejora, estabilización, descontaminación de los suelos y de las capas existentes.

El procedimiento Geomix consiste en mezclar el suelo existente por medio de una herramienta, el CSM (Cutter Soil Mixing) que se deriva de las técnicas Hidrofresa, que se puede instalar sobre una amplia gama de portadores. Se ha desarrollado una familia de materiales optimizados que combina diversos medios específicos de supervisión y de control con objeto de garantizar la homogeneidad y las características mecánicas y químicas de la mezcla obtenida.

En 2007, el procedimiento Geomix ha recibido el premio de la Innovación de la FNTP.

# La pince Accropode®



**Nicolas Durupt**  
Chef de service travaux  
GTM Terrassement



**François Arlot**  
Directeur de centre  
GTM Terrassement

**La digue de protection du bassin de navigation du port du Havre comporte une protection particulière en Accropodes®, blocs béton à formes complexes, qui s'enchevêtrent pour former une carapace résistante aux éléments. La pose des blocs de 1,5 m<sup>3</sup> (36700 unités) a fait l'objet de la création d'une pince spécifique, permettant de positionner les éléments selon différents axes sans intervention manuelle.**

**Cet outil est installé sur une pelle mécanique équipée d'un système de positionnement GPS permettant, d'une part, d'assister en continu le conducteur d'engin pour la pose de chacun des éléments (à l'aide d'un comparatif avec la position théorique sur écran), mais aussi de réaliser un contrôle continu de la pose (mémorisable sur fichier) attestant ainsi des densités de pose réalisées auprès du maître d'ouvrage.**

**Cette innovation a permis de respecter le planning général avec des cadences de pose de 21 blocs/heure pour 6 à 8 unités/heure avec une méthode traditionnelle, et ceci sans accident corporel.**

## ■ Le contexte

Le développement de cet outil s'inscrit dans le contexte de la construction des digues de protection et accès maritimes (DPAM) du projet Port 2000, au Havre. Ces travaux ont été confiés par le Port Autonome du Havre (PAH) à un groupement de sociétés du groupe Vinci, GTM Terrassement (mandataire), Dredging International, Campenon Bernard TP, Vinci Construction Grands Projets.

Ils comportaient notamment :

- les accès nautiques aux quais (chenaux et cercle d'évitement pour environ 40 millions de m<sup>3</sup>);
  - les digues d'enclôture d'environ 3 660 m permettant ensuite, après dragage, le remplissage des « casiers », terre-pleins des futurs postes à quai du port;
  - la construction d'une digue de protection du bassin et des postes à quai d'une longueur totale de 5900 m.
- Les protections des digues d'enclôture sont relativement provisoires, car elles sont protégées (à court terme) par la digue de protection et elles seront démontées (à moyen terme) pour la construction définitive des quais.

Par contre les digues de protection possèdent une structure externe conçue pour résister aux plus fortes houles et la couche supérieure de celles-ci (ou carapace) est composée de blocs Accropodes®.

## ■ Les Accropodes®

La variante technique retenue par le groupement prévoit l'utilisation du produit Accropode®, bloc béton non armé à forme complexe dont la marque déposée appartient à Sogreah.

Il est mis en œuvre par la cellule terrassement (GTM Terrassement et Entreprise Deschiron réunies), au niveau de la couche supérieure de la digue de protection, du côté exposé à la houle et peut se décliner en plusieurs tonnages, qui sont fonction des contraintes calculées.

L'assemblage des blocs entre eux constitue une carapace qui recouvre le talus de la digue de protection sur toute sa hauteur (photos 1 et 2).

Trois types d'Accropodes® sont utilisés dans la construction des 5900 m de digue de protection :

- 2000 unités de 3 m<sup>3</sup> placées sur les zones de raccordement aux musoirs, les plus sollicitées;
- 4800 unités de 2 m<sup>3</sup> pour les tronçons exposés aux houles ouest arrivant dans l'estuaire;



Photo 1

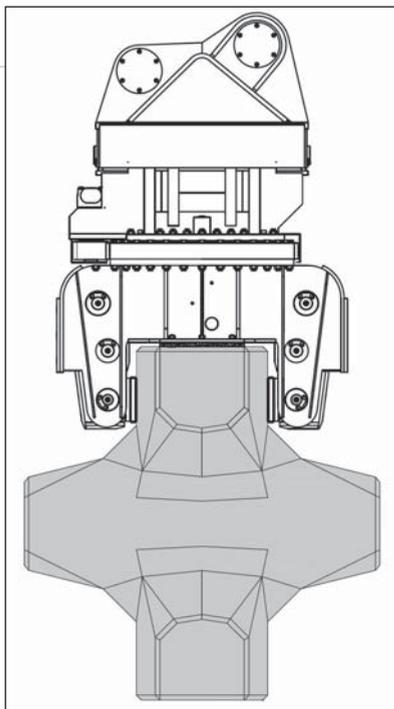
Blocs Accropodes® en position définitive  
Accropodes® blocks in final position



Photo 2

Stockage des blocs sur le site de préfabrication  
Block storage on the prefabrication site

La pince Accropode®



**Figure 1**  
Schéma du blocage de l'enclume de l'élément dans la pince  
*Diagram showing locking of the component's anvil in the clamp*

**Photo 3**

Vue d'ensemble de la cinématique, on aperçoit les antennes GPS à l'arrière de la cabine ainsi que les capteurs de mouvement en bleu au droit des articulations  
*General kinematic view; the GPS antennas can be seen to the rear of the cab, and the movement sensors in blue at the level of the joints*



- 36700 unités de 1,5 m<sup>3</sup> sur la majeure partie des autres tronçons.

Lors de la planification de la digue de protection, l'approvisionnement et la mise en œuvre des blocs Accropodes® de 1,5 m<sup>3</sup>, en plus grand nombre, entrent sur le chemin critique :

- l'avancement de la digue de protection est environ de 20 ml par jour de digue finie;
- la protection apportée par la carapace est indispensable pour protéger les couches inférieures (d'une blocométrie plus faible), de la houle;
- chaque jour le tronçon ainsi réalisé nécessite donc la mise en œuvre de plus de 200 blocs Accropodes® en suivant au plus près l'avancement du noyau de la digue, ce qui n'est pas possible avec un rendement annoncé de l'ordre de six à huit unités par heure avec les méthodes de pose traditionnelles.

Compte tenu des règles de pose figurant au cahier des charges du produit, et des cadences prévisionnelles à cette date, ces contraintes imposent au chantier une approche nouvelle sur la pose des Accropodes®.

La méthode de pose des blocs Accropodes® préconisée par le concepteur Sogreah est la mise en place à l'élingue, avec le respect des règles principales suivantes (extraites du manuel de pose) :

- une seule couche de blocs;
- maillage en losange et bonne imbrication de chaque bloc qui doit coiffer deux blocs de la ligne inférieure;
- pas de contact entre deux blocs d'une même rangée horizontale;
- chaque bloc doit être en contact avec la sous-couche et avec les deux blocs de la rangée inférieure;
- deux blocs voisins ne doivent pas avoir la même attitude ni être en contact par leur enclume;
- moins d'un tiers des blocs doivent avoir leur enclume parallèle au talus et ceux-ci sont forcément dispersés;
- la densité de pose est comprise entre 85 % et 105 % de la valeur théorique.

De surcroît, le marché impose de contrôler la densité de pose des blocs après réalisation, chaque bloc doit donc être posé précisément en x, y, z.

Outre le fait que les rendements de la pose traditionnelle sont insuffisants pour la tenue du planning, cette méthode présente des risques humains :

- elle nécessite des opérateurs au sol, d'une part pour l'élinguage sur l'engin de transport, et d'autre part dans la pente des talus constitués en enrochements pour guider les blocs pendant la pose et dégraffer l'élingue en cas de blocage;
- elle est difficilement compatible avec le travail de nuit, en environnement maritime de surcroît (figure 1).

**■ L'alternative innovante**

Au moment de la programmation de l'activité « carapace », le chantier dispose de pelles mécaniques, dont la capacité permet le levage et le maintien en bout de balancier des Accropodes® de 1,5 m<sup>3</sup>.

De plus, afin de régler les talus de la digue en construction, ces machines sont équipées d'un système de réglage GPS positionnant très précisément le godet en phase de travail comparativement au profil théorique à obtenir.

L'idée d'adjoindre à cet ensemble une pince de préhension adaptée fut émise afin de répondre à l'importance des enjeux suivants :

- mettre en œuvre les blocs Accropodes® de 1,5 m<sup>3</sup> en respectant, en une seule fois et avec un minimum de présentations, les règles d'imbrication et de densité;



Photo 4

Accropode® en cours de positionnement  
 Accropode® undergoing positioning

- avoir un rendement de pose des blocs équivalent à l'avancement de la construction de la digue, de manière à ne pas laisser une digue non protégée sur un linéaire important;
- garantir la sécurité des personnes, en évitant toute opération manuelle d'élinguage, de pose ou dépose éventuelle.

Le procédé consiste en la création d'une pince, adaptée à la préhension de ces blocs à la forme complexe, montée sur une pelle mécanique, couplée à un système GPS pour respecter précisément les positions du plan de pose et donc des densités :

- une mâchoire de préhension de petite section, qui s'adapte aux deux surfaces parallèles uniques, situées sur l'enclume de chaque pièce à manutentionner;
- l'intégration sur cette pince d'un système de rotation et de basculement latéral facilite l'imbrication des blocs et la variabilité des positionnements;
- la mise en place d'une comparaison avec le plan de pose théorique (préalablement numérisé avec MGS Project et contenu sous forme de fichier informatique dans l'ordinateur embarqué de la pelle), avec visualisation des données sur écran couleur dans la cabine de la pelle, apporte l'aide à la pose ainsi que la possibilité de faire un contrôle continu des éléments posés (photos 3 et 4).

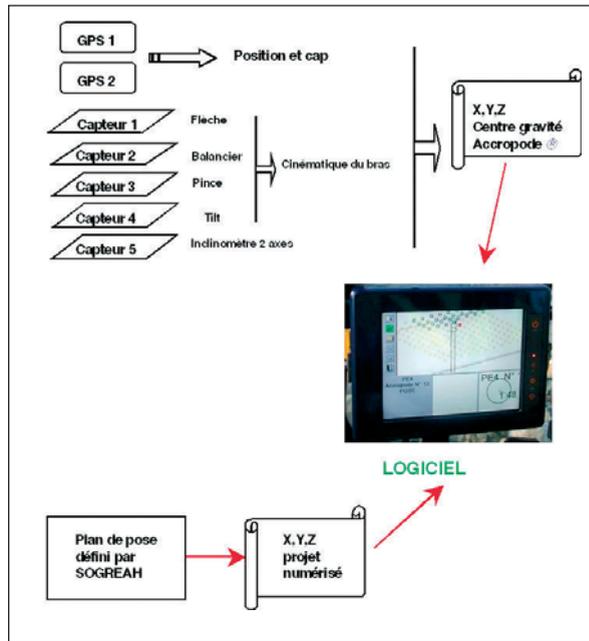


Figure 2

Principe de transmission des données  
 Data transmission technique

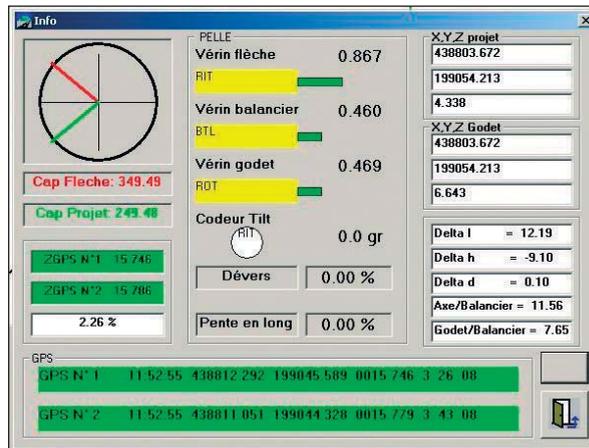


Figure 3

Paramètres de positionnement du logiciel  
 Software positioning parameters

### ■ Principe de transmission des données (figure 2)

Les paramètres de la cinématique de l'ensemble de la machine sont saisis et modifiables lors de l'installation du système à bord, le contrôle de la géométrie du bras de la pelle et de la pince en mouvement est assuré par un ensemble de capteurs sur les vérins.

Une double antenne GPS donne la position et le cap de la pelle mécanique à l'ordinateur, alors qu'un inclinomètre deux axes apporte les correctifs pour définir précisément en x, y, z le centre de gravité de l'Accropode® qu'il faut comparer avec la position théorique (figure 3).

Le conducteur de l'engin suit ainsi les indications données à l'écran pour poser les Accropodes® avec la

La pince Accropode®

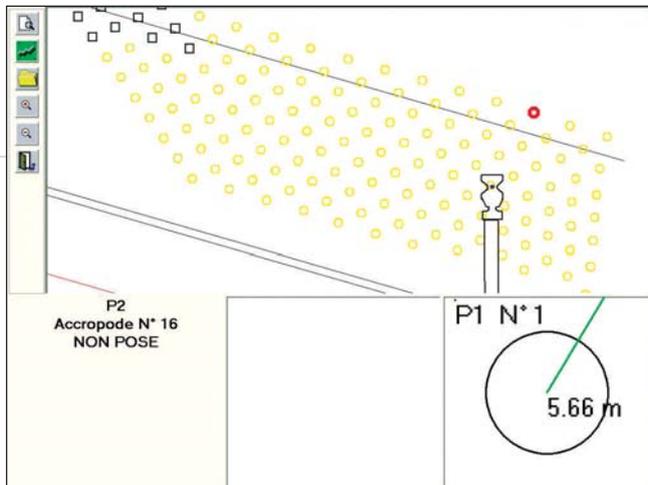


Figure 4

Image de contrôle dans la cabine de la pelle mécanique

Control picture in the shovel excavator cab

► bonne densité, et peut enregistrer les coordonnées de pose dans le cadre du contrôle (figure 4).

■ Résultats obtenus

Parmi ceux-ci on notera :

- 27500 blocs Accropode® posés, au moyen d'une pelle 974 Liebherr équipée d'un balancier long et de la pince à Accropode®;
- aucun accident corporel compte tenu de l'absence de personnel à pied assistant la pose;
- augmentation de la cadence de pose : 21 blocs par heure contre 6 à 8 par heure avec la seule méthode préconisée auparavant;
- satisfaction du concepteur Sogreah qui pourra intégrer cette nouvelle méthode de pose dans le futur;
- pas de dépose liée à une mauvaise densité ou une imbrication non conforme puisqu'il y a contrôle continu de la position de pose de chacun des éléments;
- une digue en construction protégée à l'avancement.

Le Port Autonome du Havre, maître d'ouvrage de l'opération s'est montré partenaire dans cette innovation, qu'il a rapidement validée comme outil de contrôle des densités de pose. ■

L'ÉQUIPE DE CHANTIER

- François Arlot - Directeur de centre - GTM Terrassement
- Nicolas Durupt - Chef de service travaux - GTM Terrassement
- Pierre Forte - Adjoint directeur de travaux - Entreprise Deschiron
- Éric Jamont - Responsable mécanique - Entreprise Deschiron
- Pascal Le Gall - Responsable système GPS embarqué - GTM Terrassement

ABSTRACT  
The Accropode® clamp

N. Durupt, Fr. Arlot

The protective breakwater for the navigation basin of Le Havre port includes special protection with Accropodes®, complex-shaped concrete blocks, which intertwine with one another to form a shell resisting the elements.

For placing the 1.5 cu. m blocks (36,700 units), a special clamp was created to allow the elements to be positioned in various axes without manual intervention.

This tool is set up on a shovel excavator equipped with a GPS positioning system to assist the machine operator constantly in placing each of the components (by comparison with the theoretical position on screen), but also to perform continuous monitoring of the placing operation (which can be stored in a computer file), thus providing the client with evidence of the placing densities achieved.

This innovation made it possible to meet the overall schedule with placing rates of 21 blocks per hour versus 6 to 8 units per hour with a traditional method, and this without any bodily injury.

RESUMEN ESPAÑOL  
El agarre Accropode®

N. Durupt y Fr. Arlot

El dique de protección de la zona de navegación del puerto marítimo de Le Havre consta de una protección particular en Accropodes®, bloques de hormigón de formas complejas, que se enlazan para formar un blindaje resistente a los elementos.

La instalación de los bloques de 1,5 m<sup>3</sup> (36700 unidades) ha precisado la creación de un mecanismo de agarre específico, que permite posicionar los elementos con arreglo a los distintos ejes sin necesidad de intervenir manualmente.

Este mecanismo va instalado sobre una pala cargadora dotada de un sistema de posicionamiento por GPS que permite, por una parte, supervisar de modo continuo el conductor de equipos para la instalación de cada uno de los elementos (por medio de un comparativo con la posición teórica en la pantalla), pero, además llevar a cabo un control continuo de la instalación (que se puede salvaguardar en archivo) permitiendo así conocer las densidades de tendido realizadas por la entidad contratante.

Esta innovación ha permitido respetar el planning general que incluye cadencias de instalación de 21 bloques/hora para 6 a 8 unidades/hora con un método tradicional, y ello sin accidente corporal.

# Ostrea®, le marquage qui vient de la mer

Jean Lalo  
Directeur Technique  
et Achats  
Somaro/Prosign

Fin 2006, Prosign, filiale de Somaro (groupe Colas), a lancé Ostrea®, le premier marquage routier éco-conçu, réalisé à partir de matières premières renouvelables et plus particulièrement de coquilles d'huître broyées.

Cet exemple d'écologie industrielle, dans lequel le marquage routier utilise comme matière première un déchet de l'ostréiculture, doit montrer la route du développement durable pour d'autres applications du BTP. En ce début de siècle, la ressource devient rare et il est important de développer des offres innovantes pour réduire les impacts environnementaux des produits de la route. L'analyse de cycle de vie largement utilisée par Prosign depuis plus de dix ans est l'un des outils à la disposition des entreprises pour améliorer la performance environnementale au bénéfice des clients.

Au travers du projet Ostrea®, Prosign a montré que l'on pouvait obtenir des réductions substantielles (- 20 %) des émissions de gaz à effet de serre tout en limitant les consommations de ressources abiotiques (non renouvelables) sans obérer la performance et l'économie.

La première application de la version Ostrea® spray a été réalisée fin avril avec les équipes du parc de l'Équipement du Loir-et-Cher.

## ■ Introduction (photo 1)

En 1993, lors d'un changement d'actionnaires, Prosign, l'un des leaders français des produits de marquage routier, aujourd'hui filiale de Somaro (groupe Colas, leader mondial de la route), découvre des pollutions sur ses trois sites industriels. Une gestion approximative des déchets de produits polluants avait été à l'origine des contaminations.

L'électrochoc psychologique et financier fut suffisant pour faire évoluer les mentalités dans toute l'entreprise.

Prosign a d'abord décidé de concevoir des emballages réduisant l'impact sur l'environnement de ses produits en fin de vie et les pertes de matières à incidence économique négative, puis de se lancer dans l'éco-conception des produits de marquage routier.

En 2001, l'entreprise a ainsi créé la Plastipoche®, emballage plastique souple, éco-conçu, qui se substitue à l'emballage métallique, avec une analyse de cycle de vie comparée.



Photo 1  
Déchet de l'ostréiculture  
Oyster farming wastes



Figure 1  
Schéma de l'analyse  
du cycle de vie  
Life cycle analysis  
diagram

En 2002, elle a réalisé le premier éco-profil français pour sa peinture en phase aqueuse Typhon®, véritable carte d'identité environnementale du produit.

En 2004, Prosign s'est lancé dans un troisième travail d'éco-conception avec analyse de cycle de vie (ACV). À la suite d'un appel à projets de recherche et développement en matière d'éco-conception, Prosign fut choisie avec seize autres entreprises par l'Ademe parmi 72 candidatures pour l'éco-conception d'une gamme de produits appelés enduits thermoplastiques ou encore enduits à chaud (figure 1).

Traditionnellement, ces produits de marquage routier s'appliquent à chaud, à des températures allant de 180 °C à 200 °C. La plupart utilisent des ressources pétrolières comme résines et comme huiles.

Dans le cadre de son travail de recherche et conscient des enjeux du réchauffement climatique, de la raréfaction du pétrole, des ressources fossiles et de l'énergie dans les décennies à venir, Prosign a entrepris une analyse du cycle de vie, véritable analyse de la valeur envi-

Ostrea®, le marquage qui vient de la mer

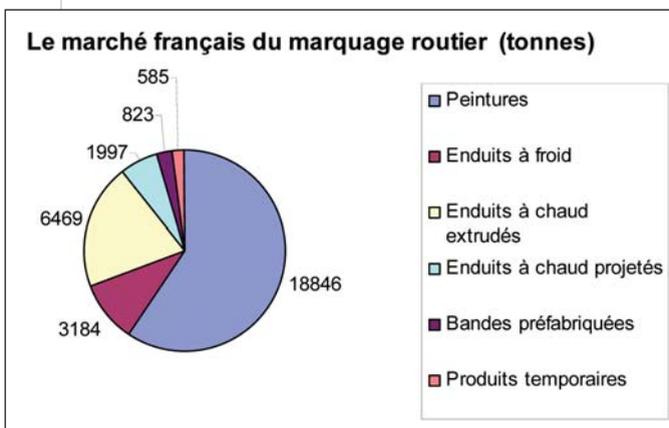


**Photo 2**  
Première application de marquage Ostrea® à Brétigny-sur-Orge, où se trouve l'usine de production des enduits à chaud, par Furlon, filiale d'application de Prosign en Ile-de-France  
*First application of Ostrea® marking in Brétigny-sur-Orge, where the hot coating production plant is located, by Furlon, Prosign's application subsidiary in the Ile-de-France region*



© Département du Morbihan

**Photo 3**  
Réalisation d'Ostrea® sur le carrefour de Mané-Craping à Landévant par le parc de l'Équipement du Morbihan  
*Execution of Ostrea® on the Mané-Craping intersection in Landévant by the Morbihan equipment fleet*



**Figure 2**  
Le marché français du marquage routier (en tonnes)  
*The French market for road marking (tonnes)*



ronnementale des enduits à chaud, avec les objectifs suivants :

- substituer des ressources renouvelables à des ressources non renouvelables;
- réduire les énergies de chauffe et les gaz à effet de serre (GES);
- préserver la santé du personnel d'application exposé au produit et aux fumées.

Les nouveaux enduits devaient toutefois conserver des performances de marquage et des coûts équivalents, seule façon de concilier environnement et économie. Ainsi est né Ostrea®, l'enduit à chaud à base de coquilles d'huître broyées, de résines et d'huiles végétales, véritable marque déposée par la nature. Depuis novembre 2006, près de 100 t d'Ostrea® ont été appliquées sur différents chantiers de marquage routier et ce n'est qu'un début (photos 2 et 3).

■ **Les enduits thermoplastiques dans le marché du marquage en France**

Les enduits thermoplastiques ont une réputation de marquage longue durée même si l'écart qui les sépare des peintures en phase aqueuse se réduit en termes de durée de vie.

Ils conservent malgré tout l'avantage de pouvoir être appliqués en couche épaisse avec un temps de séchage ou plutôt de refroidissement de 1 minute.

Même si les techniques d'application des peintures à l'eau dites à dosage inversé permettent d'avoir une « roulabilité » immédiate, les enduits thermoplastiques, par leur application à chaud (180 °C), permettent une bonne adhésion au support par fusion sur les enrobés ou enduits superficiels dans une fenêtre d'application plus large que les peintures à l'eau.

Cela positionne favorablement les enduits thermoplastiques pour tous les travaux urbains où il est impératif de rendre la route à la circulation le plus rapidement possible afin de ne pas créer des embouteillages ainsi que sur les axes fortement circulés comme les autoroutes.

La composition des enduits thermoplastiques actuels est un mélange de résines en grande partie pétrolières, avec des charges et des billes de verre qui assurent la visibilité des marquages la nuit quand les phares les éclairent (rétro réflexion ou phénomène optique de retour de la lumière vers l'émetteur). Tout au long de son usage, le « thermo » permet donc d'assurer sa visibilité de jour comme de nuit tandis qu'une peinture ne le fera que tant qu'elle retiendra les billes de verre saupoudrées lors de l'application.

Les « thermos » représentent en France un tonnage annuel de 9000 t environ par an sur un total de

32000 t de produits de marquage routier selon les statistiques de l'Association pour la qualification des équipements de la route (ASQUER) qui délivre les certifications NF-Équipements de la route. Les peintures représentent 19000 t de produits tandis que les autres produits sont des enduits à froid pour 3000 t et des bandes préfabriquées et des produits temporaires pour le reste.

Ces tonnages sont constants depuis plusieurs années mais il est à noter que les tonnes d'aujourd'hui sont nettement plus durables que celles d'il y a vingt ans en raison des progrès accomplis par la chimie et grâce au travail des formulateurs (figure 2).

Il est à noter que les enduits à chaud sont plus répandus dans les pays d'Europe du Nord comme le Royaume-Uni et la Scandinavie où les conditions météorologiques froides et humides ont historiquement favorisé leur déploiement. Le marché européen est de l'ordre de 200000 t et on estime que les enduits thermoplastiques représentent près de 100000 t (photo 4).

### ■ Ostrea®, une nouvelle gamme de produits de marquage routier longue durée pour le développement durable

Prosign avait montré la voie environnementale en 2000 avec les peintures à l'eau Typhon® en obtenant le deuxième prix Écoproduit remis par Dominique Voynet, ministre de l'Environnement, lors du salon Pollutec.

Il était donc normal d'analyser les impacts environnementaux des enduits thermoplastiques ou « thermos » qui sont les deuxièmes produits appliqués en France sur les chantiers de marquage routier.

L'Ostrea® a fait l'objet d'une démarche d'éco-conception de la part des équipes de Recherche et Développement de Prosign avec le soutien de l'Ademe et avec le concours des laboratoires du Campus scientifique et technique et de la Direction Environnement du groupe Colas.

Des moyens de laboratoire tout à fait nouveaux ont été utilisés pour atteindre les objectifs fixés par le projet comme l'analyse calorimétrique différentielle (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (ATG). On a ainsi pu quantifier la supériorité de la stabilité thermique des « thermos » Ostrea® par rapport à celle des « thermos » d'origine fossile (photos 5 et 6).

Par DSC, un gain énergétique a été mesuré pour élever les « thermos » à la température d'application lorsque l'on emploie un « thermo » Ostrea®.

Cette gamme de produits a été réalisée à partir de matières premières renouvelables dont des résines et



Photo 4  
Application de marquage Ostrea®  
Ostrea® marking application



Photo 5  
Analyse thermo-gravimétrique (ATG)  
Thermogravimetric analysis (TGA)

Photo 6  
Analyse colorimétrique différentielle (DSG)  
Differential scanning calorimetric analysis (DSC)

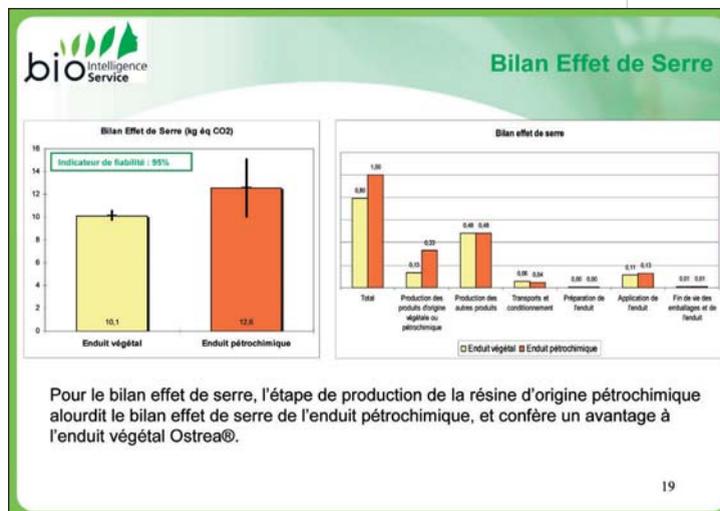


Figure 3  
Bilan effet de serre  
Greenhouse effect balance

huiles végétales ainsi que des coquilles d'huître broyées en substitution du calcaire de carrière.

Les produits de la gamme Ostrea® ont permis d'atteindre les objectifs fixés en termes environnementaux et d'hygiène.

L'Ostrea® permet notamment d'obtenir une réduction de 20 % des gaz à effet de serre, objectif de la Commission européenne (figure 3).

Dans le cadre du projet, les équipes ont voulu également vérifier qu'en améliorant les performances environnementales des enduits à chaud, les impacts sanitaires n'étaient pas dégradés. Pour cela, les fumées

Ostrea®, le marquage qui vient de la mer

**Le point de vue de Céline Lachet, responsable exploitation du parc de l'Équipement du Loir-et-Cher**

« Cela fait près de deux ans que l'idée de réaliser un thermo spray avec de la coquille d'huître m'a été annoncée. J'ai tout de suite répondu que mes équipes d'application seraient intéressées de participer à la mise au point du produit comme nous l'avions fait précédemment pour d'autres résines. Avec le rachat de Prosign par Somaro, filiale du groupe Colas, tout est allé plus vite et la résine m'a été présentée à Interoute en octobre dernier.

Le 24 avril 2007, les premiers tests avec l'Ostrea® sont mis en œuvre. Les premiers kilogrammes de résine sont appliqués sur notre embranchement ferroviaire, on affine un petit peu les pressions pour obtenir une meilleure définition de bande et c'est tout... Aucune mauvaise surprise ni modification de comportement des équipes d'application ne sont observées.

Le 25 avril, le premier chantier d'application d'Ostrea® se déroule comme un chantier d'entretien de marquage habituel, exception faite de la présence du vice-président du Conseil général, des techniciens du Conseil général et de la presse locale.

L'Ostrea® répond parfaitement à nos attentes et celle de notre client principal, le Conseil général, à savoir : pas de matières premières non renouvelables, moins de consommation de gaz pour chauffer la résine (gain de 10 °C), pas de poussières de résine qui volent partout lors de l'application, pas d'odeur désagréable et pas de surcoût financier bien que l'Ostrea® soit un produit innovant et donne une meilleure tenue dans le temps.

Suite à l'essai, avec l'accord du chef de parc, j'ai décidé de n'appliquer que de l'Ostrea® après avoir épuisé les quelques tonnes de Pélican, notre ancien produit.

Le parc routier de l'Équipement de Loir-et-Cher est certifié ISO 9001 depuis le 22 juin 2004 et ISO 14001 depuis le 11 octobre 2005. Avec l'Ostrea® nous persévérons dans notre démarche afin de préserver l'environnement et de participer au développement durable qui est au cœur des préoccupations de tous ».



Photo 9

Détail de l'application « technique projetée » en repassage : produit + billes de saupoudrage

*Detail of "spray technique" application in several passes : product + sprinkling beads*



à chaud (à 180 et 200 °C) ont été analysées en prélevant les espèces émises sur un adsorbant et en les analysant par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à spectrométrie de masse (GC/MS). Cette technique d'analyse permet d'identifier chimiquement et de quantifier les produits présents dans ces fumées.

Il a été ainsi possible de démontrer qu'aucune espèce toxique n'était formée et émise lors de la mise en œuvre des marquages « thermo », ni à 180 °C en condition normale ni à 200 °C lors d'une surchauffe ponctuelle de l'enduit (photo 7).

En prenant en compte non seulement la préservation de la planète mais aussi la santé des applicateurs comme elle l'avait fait avec les peintures en phase aqueuse Typhon® sans éther de glycol, Prosign est fidèle à son slogan « Marquer, guider, protéger ».

**■ Le chantier Ostrea® du Loir-et-Cher**

La version projetée de la gamme Ostrea®, l'Ostrea® spray numéro de certification 1RH 1036 (Classe P5/R3/Q3/S1), a été lancée avec le concours du parc de l'Équipement du Loir-et-Cher travaillant pour le compte du Conseil général entre Orchaize et Herbault. L'Ostrea® spray a encore fait parler la poudre de coquilles d'huître.

Jusqu'à présent avait été testée la version Ostrea® route faite pour les applications dites « extrusion sabot » dans lesquelles le produit est appliqué par l'intermédiaire d'une boîte qui frotte sur le sol et qui extrude le produit. Les dosages sont de l'ordre de 3 à 5 kg/m<sup>2</sup> en fonction des supports.

Photo 7

Montage de prélèvement des fumées à chaud (à gauche) et analyseur GC/MS (à droite)

*Test rig for sampling hot fumes (on the left) and GC/MS analyser (on the right)*



Photo 8

Camion projeté du parc de l'Équipement du Loir-et-Cher en application d'Ostrea® spray sur la RD766

*Spray truck of the Loir-et-Cher equipment fleet applying Ostrea® spray on county road RD766*



T [°C] air	T [°C] sol	Hygrométrie [%]	T [°C] Bain d'huile du fondoier	T [°C] application	Pression Produit [bar]	Pression Atomisation [bar]	Vitesse Camion [km/h]	Dosage produit [kg/m <sup>2</sup> ]	Dosage billes [kg/m <sup>2</sup> ]
20	16	40	200	180	1,2	7	4	2,64	0.3

Tableau I

Détails de l'application d'Ostrea® spray

*Details of Ostrea® spray application*

Dans le cas de la technique « projetée » ou « spray » en anglais, le produit fondu à des températures de l'ordre de 170 °C-180 °C est poussé par de l'air et ainsi les dosages appliqués sont inférieurs (2 kg/m<sup>2</sup>). Les vitesses d'application en technique projetée sont supérieures à celles de l'application en extrusion sabot, soit 7 à 8 km/h par rapport à 3 à 4 km/h.

Les équipes du parc de l'Équipement du Loir-et-Cher qui appliquent de cent à cent cinquante tonnes ont été très satisfaites de la facilité d'application, de la blancheur et de la baisse des températures d'application entraînant moins de fumées à l'application ainsi que des odeurs moins fortes (photos 8 et 9 et tableau I).

Le parc de l'Équipement qui a obtenu la certification ISO 14001 est ainsi cohérent dans sa démarche environnementale en appliquant l'Ostrea® spray.

## ■ Conclusion

Ostrea®, le marquage qui vient de la mer et, plus précisément, des côtes bretonnes, se met aussi au vert à la campagne et part ainsi à la conquête d'autres applications dans le reste de l'Europe.

Les récompenses reçues par l'Ostrea® sont autant de gages de reconnaissance de la part de la communauté scientifique et aussi des collectivités locales. L'Ostrea® permet, en effet, de réaliser des achats durables dans le cadre des politiques d'Agenda 21 développées par de nombreuses collectivités (photo 10). ■



Photo 10

Médaille du Prix Pierre Potier de l'Innovation en chimie au bénéfice de l'environnement reçue en juin 2006

par Jean Lalo des mains de François Loos, ministre de l'Industrie  
*Pierre Potier prize medal for Innovation in Chemistry for the Benefit of the Environment received in June 2006 by Jean Lalo from the French Minister of Industry, François Loos*

## ABSTRACT Ostrea®, marking coming from the sea

J. Lalo

*At the end of 2006, Prosign, a subsidiary of Somaro (Colas group), launched Ostrea®, the first eco-designed road marking, produced from renewable raw materials and in particular from crushed oyster shells.*

*This example of industrial ecology in which a waste product of oyster farming is used as the raw material for road marking should show the way to sustainable development for other building and construction applications. At the start of this century, resources are becoming scarce, and it is important to develop innovative offers to reduce the environmental impacts of highway engineering products. Life cycle analysis, which has been used by Prosign extensively for more than ten years, is one of the tools available to contractors to improve their environmental performance for the benefit of their clients.*

*Through the Ostrea® project, Prosign has shown that substantial (20 %) reductions in greenhouse gas emissions could be obtained while limiting the consumption of abiotic (non-renewable) resources without adversely affecting efficiency or economy.*

*The first application of the Ostrea® spray version was implemented at the end of April with the equipment fleet teams of the Loir-et-Cher region of France.*

## RESUMEN ESPAÑOL Ostrea®, marcas viales procedentes del mar

J. Lalo

*A finales de 2006, Prosign, filial de Somaro (grupo Colas), ha lanzado Ostrea®, las primeras marcas viales fabricadas de forma ecológica, realizada a partir de materias primas renovables y con mayor particularidad de conchas de ostra machacadas.*

*Este ejemplo de ecología industrial en el que la señalización vial utiliza como materia prima un desecho de la ostricultura debe indicar el camino del desarrollo sostenible que cabe seguir para otras aplicaciones en las obras públicas. En este comienzo de siglo, donde empiezan a escasear los recursos es importante desarrollar diversas ofertas innovadoras para reducir los impactos medioambientales de los productos de la carretera. El análisis de ciclo de vida utilizado muy ampliamente por Prosign desde más de diez años constituye una de las herramientas a disposición de las empresas para mejorar la actuación medioambiental en provecho de los clientes.*

*A través del proyecto Ostrea®, Prosign ha demostrado que se podía obtener reducciones sustanciales (-20 %) de las emisiones de gas de efecto invernadero limitando al mismo tiempo los consumos de recursos abióticos (no renovables) sin disminuir el resultado y la economía.*

*La primera aplicación de la versión Ostrea® spray se ha realizado a finales de abril con los equipos del parque del ministerio de Fomento del departamento de Loir-et-Cher.*

# Risques et vulnérabilité des de l'expérimentation et de

**En relation avec l'analyse du fonctionnement d'ouvrages de protection vis-à-vis de phénomènes naturels ou technologiques (séismes, éboulements, avalanches...) des recherches récentes s'appuyant sur des expérimentations imposantes (structures à échelle 1/3) ont permis la mise au point d'outils de simulation puissants décrivant la réponse d'ouvrages en béton armé sous sollicitations sévères. On présente ici trois études de cas qui démontrent la pertinence des modèles utilisés et l'intérêt de la méthodologie proposée qui débouche sur l'aide à la conception d'ouvrages non conventionnels et à la réduction de la vulnérabilité d'ouvrages existants.**

## ■ Introduction

Les ouvrages de génie civil sont conçus chacun pour un usage spécifique qui doit être assuré pendant plusieurs dizaines d'années. Durant cette période le risque, naturel, accidentel ou intentionnel existe avec une probabilité non négligeable. Pour des ouvrages neufs ou profondément remaniés ce concept de risque est réglementairement pris en compte en intégrant dans la conception l'analyse d'effets de combinaison d'actions dites accidentelles.

Le propos concerne ici le cas d'ouvrages spéciaux (barages, centrales nucléaires, ouvrages de protection...) dont la conception sort du champ de la réglementation et nécessite l'appui de calculs non conventionnels, mais aussi celui d'ouvrages existants pour des analyses de vulnérabilité, par exemple pour une mise en conformité sismique.

Aborder ces problèmes nécessite la prise en compte de la particularité des actions, qui sont généralement des chargements dynamiques violents, et nécessite également de disposer de modèles et méthodes de calculs capables de simuler la réalité de la réponse de l'ouvrage. Dans ce domaine d'énormes progrès ont été accomplis ces dernières décennies et des outils très puissants sont maintenant disponibles pour traiter de ces sujets.

S'agissant des ouvrages en béton l'approche s'appuie sur des modélisations décrivant les conséquences de dommages jusqu'à la ruine [1], [2], [3].

Ceux-ci sont implantés dans divers logiciels de calculs (Abaqus, Aster, Cast3M) permettant de traiter, par des techniques numériques adaptées, de la réponse des structures sous sollicitations extrêmes.

Pour valider ces outils de nombreuses expérimentations ont été nécessaires, aussi bien à l'échelle du matériau qu'à celle de l'ouvrage, notamment dans le cadre de la qualification de nouveaux concepts technologiques.

Dans ce contexte on présente ici quelques grands principes des méthodologies mises au point et quelques études de cas en relation avec la protection face aux risques gravitaires en montagne (chutes de blocs, avalanches) et au risque sismique.

## ■ Problèmes posés par les sollicitations sévères

Le comportement d'un ouvrage est conditionné par la réponse de sa structure résistante aux sollicitations auxquelles celui-ci est soumis. Sous chargement sévère les dégradations sont locales (à l'échelle du matériau) et les conséquences sont globales (mise en vibration, déformations d'ensemble, risque d'instabilité de la structure). Dans ce contexte un travail à plusieurs échelles apparaît nécessaire pour générer des outils performants.

## À l'échelle des matériaux

Le béton comme beaucoup d'autres matériaux est dans une première phase linéaire, phase qui se prolonge par une non-linéarité qui conduit à la fissuration (cracking) du côté des tractions, et à l'écrasement (crushing) du côté des compressions. Les propriétés de résistance d'un ordre de grandeur moindre en traction qu'en compression sont sensibles à l'état de contrainte (mono, bi ou tridimensionnel) et à la vitesse de sollicitation, notamment du côté des tractions ou la résistance sous choc peut être plusieurs fois augmentée. L'acier, associé au béton dans les structures armées ou précontraintes, se plastifie au-delà du seuil d'élasticité, ce qui lui confère une réserve de déformabilité importante qui est largement utilisée avant l'atteinte des états limites ultimes.

La caractérisation de ces comportements nécessite des expérimentations parfois très particulières. À titre d'exemple nous présentons ci-dessous celles qui sont réalisées à Grenoble avec la machine GIGA pour explorer la réponse du béton sous contrainte fortement triaxiale (jusqu'à 1 GPa), état que l'on trouve en avant d'un impacteur lors d'une pénétration ou perforation d'une paroi en béton.

La figure 1 présente un exemple de résultat montrant que dans ces conditions le béton subit, par écrasement de la matrice microporeuse, des variations volumiques supérieures à 10 %, processus au cours duquel la présence d'eau à un effet majeur [4].

# ouvrages en béton : les apports la modélisation numérique



**Jacky Mazars<sup>1</sup>**  
Laboratoire 3S-R  
& structure fédérative  
VOR  
Professeur à l'Institut  
national Polytechnique  
de Grenoble

1. Jacky.Mazars@inpg.fr

## À l'échelle de la structure

La réponse de la structure intègre l'ensemble des phénomènes « matériaux » décrits ci-dessus.

L'endommagement se traduit localement par une modification de la raideur, évolutive selon que les déformations activent l'ouverture ou la refermeture des fissures (ou microfissures) créées. De plus, les interactions entre matériaux ou à la connexion entre plusieurs éléments induisent d'autres phénomènes (frottements locaux, viscosité, déformations permanentes...). Enfin, toute structure a sa propre histoire et à une époque, à un instant donné, son état résulte de la cumulation d'effets provenant de la construction, des chargements subits et du vieillissement des matériaux.

Pour traiter de ces problèmes il faut disposer d'une description fidèle de la structure qui doit, dans ces circonstances, dépasser les capacités de la traditionnelle « Résistance des matériaux ».

La discrétisation se fait par une technique « éléments finis » qui permet de décrire finement les propriétés des matériaux et de leur association, celles des interactions entre éléments (poutres-poteaux, sol-structure...), la distribution des masses et se prête, par l'usage d'algorithmes adaptés, à la prise en compte de chargements très variés : monotones, cycliques, sismiques, impacts, souffles...

## ■ Quelques études de cas

Les conséquences de l'action de phénomènes naturels ou technologiques (aléa) sont associées au concept de vulnérabilité des ouvrages qui doivent dans de nom-

breuses situations jouer le rôle de protection dite pare-aléa.

Ces situations de nature accidentelle génèrent sur les structures des sollicitations très violentes qui relèvent de l'analyse non linéaire et qui nécessitent de faire appel à des outils de calculs et une méthodologie très spécifiques. On se propose ici, à travers quelques exemples, de montrer les particularités et l'intérêt de telles approches.

## Risque gravitaire en montagne : protection face aux chutes de blocs

La protection des infrastructures routières dans les zones de montagnes vis-à-vis d'éboulements et de chutes de rochers nécessite la mise en place de systèmes adaptés. Parmi eux, il faut principalement différencier les ouvrages souples (type filets) et les ouvrages rigides (type galeries ou casquettes).

Parmi ces derniers, il faut encore distinguer les galeries conventionnelles recouvertes d'une couche de matériau dissipant et dont la structure est conçue à partir d'approches statiques que les méthodes réglementaires actuelles permettent d'aborder. Mais ces constructions sont massives et coûteuses, aussi se développent de nouvelles technologies d'ouvrages plus légers combinant une dalle béton directement impactée par les blocs et reposant sur des appuis fusibles dissipateurs d'énergie.

Dans cette situation, les impacts peuvent générer des dégradations que la conception doit intégrer, ce qui nécessite de l'aborder en prenant en compte le comportement dynamique de l'ouvrage sous impact ce qui dépasse le domaine d'application des règles habituelles de dimensionnement.

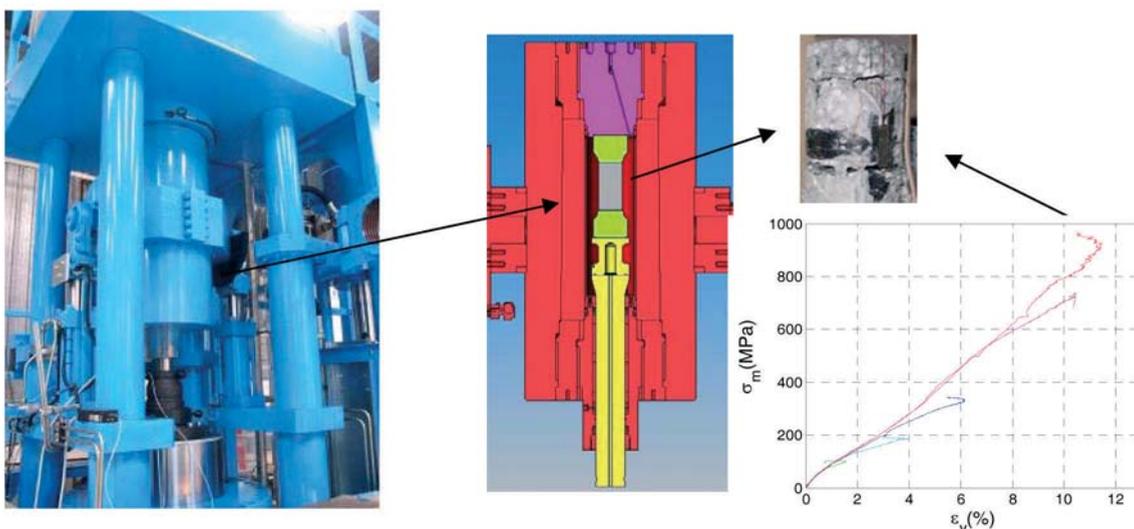


Figure 1

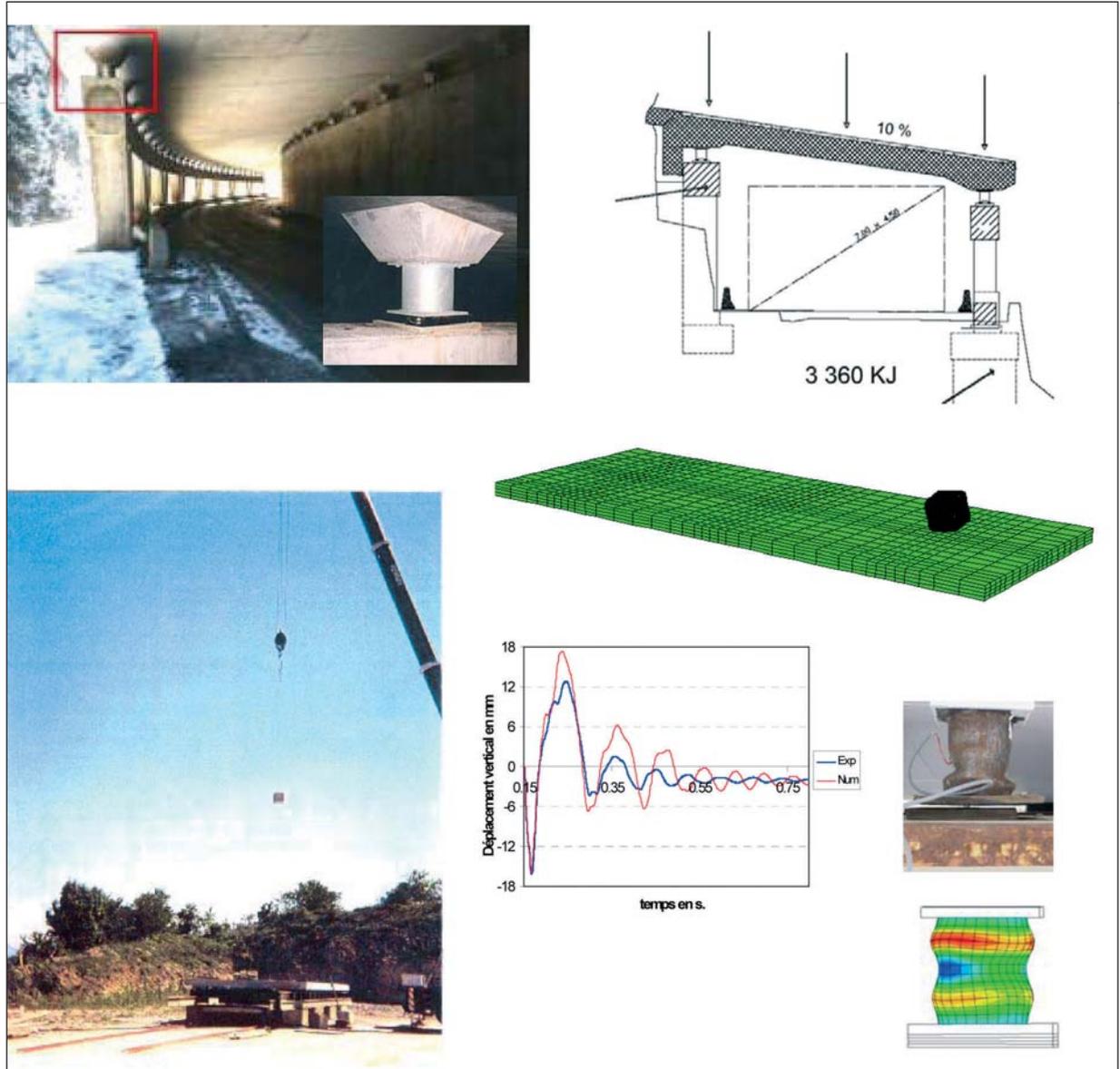
Essais à fort confinement sur la machine GIGA : résultat d'essais triaxiaux dits proportionnels dont le confinement a atteint 650 MPa et la contrainte moyenne 1 GPa, la déformation volumique est proche de 12 % et la rupture se localise sur des plans parallèles à la charge axiale  
*Strong confinement tests on the GIGA machine : result of so-called proportional three-axis tests for which the confinement reached 650 MPa and the mean constraint 1 GPa, the volume deformation is close to 12 % and failure is localised on planes parallel to the axial load*

Risques et vulnérabilité des ouvrages en béton : les apports de l'expérimentation et de la modélisation numérique

Figure 2

Dalle pare-blocs structurellement dissipante : exemple d'ouvrage, expérimentation sur maquette et simulations numériques : discrétisation éléments finis, comparaison calcul essais de l'évolution de flèche après le choc et du fonctionnement des appuis « dissipants »

*Structurally dissipating rock shed : example of structure, experiments on model and numerical simulations : finite element discretisation, test calculation comparison of the change in deflection after the impact and the operation of the "dissipating" supports*



Expérimentation - Modélisation

Pour valider le fonctionnement de ce nouveau type d'ouvrage dit PSD (ouvrages pare-blocs structurellement dissipants), plusieurs essais ont été réalisés sur maquette à échelle 1/3 (dimension de la dalle testée : longueur 12 m, largeur 4,4 m, épaisseur 0,28 m) subissant une série d'impacts associés à la chute de blocs en béton lâchés d'une grue (énergie variant de 135 à 300 kJ). Ces expérimentations ont été conçues et réalisées par l'équipe du LOCIE - Université de Savoie en collaboration étroite avec Tonello IC qui est à la base du concept des « PSD » [5].

Qualifier l'efficacité de la technologie et valider les procédures de simulations, tels sont les enjeux du programme de recherche qui a été conduit sur ce thème [6].

La modélisation utilise la mécanique de l'endommagement (modèle PRM [3]) qui, intégrée dans le code numérique Abaqus, permet de simuler par la méthode des éléments finis les situations de chargements sévères

en décrivant le caractère tridimensionnel et multiphénomènes du problème (dégradation du béton, poinçonnement de la dalle, écrasement par flambage des appuis « dissipants », mise en vibration de la structure...).

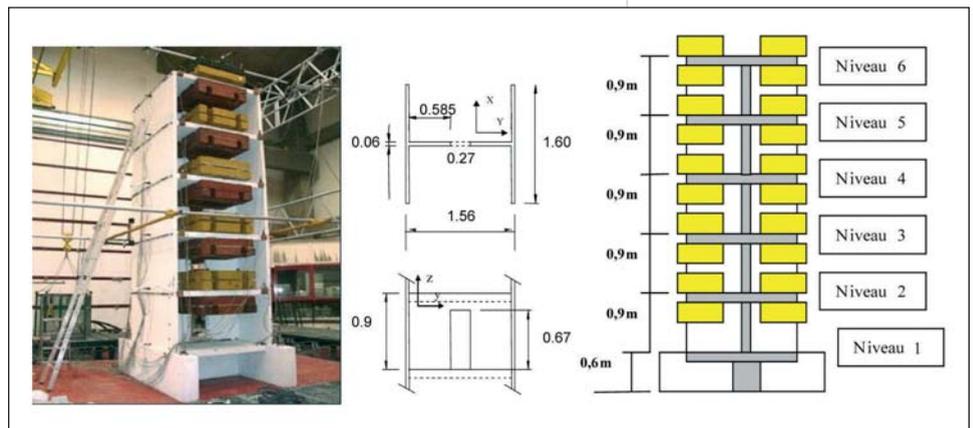
La figure 2 donne le contexte de l'expérimentation et quelques résultats de modélisation qui se sont avérés d'excellente qualité [7].

Risque sismique

Qualifier le caractère parasismique des murs structuraux faiblement armés très usités en France, tels étaient les objectifs d'une série de programmes de recherches entrepris en France et en Europe depuis une quinzaine d'années. L'ensemble de ses travaux a notamment permis d'intégrer dans l'Eurocode 8 le concept de « mur de grande dimension et faiblement armé ». Sur ce sujet, le dernier en date des programmes traités est Ecoleader [8]. Il s'articule autour de l'expérimentation sur table sismique (réalisée par le LNEC - Lisbonne) d'une cel-

lule de bâtiment d'échelle 1/3 conçue selon les règles parasismiques françaises relatives aux murs structuraux faiblement armés, maintenant reprises dans les règles européennes. D'une masse de 31,6 t la maquette est composée de deux murs porteurs liés par six planchers et une longrine inférieure ancrée sur la table sismique afin de reproduire une liaison de type encastrement. De plus, elle est contreventée par un mur intérieur avec ouvertures. Les murs ont chacun une hauteur de 4,5 m (plus 0,6 m la longrine), une longueur de 1,60 m et une épaisseur de 6 cm. La longrine inférieure a une longueur de 2 m, une hauteur de 0,6 m et une épaisseur de 20 cm. Les principales caractéristiques de la maquette sont données à la figure 3. Celle-ci est soumise à une action sismique bidirectionnelle (dans le plan de la table) à intensité progressive sur la base de signaux naturels (séisme de Tolmezzo - Italie).

Dans le même esprit que précédemment des simulations numériques ont été réalisées dans le but de préparer l'expérimentation et de compléter les résultats d'analyse. L'outil utilisé est de nature simplifiée, il comporte les mêmes concepts que ceux vus ci-dessus mais dans une description dépouillée (par poutres multifibres), le rendant accessible à l'ingénierie [9]. La figure 4 illustre l'état de dégradation en fin de séisme (accélération de 0,85 g parallèlement aux murs principaux et 0,5 g dans la direction orthogonale - 70 % de plus que le niveau de conception). La struc-



ture est fortement endommagée et plusieurs fissures sont concentrées à sa base. Le béton est écaillé dans les extrémités des murs et quelques aciers sont rompus dans une zone où le calcul prévoit des déformations supérieures à la déformation ultime déterminée par des tests préalables sur échantillons d'armatures. La comparaison avec les zones fortement endommagées (en rouge) et de forte plastification des armatures données par la simulation, montre l'efficacité de la stratégie de simulation choisie à prédire les zones critiques [10].

On devine qu'à partir de l'utilisation d'un tel outil l'analyse de vulnérabilité d'une construction existante devient possible et que, de la connaissance des zones critiques, des solutions technologiques pour le renfor-

Figure 3  
Programme Ecoleader, essai sur table sismique et caractéristiques de la maquette encastree sur la table et soumise à un séisme plan bidirectionnel  
*Ecoleader program, test on seismic table and characteristics of the fully restrained model on the table subjected to a bidirectional plane earthquake*

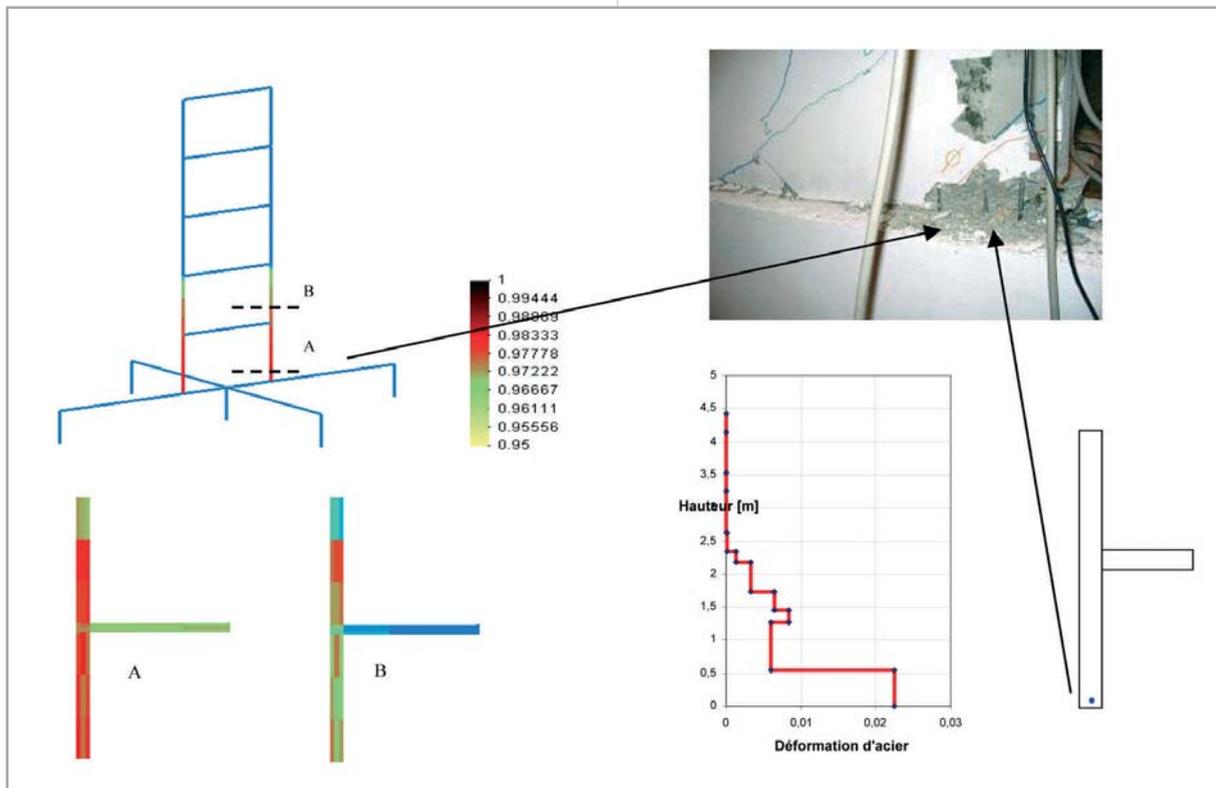


Figure 4  
Discretisation en portique de la maquette Ecoleader et résultats de l'analyse non linéaire : zones endommagées et plastification des armatures de rive en fonction de la hauteur traduisant une rupture à la base de la structure en fin de séisme  
*Portal structure discretisation of the Ecoleader model and nonlinear analysis results : damaged areas and plasticising of the edge reinforcements depending on height, translating a failure at the base of the structure at the end of the earthquake*

## Risques et vulnérabilité des ouvrages en béton : les apports de l'expérimentation et de la modélisation numérique

cement, dont la simulation de l'efficacité peut être traitée avec les mêmes techniques, sont envisageables. Des travaux de recherche se poursuivent sur le sujet notamment dans le cadre du programme ANR-ARVISE.

### Analyse post-accidentelle : dent freineuse de Tacconnaz [12]

À proximité du Mont-Blanc, le couloir d'avalanches de Tacconnaz est situé dans la vallée de Chamonix sous le glacier du même nom. Des avalanches qui peuvent être considérées comme parmi les plus destructrices des Alpes le parcourent régulièrement, menaçant différentes infrastructures (habitations, route nationale...).

Après différentes destructions et l'insuffisance avérée d'anciennes digues, la construction d'un important système de protection paravalanche est menée au début des années 1990. Fermant la zone d'arrêt vers 1200 m d'altitude, ce dispositif est constitué de différentes parties avec chacune une fonction propre : onze dents déflectrices sont ainsi placées en un double éventail à l'entrée du dispositif pour étaler l'écoulement (figure 5).

Ces dents sont des structures massives en béton armé constituées d'un mur directement soumis à l'action de l'avalanche et d'une double semelle de fondation pour tenir compte de la pente du terrain naturel. Initialement, ces dents ont été définies pour une avalanche de référence proposée par les experts du Cemagref avec un profil vertical de pression linéaire représentatif d'un écoulement avalancheux dense. Le dimensionnement proprement dit de ces ouvrages a ensuite été mené de manière classique à partir d'un calcul statique de type BAEL.

Enfin, et pour lester l'ensemble, des massifs de roches maçonnées ont été ajoutés lors de la construction à l'arrière des murs de chaque dent.

Le 11 février 1999, pour conclure une terrible série dans les Alpes (notamment avec l'avalanche de Montroc qui a fait 12 morts et détruit 17 chalets), une énorme avalanche arrive dans le dispositif. L'analyse d'experts [11] a permis de conclure à un phénomène très rapide, incluant une partie de neige dense avec des blocs de glace surmontée d'un écoulement aérosol de grande hauteur.

Un des effets les plus visibles de la violence de cet événement est la destruction de deux dents déflectrices. Ces deux dents sont celles situées à droite (dans le sens de propagation, cf. figure 5) des deux éventails (dent n° 9 à l'amont et 11 à l'aval). À première vue, la destruction semble analogue : le coin supérieur est comme découpé et transporté par l'écoulement à quelques dizaines de mètres. Concernant le ferrailage, certaines

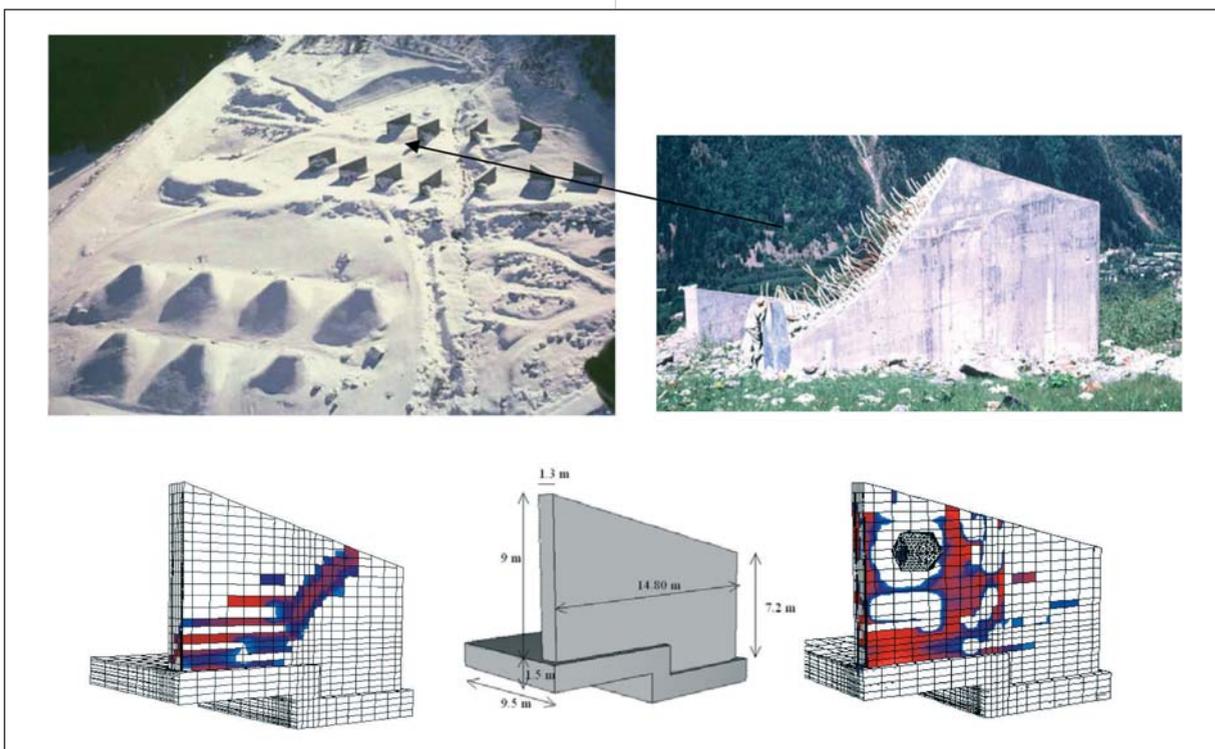
armatures sont rompues mais beaucoup sont également à l'air libre, désolidarisées du béton sur une partie de leur longueur et comme peignées par l'avalanche. Une part importante du béton d'enrobage est arrachée.

Réalisés avec exactement les mêmes outils que pour l'étude des ouvrages pare-blocs ci-dessus, les calculs effectués ont notamment permis d'évaluer la capacité résistante réelle des dents à la rupture sous sollicitation normale statique. Par le jeu des facteurs de sécurité réglementaire, cette capacité résistante est bien supérieure aux hypothèses de dimensionnement initiales mais surtout est influencée par l'appui du massif de roches maçonnées. Celui-ci a également clairement joué un rôle dans la forme de la fracture. Au final, la rupture (assimilée par convention à la première plastification d'armatures) intervient pour une pression équivalente statique uniforme de 220 kPa. Ensuite, l'activation du modèle d'endommagement, a permis de repérer les zones les plus endommagées et donc de localiser les zones de fracture en fonction de différents scénarios de chargements.

Les résultats obtenus sont probants, en cohérence avec les observations de terrain. Enfin, ces outils sont utilisés comme expérimentations numériques pour tester l'influence de la dynamique de chargement. Il a ainsi pu être montré qu'une application violente de la charge pouvait conduire à une ruine prématurée, confirmant la nécessité de prendre correctement en compte cet aspect pour un dimensionnement optimal des structures soumises à des phénomènes gravitaires. De plus, comme présenté figure 5, un scénario faisant intervenir un bloc qui, propulsé par l'avalanche, impacte la dent en démontre le caractère destructeur [7]. Il est clair que toutes ces données sont à même d'orienter l'actualisation et le renforcement de ce dispositif paravalanche.

### ■ Conclusions et perspectives

Avec trois cas d'études on montre comment la simulation numérique peut constituer un apport majeur vis-à-vis de la qualification d'ouvrages subissant des chargements sévères. Ces ouvrages dits de protection doivent être conçus pour faire face à des chargements violents susceptibles de générer des dégradations locales sans compromettre leur tenue d'ensemble. Dans ces conditions les méthodes classiques de conception sont inopérantes et la prise en compte du caractère dynamique du chargement apparaît quasi incontournable. Pour faire face, la structure doit dissiper de l'énergie associée à l'apparition de non-linéarités que la modélisation doit être capable de reproduire pour assurer la pertinence des simulations réalisées.



**Figure 5**  
 Dents freineuses de Taconnaz : le site, la dent n° 9 après l'avalanche de 1999 et les simulations des endommagements : à gauche sous pression de neige, à droite sous l'impact d'un bloc  
 Taconnaz avalanche barrier : the site, barrier element No. 9 after the 1999 avalanche and damage simulations : on the left under snow pressure, on the right under the impact of a block

La mise au point de ces modèles nécessite des expérimentations spécifiques tant au niveau du matériau qu'au niveau de la structure. Par exemple, il est montré ici que les situations d'impact nécessitent des résultats sur la réponse du matériau sous chargement triaxial à forte étreinte et des essais sont réalisés en ce sens sur la machine GIGA au laboratoire 3S-R à Grenoble. S'agissant des structures, l'étude sur maquette, à une échelle qui ne compromet pas la représentativité du problème (1/3), permet de constituer des bases de données et d'observer les principaux effets du chargement. En parallèle, les modèles numériques qui se nourrissent des résultats de l'expérimentation, aident à l'analyse. De ce jeu de dialogue naissent des outils de simulation se déclinant en modèles plus ou moins complets ou simplifiés selon l'utilisation visée.

Dans l'état actuel des connaissances il apparaît tout à fait possible de décrire dans toute sa complexité un ouvrage et d'utiliser ce modèle comme un « clone » de l'ouvrage réel qui, intégrant les évolutions constatées, devient un outil puissant pour prévoir toute situation critique et, de ce fait, pour optimiser la gestion de la maintenance.

Dans un autre domaine, celui du bâti existant, l'analyse de vulnérabilité, par exemple dans le domaine sismique, peut s'appuyer sur des outils de même nature qui peuvent être largement simplifiés en ne privilégiant que les aspects majeurs des phénomènes. De la détection des zones critiques on peut numériquement aborder

l'efficacité des méthodes de renforcement, ce qui conduit à un véritable outil d'aide à la décision.

### Références

- [1] Mazars J., 1986. « À description of micro- and macroscale damage on concrete structures », *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, vol. 25, 5-6, pp. 729-737.
- [2] Mazars J., Pijaudier-Cabot G., 1989. « Continuum damage theory - Application to concrete ». *Journal of Engineering Mechanics*. 115 (2), pp. 345-365.
- [3] Rouquand A., Pontiroli C., Mazars J., 2007. « Concrete structures under severe loadings : a strategy to model the response for a large range of dynamic loads », *Proceedings FRAMCOS-6, Catania Italie*.
- [4] Gabet, T., 2006. Comportement triaxial du béton sous forte contrainte : influence du trajet de chargement, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble.
- [5] Perottin P., Delhomme F., Mommessin M. Behavior of an impacted reinforced concrete slab : percussion and punching analysis, 8th International Conference on Structures Under Shock and Impact, Athens 2004.

## Risques et vulnérabilité des ouvrages en béton : les apports de l'expérimentation et de la modélisation numérique

[6] Nicot F., Mazars J., et al., 2004. « Rapport final programme PIR : Prévention des instabilités rocheuses », MRT, décisions d'aide n° 01V 0574 à 0579.

[7] Berthet-Rambaud P., 2005. Structures rigides soumises aux avalanches et aux chutes de blocs, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble.

[8] Bisch P., Coin A., Mazars J. et al., 2007. « Performance sismique des structures à murs banchés : le programme Ecoleleader », *Revue Européenne de Génie Civil* (sous presse).

[9] Kotronis P., Davenne L., Mazars J., 2004. « Poutre 3D multifibre Timoshenko pour la modélisation des structures en béton armé soumises à des chargements sévères », *Revue Française de Génie Civil*, vol. 8, issues 2-3, pp. 329-343.

[10] Mazars J., Nguyen X.H., Kotronis P., Ile N., Reynouard J.-M., 2005. « Rapport final : Étude sur le fonctionnement sismique de structures à mur à cellules contreventées ». Contrat DRAST - Mission Génie Civil, N° 04MGC 5 07.

[11] Rapin F. & Ancey C., 2000. Occurrence conditions of two catastrophic avalanches at Chamonix, France, *International snow science workshop*, Big sky, Montana, USA.

[12] Berthet-Rambaud P., Richard D., Mazars J., Prane. Ouvrages de protection soumis à l'action de la neige, *Revue française de Génie Civil*, volume 8, n° 1, 2004. ■

**ABSTRACT**

***Risks and vulnerability of concrete structures : the contributions of experiments and numerical modelling***

J. Mazars

*Related to analysis of the operation of protective structures to cope with natural or technological phenomena (earthquakes, rock slides, avalanches, etc.), recent research based on impressive experiments (structures to scale 1/3) has enabled the development of powerful simulation tools describing the response of reinforced concrete structures under severe loading. We describe here three case studies which demonstrate the relevance of the models used and the potential benefits of the proposed methodology which provides aid for the design of non-conventional structures and to reduce the vulnerability of existing structures.*

**RESUMEN ESPAÑOL**

***Riesgos y vulnerabilidad de las obras de hormigón : las aportaciones de la experimentación y de la modelización digital***

J. Mazars

*En relación con el análisis del funcionamiento de estructuras de protección para hacer frente a los fenómenos naturales o tecnológicos (seísmos, desprendimiento de tierras, avalanchas, etc.) diversas investigaciones recientes que se fundan en experimentaciones de gran dimensión (estructuras a escala 1/3) han permitido la elaboración de potentes herramientas de simulación que describen la respuesta de las obras de hormigón armado bajo fuertes sollicitaciones. Se presenta en este artículo tres estudios de caso que permiten demostrar la pertinencia de los modelos utilizados así como el interés de la metodología propuesta que desemboca en la ayuda para el establecimiento del concepto de estructuras no convencionales y a la reducción de la vulnerabilidad de las obras ya existentes.*

# Construction virtuelle



**Claude Dumoulin**  
Directeur Informatique  
Technique  
Bouygues Travaux  
Publics

**La construction virtuelle consiste à utiliser une maquette et des simulations numériques pour mieux analyser le comportement d'un ouvrage. L'objectif est d'identifier et d'anticiper les problèmes le plus tôt possible. La maquette numérique contient la représentation de l'ouvrage dans son ensemble, ce qui garantit des informations à jour et évite les ressaisies.**

**L'article passe en revue l'utilisation de cette technologie dans le génie civil. Des premiers résultats prometteurs sont identifiés en utilisation solitaire. Des problèmes d'organisation restent à résoudre en utilisation à plusieurs.**

## ■ Introduction

Traditionnellement, un ouvrage de génie civil est défini par un ensemble de documents comprenant des plans et des descriptifs. Tout l'art du projeteur est de produire une définition complète de l'ouvrage au moyen d'un nombre minimum de documents, en s'attachant néanmoins à ce qu'ils soient de taille raisonnable, sans oubli et sans sous-entendu d'information, et en acceptant un minimum de redondance pour en faciliter la lecture. Pour permettre aux non-initiés de mieux appréhender l'ouvrage futur, une maquette physique est parfois réalisée, à simple titre informatif, vu son coût et son incomplétude.

## Les technologies de l'information

Les progrès remarquables de l'électronique, de l'informatique, des mathématiques et de l'algorithmique permettent aujourd'hui d'afficher et de manipuler des maquettes numériques en trois dimensions, compatibles avec la taille de nos ouvrages, à un coût et un confort d'utilisation acceptables. L'ouvrage est totalement défini dans la maquette numérique, avec une complétude en accord avec le niveau de détail retenu pour la phase du projet modélisée. Les descriptifs et les plans ne sont plus que des vues particulières de l'ouvrage, pour en faciliter la lecture et la compréhension. La maquette numérique couplée à des simulations numériques du comportement de l'ouvrage constitue ce qu'on appelle Construction virtuelle.

## Les industries manufacturières

L'industrie, et notamment les principaux constructeurs aéronautiques et automobiles, sont en train de généraliser l'emploi de cette approche à tous les pro-

cessus de conception industrielle. Cela permet de réduire le délai de mise au point de nouveaux modèles et de construire juste du premier coup. Initialement, ce choix a été guidé par le besoin de maîtriser des formes géométriques complexes et de piloter des machines à commande numérique. Aujourd'hui, ce choix permet aussi de profiter à plein des possibilités fantastiques offertes par les simulations numériques, facilitant ainsi l'identification très en amont des problèmes et réduisant le nombre de maquettes et d'essais physiques à réaliser. Qui ne connaît pas l'exploit du Falcon 7X de Dassault Aviation entièrement développé en maquette numérique? « Dès le début de la conception de l'appareil, le projet a totalement intégré tout le cycle de vie jusqu'au support et à la maintenance », *Dassault Aviation, Press Information*, 10 juin 2005.

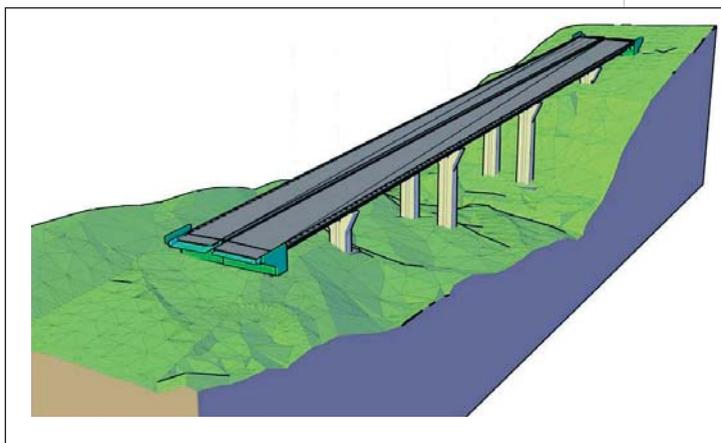


Figure 1

*Vue d'ensemble d'un viaduc dans son environnement. Les interfaces entre chaque acteur et chaque métier doivent être parfaitement définies*  
*General view of a viaduct in its environment. The interfaces between each stakeholder and each trade must be perfectly defined*

## Les métiers de la construction

Cette appropriation a été beaucoup plus lente dans les métiers de la construction. Les causes sont bien connues : pas d'effet de série, pas de formes géométriques complexes, pas de machines à commande numérique, la réalisation de l'ouvrage *in situ* et non en usine, des matériaux bon marché, la fragmentation de la profession, la faiblesse des investissements et des marges. Tout cela conduit à maintenir l'usage du plan sur le site de production. Ce sont les progrès des outils et des réseaux informatiques associés aux baisses de coûts de l'informatique et des télécommunications qui rendent cette approche possible aujourd'hui.

Une première étape a consisté à numériser les documents et à s'appuyer sur l'informatique pour mieux gérer et tracer le cycle de vie des documents. Mais la cohérence de l'ensemble des documents repose toujours sur la capacité du projeteur à coordonner tous les documents entre eux.

Aujourd'hui les documents sont numérisés pour réduire la quantité de papier utilisé, l'informatique facilite les échanges et la traçabilité des documents, mais le pro-

## Conception virtuelle

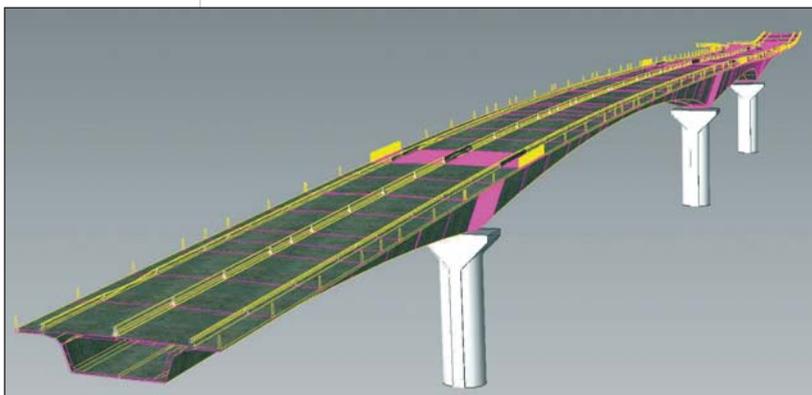


Figure 2

Conception paramétrique d'un viaduc. L'ensemble des caractéristiques principales du tablier est piloté par l'abscisse curviligne du projet

*Parametric design of a viaduct. All the main characteristics of the deck are controlled by the curved abscissa of the design*

cessus proprement dit n'a pas changé. Un plan est toujours un document 2D, c'est-à-dire une vue partielle de l'ouvrage gérée et mise à jour à la main par le projeteur en fonction de l'avancement du projet. Une autre vue ou une autre échelle de la même vue nécessite un autre plan à la main. Et le plan papier reste le support principal du compagnon sur le chantier.

### ■ Construction virtuelle

La Construction virtuelle est un processus permettant de visualiser et d'appréhender les divers problèmes rencontrés au cours du cycle de vie d'un ouvrage (conception, construction, exploitation) au moyen de simulations numériques. Cela permet de mieux imaginer l'ouvrage futur, d'en comprendre le fonctionnement, d'explorer plus rapidement des variantes ou d'évaluer plus efficacement les risques.

La Construction virtuelle s'appuie sur les technologies suivantes :

- visualisation et manipulation d'objets géométriques 3D;
- simulations numériques s'appuyant d'une part sur une géométrie 3D, d'autre part sur un axe d'étude particulier : détection de conflits géométriques, études d'impact, intégration dans le site, méthodes et phasage de construction, planification, comportement de l'ouvrage (structure, vent, acoustique, feu), comportement des usagers (sécurité, évacuation), approvisionnement...;
- travail à plusieurs autour d'une même maquette numérique (concept de « plateau projet virtuel »).

### Partager une même vision

Traditionnellement, les représentations et les échanges d'informations d'un ouvrage se font sur la base de plans 2D (voire de documents descriptifs) et chacun essaie d'imaginer l'ouvrage futur dans sa tête.

Aujourd'hui, les outils capables de représenter directement l'ouvrage en 3D existent et permettent de mieux l'appréhender en le manipulant et en l'observant sous tous les angles. Tous les acteurs partagent la même vision.

### Bénéficier de données communes

La maquette numérique contient la représentation de l'ouvrage dans son ensemble. Cela garantit des informations à jour et réduit les ressaisies et les risques d'erreurs. Tous les acteurs partagent les mêmes données. On notera que partage des données n'implique pas nécessairement partage de toutes les données et même périphérique de stockage. Cette remarque est fondamentale compte tenu des relations contractuelles reliant les différents partenaires dans l'acte de construire.

### Simuler l'ouvrage et son comportement

En associant des dates aux diverses parties de l'ouvrage, des animations permettent de mieux comprendre les étapes de sa construction. De façon plus générale, des axes d'analyse supplémentaires peuvent être superposés à la géométrie : un planning, des coûts unitaires associés aux mètres de la géométrie, des analyses de comportement de la structure, des points de vue par métiers, l'identification de conflits entre corps d'état, la gestion des travaux modificatifs... S'appuyant sur la géométrie, la maquette offre des possibilités insoupçonnées de simulation, de contrôle et d'aide à la décision. La simulation numérique permet de pousser l'ouvrage jusqu'à ses limites pour organiser le projet, explorer des variantes et évaluer les risques.

### Concevoir en mode collaboratif

L'acte de construire est un processus complexe impliquant un grand nombre d'intervenants. Les délais de conception sont de plus en plus courts et exigent donc des équipes toujours plus nombreuses.

Traditionnellement le plan – décrivant tout ou une partie de l'ouvrage – est un document créé par une seule personne, validé et utilisé par d'autres. La cohérence de l'ensemble des plans entre eux est maintenue par le processus de validation et d'approbation.

La maquette numérique peut faciliter cette cohérence

car elle permet de représenter l'ouvrage dans son ensemble. Tous les intervenants peuvent partager ou échanger des informations d'une même maquette : c'est une utilisation en mode de travail collaboratif. C'est une contrainte forte pour la maquette numérique, car elle doit savoir gérer les responsabilités de chaque intervenant et maintenir la confiance. C'est un changement culturel important, car l'outil impacte tous les intervenants, de l'architecte au plus humble des sous-traitants.

### ■ États des lieux

Les causes de l'appropriation lente de ces nouvelles technologies dans les métiers de la construction sont bien connues et explicitées ci-après.

### Produit unique

L'ouvrage à construire doit être inséré dans un site et adapté aux conditions locales. Sa destination, la géométrie du site et ses caractéristiques géotechniques, l'insertion dans le site et les contraintes environnementales et réglementaires locales influencent le parti pris architectural et la géométrie de l'ouvrage. Ce dernier est donc, de fait, à chaque fois unique. La réutilisabilité de certains composants sur d'autres projets est relativement faible. Il n'y a pas d'effet de série.

### Chantier forain

L'ouvrage est réalisé directement sur le site où il sera exploité. L'atelier est forain, temporaire, évolutif tout au long du projet. Ce ne sont pas les conditions d'une chaîne de production contrôlée en usine. Au fur et à mesure de la construction, certaines parties de l'ouvrage sont utilisées pour porter les outils servant à construire la suite.

La distinction, classique de l'industrie manufacturière, entre d'une part production de composants et d'autre part assemblage de composants, est gommée par le fait que les composants sont souvent uniques et réalisés sur place.

### Imprecision et adaptabilité

L'ouvrage s'appuie sur un terrain naturel et s'intègre dans un bâti existant. Cet existant dans lequel s'insère l'ouvrage à construire impose de se baser sur des informations imprécises et souvent difficiles à acquérir. Des adaptations *in situ* sont donc toujours à prévoir pour pouvoir s'ajuster sur place à l'imprécision de certaines données : géométrie du terrain naturel, tassement du sol, fluage des matériaux, déformations thermiques...

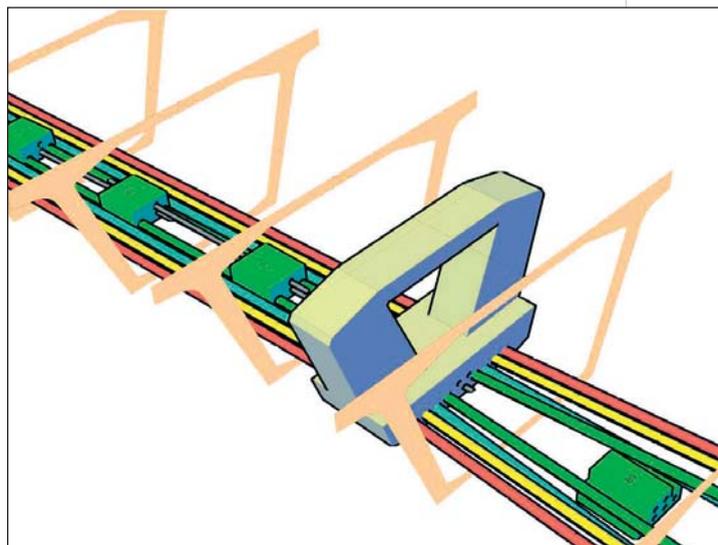


Figure 3

Détection de conflits géométriques entre les câbles de précontrainte interne d'un viaduc. Les câbles sont implantés automatiquement à partir des données d'un logiciel de calcul

*Detection of geometric conflicts between the internal prestressing cables of a viaduct. The cables are positioned automatically based on the data from a calculation software*

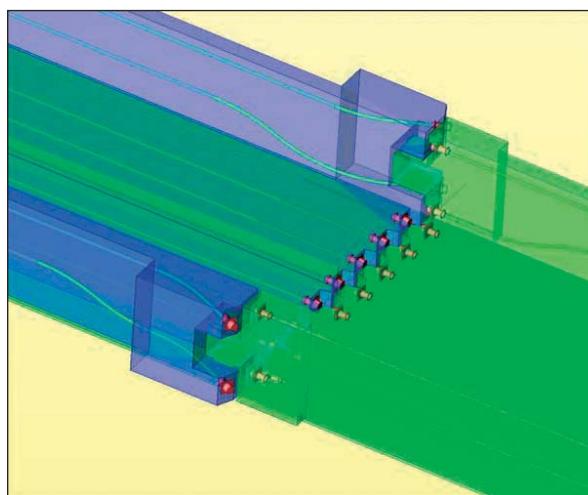


Figure 4

Étude de détail de la précontrainte interne d'un tablier de pont

*Detail design of internal prestressing of a bridge deck*

### Limites dimensionnelles

Les plus gros avions ont des tailles inférieures à cent mètres. En génie civil, la taille totale de projets d'infrastructures peut atteindre plusieurs kilomètres. Mais tant pour les avions que pour les ouvrages linéaires, la taille des détails est centimétrique, voire millimétrique. Cela conduit à des problèmes de taille des modèles numériques et de précision numérique. Et la sphéricité de la Terre conduit à des pièges si l'on utilise les repères cartésiens de façon classique.

### Maquette physique

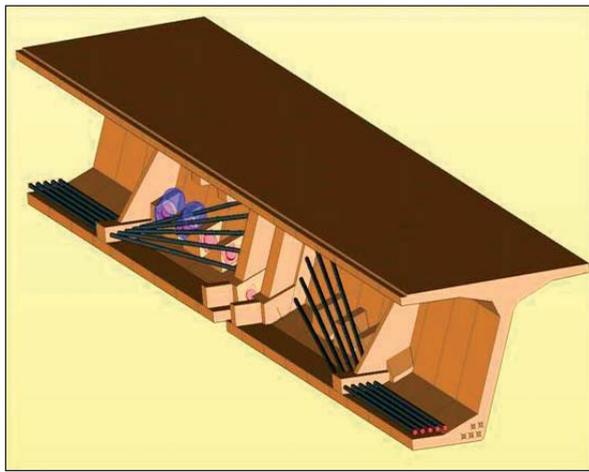
Des maquettes de taille réduite sont réalisées à titre didactique, pour expliquer et commenter l'insertion visuelle dans le site. La difficulté principale est généralement la représentation de l'existant. Par contre, compte tenu de l'unicité de l'ouvrage et de sa taille, les maquettes physiques de grande taille sont exceptionnelles dans le cadre de la conception afin de valider les

## Conception virtuelle

Figure 5

Étude de l'implantation  
de la précontrainte interne  
d'un tablier de pont

*Layout design of internal  
prestressing of a bridge deck*



hypotheses. Le comportement de la structure n'est pas poussé aux limites. La conception s'appuie sur des codes de calcul et des valeurs enveloppes. La disponibilité d'outils de simulation de plus en plus performants est une vraie opportunité dans ce domaine.

### Une profession peu équipée

Compte tenu de la grande variabilité de la taille des entreprises du secteur de la construction, l'équipement informatique est d'une très grande variété, tant du point de vue des capacités et des puissances des machines que des logiciels utilisés. À cela s'ajoute le fait que le partage de données numérisées nécessite des lignes de télécommunications à haut-débit. L'informatique est présente dans les bureaux de conception, et pénètre enfin les sites de production grâce aux progrès techniques, à la baisse des coûts et une meilleure disponibilité.

### Pas de vrai marché logiciel

Compte tenu des spécificités du génie civil et de la grande variété d'équipement informatique, il n'y a pas aujourd'hui de logiciels couvrant tous les besoins du métier en termes de maquette géométrique. Les utilisateurs en sont réduits à utiliser des outils différents pour modéliser soit plutôt le terrain naturel, soit au contraire la structure d'un point de vue mécanique, ou encore pour réaliser des animations, l'analyse du phasage de construction ou la détection de conflits géométriques. L'absence d'éditeurs leaders, ou proposant une solution complète comme dans l'industrie, se fait fortement sentir.

### Et pourtant cela frémit...

Les progrès récents des outils de simulation, la connaissance des réussites, notamment des industries aéronautiques et automobiles dans ce domaine, font

que les décideurs et le public exigent de plus en plus des maquettes numériques pour accepter les grands projets. C'est avant tout un besoin de communication qui pousse l'émergence de ces technologies dans nos métiers. Insertion dans le site, parti architectural, études d'impact, phasage de construction, variantes d'avant-projet sont aujourd'hui au cœur de la demande.

C'est aussi une étape qui peut être traitée par une petite équipe et qui ne remet pas en cause les processus de conception basés traditionnellement sur le plan. Plus qu'un changement dans la façon de concevoir, cette approche couvre aujourd'hui un manque lié à l'absence de maquettes physiques de grande taille. Mais c'est la porte ouverte pour pénétrer enfin dans le secteur de la construction.

### ■ Mode de travail isolé

Aujourd'hui, un certain nombre de logiciels du marché sont matures et disponibles avec les fonctionnalités déjà énoncées plus haut. La seule condition, mais de taille, est de faire le saut culturel consistant à passer du dessin industriel à la maquette numérique. Autrement dit c'est passer d'un ensemble de traits représentant conventionnellement un élément de l'ouvrage selon un certain point de vue à un objet en trois dimensions modélisant le même élément quel que soit le point de vue.

De nombreuses expérimentations le prouvent et les logiciels sont en phase de production dans des entreprises ou des sociétés spécialisées.

### Les limites

Le découpage traditionnel en plans répond à un certain nombre de règles tacites. Elles sont basées sur l'axiome qu'un plan doit être réalisé par une seule personne qui est responsable de son contenu et y apporte son expertise. De la même façon, la maquette réalisée en mode de travail isolé est gérée par une seule personne. Très vite, selon le niveau de détail ou la taille du projet, le nombre d'informations à gérer rend la tâche impossible dans le délai imparti. Et le projeteur n'est pas compétent dans tous les métiers.

Plus la maquette se complexifie, plus son contrôle et sa validation deviennent difficiles et nécessitent des représentations sous forme de plans. Tout ce processus reste à définir.

L'absence d'éditeur dominant fait que les échanges de modèles numériques doivent être interopérables. Les formats d'échange de données de génie civil ne sont pas encore normalisés et des outils de contrôle de l'échange n'existent pas sur le marché. Ce besoin de

normalisation impose que tous les acteurs du secteur de la construction agissent de concert, les grands comme les petits, car tout le monde est concerné par un échange efficace. L'ensemble des acteurs d'un projet doit y contribuer. Si un seul ne joue pas le jeu, la maquette risque fort d'être incomplète.

### La demande du client est le moteur

L'analyse précédente des limites permet de comprendre pourquoi c'est à l'amont du processus de conception que se développe la construction virtuelle. Les données sont encore peu nombreuses et sont toutes modélisées dans cette phase. Il n'y a d'échange de données numérisées avec aucun des autres acteurs du projet. Vu le niveau de détail à ce stade, l'étude peut être traitée par une petite équipe dans un même lieu.

### Le plan, outil de dialogue

Pour un certain temps encore, le plan est le document final utilisé sur le site de production. Traditionnellement, le plan est aussi la représentation de travail dans toutes les phases d'échange, de coordination entre métiers et d'approbation finale par le client. Contrairement à l'industrie manufacturière, la distinction entre composants et assemblage de composants est gommée car une grande partie de l'ouvrage est réalisée, adaptée et assemblée sur site. Cette confusion est gérée dans la gestion traditionnelle des plans, mais rend difficile les validations en direct sur une maquette numérique en trois dimensions, utilisée pour contrôler l'assemblage.

La maquette est créée avec des outils de modélisation en trois dimensions, avec des règles pour tenir compte des contraintes du métier. Les plans utilisés pour dialoguer entre acteurs sont des points de vue particuliers et choisis constituant la liste des plans définissant le projet. Ces plans contiennent aussi les commentaires et les validations officielles. Comment relier les plans à la maquette et garantir la cohérence des informations dans ce processus ?

### La gestion des modifications

Le projet est en constante évolution. Au fur et à mesure de l'avancement, le niveau de détail s'affine, les conflits sont identifiés et traités au cours de réunions de coordination. Il est donc nécessaire de gérer les modifications et d'être sûr d'avoir toujours à disposition les informations à jour pour travailler. Traditionnellement, cela est garanti par la gestion des indices sur les plans. Le fait que la maquette numérique soit le référentiel unique contenant toute l'infor-

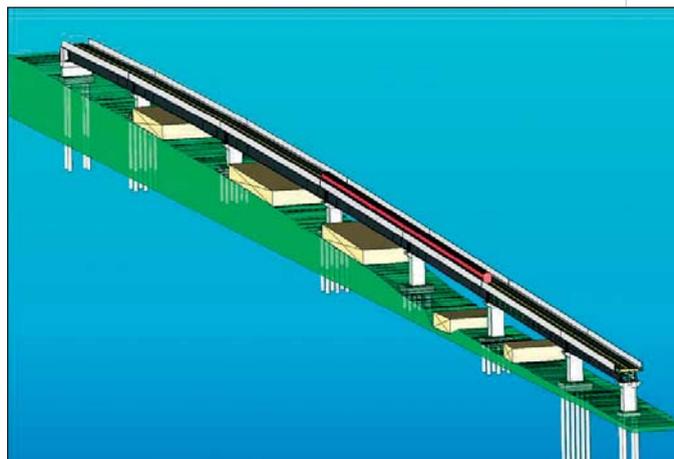


Figure 6  
Étude de variante  
d'un pont  
*Bridge variant design*

mation du projet conduit à gérer les modifications au niveau de l'objet, et donc à revisiter tout ce processus.

### Besoin d'un découpage en objets

Traditionnellement les acteurs d'un projet de construction échangent des plans et s'accordent sur une liste de plans définissant complètement l'ouvrage. Quelques composants sont clairement identifiés lorsqu'ils sont produits en usine (inserts, armatures, éléments d'un ouvrage métallique...) et donnent alors lieu à des nomenclatures spécifiques. Allons-nous, à l'image des autres industries, devoir découper l'ouvrage en composants élémentaires et nous accorder sur des nomenclatures de composants ?

### ■ Mode de travail à plusieurs

Très souvent, selon la taille ou la complexité du projet, le niveau de détail, le délai imparti, les diverses spécialités impliquées et l'éclatement des équipes, la maquette numérique ne peut plus être gérée par une seule personne et le travail à plusieurs s'impose. Et plus la maquette se complexifie, plus son contrôle et sa validation deviennent difficiles et nécessitent des représentations sous forme de plans. Tout ce processus reste à revisiter.

Travailler à plusieurs peut se faire sous différentes formes :

- échanges d'objets en trois dimensions ;
- échanges de plans pour coordination, validation et approbation ;
- échanges de plans pour information et utilisation.

### Comment partager ?

L'utilisation de la maquette numérique dans ces conditions conduit à des questions et des remises en cause de l'organisation à plusieurs niveaux :

Conception virtuelle



1. Échange d'information entre différents logiciels, c'est-à-dire réutilisation de la géométrie par les logiciels de simulation du comportement de l'ouvrage... Les points de vue ne sont pas les mêmes. Comment extraire les informations pertinentes, les adapter, les échanger en maintenant la cohérence d'ensemble entre les différents points de vue ?

Figure 7

Étude d'un rameau de communication entre les deux tubes d'un tunnel

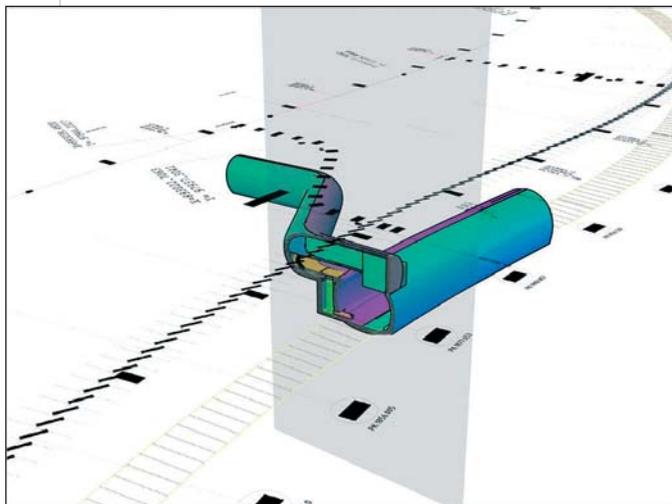
*Design of a cross-passage between the twin tubes of a tunnel*



Figure 8

Conception et implantation paramétrique d'un tunnel à voussoirs préfabriqués

*Design and parametric layout of a prefabricated-segment tunnel*



2. Échange et contrôle de parties de la maquette entre différents acteurs du projet, qui peuvent être des entités juridiques différentes liées entre elles par contrat dans le cadre du projet. La maquette doit permettre la prise en compte des responsabilités de chacun. Chaque entité produit des informations, dont elle est pleinement responsable, mais permet aux autres de les utiliser. Comment gérer et tracer ce besoin avec une maquette numérique ? La confiance mutuelle est indispensable.

3. Validation et contrôle de la contribution de l'un des partenaires par d'autres : responsable hiérarchique, responsable du projet, cellule de synthèse, bureau de contrôle... Traditionnellement, le « valideur » annote un plan. Comment faire avec la maquette numérique ? L'information sera stockée au niveau de l'objet. Faut-il visualiser sur les plans les objets approuvés ?

4. Utilisation de la maquette numérique sur le lieu de production. Traditionnellement, le compagnon utilise des plans sur chantier, et plus précisément les plans approuvés et bons pour exécution. Le même plan sert donc à la fois à approuver les informations du projet et à informer la production de ce qui est « bon pour exécution ».

Le contenu du plan est optimisé pour favoriser l'approbation, et n'est donc pas optimal pour l'exécution. Faut-il envisager des plans différents puisque la maquette contient aussi les informations nécessaires à la production ? Les outils de production ? Le planning ? Des éclatés de montage détaillant les phases de construction comme dans les jeux ?

**Qui fait quoi ?  
Les nouveaux métiers et l'évolution des rôles**

Pour pouvoir être traitée efficacement, l'information doit être structurée. Mais cette structuration est parfois contraignante, voire lourde, dans des projets de conception en évolution continue. La conception est une phase dynamique et innovante, où les échanges informels et non structurés doivent être maintenus pour ne pas brider la spontanéité. Régulièrement des problèmes surgissent et des décisions correctives sont prises. Puis le niveau de détail augmente et le cycle recommence. Il y a donc risque qu'une structuration mal gérée bride la créativité.

La numérisation et la gestion des plans par informatique ont déjà mis en évidence le rôle clé des administrateurs de ces systèmes et l'importance de l'implication très tôt de tous les acteurs et d'une définition claire des processus. Pour être efficace, il faut que cela se mette en place dès le début du projet.

**■ Conclusions et défis**

**Outils**

Des logiciels matures existent sur le marché. Le défi est de passer du trait à l'objet en trois dimensions, du dessin industriel à la maquette numérique. Un autre défi est d'avancer sur les normes d'échange et les outils de contrôle associés.

**Méthodes**

L'ouvrage à construire est défini par un ensemble de composants. Le plan reste néanmoins un outil de communication et de dialogue pour gérer la complexité. La nomenclature des composants s'ajoute à la liste des plans.

## Processus

Ils sont à revisiter compte tenu des possibilités de la maquette numérique qui devient le référentiel unique. L'échange de données est facilité car les données ne sont plus reprises manuellement, chacun étant responsable de sa valeur ajoutée. La validation utilise le plan comme outil de dialogue, mais l'information est gérée au niveau des objets. Les plans ne sont que des points de vue particuliers de la maquette numérique.

## Organisation

La mise en place d'une décomposition en composants partagés est fortement structurante. Le gestionnaire de la maquette devient un rôle essentiel.

## Entreprise

Le changement est d'abord culturel. Le succès dépend de la conduite du changement. Tout le monde est concerné, depuis les utilisateurs à former jusqu'à la hiérarchie qui doit apporter son soutien. ■

Cet article s'appuie sur des travaux de recherche en cours dans le cadre du projet de recherche européen INPRO ([www.inpro-project.eu](http://www.inpro-project.eu)) partiellement financé par la Commission Européenne et le projet de recherche français COMMUNIC partiellement financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

## ABSTRACT *Virtual construction*

*Cl. Dumoulin*

*Virtual Construction promotes the use of digital mock up and computer simulations for analysing the behaviour of a structure. The aim is to identify and anticipate problems as soon as possible. All the data defining the structure are stored into the digital mock up in order to guarantee updated information and avoid retyping again the needed data. This paper provides an overview regarding the use of that technology in civil engineering. Promising results have been identified when the user is alone. Problems remain to be solved when the user is in a team.*

## RESUMEN ESPAÑOL *Construcción virtual*

*Cl. Dumoulin*

*La construcción virtual consiste en utilizar una maqueta y simulaciones digitales para analizar mejor el comportamiento de una obra. El objetivo consiste en identificar y anticipar los problemas lo antes posible. La maqueta digital contiene la representación de la obra en su totalidad, lo que permite garantizar informaciones actualizadas y evitar las nuevas entradas de datos. En el presente artículo se analiza la utilización de esta tecnología en la ingeniería civil. Se han identificado diversos resultados preliminares prometedores en utilización solitaria. Quedan por resolver diversos problemas de organización cuando se utiliza de forma compartida.*