

# sommaire

## éditorial

## structures

<i>Justification des fondations de grues à tour – L'approche Bureau Veritas –</i> <i>P.-E. THÉVENIN</i> .....	6
--	---

## ORGAGEC'08

### Matériaux organiques pour la construction : performances techniques et environnementales

<i>Suivi environnemental de la production d'enrobés bitumineux dans une centrale</i> <i>au gaz naturel – E. CHÂTEAU, M. LANGLET, Y. BAUDRU, P. MONÉRON</i> .....	15
---	----

<i>Influence de la température sur le comportement des composites de PRF</i> <i>pour le génie civil – M. ROBERT, P. COUSIN, B. BENMOKRANE</i> .....	21
--	----

<i>Durabilité des géotextiles aramides en milieu alcalin : recherche</i> <i>d'indicateurs de vieillissement – G. DEROMBISE, L. VOUYOVITCH</i> <i>VAN SCHOORS, P. DAVIES</i> .....	28
---	----

<i>Des ressources renouvelables dans les chantiers routiers. Une alternative</i> <i>au tout pétrole – C. DENEUVILLERS, M. CHAPPAT</i> .....	33
--	----

résumés — abstracts.....	4
annonces de colloques .....	42
recommandations aux auteurs.....	3 <sup>e</sup> de couv
bulletin d'abonnement .....	2



## BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS  
Tél. 01 42 86 55 73 – Fax 01 42 60 45 35

Nom .....

Raison sociale.....

Adresse .....

Code postal ..... Ville ..... Pays .....

Je m'abonne pour l'année 2009 (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : <b>216 €</b>  | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : <b>261 €</b>  |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : <b>271 €</b> | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : <b>312 €</b> |

### À partir du 2<sup>e</sup> abonnement :

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : <b>174 €</b>  | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : <b>209 €</b>  |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : <b>217 €</b> | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : <b>250 €</b> |

*Surtaxe aérienne 2,90 € par volume (2,90 x 6) soit 17,40 €*

- Je joins :
- ☐ Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
  - ☐ Un virement bancaire aux Editions ESKA -  
BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

\* 6/2008

## LISTE DES ANNONCEURS

ÉDITIONS ESKA – 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> de couv

Ce dernier numéro de l'année 2008 paraît alors que l'année 2009 est déjà bien entamée. Ce délai traduit l'ampleur du travail de rénovation de la revue que nous menons en ce moment.

En attendant que notre partenariat avec l'AFGC et l'AUGC se concrétise, nous vous proposons dans ce numéro, ainsi que dans le suivant, des articles issus d'une manifestation qui s'est tenue fin août 2008, **ORGAGEC'08**, et qu'une association qui vous sera présentée ci-dessous a organisée.

Par ailleurs ce numéro permet de renouer une fois de plus avec la tradition qui a fait le renom de la revue, dans sa version actuelle, mais également dans sa version historique des Annales de l'ITBTP. Un spécialiste du bureau Veritas nous propose en effet une méthode de justification des fondations de grues à tour. Par cet apport consistant sur un problème récurrent de chantier, la revue continue ainsi à contribuer au bon exercice de la profession d'ingénieur du secteur du BTP.

François BUYLE-BODIN  
*Le rédacteur en chef*

## L'Association ORGAGEC – Fondements et projets

Dans les métiers de la construction, pour la majorité des acteurs, le terme de matériau organique n'évoque rien de précis. Et pourtant il ne s'agit pas obligatoirement de matériaux récents : le bois et le bitume sont employés depuis au moins cinq millénaires. Mais il est vrai que les matériaux de synthèse n'ont effectivement investi le champ de la construction que dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle et que le début du XXI<sup>e</sup> siècle voit se manifester une véritable explosion de leur utilisation. Il appartient aujourd'hui de prendre la mesure du phénomène en termes de développement durable.

Ce souci est à l'origine du concept **ORGAGEC** qui part de plusieurs constats. La compétence scientifique et technique existe, mais se trouve dispersée au sein d'équipes spécialisées très diverses, peu accessibles, ou encore parmi les seniors qui ont souvent été des précurseurs pour les différents métiers de la construction. L'importance grandissante que présentent les matériaux organiques par rapport aux matériaux de construction traditionnels n'est pas assez prise en compte dans les formations actuelles.

Ces constats ont amené une équipe pluridisciplinaire à se rassembler et à se donner pour objectif, en premier lieu de développer des actions de formation sous forme de colloques, journées d'études, rencontres, stages, etc. pour rassembler les connaissances et permettre les échanges entre des professions souvent cloisonnées. À plus long terme elle souhaite pouvoir aborder le problème de la qualité du bâti utilisant les matériaux organiques dans les systèmes constructifs contemporains, ainsi que dans les opérations de rénovation ou de réparation, dans le respect des spécificités régionales, culturelles et climatiques, tout en prenant en compte les incertitudes qui subsistent, en termes sanitaires et environnementaux notamment.

Cette équipe a créé une association – **ORGAGEC** « Matériaux organiques pour la construction » qui se positionne comme une instance neutre de rencontre entre les acteurs concernés, qu'il s'agisse d'enseignants et de chercheurs, de professionnels de la construction, de la santé et de l'environnement, ou encore de responsables des collectivités territoriales. Cette association s'appuie, pour les manifestations qu'elle organise (colloques, journées d'études, etc.), sur les structures scientifiques, techniques ou de transfert régionales, nationales voire européennes ou internationales adéquates ; son rôle est essentiellement incitatif et assorti d'une collaboration active avec les partenaires potentiels, matérialisée par un label destiné à garantir l'authenticité de l'événement. Elle fait appel par ailleurs à la compétence et à l'expérience des précurseurs disponibles, susceptibles d'accélérer la transmission du savoir et des pratiques et reste résolument ouverte au dialogue international, principalement européen, pour aider les enseignants, les chercheurs et les professionnels concernés à mieux prendre en compte les progrès scientifiques et techniques en cours de développement.

Dans ce cadre, l'association a organisé **ORGAGEC'08 - Matériaux organiques pour la construction – Performances techniques et environnementales**, qui s'est tenu dans les locaux de l'ENPC à Marne la Vallée du 27 au 29 août 2008. L'accent a été mis sur la valorisation des déchets et des matériaux locaux, la durabilité des matériaux et des structures, le renforcement des structures par matériaux composites collés et les structures innovantes (structures textiles tendues, structures mixtes contrecollées, nouveaux usages du bois). Les communications présentées illustrent la grande vitalité et le développement des matériaux organiques dans les différents domaines de la construction. Les *Annales du BTP* ont accepté d'en reprendre quelques unes, caractéristiques de la richesse et de la diversité des thèmes abordés.

Yves MOUTON  
*Président d'ORGAGEC*

## **JUSTIFICATION DES FONDATIONS DE GRUES À TOUR – L'APPROCHE BUREAU VERITAS**

P.-E. THÉVENIN

La stabilité d'une grue à tour doit être démontrée lors de son installation sur un chantier. Malheureusement, il n'existe actuellement aucun référentiel reconnu pour la justification des fondations d'une grue, ce qui génère parfois quelques difficultés, faute de base commune de dialogue entre les différents intervenants (fabricant de la grue, entreprise, bureau de contrôle).

Cet article présente la démarche et les critères retenus par Bureau Veritas pour ses propres prestations de contrôle des fondations de grue. Dans un premier temps, les principes des vérifications sont donnés et expliqués. Ces principes sont ensuite déclinés pour les deux grandes configurations de grues habituellement rencontrées : grues sur châssis (grues lestées) et grues avec fût encastré (grues scellées).

Cette pratique est le fruit d'une démarche entreprise depuis plusieurs années, qui comporte de nombreuses discussions en interne et avec la profession. Elle pourra, sans nul doute, servir de base pour l'élaboration d'un référentiel acceptable et reconnu par tous.

## **DESIGN OF TOWER CRANE FOUNDATIONS – THE BUREAU VERITAS APPROACH**

*The stability of a tower crane must be proved before its installation on a construction site.*

*Unfortunately, there is today no regulation or standard for the design of the crane foundations. This generates sometimes difficulties during discussions between the different parts (manufacturer of the crane, the builder, the controller).*

*This paper presents the method and the criteria adopted by Bureau Veritas for the control of a crane foundation. Firstly, the principles of the checks are given and explained. These principles are then described for two common configurations of cranes: cranes on cross-shaped base (ballasted cranes) and cranes on fixing angles (embedded cranes).*

*This practice is the result of a several-year brain-work. It can be used as basis for the elaboration of approved and useful rules.*

## **SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE LA PRODUCTION D'ENROBÉS BITUMINEUX DANS UNE CENTRALE AU GAZ NATUREL**

E. CHÂTEAU, M. LANGLET, Y. BAUDRU, P. MONÉRON

La fabrication d'enrobés à chaud, par l'utilisation de combustibles fossiles et de liants bitumineux, s'accompagne d'émissions dans l'atmosphère de composés organiques et inorganiques. La réduction de ces émissions impose la connaissance et la maîtrise des procédés de fabrication. Pour ce faire la centrale du parc de Blois a été instrumentée pour suivre en continu et mémoriser les paramètres de fabrication et les consommations d'énergies correspondantes. À l'échelle de l'année, l'analyse de la variation de consommation en combustible fossile permet de cibler des expérimentations destinées à quantifier les rejets polluants à l'atmosphère pour corréler ces émissions à la consommation. À terme, l'objectif est

de renseigner une base de données concernant des valeurs de flux d'émissions polluantes, représentatives du fonctionnement réel d'une centrale d'enrobage.

## **ENVIRONMENTAL MONITORING OF HOT MIXES PRODUCTIONS IN A NATURAL GAS ASPHALT PLANT**

*The asphalt pavement production generates organic and inorganic compounds emission into the air. The gas emissions reduction needs the absolute knowledge and the control of production process. The asphalt pavement production unit of Blois was followed to get the continuous parameters of production and power consumption. The analysis of the consumption year-long variations helps us to do other focused experimentations about the gas emission values to correlate them with the power consumption. Eventually we want to realize a data base about the values of pollutants emissions particular to the asphalt pavement production units.*

## **INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE COMPORTEMENT DES COMPOSITES DE PRF POUR LE GÉNIE CIVIL**

M. ROBERT, P. COUSIN, B. BENMOKRANE

Les matériaux polymères renforcés de fibres (PRF) sont de plus en plus utilisés dans les ouvrages de génie civil à cause de leurs nombreux avantages par rapport à l'acier d'armature. Toutefois, certaines conditions d'application peuvent potentiellement affecter leur durabilité, rendant cruciales les études exhaustives de leur durabilité à long terme pour permettre leur plein développement. Ces études doivent obligatoirement faire intervenir un facteur accélérant comme la température permettant de les effectuer dans des délais raisonnables. Toutefois, l'usage de températures de conditionnement trop élevées (60° à 80°C) peut amplifier de manière non représentative la réduction des propriétés et la diffusion de l'humidité et mener à une sous-estimation de la durabilité des composites de PRF impliquant même une conception trop conservatrice des ouvrages contenant ces nouveaux matériaux. Le présent article explicite les effets de la température sur les propriétés des composites de PRF tout en présentant certains résultats expérimentaux appuyant les conclusions.

## **EFFECT OF THE TEMPERATURE ON THE BEHAVIOUR OF FRP COMPOSITE IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS**

*Fibre Reinforced Polymers (FRP) composites are increasingly being used in civil engineering applications due to their numerous advantages. Moreover, some environmental conditions can potentially affect their long-term durability. Consequently, the study of their long-term behaviour is crucial to ensure their full development. To perform durability study in a reasonable delay, an accelerated factor, like high temperature, is generally used. However, the use of too high temperature of conditioning (60° to 80°C) could amplify the reduction of the properties leading to conservative long-term properties. The present paper clarifies the effects of the temperature on the mechanical and*

*barrier properties of FRP materials for civil engineering applications, by presenting some experimental results and conclusions of laboratory accelerated studies.*

### **DURABILITÉ DES GÉOTEXTILES ARAMIDES EN MILIEU ALCALIN : RECHERCHE D'INDICATEURS DE VIEILLISSEMENT**

G. DEROMBISE, L. VOUYOVITCH VAN SCHOORS,  
P. DAVIES

Du fait de leurs propriétés initiales élevées, les géotextiles à base de fibres aramides sont utilisés depuis une dizaine d'années pour le renforcement des sols. Aujourd'hui, les fabricants de géotextiles envisagent leur utilisation dans les sols traités. Cependant le comportement à long terme des fibres aramides dans ces conditions est encore mal connu. Une étude de durabilité en milieu basique a donc été initiée afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de dégradation mis en jeu. Ainsi, les caractéristiques chimiques, physiques et morphologiques des fibres *Twaron 1000* ont été suivies à différents temps de vieillissement et corrélées aux propriétés mécaniques.

### **DURABILITY OF ARAMID GEOTEXTILES IN AN ALKALINE ENVIRONMENT: SCREENING OF AGING INDICATORS**

*Because of their high initial properties, aramid geotextiles have been used for a decade for ground reinforcement. Today, the geotextiles manufacturers think about their use in treated grounds. However there are few data on the long-term behaviour of aramid fibres under these conditions. Consequently, a durability study in a basic environment has been carried out in order to improve understanding of the degradation mechanisms involved in ageing. On that purpose, chemical, physical and morphological characteristics of Twaron 1000 fibres have been followed at different ageing times and correlated to the mechanical properties.*

### **DES RESSOURCES RENOUVELABLES DANS LES CHANTIERS ROUTIERS. UNE ALTERNATIVE AU TOUT PÉTROLE**

C. DENEUVILLERS, M. CHAPPAT

En matière de ressources énergétiques, le monde est soumis depuis quelque temps à des secousses énormes : d'une part, une montée fulgurante des prix du pétrole et des autres ressources énergétiques dont le prix en est dépendant ; d'autre part, des perspectives de raréfaction de la ressource pétrolière à échéance de 25 à 30 ans qui posent le problème de son remplacement.

Bien entendu, cette situation soulève la question essentielle du besoin en énergie de chaque pays pour le présent et l'avenir. Et, partant, quelle énergie. Ces questions sont non seulement des questions de politique mais aussi des questions de société.

Comment les acteurs de la route pourraient-ils contribuer à des solutions au moins partielles ?

Nous présentons dans le texte une politique adoptée par un constructeur privé, déterminé à introduire dans ses productions

les critères du développement durable et de la chimie verte. Le bitume étant un dérivé du pétrole, peut-on le remplacer ? La plupart des produits chimiques utilisés dans la route étant issus de la pétrochimie, peut-on les remplacer ?

En s'orientant vers les ressources végétales, on peut contribuer à réduire la dépendance énergétique. On montre comment, à quel prix et avec quelles précautions. Il est inévitable, dans ce raisonnement, d'aborder les critères de l'analyse du cycle de vie et d'examiner comment on peut les utiliser de manière lisible.

Cette démarche d'un industriel a déjà produit d'excellents résultats, décrits dans le texte. On essaie de montrer aussi comment les ressources végétales peuvent être une chance pour les pays en développement et pour les pays développés. Les uns peuvent produire une nouvelle ressource énergétique et augmenter leur niveau de vie. Les autres trouveraient là une solution partielle à leurs ressources en énergie et en certains produits de base (bitume) pour la route en particulier.

La Route, lien universel entre les peuples, serait encore porteuse d'avenir et d'espoir.

### **ROAD CONSTRUCTION REPLACEABLE MATERIALS. AN ALTERNATIVE TO OIL BASED MATERIALS**

*For some time the world has been subjected enormous upheavals with regard to energy resources: on one hand there is the steep rise in the price of oil and the other energy sources whose price depends on it; on the other hand, the prospects are that during the next 25 to 30 years oil resources will become increasingly scarce, which raises the problem of its replacement.*

*This situation obviously raises the vital question of the present and future energy needs of each country, and, consequently, what type of energy. These are not only political issues but also issues for society.*

*How could the roads sector help to find at least partial solutions?*

*This paper will describe a policy adopted by a private sector construction company which is determined to apply the criteria of sustainable development and green chemistry in its products. Bitumen is a derivative of oil, can it be replaced? Most of the chemical products used in roads are petrochemical in nature, can they be replaced?*

*Turning towards vegetable resources provides one way of reducing energy dependency. The paper demonstrates how this could be done, and at what price and with what precautions. This topic inevitably involves a discussion of the criteria of life-cycle analysis and an examination of how they can be applied in a clear manner.*

*This response from industry has already provided some excellent results, which are described in this paper. It also attempts to show how vegetable resources may provide an opportunity for both developing and developed countries. The first could produce a new energy resource and increase their standard of living. The second could find a partial solution to their energy resources problems.*

*Roads, which provide a universal link between different peoples, may still provide a future and hope.*



# JUSTIFICATION DES FONDATIONS DE GRUES À TOUR – L'APPROCHE BUREAU VERITAS

P.-E. THÉVENIN

BUREAU VERITAS, Département technique Construction, 16, chemin du Jubin, 69570 DARDILLY

## I. GÉNÉRALITÉS

### A. Le contexte réglementaire et normatif

#### *Les textes réglementaires*

L'arrêté du 1<sup>er</sup> mars 2004 impose au chef d'établissement (dans le cas général, l'entreprise) de faire procéder à la vérification de la grue qu'il met en place sur son chantier et d'établir l'adéquation de la grue au site, ce qui consiste à vérifier :

- que le type de grue envisagé est compatible avec les charges à soulever et les portées prévues ;
- que la grue restera stable pendant toute la durée du chantier, compte tenu des conditions locales de sol et de vent.

La Recommandation R.406 de la CNAMTS (Caisse nationale d'assurance maladie pour la protection des travailleurs salariés) définit les dispositions à prendre pour la protection des travailleurs et précise en particulier comment doit être évalué le vent applicable à la grue pour les justifications. D'autres documents existent localement et peuvent imposer des dispositions complémentaires : arrêtés municipaux ou préfectoraux.

#### *Les textes normatifs*

Les grues sont calculées selon des règles spécifiques : règles FEM, normes DIN... Dans ce domaine comme dans d'autres, la normalisation européenne se met progressivement en place et des normes harmonisées viennent peu à peu uniformiser les règles de dimensionnement.

Les grues sont dimensionnées en exploitation sous vent limité (vent de service) et en situation hors service sous l'effet d'un vent de tempête (dénomination FEM 1.005).

Les éléments de fondation des grues, réalisés dans la majorité des cas par l'entreprise, ne font pas l'objet d'un texte spécifique. Leur dimensionnement est donc généralement basé sur les prescriptions des DTU 13.11 et 13.12 (fondations superficielles de bâtiment), DTU 13.2 (fondations profondes de bâtiment) et éventuellement fascicule 62 (fondations d'ouvrages de génie civil).

### B. Types de grues et configurations possibles

Vis-à-vis des fondations, deux grandes familles de grues existent.

#### *Les grues sur châssis (ou grues lestées)*

La grue est juste posée sur ses fondations. Elle ne peut donc pas tirer sur celles-ci et les réactions verticales sont

toujours des compressions. Le lest de base déterminé par le fabricant de la grue assure l'équilibre et évite les soulèvements.

Dans cette famille de grues, on distingue :

- les grues reposant directement sur une fondation béton, par l'intermédiaire de platines non ancrées au soulèvement mais pouvant être bloquées dans le sens horizontal ;



- les grues sur bogies, circulant sur une voie de grue. Un cas particulier est la grue bloquée en position fixe sur un tronçon de voie restreint (grue calée avec moteur de roulement démonté).



### *Les grues avec fût encastré*

Ces grues n'ont pas de lest. Leur mât est encastré dans la fondation par l'intermédiaire d'un tronçon spécifique. La fondation joue alors le rôle de lest et doit prémunir du renversement.



Les efforts verticaux aux appuis (pieds de scellement) sont des tractions et des compressions. Les efforts de traction pouvant être très importants, ces cas méritent une grande attention.

## **C. L'environnement de la grue**

Une grue est installée dans un environnement qui va agir sur elle. Il est donc nécessaire de disposer des informations suffisantes sur cet environnement pour pouvoir assurer la stabilité de la grue.

### *Le sol*

L'étude de sol doit caractériser le sol sous l'emplacement de la fondation de la grue : nature des couches de sol et caractéristiques de ces couches, contraintes admissibles... Le choix du mode de fondation de la grue est en principe de la responsabilité du bureau d'études de sol. Cependant, il est très rare que celui-ci soit missionné pour les fondations de la grue. Il est alors d'usage de reconduire pour la

grue le même mode de fondation que pour le bâtiment (fondations superficielles ou fondations profondes). Toute remise en cause de ce mode de fondation doit être soumise à l'approbation du bureau d'études de sol.

Les informations données par l'étude de sol menée pour le bâtiment projeté peuvent ne pas suffire, en particulier lorsque les niveaux de fondation du bâtiment et de la grue ne sont pas les mêmes : la connaissance du sol sous l'ouvrage ne donnerait alors aucune indication sur le sol supportant la grue. Dans ce cas, le géotechnicien doit être consulté pour qu'il complète son étude.

Une étude spécifique pour les fondations de la grue est également nécessaire lorsque les contraintes liées à la nature de l'ouvrage à construire sont incompatibles avec celles de la grue. Par exemple, un réservoir d'hydrocarbure de grand diamètre tolère un tassement différentiel important entre la périphérie et le centre, alors que l'assise de la grue impose une valeur très limitée des déformations différentielles entre appuis.

### L'eau

Les niveaux d'eau dans le sol, voire les niveaux de crues, doivent être connus. Dans certains cas, le niveau d'eau peut atteindre la fondation de la grue, parfois même le lest de la grue.

En particulier, lorsque le fût de la grue est encastré dans un massif de fondation, le poids du massif assure la stabilité. Il faut alors tenir compte de l'effet défavorable de la poussée d'Archimède sur le massif pour vérifier l'équilibre.

Ce cas se produit pour une fondation proche de la nappe phréatique ou lorsque le chantier est situé au bord d'un fleuve ou d'une rivière.

Un autre cas à envisager est celui où un pompage de la nappe à proximité des fondations de la grue pourrait venir perturber l'équilibre de celle-ci, du fait des tassements différentiels possibles.

### Le vent

La charge de vent est un paramètre essentiel pour le dimensionnement et la vérification des fondations de la grue.

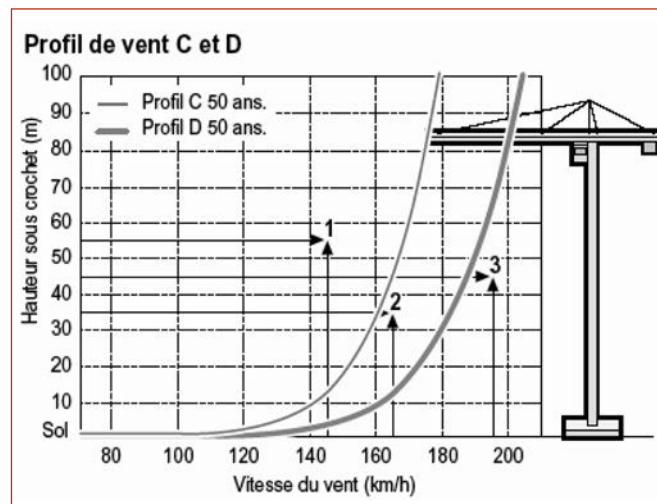
#### Vent en service et vent hors service

Deux configurations de vent sont prises en considération : Le **vent en service** correspond à la phase d'exploitation de la grue. La vitesse maximale du vent de service est habituellement de 72 km/h. Cette vitesse est réduite si les charges soulevées présentent une grande surface (exemple : banche) ; Le **vent hors service** est le vent caractérisé par la vitesse maximum instantanée (vitesse de pic établie sur 3 secondes) à une hauteur de 10 mètres pour une période de retour moyenne de 50 ans. Le vent hors service doit bien entendu être évalué en tenant compte des éventuels effets de site liés à l'implantation et l'environnement proche de la grue. Il pourrait donc y avoir, en principe, des valeurs différentes selon les directions de vent considérées. Cependant, dans le cas général, seule la valeur maximale est fournie. La valeur de la vitesse de vent hors service peut

aussi être évaluée pour une autre hauteur que 10 mètres : hauteur sous crochet par exemple.

#### Les profils de vent

La valeur de la vitesse de vent hors service n'est pas directement utilisée pour le calcul de la grue. En effet, pour ne pas avoir à calculer les grues pour chaque vitesse de vent possible, les constructeurs de grue utilisent des profils de vent enveloppe (voir figure ci-dessous tirée de la Recommandation R.406).



Le profil C est le minimum requis pour toutes les grues : si la vitesse du vent hors service est inférieure à la vitesse donnée par le profil C, la grue doit être calculée pour la vitesse du profil C.

- Par exemple, si la vitesse de vent applicable à la grue, compte tenu des éventuels effets de site, a été estimée à 145 km/h pour une hauteur de 55 mètres, la grue doit être calculée pour le vent correspondant au profil C (cas du point 1).

Si la vitesse est comprise entre les profils C et D, les réactions sous la grue sont calculées sous l'effet d'un vent correspondant au profil D.

- C'est le cas du point 2 (vitesse 165 km/h à 35 m).

Si la vitesse du vent hors service est située au-delà du profil D, les réactions sous la grue doivent être calculées par le fabricant de la grue sous l'effet de ce vent spécifique.

- C'est le cas du point 3 (vitesse 195 km/h à 45 m).

Remarque :

La vitesse du vent varie selon la hauteur, selon des lois complexes (cf. NF EN 1991-1-4). La figure de la recommandation R.406 n'est pas conçue pour extrapoler la vitesse du vent à une hauteur donnée à partir de la vitesse connue à une autre hauteur. Elle sert uniquement à définir le profil de vent applicable à la grue, selon la position d'un point sur cette figure.

#### Effets de site et étude aérodynamique

L'estimation du vent sur un site donné est en principe effectuée par un prestataire spécialisé (CSTB ou Météo France par exemple).

Dans le cas général, aucun effet de site n'est à prendre en compte (un effet de site est un phénomène de masque, de



tourbillon, ou d'accélération de la vitesse du vent du fait de l'environnement proche de la grue : autres bâtiments, relief marqué ...). Le document remis par le prestataire indique alors le profil de vent qui doit être utilisé pour le dimensionnement et la vérification des fondations de la grue.

Dans certains cas, un effet de site est à craindre et une étude spécifique doit être réalisée.

Cette étude consiste à étudier en soufflerie une maquette représentative de la grue avec son environnement (constructions environnantes, relief).

Cette étude donne plusieurs informations :

- valeur des coefficients d'amplification des efforts de vent (moment aérodynamique et effort tranchant) dans chaque direction ;
- comportement de la grue face aux vents qui la sollicitent : mise en girouette, mise en travers ou autorotation.

L'étude aérodynamique permet d'identifier les grues et les configurations pour lesquelles les tableaux standard des constructeurs, basés sur les profils de vent, ne sont pas suffisants. Pour ces grues, le constructeur de la grue doit fournir des valeurs spécifiques des réactions d'appui.

### Vérification de la valeur de vent hors service utilisée

La cohérence entre la vitesse du vent hors service, spécifique au site, et la valeur de vent hors service qui a servi de base aux calculs du fabricant de la grue doit être vérifiée.

Pour cela, il est indispensable que les informations nécessaires (profil de vent, période de retour) figurent dans l'entête des tableaux de réactions qui sont fournis par les constructeurs de grue.

C'est d'autant plus nécessaire que la France prend en compte une période de retour de 50 ans pour le vent hors service, ce qui n'est pas le cas de tous les pays (qui peuvent rester sur la période de retour de 25 ans proposée par les règles FEM). Dans le cas de grues provenant de l'étranger, il peut y avoir un doute sur la période de retour réellement utilisée pour le calcul des réactions.

Sur ce point, des améliorations dans la qualité des informations fournies par les fabricants de grues sont possibles. Il serait ainsi souhaitable que :

- dans les tableaux classiques de réactions d'appui, la période de retour utilisée pour calculer les réactions soit systématiquement indiquée,
- dans les tableaux établis suite à une étude aérodynamique (effet de site), la référence à l'étude aérodynamique soit là aussi systématiquement indiquée.

## II. LES JUSTIFICATIONS

### A. Les données nécessaires au dimensionnement des fondations

#### 1. Les éléments nécessaires

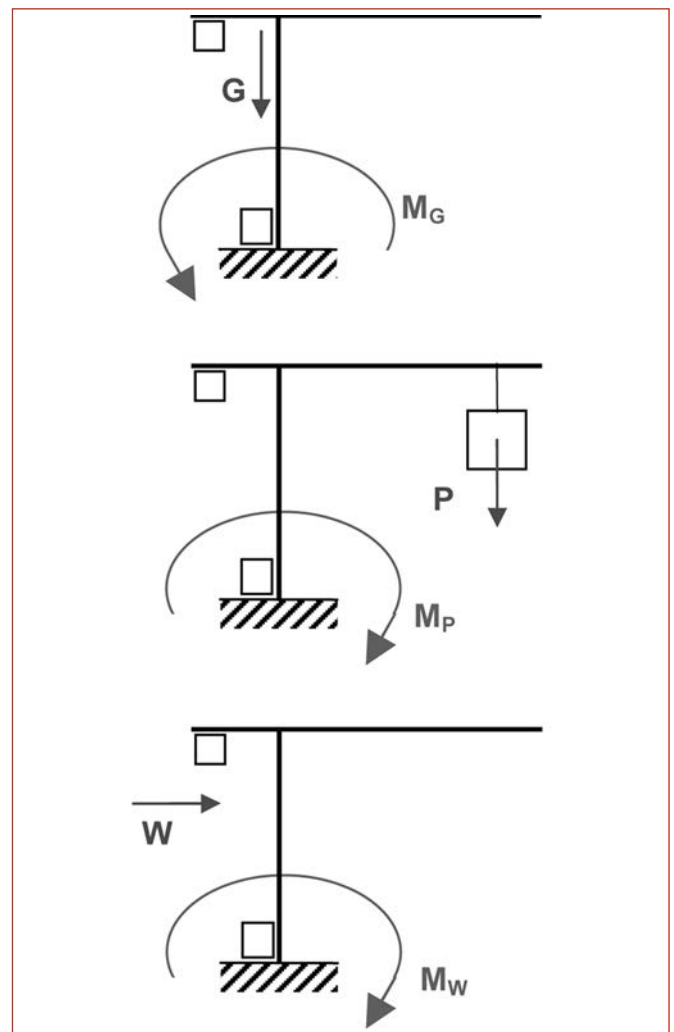
Pour dimensionner (ou vérifier) une fondation de grue, il est nécessaire de disposer de toutes les informations utiles :

- plans d'installation du chantier (vue en plan, coupes) ;
- nature et caractéristiques du sol à l'emplacement de la grue, au niveau de fondation envisagé pour celle-ci ;
- identification et caractéristiques de la grue (hauteur sous crochet, flèche, lest) ;
- profil de vent applicable à la grue, compte tenu des éventuels effets de site ;
- valeur des charges transmises aux appuis de la grue, données par le fabricant de la grue sous forme de tableaux.

#### 2. Les actions agissant sur les fondations de la grue

Les actions (ou cas de charge) agissant sur les fondations sont :

- les charges permanentes  $G$  : poids de la grue, lest de base et contrepoids. Ces charges génèrent une action verticale et un moment arrière (la grue préchargée par le contrepoids penche vers l'arrière) ;
- la charge d'exploitation  $P$  : la charge levée génère une action verticale et un moment avant ;
- le vent  $W$ , qui se traduit par un effort horizontal et un moment de renversement. La direction du vent peut être quelconque dans le cas du vent en service et est en principe orientée dans le sens de la flèche dans le cas du vent hors service, du fait de la mise en girouette de la grue ;
- les effets d'entraînement qui se traduisent par un couple de torsion  $C$  d'axe vertical, lorsque la grue est en service.



Ces actions génèrent des efforts à la base de la grue. Ces efforts sont transmis aux fondations par l'intermédiaire des 4 appuis.

### 3. Les efforts donnés par les constructeurs de grue

Les tableaux fournis par les constructeurs donnent les efforts à la base de la grue. On a généralement les informations suivantes :

- réactions verticales à chaque appui, engendrées par les charges permanentes, la charge levée et la flexion de la grue sous l'effet combiné de ces charges et du vent ;
- effort tranchant global à la base de la grue, dans chaque direction X et Y, sous l'effet du vent ;
- couple de torsion d'axe vertical lié à l'exploitation de la grue.

Pour les configurations en service et hors service, les valeurs des réactions verticales sont données pour différentes hauteurs de mât (en fait la hauteur sous crochet) sous l'effet de combinaisons des charges non pondérées.

On trouve également dans certains cas (grues scellées en particulier) des tableaux dans lesquels les efforts à la base de la grue sont exprimés sous la forme d'un torseur :

- M : moment de renversement sous l'effet des charges appliquées ;
- V : effort vertical dû aux charges permanentes et d'exploitation ;
- H : effort horizontal dû au vent ;
- C : couple de torsion d'axe vertical.

Les valeurs de ces efforts sont également issues de combinaisons de charges non pondérées.

## B. Combinaisons d'actions et états limites

Le dimensionnement et la vérification des fondations de grues sont basés sur la théorie des états limites. Différents critères (états limites) portant sur la reprise des efforts, le comportement des matériaux, l'équilibre et les déformations sont définis, selon que la grue est en service ou hors service.

### 1. Combinaisons pour les états limites de service

Pour les vérifications, on distingue l'ELS rare et l'ELS fréquent. Dans les combinaisons ci-dessous,  $W_{ES}$  est le vent en service et  $W_{HS}$  est le vent hors service :

Configuration grue	Combinaison	Remarque
Grue en service	$G + Q + W_{ES}$	ELS fréquent
Grue hors service	$G + W_{HS}$	ELS rare

Remarque : le cas  $G + W_{HS}$  ne doit pas être considéré comme une combinaison accidentelle.

À l'ELS, les réactions verticales sous appui peuvent être tirées directement des tableaux : il suffit de récupérer la valeur extrême, qui correspond généralement au cas d'un vent en diagonale, pour effectuer les vérifications relatives à un appui.

### 2. Combinaisons pour les états limites ultimes

Les combinaisons fondamentales ELU sont les suivantes :

Configuration grue	Combinaison	Remarque
Grue en service	$1,35 G + 1,5 Q + 1,5 W_{ES}$ $G + 1,5 Q + 1,5 W_{ES}$	
Grue hors service	$1,35 G + 1,5 W_{ES}$ $G + 1,5 W_{ES}$	

Dans les combinaisons ELU en configuration de service, la charge soulevée et le vent sont affectés du même coefficient 1,5 car il y a réellement concomitance entre ces deux actions.

Pour la configuration hors service, le coefficient de pondération appliqué au vent  $W_{HS}$  est tiré de l'eurocode 0 (NF EN 1990) ; la valeur de vent appliquée à la grue est en effet une valeur caractéristique au sens eurocode (NF EN 1990 art. 4.1.2 (7) note 2).

Ce coefficient de 1,50 sur le vent traduit la probabilité que le parc des grues installées rencontre ce vent hors service. Pour évaluer le risque de chute d'une grue, il est en effet impératif de tenir compte de l'ensemble de la population (plusieurs milliers de grues sont en service en France) et ne pas se limiter à la fondation d'une grue spécifique de cette population. Ce coefficient indique également qu'on n'accepte pas de diminuer la sécurité des constructions environnantes du fait de la présence d'une grue.

### 3. États limites à prendre en compte

Les fondations sont à vérifier en configuration de service et en configuration hors service.

Pour bâtir le tableau suivant, nous nous sommes inspirés des passages pertinents tirés des DTU 13.11 et 13.12 (fondations superficielles), du DTU 13.2 (fondations profondes), du fascicule 62 (fondations d'ouvrages de génie civil) et du Guide pratique des fondations de remontées mécaniques publié en 1993 par le CEBTP et le STRM (Service Technique des Remontées Mécaniques – ministère des Transports) :

État limite	Type de vérification	
Mobilisation du sol : capacité portante	ELS	ELU
Décompression du sol	ELS	ELU
Renversement - Glissement		ELU
Déplacements – Tassements différentiels	ELS	
Matériaux constitutifs des fondations	ELS	ELU
Arrachement - Poinçonnement		ELU

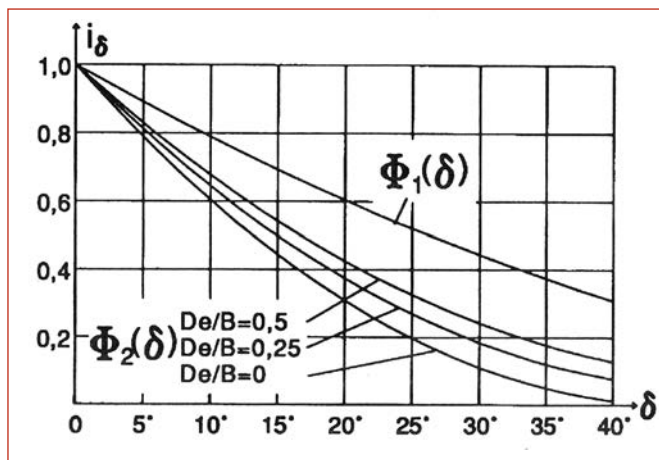
Selon la nature des fondations de la grue et le type de grue (lestée, encastrée), les états limites les plus pertinents sont utilisés.

## C. Critères de justification

### 1. État limite de mobilisation du sol - Vérification de la portance

À l'état limite de service, la contrainte sous la fondation doit être comparée à la contrainte admissible à l'état limite de service donnée par le rapport de sol. Pour cette vérification, c'est la combinaison ELS fréquent qu'il convient d'utiliser.

La vérification de la contrainte au sol doit tenir compte de l'effort horizontal, qui influe sur la forme du diagramme de pression et entraîne une diminution de la contrainte admissible, du fait de l'obliquité de la résultante (cf. DTU 13.12 art. 3.22, fascicule 62 annexe F1).



Coefficient minorateur en fonction de l'inclinaison de la charge (fascicule 62)

À défaut de calculs plus poussés, on peut utiliser les valeurs suivantes, établies pour une profondeur d'encastrement équivalente  $D_e = 0$ , et pour des inclinaisons de 5, 10 ou 15° :

	5°	10°	15°
Sols frottants : sables et graves	0,80	0,60	0,45
Sols cohérents : argiles, limons, craies, marnes, roches	0,90	0,80	0,70

En configuration de service, si la vérification à l'ELS est satisfaite, le critère à l'état limite ultime est automatiquement respecté, du fait de la relation existant entre la contrainte admissible ELS et la contrainte admissible ELU :

$$\sigma_{adm,ELU} = 1,5 \sigma_{adm,ELS}$$

En configuration hors service par contre, la vérification à l'état limite ultime doit être faite (pas de vérification ELS dans cette configuration).

### 2. État limite de décompression du sol - Vérification de la surface comprimée

Cette vérification vise à prémunir du risque de dégradation des caractéristiques mécaniques du sol sous l'effet de décompressions fréquentes.

Sous l'effet des actions en service (ELS fréquent), la fondation doit demeurer entièrement comprimée.

Sous l'effet des actions hors service (ELS rare), la surface comprimée de chaque fondation doit être supérieure à 75%.

Sous les combinaisons ELU, le pourcentage de surface comprimée doit être supérieur ou égal à 30%.

### 3. État limite de renversement

La stabilité au renversement est en général assurée par le respect des critères de poinçonnement (portance) et de surface comprimée. Dans le cas général, la rupture par poinçonnement du sol intervient avant la perte de l'équilibre statique.

Dans certains cas (par exemple lorsque la fondation de la grue est située sur un sol rocheux ou que le support comporte un point dur), la vérification suivante doit également être faite :

$$\frac{\Sigma M_{stabilisant}}{\Sigma M_{renversement}} \geq 1,5$$

Les moments à prendre en compte sont des moments non pondérés.

### Prise en compte de l'eau

La vérification de l'équilibre du massif doit tenir compte d'un éventuel effet défavorable de la poussée d'Archimède. En général, on considère simultanément la crue avec les sollicitations en service ou hors service, ce qui est défavorable.

Des informations utiles sur la prise en compte des différents niveaux d'eau peuvent être trouvées dans l'annexe nationale de l'eurocode 0 (NF P 06-100-2).

### Prise en compte de la butée

Sur un chantier, le sol autour des fondations est assez fortement remanié. Il est donc sage de ne pas tenir compte de la butée horizontale pour assurer l'équilibre d'un massif. En tout état de cause, cette butée doit être neutralisée sur au moins 1 mètre.

La butée doit être limitée ( $K_p \leq 1$ ) car les déplacements du massif doivent rester faibles. Une grue ne peut en effet supporter une rotation à sa base (dénivellation d'appui) supérieure à 1/400.

**Une valeur  $K_p > 1$  n'est pas acceptable : elle correspondrait à des déplacements importants du massif, incompatibles avec le fonctionnement de la grue.**

### 4. État limite de glissement

La vérification au frottement des fondations de grue (semelles superficielles ou massif) est en général satisfaite, compte tenu du rapport entre force horizontale et force verticale.

### 5. État limite de déplacement – tassement différentiel :

Selon les fabricants de grues consultés, la tolérance d'une grue au tassement différentiel est de 1/400. Au-delà de cette valeur, le fonctionnement correct de la grue n'est pas assuré.

Il faut donc vérifier que, sous les combinaisons ELS fréquent, le tassement différentiel entre points d'appui reste en-deçà de la valeur admissible.

### 6. Coefficients partiels de sécurité sur les matériaux

Les états limites dans les matériaux constitutifs des fondations (acier, béton) sont vérifiés en recherchant le même niveau de sécurité que pour des bâtiments.

On utilise donc les mêmes coefficients de sécurité et les mêmes coefficients sur les matériaux  $\gamma_M$ .

## D. Exploitation des tableaux d'efforts

### 1. Combinaison des actions

Les valeurs fournies par les fabricants de grues correspondent à des combinaisons non pondérées des différents cas de charge (poids propre, lest, charge soulevée, vent), en situations en et hors service.

Cela implique que, pour créer des combinaisons d'actions précises utilisant des facteurs de pondération particuliers, il faudra d'abord « décomposer » les valeurs des tableaux, de façon à retrouver les cas de charges élémentaires.

Une autre solution consiste à utiliser des méthodes simplifiées, qui permettent d'éviter cette décomposition, mais qui peuvent conduire à des résultats plus défavorables.

### 2. Prise en compte des actions horizontales

Les tableaux fournissent les valeurs des efforts horizontaux appliqués à la grue :

- $T_{\max}$  : effort tranchant global à la base de la grue (effet du vent) dans les directions X et Y
- C : couple de torsion d'axe vertical à la base de la grue (effet lié à l'exploitation de la grue donc valeur nulle en configuration hors service).

Diviser l'action horizontale totale par 4 pour obtenir l'action à chaque appui est trop favorable, et impliquerait l'existence d'un diaphragme indéformable entre les 4 points d'appui.

Il est possible de considérer pour chaque appui une part d'effort horizontal proportionnelle à la charge verticale reprise par l'appui :

$$FH_i = \frac{FV_i}{\sum FV_j} \cdot T_{\max}$$

Il est souhaitable d'utiliser une approche plus simple et plus sécuritaire en adoptant la formule donnée par certains constructeurs de grues pour évaluer l'effort horizontal maximal sur un appui :

$$FH = T_{\max}/2 + C/c$$

c est la distance entre appuis de la grue

Cette dernière formule correspond au cas limite où tous les efforts sont repris par deux appuis seulement (cas limite avant soulèvement des deux appuis arrière).

La valeur de FH est généralement de l'ordre de 10 à 15 % de la réaction maximale verticale.

## III. EXEMPLES D'APPLICATION

### A. Grue lestée sur fondations isolées

Ce cas correspond à la grande majorité des cas. Les fondations sont considérées comme isolées si elles ne servent qu'à reprendre les efforts de la grue, qu'elles sont indépendantes les unes des autres et qu'elles ne sont pas en interaction avec d'autres éléments de structure (paroi de soutènement par exemple) ou de sol (talus par exemple).

#### 1. Principe des justifications

La grue est posée sur ses fondations. Elle ne peut donc exercer qu'une compression sur chacun de ses appuis. L'effort minimal sur un point d'appui correspond au cas d'un soulèvement et est en principe évité par le choix judicieux du lest par le constructeur de la grue.

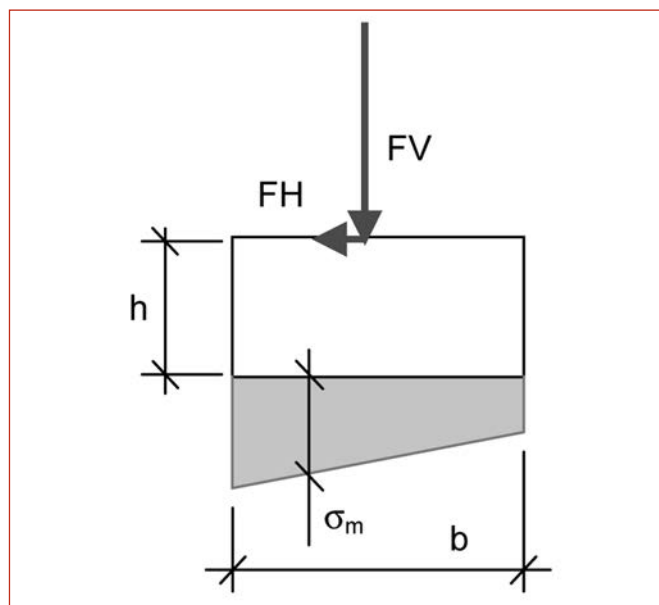
La stabilité de la grue sous l'effet des charges appliquées (P, Q et W) a été étudiée par le constructeur de la grue. Il suffit alors de démontrer que les fondations ne constituent pas un élément faible de l'ensemble.

Les critères à vérifier sont donc la capacité de la fondation à supporter les charges verticales et horizontales qui lui sont appliquées, et la valeur du tassement différentiel entre 2 appuis qui doit rester compatible avec le fonctionnement de la grue.

#### 2. Cas des semelles superficielles

La vérification de la contrainte ELS au sol doit prendre en compte les charges appliquées, le poids de la semelle et le fait que le point d'application des charges est situé au-dessus de la semelle. Le cas échéant, la pression d'eau pouvant délester la fondation doit être également intégrée dans l'équilibre des forces.

Comme cela a été dit plus haut, il faut considérer l'obliquité de la charge dans l'évaluation de la contrainte admissible.



On peut démontrer que, pour la majorité des cas (pas d'eau en sous-pression et hauteur de semelle h inférieure au tiers de sa longueur b), la vérification est satisfaite si :



$$1,5 \frac{FV}{S} \leq \bar{\sigma}_{ELS}$$

Où :

- FV est la réaction maximale donnée par le tableau du constructeur de la grue,
- S est la surface au sol de la semelle,
- $\bar{\sigma}_{ELS}$  est la contrainte admissible ELS, évaluée sans tenir compte de l'obliquité de la charge.

Il restera par ailleurs à vérifier que le tassement sous les semelles reste admissible.

### 3. Cas des fondations profondes

Les pieux doivent être vérifiés sous l'effet des charges verticales (force portante) et des charges horizontales (flexion).

Une approche simplifiée consiste à calculer les pieux à l'ELU sous 2 torseurs : (1,5 FV, 1,5 FH) et (0, 1,5 FH) :

- FV est la réaction maximale donnée par le tableau du constructeur de la grue,
- L'effort horizontal FH est obtenu par la formule fournie plus haut :  $FH = T_{\max}/2 + C/c$

Les pieux doivent être armés, le ferrailage étant placé sur au moins 3 fois la longueur élastique  $L_E$  (le moment étant ensuite très faible). Il est d'usage de calculer les pieux en les considérant articulés en tête.

Rappel : la longueur élastique  $L_E$  est donnée par la formule

$$L_E = \sqrt[4]{\frac{4EI}{kB}}$$

Les armatures doivent permettre la reprise de l'effort tranchant.

Il faut également vérifier que le tassement reste admissible.

## B. Grue encastrée dans un massif

### 1. Principe des justifications d'ensemble

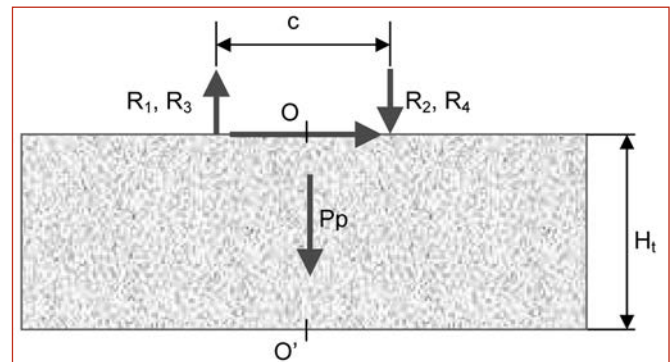
À l'inverse du cas précédent (grue lestée sur fondations isolées), la stabilité de la grue ne peut être étudiée qu'en tenant compte du massif. On ne peut donc plus dissocier la réponse des 2 éléments : la grue d'un côté, ses fondations de l'autre.

La stabilité de l'ensemble doit être vérifiée sous l'effet des combinaisons adaptées aux fondations, avec les coefficients de pondération et de sécurité propres à ce type d'ouvrages. À défaut de lire dans les tableaux fournis par le fabricant de la grue les torseurs élémentaires associés à chacun des cas de charge P, Q et W, il faut les retrouver à partir des valeurs des réactions d'appui : c'est la décomposition des efforts,

Cette opération, si elle n'est pas immédiate, ne présente pas de grande difficulté dès lors qu'on garde en tête le mode de fonctionnement de la grue en service et hors service et le sens des efforts générés par chacune des actions élémentaires (cf. II. A.2).

Les critères associés à cette stabilité sont la capacité portante, le renversement et le glissement. Pour valider le fonctionnement correct de la grue, on ajoutera la décompression du sol et la rotation sous le massif.

Il ne faut pas oublier, pour ces vérifications, de transporter les efforts sous le massif (point O') puisque les efforts donnés par les tableaux sont appliqués en face supérieure du massif (point O). On prendra garde également de ne pas oublier de compter le poids propre  $P_p$  du massif.



### 2. Principe des justifications locales

L'ancrage de la grue dans le massif et la capacité de celui-ci à supporter les efforts transmis doivent être vérifiés. Il faut noter que l'ordre de grandeur de ces efforts est sans commune mesure avec ce qu'on a habituellement en bâtiment : on peut avoir plus de 1 000 kN à transmettre au massif de façon ponctuelle.

Les critères associés à cette résistance locale sont le poinçonnement et l'arrachement, l'équilibre interne du massif étant calculé en béton armé selon les dispositions habituelles (Bael ou EC2).

Une méthode simplifiée pour la vérification locale de l'ancrage (poinçonnement et arrachement) consiste à prendre la réaction d'appui maximale FV donnée par le tableau, pour les configurations en service et hors service, et à pondérer cette valeur par 1,50. On obtient donc une valeur ELU.

La valeur de l'action horizontale FH est calculée comme indiqué précédemment.

## III. REMERCIEMENTS

Cette méthodologie de justification des fondations de grues découle d'une longue réflexion entamée il y a plusieurs années. Et on ne saurait traiter le sujet sans reconnaître la part prépondérante prise dans cette analyse par Christian Martin, alors ingénieur à la Direction technique de Bureau Veritas. C'est lui qui, le premier, a bâti un ensemble cohérent de justifications spécifiques à ces ouvrages particuliers que sont les fondations de grues.

De très nombreux échanges ont aussi eu lieu avec les constructeurs de grues. Nous avons notamment mis à forte contribution MM Chataigner et Miton de Potain Manitowoc pour comprendre le point de vue d'un constructeur et l'origine des valeurs des tableaux fournis par ceux-ci.

Et comme une méthode n'a de validité et de légitimité qu'une fois confrontée et adaptée à la réalité du terrain, nous avons pu la tester en conditions réelles et la faire évoluer progressivement, en particulier grâce aux arguments et

expériences de Benoit Meunier, Nathalie Borie et Gilbert Nouel pour ne citer que les plus impliqués sur ce projet. En publiant les principes de notre approche de vérification des fondations de grues, nous espérons lancer la discussion avec tous les professionnels concernés. Nous donnons donc nos arguments. Si ceux-ci semblent inexacts ou inadaptés, nous accueillerons avec intérêt les arguments de nos contradicteurs. Si, par contre, comme nous le pensons, notre approche est cohérente, alors elle pourra sans nul doute servir de base à l'élaboration d'un référentiel accepté et reconnu par tous.

## IV. BIBLIOGRAPHIE

FEM 1.004 : Recommandation pour le calcul des sollicitations dues au vent sur les charpentes des engins de levage – Fédération européenne de la manutention - 07/2000.

FEM 1.005 : Recommandations pour le calcul des structures de grues à tour hors service – Fédération européenne de la manutention - 11/2003.

NF EN 14439 : Appareils de levage à charge suspendue – Sécurité – Grues à tour (02-2007).

NF EN 13001-2 : Appareils de levage à charge suspendue – Conception générale. Partie 2 : effets de charge (05-2005) – Amendement A1 (01/2007).

DTU 13.11 (NF P 11-211) : Fondations superficielles (03/1988) + modificatif n° 1 (06/1997).

DTU 13.12 (P 11-711) : Règles pour le calcul des fondations superficielles - 03/1988.

DTU 13-2 (NF P 11-212-2) : Travaux de bâtiment – Marchés privés – Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Partie 2 : cahier des clauses spéciales – 11/1994.

Fascicule 62 Titre 5 : Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil - 09/1993.

Guide pratique des fondations de remontées mécaniques - CEBTP et STRM (Service technique des remontées mécaniques) – 1993.

Recommandation R.406 : Prévention du risque de renversement des grues à tour sous l'effet du vent – CNAMTS (Caisse nationale d'assurance maladie pour la protection des travailleurs salariés) – 10/06/2004.

# **SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE LA PRODUCTION D'ENROBÉS BITUMINEUX DANS UNE CENTRALE AU GAZ NATUREL**

**E. CHÂTEAU\*, M. LANGLET\*, Y. BAUDRU\*\*, P. MONÉRON\*\***

\* Station d'essai de Matériels Routiers, CETE Normandie-Centre, 31, rue Laplace – CS 2912, 41029 Blois cedex  
eric.chateau@equipement.gouv.fr – michael.langlet@equipement.gouv.fr

\*\* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex  
yvan.baudru@lcpc.fr – pierre.moneron@lcpc.fr

## **1. INTRODUCTION**

**L**a fabrication des enrobés à chaud s'accompagne d'émissions à l'atmosphère de composés organiques et inorganiques issues de la combustion de combustibles fossiles et de la présence de liants bitumineux chauds. La réduction de ces émissions polluantes, dont la nécessité est unanimement reconnue, passe par une connaissance précise des procédés de fabrication et nécessite la réalisation d'analyses de gaz. En effet, les connaissances actuelles présentent certaines lacunes dans les conditions opératoires et les données disponibles sont difficilement généralisables. Les analyses de gaz en continu n'étant pas réalisables à l'échelle d'une année, il est judicieux de passer par des valeurs d'indicateurs intermédiaires susceptibles d'orienter les futurs plans d'expérience selon des durées d'analyses à définir. Dans cette optique, le suivi en continu de la consommation énergétique en combustible de la centrale étant facile à réaliser, le paramètre consommation constitue un indicateur discriminant et cet article décrit l'instrumentation réalisée sur la centrale d'enrobage de type TSM 17 du parc routier de Blois, destinée à orienter les futurs plans d'expérience.

## **2. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE L'INSTRUMENTATION**

Suite au Grenelle de l'environnement, la lutte contre le changement climatique fait l'objet d'un engagement très ferme de la France et de l'Europe, avec entre autres pour objectif de diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie. Dans ce contexte, le travail sur la centrale d'enrobage constitue une approche sectorielle de l'analyse environnementale globale d'une infrastructure routière dans sa phase de construction. Il s'avère nécessaire de réaliser une base de données consommations/émissions représentatives du fonctionnement de la centrale d'enrobage. Ce fonctionnement étant variable (formules, cadences, températures...), il n'est en effet pas envisageable sans étude spécifique de quantifier des émissions polluantes sous la forme de flux annuels en se basant uniquement sur des mesures ponctuelles et un tonnage annuel d'enrobés fabriqués. Sur le site du parc routier, le but des expérimentations est de repérer les périodes intéressantes de fonctionnement de la centrale afin de cibler les moments stratégiques où il faudra réaliser des mesures

d'analyses de gaz, de manière à quantifier la variabilité des émissions en fonction de la variabilité de la consommation de combustibles fossiles.

La combustion est un phénomène d'oxydation violente qui se matérialise par des flammes au niveau de la chambre de combustion de l'installation. Dans nos applications, les combustions sont toujours incomplètes, et les gaz de combustion contiennent encore des composés combustibles comme le monoxyde de carbone (CO), le carbone C (suie) et divers composés organiques  $C_nH_m$ . En dehors des considérations économiques et de rendement, ces composés sont toxiques et nocifs pour l'environnement et des mesures s'imposent pour prévenir leurs émissions, par ailleurs réglementées (arrêté du 2 février 1998, voire dispositions spécifiques fixées dans l'arrêté d'autorisation de l'installation). Le fonctionnement annuel d'une centrale d'enrobage induit inéluctablement des variations de consommation. Une première approche à partir des relevés de consommation destinés à la gestion de l'installation avait mis en évidence à l'échelle de l'année des consommations en gaz naturel variant dans un rapport de 2 et des teneurs en eau variant dans un rapport de 1,4 (Ventura *et al.*, 2005), avec le sable fillérisé à l'abri des intempéries. Les émissions polluantes n'étant vraisemblablement pas proportionnelles à ces variations de consommation, et les mesures d'analyses de gaz étant longues et coûteuses, la première démarche consiste à mettre en évidence, pour une échelle de temps allant de la journée à l'année, les variations de consommation.

### 3. INSTRUMENTATION ET ACQUISITIONS RÉALISÉES

L'instrumentation réalisée a consisté à associer les mesures de consommation de gaz, de consommation électrique ainsi que la mesure de teneur en eau du sable roulé aux données fournies par le module classique de contrôle de fabrication en continu des enrobés (débits des granulats, débit de liant...), de manière à acquérir des données technico-environnementales se rapportant à la production d'enrobés à chaud. Jusqu'alors dispersées sur le site et issues de relevés périodiques, ces informations sont maintenant centralisées dans le système d'acquisition au niveau du poste de commande (figure 1).

Le débit de gaz naturel aux conditions de service est quantifié avec un émetteur d'impulsions installé sur le compteur à gaz, et fournissant une impulsion tous les 0,8 dm<sup>3</sup> (figure 2). Ce débit de gaz est ensuite rapporté aux conditions normalisées de température et de pression, à l'aide de mesures issues actuellement de relevés manuels, mais qui seront à l'avenir aussi incorporées à l'acquisition centralisée. La teneur en eau du sable est mesurée à la sortie du tapis du doseur avec une sonde micro-ondes (figure 3). La méthode consiste à mesurer la valeur de l'atténuation que subit un champ magnétique de très haute fréquence (10 GHz) qui traverse un matériau humide. Cette atténuation varie en fonction de sa teneur en eau. La sonde (figure 3) comprend un émetteur micro-ondes qui envoie un faisceau à travers

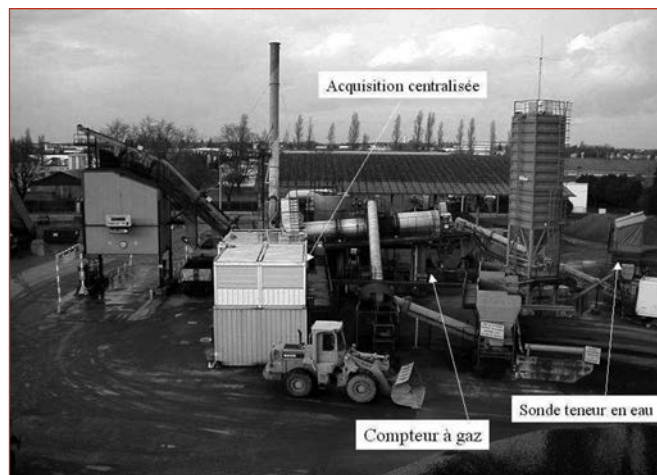


Figure 1: Implantation de l'instrumentation.

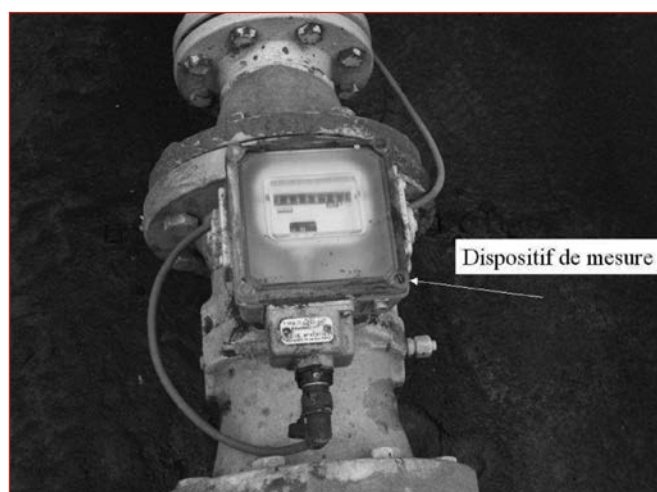


Figure 2: Compteur à gaz.



Figure 3: Sonde de teneur en eau.

le matériau et un récepteur qui mesure le faisceau réfléchi. Le stock de sables fillérisés étant protégé des intempéries, la sonde est installée sur les sables de Loire, sables alluvionnaires qui sont utilisés dans un petit nombre de fabrications mais qui ne sont pas stockés à l'abri et dont la teneur eau est dès lors variable.

Pour l'ensemble des fabrications de la centrale, les informations sont enregistrées en continu (valeur moyenne



toutes les min) avec le système d'acquisition de données « Adline », développé par la Station d'Essais des Matériels Routiers et mis à jour avec de nouvelles fonctionnalités. Ces données comprennent :

- la chronologie des fabrications (h/min/s),
- la formule fabriquée, selon le code du catalogue de formule du parc routier,
- l'humidité des granulats (%): l'humidité prise en compte pour cette étude est uniquement celle des sables de Loire. Les sables fillérisés et le filler sont stockés à l'abri et la teneur en eau des gravillons n'est pas vérifiée en continu ;
- le débit des granulats (t/h) et du liant (t/h) selon la méthode normalisée (cf. norme NF P98-772-1) ;
- la cadence horaire (t/h) ;
- la température du liant (°C) : les bitumes doivent être stockés chauds en permanence. La température de stockage et d'utilisation est propre au type de bitume utilisé ;
- la température des enrobés (°C) ;
- la consommation en électricité (kWh) ;
- la consommation de gaz naturel (m³/h).

Ce système d'acquisition, développé pour les centrales de type TSE pour suivre la fabrication des enrobés à partir de la ligne informatisée de l'automate, ne peut dans la forme présentée ici pour la centrale du parc routier de Blois s'installer sur d'autres centrales sans instrumentation complémentaire de celles-ci.

## 4. RÉSULTATS

Les résultats sont compilés dans un fichier excel et accessible par formule ou par journée. Quelque soit le type d'enrobé produit, le fichier permet une exploitation comparative tant sur les consommations que sur les données de production. Après avoir résolu un problème de parasitage des données due à l'alimentation électrique du système de mise en trémie de stockage des enrobés chauds, l'acquisition présentée est opérationnelle depuis septembre

2007. Depuis, l'exploitation des résultats a porté sur les données enregistrées pour l'ensemble des fabrications.

À l'échelle de la journée, un exemple retenu pour illustrer les résultats obtenus avec ce type de démarche est présenté sur la figure 4. Cet exemple concerne deux fabrications très différentes, pour lesquelles les formules d'enrobés produits sont explicitées dans le tableau 1. Les évolutions des consommations (gaz naturel et électricité) et des principaux paramètres de contrôle définis ci-dessus sont présentées sur la figure 4. Les consommations énergétiques sont exprimées en kWh, unité habituelle de l'exploitant, et seront converties en J pour la prise en compte dans les évaluations globales.

Plusieurs points importants et qui mettent en évidence l'intérêt d'une telle instrumentation peuvent être relevés à la lecture de la figure 4.

### Périodes transitoires

- la température des enrobés est disponible environ 4 min après le démarrage du brûleur (ceci correspond approximativement au temps de transfert des granulats dans le tambour sécheur à équicourant. Pendant cette période, c'est la température des gaz à la sortie du sécheur qui renseigne sur le réglage du débit en gaz naturel ;
- la cadence horaire est stabilisée environ 10 min après le démarrage du brûleur ;
- des surconsommations de gaz inéluctables (augmentation d'environ 5 % pendant un temps de l'ordre de 10 min) au démarrage (en début de journée ou suite à un arrêt du brûleur) de la centrale. Ces surconsommations sont minimisées (voire supprimées dans l'exemple de la figure 4 lors du changement de formule à 11 h) lors d'un changement de formule sans arrêt du brûleur ;
- un temps de l'ordre de 15 min après le démarrage du brûleur nécessaire au chef de poste de la centrale pour obtenir la stabilisation de la température des enrobés, soit après une production de 20 tonnes environ pour les cadences concernées (critère retenu pour le démarrage

Formule 66 Désignation BBSG 20 % recyclé							
MATÉRIEL	Pulv.1	A.E.2	Dos.1	Dos.3	Dos.4	Bitume	Bitume A.E.2
Type Doseur	Pondéral	Pondéral	Volumétrique	Volumétrique	Pondéral		
Matériau	Filler	agrégats d'enrobé 0/10	Granulats NOUBLEAU 6,3/10	Granulats NOUBLEAU 2/6,3	Sable broyé NOUBLEAU 0/2	50/70	
Formule	1,00 %	20,00 %	41,00 %	15,00 %	23,00 %	5,35 %	4,50 %

Formule 20 Désignation BBS					
MATÉRIEL	Pulv.1	Dos.2	Dos.3	Dos.4	Bitume
Type Doseur	Pondéral	Volumétrique	Volumétrique	Pondéral	
Matériau	Filler	Sable roulé de Loire 0/4	Granulats NOUBLEAU 2/6,3	Sable broyé NOUBLEAU 0/2	50/70
Formule	2,00 %	27,00 %	46,00 %	25,00 %	6.30 ppc

Tableau 1 : Formule des enrobés n°66 et 20.

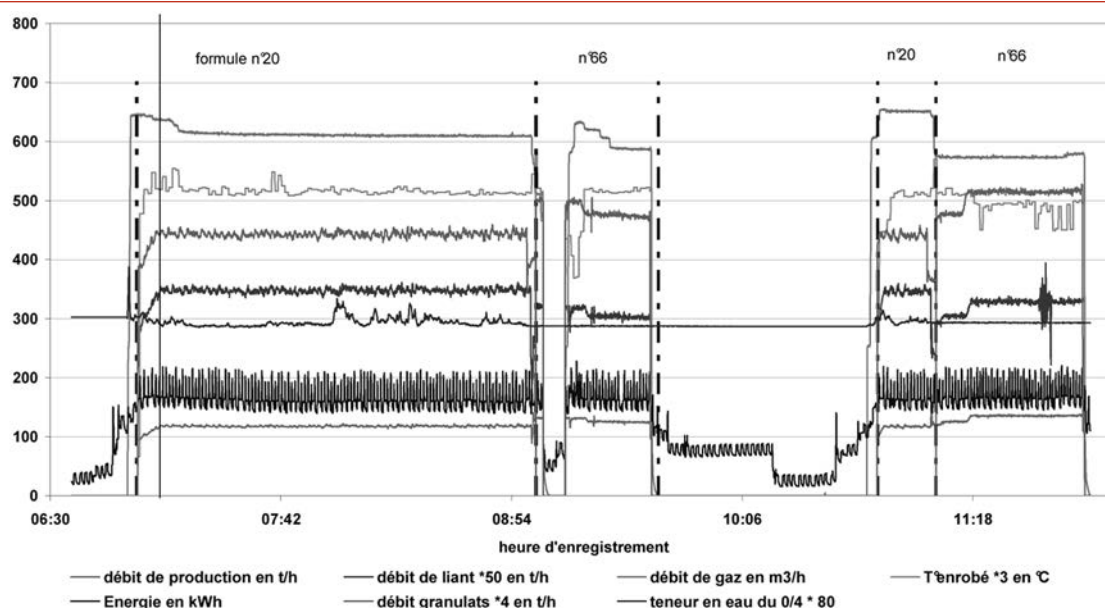


Figure 4: Synthèse des paramètres relevés pour la journée du 07/09/07.

des échantillonnages gazeux dans les expérimentations précédentes Paranhos [2007]).

#### Périodes stabilisées

- une consommation en gaz variable en fonction de la formule (baisse d'environ 12 % en fin de matinée), et intégrant les changements de cadence horaire (hausse de 117 et 135 t/h) et de teneur en eau des granulats (baisse en passant des sables de Loire à  $\approx 3,7$  % aux sables fillérisés à  $\approx 1$  %).

Un deuxième exemple est proposé afin d'illustrer les possibilités en matière de suivi annuel des consommations. A l'échelle de cinq mois de fabrication (juillet à novembre 2007), un exemple d'évolution de la consommation est présentée pour la fabrication de BBSG avec 20 % d'agrégats d'enrobés. Les valeurs moyennes calculées sur des périodes stabilisées pendant lesquelles la cadence horaire et la température des enrobés sont stables, sont présentées dans le tableau 2. Les dates correspondent aux jours où cette formule a été fabriquée par la centrale.

Date	Temps période stabilisée (min)	Formule	Puissance (kW)	Débit gaz (m3/h)	Débit centrale (t/h)	Temp.enrobé (°C)	Débit pompe liant (t/h)
09/07/07	106	F66 BBSG 20% recyclé	174	642	136	172	5,6
09/07/07	15	F66 BBSG 20% recyclé	167	656	127	165	5,3
17/07/07	64	F66 BBSG 20% recyclé	177	622	150	153	6,2
18/07/07	47	F66 BBSG 20% recyclé	170	604	136	162	5,6
18/07/07	30	F66 BBSG 20% recyclé	160	513	120	156	4,9
18/07/07	30	F66 BBSG 20% recyclé	159	430	99	147	4,1
03/08/07	10	F66 BBSG 20% recyclé	169	528	121	152	4,8
03/08/07	38	F66 BBSG 20% recyclé	161	479	122	150	4,8
03/08/07	12	F66 BBSG 20% recyclé	171	630	141	173	5,6
06/08/07	211	F66 BBSG 20% recyclé	176	659	143	162	5,9
06/08/07	123	F66 BBSG 20% recyclé	179	680	150	167	6,2
07/09/07	40	F66 BBSG 20% recyclé	168	573	133	165	5,2
10/09/07	13	F66 BBSG 20% recyclé	163	608	120	180	4,8
17/09/07	26	F66 BBSG 20% recyclé	167	594	133	171	5,3
21/09/07	19	F66 BBSG 20% recyclé	175	586	139	167	5,5
24/09/07	30	F66 BBSG 20% recyclé	169	622	129	166	5,1
02/10/07	27	F66 BBSG 20% recyclé	172	593	123	171	4,9
19/10/07	54	F66 BBSG 20% recyclé	183	588	117	171	4,6
23/10/07	42	F66 BBSG 20% recyclé	187	593	126	170	5
23/10/07	18	F66 BBSG 20% recyclé	192	598	133	158	5,3
23/10/07	21	F66 BBSG 20% recyclé	191	605	133	167	5,1
09/11/07	9	F66 BBSG 20% recyclé	175	600	121	149	4,8
29/11/07	20	F66 BBSG 20% recyclé	172	594	111	172	4,4
16/11/07	117	F66 BBSG 20% recyclé	187	613	127	171	5
Min			159	430	99	147	4,1
Max			192	680	150	180	6,2
Ecart			33	250	51	33	2,1

Tableau 2 : Évolution des consommations énergétiques sur 5 mois.

La conduite d'une centrale d'enrobage s'accompagne de fluctuations des paramètres de fonctionnement (cadence horaire et température des enrobés) induites par les contraintes du chantier (quantité d'enrobés, distance du chantier, époque de réalisation). Ces fluctuations, traduites sous la forme des écarts mentionnés dans le tableau 2, conditionnent des variations de consommations énergétiques et de liant bitumineux. Obtenir des données représentatives du fonctionnement de la centrale va donc consister à quantifier globalement la conséquence de ces variations sur l'évolution des émissions de rejets polluants à l'atmosphère, en terme de concentrations volumiques et de flux horaires. Les représentations graphiques des évolutions des consommations énergétiques (gaz et électricité) en regard des évolutions de cadence horaire et de température des enrobés sont synthétisées sur la figure 5.

Déjà visible à l'échelle d'une journée de production en fonction de la formule fabriquée et des contraintes chantiers (arrêts/redémarrages et cadences horaire), la variation de consommation existe par ailleurs à l'échelle de l'année, sur une même formule, en fonction de la cadence horaire et de la période de fabrication (température extérieure et intempéries). L'exemple présenté (figure 5) montre sur 5 mois une augmentation d'environ 60 % entre les consommations mini et maxi. Sur la même période, l'étude de la consommation rapportée à la tonne d'enrobé (figure 6) montre un écart de l'ordre de 35 %, due essentiellement aux différences de températures (enrobés et ambiante) et aux intempéries (teneurs en eau des granulats). Par ailleurs, l'incidence de la teneur en eau est minimisée pour la fabrication du BBSG, puisque le sable fillérisé utilisé est stocké à l'abri des événements pluvieux.

À l'échelle de l'année, les différences de consommation sont donc importantes, du simple au double pour la centrale du parc routier (Ventura *et al.*, 2005). La quantité de polluants émis lors de la combustion du gaz naturel est liée à sa consommation mais ces deux paramètres ne sont pas proportionnels : il existe des différences de cinétique thermique conduisant à des évolutions d'émissions polluantes en composés organiques et inorganiques (Monéron *et al.*, 2006).

Conjointement aux mesures de consommations énergétiques, l'objectif est maintenant de réaliser des mesures d'analyses de gaz au niveau de la cheminée d'évacuation des rejets gazeux à l'atmosphère de manière à établir la corrélation entre la consommation, et donc le fonctionnement de la centrale d'enrobage, et les rejets polluants à l'atmosphère. Par ailleurs, la recherche d'une utilisation rationnelle de l'énergie passe par la maîtrise de la combustion. Dans ce domaine, le maintien d'une combustion optimisée nécessite de disposer d'un brûleur qui assure parfaitement et pour l'ensemble de la fabrication le mélange intime entre combustible et comburant. L'indice ICO/CO<sub>2</sub> (Paranhos, 2007) constitue un indicateur robuste du contrôle de ce dosage, garant de la qualité de la combustion, qui sera systématiquement pris en compte dans les expérimentations futures.

## 5. CONCLUSION

Sur une année, le fonctionnement normal d'une centrale d'enrobage s'accompagne d'importantes variations de la consommation en combustible. Sans incidence sur la qua-

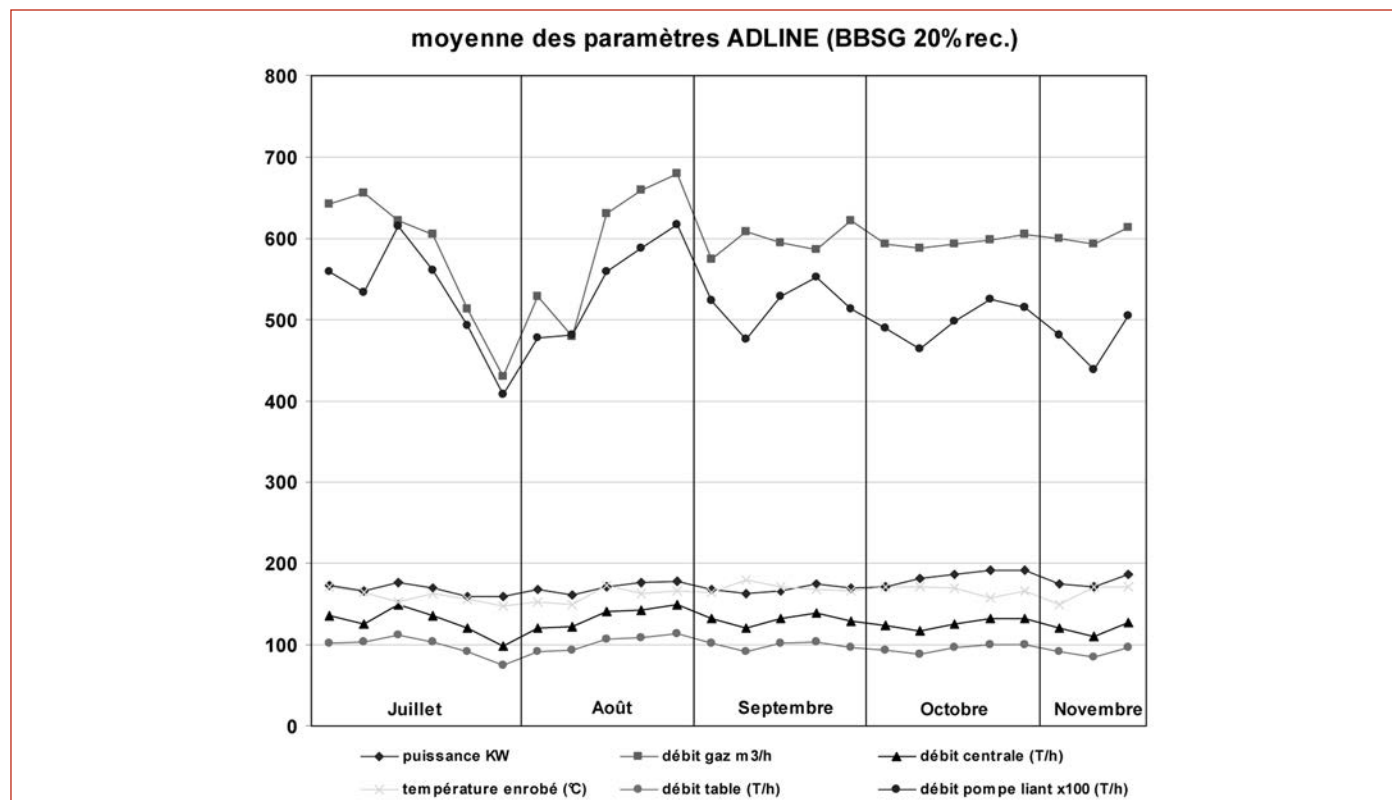


Figure 5 : Évolutions énergétiques et paramètres de fonctionnement en période stabilisée.

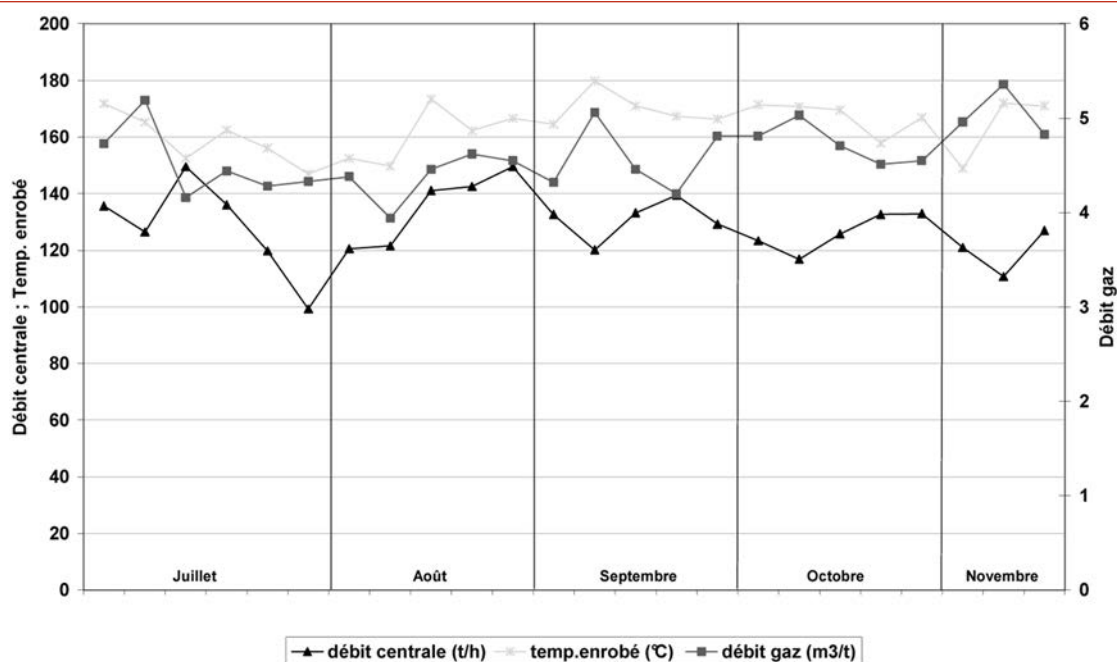


Figure 6 : Évolutions de la consommation à la tonne d'enrobé.

lité des enrobés fabriqués, ces différences présentent actuellement une importance accrue dans un contexte de développement durable appliqué aux procédés thermiques de fabrication d'enrobés bitumineux pour les infrastructures routières. Le présent projet consiste à mesurer et analyser les caractéristiques globales du procédé de centrale d'enrobage à Tambour Sécheur Enrobeur et d'obtenir des plages d'émissions polluantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{COT}$ ,  $\text{CH}_4$  et HAP) en relation avec les consommations de combustible. La caractérisation et l'analyse des procédés sont envisagées à plusieurs échelles de temps, de manière à mettre en évidence des valeurs moyennes et des amplitudes de variation, pour permettre de prendre en compte la problématique de comparaisons à des valeurs réglementaires (échelle de la journée) ainsi que la quantification de flux annuels de polluants. Les variations de consommation s'accompagnent d'une modification des échanges thermiques à l'intérieur du tambour sécheur qui, pour la centrale d'enrobage du parc routier de Blois, s'apparente à un échangeur antiméthodique. En complément de l'instrumentation réalisée, il est proposé pour les expérimentations futures d'installer des mesures de températures des gaz selon l'axe longitudinal du tambour sécheur, de manière à corréler les émissions polluantes à ces températures. En terme d'intérêt pratique les problématiques consistent à aboutir à une évaluation technico-environnementale glo-

bale du procédé centrale d'enrobage pour permettre de mieux comprendre l'incidence des pratiques actuelles sur l'environnement afin de réduire les impacts dans les conditions industriellement acceptables et d'élaborer des méthodologies scientifiques conduisant à des solutions techniques intégrant un volet environnemental.

Les auteurs remercient Michel SCHEMID, chef du Parc Routier de la DDEA de Loir et Cher, et Jack OUDIN, directeur de la SEMR, pour leurs contributions tant matérielles qu'intellectuelles.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Monéron P., Jullien A., Ventura A., *Analyse des mesures d'émissions gazeuses sur le TSM 17 du Parc Routier de Blois – Inventaire de conditions de fabrication d'une grave bitume de classe 2*, rapport de contrat n° TGCE/SDD/03-06, 55 p. +annexes, juin 2006.
- Paranhos R. S., *Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud*, 294 p., février 2007.
- Ventura A., Pierre Monéron, Agnès Jullien, Michel Schemid, Régis Paranhos, *Approche multi-échelle de la collecte des données sur une centrale d'enrobage*, octobre 2005.



# INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE COMPORTEMENT DES COMPOSITES DE PRF POUR LE GÉNIE CIVIL

**M. ROBERT, P. COUSIN, B. BENMOKRANE**

Mathieu.Robert2@USherbrooke.ca – Patrice.Cousin@USherbrooke.ca  
Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte

**D**e nos jours, bon nombre de structures en béton armé ayant été exposées à des environnements agressifs présentent des problèmes de durabilité et risquent de ne pas atteindre leur durée de vie utile théorique. La corrosion induite par les chlorures et/ou la carbonatation est la principale cause de détérioration des structures de béton armé. Les coûts des réparations et des restaurations effectuées aux USA, au Canada et dans la plupart des pays européens représentent un fort pourcentage des dépenses reliées aux infrastructures. En Europe par exemple, le coût annuel des réparations dues à la corrosion des barres d'acier d'armature est estimé à un milliard d'Euros [Nkurunziza, 2005]. L'utilisation de sel de déglacage et les cycles de gel-dégel constituent des agresseurs importants dans les pays nordiques. À ces agents corrosifs, s'ajoute l'augmentation des charges utiles sur les routes par suite de l'accroissement du volume des activités

économiques dans les pays industrialisés durant les trente dernières années. Conséquemment les ponts construits dans les années cinquante et soixante sont soumis à des charges supérieures à celles pour lesquelles ils ont été conçus, pouvant même atteindre le double des charges de calcul. Cette augmentation combinée aux effets des agents corrosifs entraîne une détérioration importante de nombreuses structures en béton.

L'ampleur du phénomène et les considérations économiques ont initié le développement de nouvelles technologies permettant de protéger l'armature d'acier contre la corrosion ou de simplement la remplacer par des matériaux moins sensibles à la corrosion. C'est dans cette optique que des recherches ont été orientées vers le développement et l'utilisation des polymères renforcés de fibres (PRF) pour leur utilisation en génie civil.

### 1.2. Matériaux composites

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de nature différente mais complémentaire, créant ainsi un matériau dont les performances générales sont supérieures à celles de chacun

de ces composants pris séparément [Berthelot, 1992]. Les matériaux composites de PRF sont constitués d'un renfort (fibres) protégé et supporté par une résine appelée matrice (figure 1).

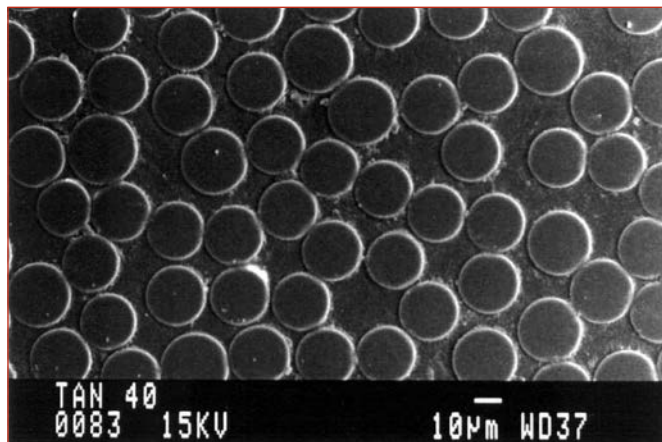


Figure 1: Fibres de verre dans une matrice polymère.

Les principales fibres ayant fait l'objet d'études au cours des dernières années sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. La fibre de verre domine dans la majorité des applications. Sa vaste gamme de propriétés, son rapport résistance/coût élevé, sa disponibilité et sa facilité de mise en œuvre en font la plus importante fibre au niveau industriel. Les propriétés mécaniques des armatures de polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) dépendent principalement des caractéristiques des fibres, de leur orientation, de leur forme, de leur rapport volumétrique par rapport à la matrice, de la qualité de l'interface fibre résine ainsi que du procédé de fabrication. Le rôle de la matrice est de maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales. Les résines de type vinylester sont habituellement utilisées pour les applications du génie civil vu leur bonne résistance chimique. Les applications des composites de PRF en génie civil portent essentiellement sur les armatures de renforcement interne du béton dont il sera question dans le présent article (figure 2) et les laminés pour la réhabilita-

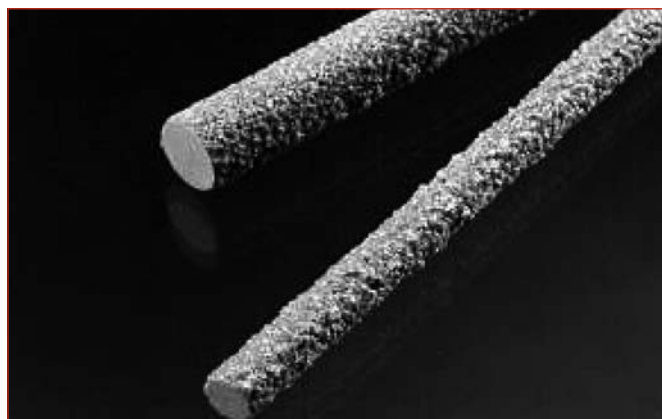


Figure 2: Barres d'armature en PRFV.

tion externe de structures existantes. Plusieurs ouvrages contenant des composites de PRF comme renforcement interne du béton ont déjà été construits dans le monde (figure 3) et plusieurs codes et guides de calcul traitant de l'armature en matériaux composites pour les structures de béton ont été développés (CAN/CSA-S806-02 ; CAN/CSA-S6-06 ; ACI 440.1R-06 ; JSCE). Aussi, plusieurs codes de spécifications des propriétés pour l'homologation des produits de composites de PRF pour leur utilisation en génie civil ont été développés (ISIS, 2006 ; ACI 440.5-08 ; ACI 440.6-08).



Figure 3: Tablier de pont en béton armé de PRFV.

### 1.3. État actuel

Face à l'arrivée d'un nouveau produit, le milieu du génie civil a été longtemps considéré comme réservé. Cependant, face au développement sans précédent de nouveaux produits performants, l'industrie de la construction a dû modifier son approche conservatrice, ce qui a permis aux nouvelles technologies liées à l'utilisation des composites de PRF de susciter une attention toute particulière de la part des ingénieurs de réalisation de travaux publics et des gestionnaires de systèmes d'infrastructure. La résistance à l'application à grande échelle des matériaux composites de PRF est fondée en partie sur le manque d'informations sur le comportement à long terme de ces matériaux dans les conditions de service les plus critiques. Un des grands défis actuels à relever quant à l'acceptation des composites de PRF en génie civil concerne la durabilité de ces matériaux et plus spécifiquement leur capacité à maintenir leur performance structurale dans des conditions environnementales sévères et changeantes sous charge soutenue. L'utilisation de vieillissements accélérés en laboratoire, simulant l'environnement d'application des composites de PRF pour évaluer leur propriétés mécaniques résiduelles et prédire la perte de propriétés à long terme est très commune pour les scientifiques étudiant la durabilité de ce type de matériau. Dans un vieillissement accéléré, le matériau est vieilli prématurément en utilisant un paramètre accélérant, généralement la température. En effet, la théorie d'Arrhenius suppose que si un seul phénomène de dégradation survient dans une certaine plage de température et

qu'aucun autre mécanisme ne se déclenche, l'effet du temps et de la température pourra être considéré comme équivalent dans cette plage de température, autrement dit que l'effet du temps pourra être simulé en augmentant la température.

Se basant sur l'hypothèse que la loi d'Arrhenius était respectée, plusieurs travaux ont été menés afin d'étudier la durabilité des composites de PRFV soumis en laboratoire à divers environnements pouvant simuler les conditions réelles d'application. Porter *et coll.* (1997) ont exposé trois différents types de barres d'armature en résine polyester isophthalique renforcée de fibres de verre de type E à une solution alcaline et à une température maximale de 60°C durant des périodes allant de deux à trois mois. Leurs résultats expérimentaux indiquent que les vieillissements accélérés réalisés réduisaient sévèrement la résistance ultime en traction des barres d'armature de PRFV. Deijke (1999) a démontré pour sa part que certaines fibres de verre se dégradent en présence d'eau et que l'humidité pouvait diminuer la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) de la résine polymère en agissant comme un plastifiant et réduire potentiellement la résistance en flexion des barres de PRFV. La réaction des composites de PRF aux alcalis du béton est un des soucis majeurs des ingénieurs en conception soucieux de la durabilité de ces nouveaux matériaux. L'environnement typiquement alcalin du béton, qui dépend du mélange de conception de béton et du type de ciment utilisé [Diamond, 1981 ; Taylor, 1987] endommage les fibres de verre en diminuant la dureté et la résistance et en les fragilisant.

Les fibres de verre sont endommagées par la combinaison de deux phénomènes: (1) l'attaque chimique des fibres de verre par l'environnement alcalin du béton et (2) la croissance et l'augmentation de la concentration de produits d'hydrolyse entre les monofilaments de verre [Murphy *et coll.*, 1999]. La fragilisation des fibres est due à la nucléation d'hydroxyde de calcium sur la surface des fibres. La formation d'hydroxyde peut attaquer la surface des fibres de verre et une augmentation de la rugosité de cette dernière, ce qui peut agir comme défauts réduisant significativement les propriétés des fibres en présence d'humidité. De plus, les hydroxydes de calcium, de sodium et de potassium trouvés dans le béton humide sont fortement agressifs pour les fibres de verre. La dégradation des fibres de verre dépend donc non seulement du pH élevé du béton humide, mais aussi de la combinaison des sels alcalins, du pH et de l'humidité. Le taux de réaction de tous ces phénomènes de dégradation augmentent avec la température, faisant penser que la dégradation globale des composites de PRF soumis à des vieillissements accélérés en solutions est en fait un ensemble de plusieurs réactions simples faisant appel aux mêmes mécanismes sur toute la gamme de température de vieillissement. Pour cette raison, plusieurs chercheurs utilisent des températures de vieillissement très élevées (jusqu'à 80°C) pour accélérer au maximum les phénomènes de dégradation.

Cet article établit les effets de l'utilisation de températures de vieillissement élevées sur le taux de réaction de dégradation des composites de PRF soumis à des solutions aqueuses. Quelques résultats expérimentaux sont présentés quant à la perte de propriétés en flexion et à l'augmentation du taux d'absorption d'humidité des composites de PRF.

## 2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1. Matériaux

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article ont été obtenus à partir de travaux de recherche réalisés dans le laboratoire de durabilité des matériaux composites de PRF du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, Canada. Des barres de PRFV de 12 mm de diamètre à recouvrement de sable fabriquées par Pultrall Inc., Thetford Mines, Québec, ont été utilisées (figure 2). Les barres sont fabriquées à partir de fibres de verre continues de type E imprégnées avec une résine vinylester par un procédé de pultrusion. La fraction massique de verre mesurée par analyse thermogravimétrique selon la norme ASTM E 1131 est de 81,5 %. La densité relative mesurée selon la norme ASTM D 792 est égale à 1,99. Des vieillissements accélérés par immersion complète dans l'eau d'aqueduc des barres de PRFV ont été effectués à 23°, 40°, 60° et 80°C avec différents temps d'exposition.

### 2.2. Essais de flexion

Des essais de flexion quatre points permettant de mesurer la rétention de la résistance en flexion des barres de PRFV ont été réalisés selon la norme ASTM D 4476. Quelques modifications ont été apportées à la norme utilisée, comme l'utilisation de barres à section circulaire au lieu de barres à section semi-circulaire. Un surplomb de 10 % de l'espacement entre les appuis inférieurs a été utilisé. La figure 4 montre le montage expérimental utilisé pour la réalisation des essais de flexion des barres de PRFV. Une presse universelle à commande manuelle d'une capacité de 270 kN a été utilisée pour la réalisation des tests de flexion. Les échantillons ont été chargés sous force contrôlée à un taux approximatif de 5 MPa/sec. Cinq échantillons ont été testés après 100 et 120 jours d'exposition.

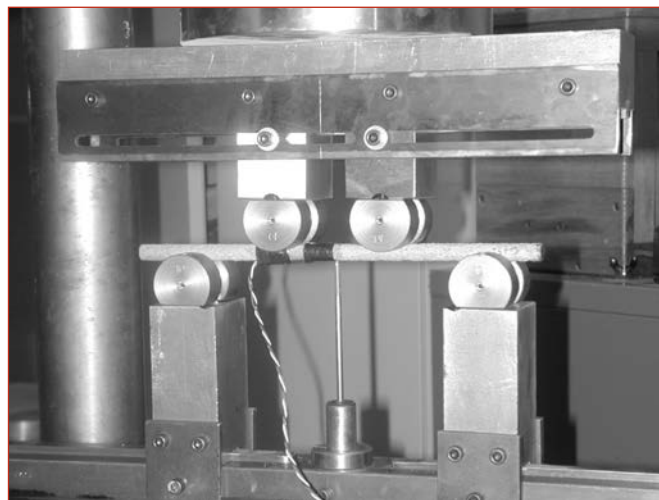


Figure 4: Montage expérimental de l'essai de flexion 4 points de barres de PRFV.



## 2.3. Absorption d'humidité

Des mesures d'absorption d'humidité ont été périodiquement prises en retirant les échantillons de l'eau, en les séchant et en mesurant immédiatement leur poids. Les mesures ont été faites jusqu'à saturation selon la norme ASTM D 570. Le gain de masse a été corrigé pour prendre en compte la perte de masse éventuelle des échantillons par dissolution ou décollement de matière. Cette correction a été effectuée en mesurant la masse des échantillons séchés après immersion et en la rapportant à la masse initiale.

## 3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 3.1. Perte de résistance en flexion

La figure 5 montre la perte de résistance en flexion observée avec les barres de PRFV conditionnées dans l'eau d'aqueduc pendant 100 et 120 jours (Wang, 2005). Les résultats expérimentaux montrent que l'effet de la température sur les propriétés mécaniques en flexion des composites soumis à un vieillissement accéléré utilisant la température comme le facteur accélérant, n'est pas constant entre la température ambiante et 80°C. La figure 5 montre que la dégradation du matériau est plus importante entre 60° et 80°C qu'entre 40° et 60°C, alors qu'elle est la plus faible entre la température ambiante et 40°C (Wang, 2005). Puisque l'amplitude de l'augmentation de la perte de résistance mécanique est plus grande aux températures plus élevées, les prédictions basées sur des températures très élevées (> 50°C) peuvent surestimer la dégradation suite à l'exposition aux conditions réelles d'application et donc sous-estimer la durabilité à long terme du matériau.

### 3.2. Absorption d'humidité

La figure 6 présente la tendance générale de l'absorption d'humidité d'échantillons de PRF immergés dans l'eau d'aqueduc (Wang, 2005). Les résultats présentés sont les valeurs moyennes obtenues pour cinq échantillons diffé-

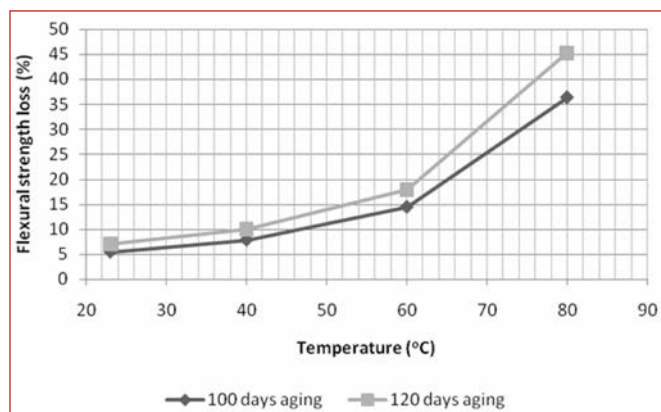


Figure 5: Perte de résistance en flexion en fonction de la température.

rents. Tel qu'attendu, plus la température d'immersion est élevée (ou plus le temps d'immersion est long), plus l'absorption d'humidité est élevée. Les taux d'absorption d'humidité à saturation sont égaux à 0,7 % pour les échantillons immergés à 23°, 40°, 60°C et à 1,8 % pour ceux immergés à 80°C. Ces observations indiquent une différence majeure entre la diffusion d'humidité à basses températures (23°, 40° et 60°C) et à hautes températures (80°C). Ceci pourrait être expliqué par un phénomène thermomécanique comme nous le verrons ci-dessous.

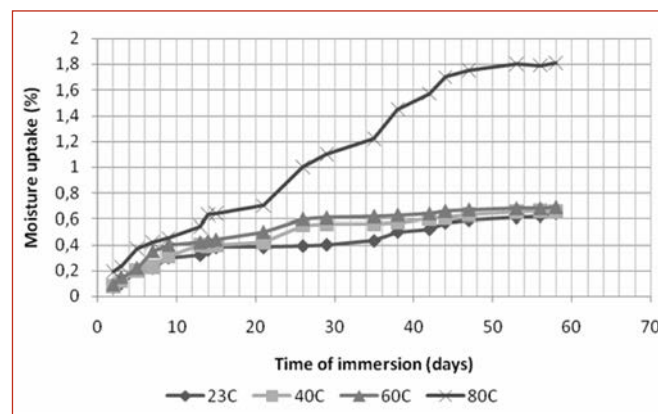


Figure 6: Absorption d'humidité de barres de PRFV immergées dans l'eau en fonction du temps.

## 4. DISCUSSION

L'augmentation de type exponentiel de la perte de résistance en flexion et l'augmentation de l'absorption d'humidité à saturation avec la température peuvent être expliquées par deux phénomènes distincts, le premier cinétique qui pourrait être le plus important et le second thermomécanique.

### 4.1. Phénomène cinétique

Il peut facilement être présumé que la perte de résistance mécanique des composites de PRF soumis à un vieillissement accéléré sous différentes conditions (type d'environnement, température, niveau de chargement, etc.) peut être reliée à plusieurs réactions chimiques simples. De plus, il est attendu que le niveau de rétention des propriétés mécaniques sera inversement proportionnel au niveau de dégradation, c'est-à-dire au taux de dégradation chimique du matériau. Par exemple, dans le cas d'un composite de résine vinylester renforcée de fibres de verre soumis à un conditionnement dans une solution alcaline, les alcalis peuvent réagir avec les fibres de verre par des mécanismes de dissolution et aussi réagir avec le polymère via un processus d'hydrolyse. Selon l'équation d'Arrhenius suivante, on voit que le taux de réaction est relié à la température de vieillissement :

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

k est une constante reliée au taux de dégradation,  $E_a$  l'énergie d'activation de la réaction de dégradation, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue.



Dans la grande majorité des réactions, cette équation montre que pour chaque augmentation de 10°C, le niveau de dégradation augmente d'un facteur de 2 à 3 (généralement près de 2). La figure 7 montre l'effet de l'augmentation de température de 20° à 80°C sur la vitesse de réaction, lorsque ce dernier double à chaque augmentation de 10°C. On peut observer à la figure 7 que l'augmentation de la vitesse de réaction est presque linéaire entre la température ambiante et 50°C, tandis qu'elle devient exponentielle au fur et à mesure que la température s'élève (plus de 60°C). Par conséquent, une petite augmentation de température, lorsque celle-ci est déjà élevée, amplifiera la perte de résistance mécanique. La comparaison des figures 5 et 7 confirme que l'effet de température sur la résistance en flexion d'un composite de PRFV conditionné dans l'eau est semblable à celui exercé sur la vitesse d'une réaction chimique simple.

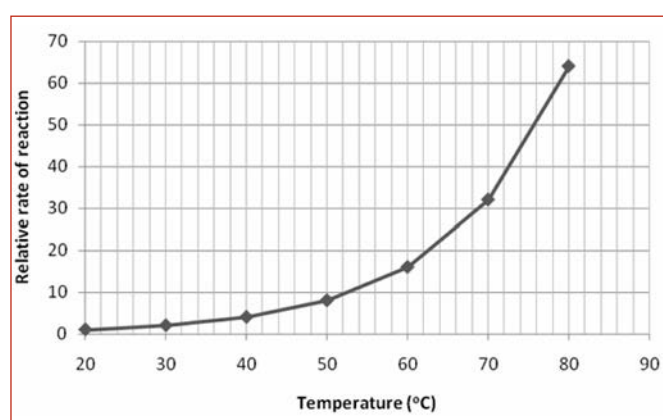


Figure 7: Vitesse de réaction relative en fonction de la température.

La figure 8 montre la perte de résistance en flexion de barres de PRFV après 120 jours de conditionnement en fonction d'une vitesse de réaction doublant à chaque augmentation de 10°C. En traçant ces données, nous obtenons une ligne droite parfaite qui montre que les propriétés mécaniques peuvent être traitées comme des réactions chimiques simples. Il devient donc possible de calculer le facteur accélérant comme une fonction de la température à partir d'une température de référence correspondant à la température annuelle moyenne (TAM) d'application (exemple TAM = 6°C pour Montréal, Canada, selon environnement Canada). Il doit être noté que dans les régions soumises à de grandes variations de températures comme le Canada, un vieillissement d'une année à la température moyenne n'est pas équivalent à un vieillissement d'une année aux températures variant autour de cette température médiane. En fait, pour deux secteurs ayant la même température moyenne, la dégradation sera inférieure dans la région ayant la variation de température la plus faible du fait de l'équation Arrhenius qui établit que la dégradation ne varie pas linéairement avec la température mais exponentiellement. La figure 9 montre les valeurs du facteur accélérant en fonction des températures de conditionnement pour une température de référence égale à 6°C.

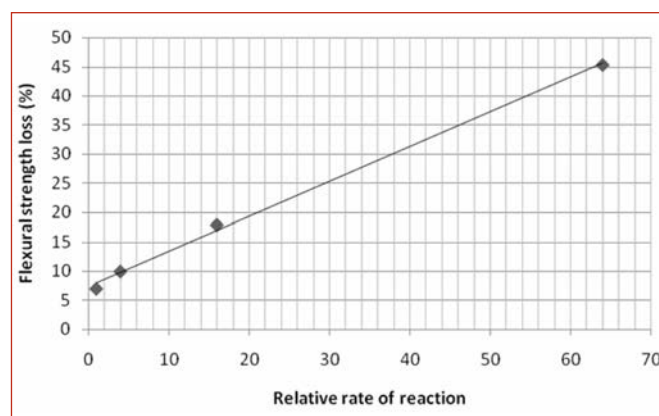


Figure 8: Relation entre la perte de résistance en flexion et la vitesse relative de réaction.

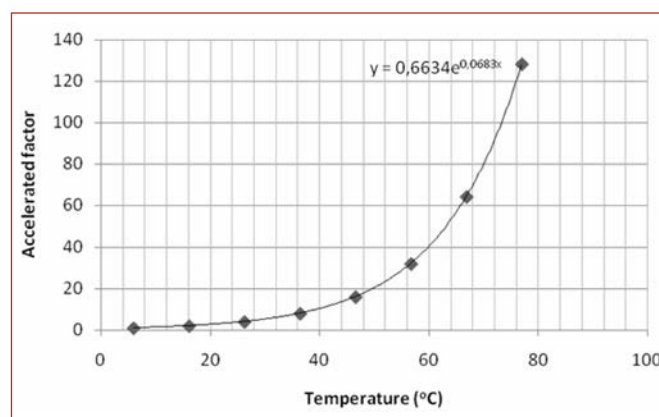


Figure 9: Facteur accélérant en fonction de la température.

## 4.2. Phénomène thermomécanique

Selon la théorie Arrhenius, les mécanismes de dégradation affectant un matériau doivent être quantitativement et qualitativement les mêmes sur la totalité de la plage des températures de vieillissement accéléré utilisées (Bank *et coll.*, 2003). Les composites de PRF sont composés de fibres de verre très stables à hautes températures. Cependant, la phase polymère ne peut pas supporter une gamme de températures aussi élevées. Quand la température de transition vitreuse de la résine,  $T_g$ , est atteinte (entre 110° et 130°C pour les résines vinylester), la structure et le comportement de la résine change profondément, passant d'un état vitreux à un état viscoélastique. Quelques changements peuvent aussi être observés avant  $T_g$  et il a été observé que certaines propriétés des résines vinylester commencent à être affectées à des températures aussi basses que  $T_g - 50^\circ\text{C}$  (Foster et Bisby, 2008). Une des caractéristiques principales des résines polymères qui est affecté autour de  $T_g$  est l'expansion thermique. À l'état vitreux et bien en dessous de  $T_g$ , le coefficient d'expansion thermique de la résine est constant. Quand la température du matériau s'approche de  $T_g$ , ce coefficient et par conséquent le volume libre du polymère, augmente rapidement, menant à un matériau légèrement moins dense. De plus, la rigidité et le module d'élasticité du composite polymère commence à diminuer. Ces deux phénomènes créent un matériau plus poreux qui peut absorber une plus grande quantité de solution (voir la figure 6), augmentant les mécanismes de dégradation.

Dans le cas des composites vinylester-verre, il est probable que la solution diffusant dans le matériau remplisse plus facilement l'espace libre à l'interface fibre-résine et commence à réagir avec les molécules de la résine polymère ou de la silice des fibres avoisinantes. Puisque la quantité d'eau et éventuellement la quantité d'ions dissous sera plus concentrée à l'interface fibre-résine que dans la résine elle-même, les réactions de dégradation seront plus importantes dans cette région. Par exemple, la réaction d'hydrolyse menant à la rupture de chaînes moléculaires du polymère pourrait être fortement localisée à l'interface fibre-résine et presque inexistante dans le reste du matériau. Par conséquent, la quantité de chaînes hydrolysées pourrait être très faible, et peut-être même non détectable, comparativement à la quantité totale de résine tout en étant concentrée à l'interface fibre-résine, zone essentielle au transfert des charges mécaniques dans le matériau. Puisque la région de l'interface entre les fibres et la résine est en fait le point faible des composites polymères, tout changement, même faible, survenant à ce niveau peut affecter de manière importante le comportement du matériau en réduisant le transfert de charges entre les fibres.

Deuxièmement, les coefficients d'expansion thermiques (CET) de la résine et des fibres de verre sont respectivement égaux à  $33 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  et  $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Quand le matériau composite est chauffé, la grande différence entre les CET produit un effort de cisaillement principalement situé dans la région où les deux composants sont en contact, c'est-à-dire l'interface. Cela peut induire un phénomène de décollement/délaminage des fibres et l'apparition de vides à l'interface. De plus, il a été observé que le coefficient d'expansion thermique transversal des barres, qui est grandement lié à celui de la résine (alors que le CET longitudinal est lié à celui des fibres) n'est pas constant sur une grande gamme de températures puisqu'il augmente quand le matériau est au-dessus de  $40^{\circ}$  ou  $50^{\circ}\text{C}$  (Masmoudi *et coll.*, 2005). Par conséquent, le phénomène thermomécanique de dégradation serait amplifié quand des températures de vieillissement trop élevées seraient utilisées, menant à une « sur dégradation » du matériau composite.

## 5. CONCLUSION

La dégradation des composites de PRF conditionnés en solution aqueuse peut être reliée à des réactions chimiques de dégradation impliquant plusieurs phénomènes distincts (cinétique et thermomécanique). L'effet de la température est le plus important comparativement aux autres facteurs comme le temps ou les charges soutenues. Par exemple, si le temps de vieillissement en solution aqueuse est choisi comme un paramètre de dégradation, le niveau de dégradation devrait être proportionnel à la durée du conditionnement tant que le matériau composite est entièrement et également saturé de solution. Dans ce cas, un temps de vieillissement double doublera le niveau de dégradation. Au contraire, l'effet de la température est plus important puisque le taux de dégradation chimique, comme n'importe quelle réaction chimique, n'est pas proportionnel à la température mais varie exponentiellement avec cette dernière.

Une nouvelle approche de l'utilisation des vieillissements accélérés pour la prédiction du comportement à long terme des composites de PRF doit être élaborée. Dans cette optique, quelques chercheurs [Robert *et coll.*, 2009 ; Davalos *et coll.*, 2008] ont mis au point des techniques de conditionnement reflétant mieux la réalité, en immergeant des échantillons enrobés de béton dans de l'eau à une température maximale de  $50^{\circ}\text{C}$ . Ces paramètres de vieillissement simulent mieux les conditions d'applications réelles comparativement aux paramètres traditionnels de vieillissement par immersion en solution alcaline à haute température. En effet, Robert *et coll.* (2009) ont conclu à la suite de vieillissements accélérés en eau tempérée de barres de PRFV enrobées de béton que la perte des propriétés mécaniques en traction ne devrait pas dépasser 25 % après 200 ans d'utilisation, garantissant ainsi une résistance à long terme largement supérieure aux contraintes de conception utilisées par les principaux codes de conception en vigueur (CAN/CSA-S806-02 ; CAN/CSA-S6-06 ; ACI 440.1R-06 ; JSCE). Ces résultats semblent corroborer ceux recueillis sur le terrain par Mufti *et coll.* (2005) qui démontrent qu'après près de 10 ans d'utilisation, aucun changement physique ou microstructural n'est survenu sur des barres de PRFV utilisées dans la construction de différents ouvrages au Canada. On peut conclure de ces considérations que les modèles prédictifs servant à extrapoler les résultats des vieillissements accélérés en durée de vie utile réelle doivent prendre en compte les phénomènes de dégradation liés à l'utilisation de températures de conditionnement trop élevées. L'utilisation de températures très élevées (supérieures à  $50^{\circ}$  ou  $60^{\circ}\text{C}$ ), qui est pratique courante dans les études sur la durabilité des composites pour leur applications en génie civil, mènerait à une surestimation des processus de dégradation sur les très longues périodes et influenceraient négativement les concepteurs et les ingénieurs des travaux publics potentiellement intéressés à les utiliser.

## 6. RÉFÉRENCES

- ACI 440.1R-06 (2006) "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006, 44p.
- ACI 440.5-08 (2008) "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008, 9p.
- ACI 440.6-08 (2008) "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008, 10p.
- ASTM D 570 (2005). "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics." American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 792 (2000). "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement." American Society for Testing and Materials.

- ASTM E 1131 (2003). "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry." American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 4476 (2000). "Standard test method for flexural properties of fiber reinforced pultruded plastic rods" American Society for Testing and Materials.
- Bank, L.C, Gentry, T.R, Thompson, B.P, Russel, J.S (2003). "A Model Specification for Composites for Civil Engineering Structures." *Construction and Building Materials*, vol. 17(6-7), 405-437.
- Berthelot, J.-M (1992) « Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures », Masson, Paris, 620 p.
- CAN/CSA-S806-02 (2002). "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers," Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 177 p.
- CAN/CSA-S6-06 (2006). "Canadian Highway Bridge Design Code," Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 757 p.
- Davalos, J.F., Chen, Y., Ray, I. (2008) "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete." *Cement & Concrete Composite*, 30, 722-730.
- Dejke, V. (1999). "Durability of Fibre Reinforced Polymers (FRP) as Reinforcement Concrete Structures," Publication P-98:18, Department of Building Materials Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 69 p.
- Diamond, S. (1981). "Effects of two Danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement fly ash pastes." *Cem. Concr. Res.*, 11, 383 – 394.
- Foster, S. K., Bisby, L., A. (2008) "Fire Survivability of Externally Bonded FRP Strengthening Systems." *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 553-561.
- ISIS (2006) "Specifications for Product Certification of Fibre Reinforced Polymers (FRPs) as Internal Reinforcement in Concrete Structures." ISIS Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba, Canada, 27 p.
- Japanese Society of Civil Engineers (1997) "Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforced Materials." 120 p.
- Masmoudi, R., Zaidi, A., Gérard, P. (2005) "Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete," *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 377-387.
- Mufti, A., Onofrei, M., Benmokrane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J., Bakht, B., Tadros, G., Brett, P. (2005). "Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures." ACI Special Publication, 230, 1361-1378.
- Murphy, K., Zhang, S., and Karbhari, V. M. (1999). "Effect of concrete based alkaline solutions on short term response of composites." *Proc.*, 44<sup>th</sup> Int. SAMPE Symposium and Exhibition, L. J. Cohen, J. L. Bauer, and W. E. Davis, eds., Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Long Beach, Calif., 2222-2230.
- Nkurunziza, G., Benmokrane, B., Debaiky, A. S., Masmoudi, R. (2005) Effect of sustained load and environment on long-term tensile properties of glass FRP reinforcing bars, *ACI Structural Journal*, vol 102, no 4, p. 615-621.
- Porter, M.L., Mehus, J., Young, K.A., O'Neil, E.F., and Barnes, B.A., (1997). "Ageing for Fiber Reinforcement in Concrete," *Proc. of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, Vol. 2, 59-66.
- Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B. (2009) "Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete", *Journal of Composites for Construction*, sous presse.
- Taylor, H. F. W. (1987). "A method for predicting alkali ion concentration in cement pore water solutions." *Adv. Cem. Res.*, 1(1), 5-16.
- Wang, P. (2005). "Effect of Moisture, Temperature, and Alkaline on Durability of E-Glass/Vinyl Ester Reinforcing Bars". Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

# DURABILITÉ DES GÉOTEXTILES ARAMIDES EN MILIEU ALCALIN : RECHERCHE D'INDICATEURS DE VIEILLISSEMENT

G. DEROMBISE\* – L. VOUYOVITCH VAN SCHOORS\* – P. DAVIES\*\*

\*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris cedex 15

\*\*IFREMER, Centre de Brest BP 70, 29280 Plouzané

## 1. INTRODUCTION

Il y a encore quelques années, les géotextiles à base de fibres polyéthylène téréphtalate étaient, du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques, largement utilisées pour le renforcement des sols alcalins (sols traités à la chaux ; au voisinage de la peau superficielle de béton durci...). Compte-tenu de leur vieillissement prématuré dans ces conditions, il est maintenant établi d'exclure l'emploi de cette nature de polymère dans les sols où le pH est supérieur à 12. Des solutions de remplacement telles que les fibres polyaramides, utilisées depuis une dizaine d'année pour le renforcement des sols, ont donc été envisagées. Un géotextile bi-module, composé à la fois de câbles polyaramides et polypropylène, a déjà été employé pour le renforcement des remblais et de la structure de chaussée de la déviation de Meaux [1]. Le géotextile de renfort est destiné à limiter les déformations en surface occasionnées lors d'un éventuel effondrement du sol jusqu'à réparation de l'ouvrage. Du fait que la structure de la chaussée se compose de limons traités à la chaux et au ciment, dont le pH est proche de 11, le dimensionnement du renforcement a été réalisé en prenant en compte un coefficient de sécurité lié à l'environnement physico-chimique du géotextile. En effet, les fibres aramides compor-

tent des fonctions amides susceptibles d'être hydrolysées (Figure 1). Le mécanisme de dégradation, rapporté par Morgan *et al.* [2], conduit à la coupure des liaisons C-N des fonctions amides, ainsi qu'à une diminution de la résistance mécanique. En effet, les auteurs ont prédit une diminution de résistance mécanique de 0,6 %/an à 100 % d'humidité relative et à 23°C, et de 12 %/an à 100 % d'humidité relative et 65°C. L'hydrolyse est donc accélérée par la température.

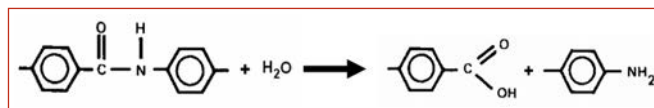


Figure 1: Hydrolyse des fibres PPTA [2].

De même, Auerbach [3] a prédit une diminution de 10 % de la résistance mécanique des fibres Kevlar 29 après 25 ans d'exposition à 100 % d'humidité relative à 25°C. Springer *et al.* [4], quant à eux, ont montré que les propriétés mécaniques des fibres Kevlar 49 et Twaron 1055 sont plus affectées en milieux acides et basiques (4 jours à 90°C dans une solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 40 %, 4 jours à 90°C dans une solution de NaOH à 10 %) qu'en milieu neutre (une journée à 180°C dans l'eau). Cependant, aucune étude



publiée ne traite du comportement à long terme des fibres polyaramides en milieu modérément alcalin. Des vieillissements accélérés à pH9 et à pH11 ont donc été initiés à quatre températures comprises entre 20 et 80°C, pour les fibres *Twaron 1000*. Les fibres *Twaron 1000*, polycondensat à base de poly(*p*-phénylène téréphtalamide) (PPTA) (figure 2 [5]), sont produites par Teijin et envisagées pour le renforcement des sols basiques.

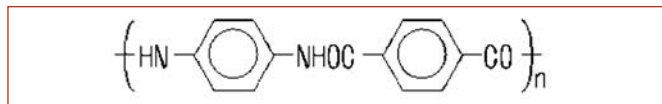


Figure 2: Formule semi-développée du PPTA (Twaron) [5].

Les caractéristiques chimiques, physiques et morphologiques ont été suivies et corrélées aux propriétés mécaniques. L'objectif de ce travail est d'identifier des indicateurs de vieillissement permettant de suivre la dégradation et d'améliorer la compréhension des mécanismes de dégradation mis en jeu. À terme, la durée de vie des fibres aramides en milieu basique pourra être estimée, ce qui permettra de justifier ou non l'emploi de ces géotextiles pour ce type d'application.

### 3. PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES

Les essais de traction permettent de caractériser les propriétés fonctionnelles des fibres, à savoir le module élastique et la résistance mécanique. Les essais ont été réalisés sur fibres unitaires au moyen d'une presse de traction. Le diamètre des fibres, ~12 µm en moyenne, a été mesuré avant chaque essai avec un micromètre laser directement fixé à la presse. Aucune évolution significative du diamètre des fibres n'a été observée tout au long des différents vieillissements.

#### Résistance mécanique

Les figures 3a et 3b présentent les évolutions de la résistance mécanique des fibres *Twaron 1000* vieilles respectivement à pH11 et à pH9.

À pH11, la résistance mécanique suit, en première approximation, une évolution logarithmique avec le temps de vieillissement (figure 3a). On remarque que plus la température est élevée, plus la dégradation est importante : en effet, après un an et demi de vieillissement, la résistance mécanique chute d'environ 80 % à 80°C alors qu'elle diminue d'environ 5 % seulement à 20°C. À pH9, la résistance mécanique suit une relation linéaire avec le temps de vieillissement (figure 3b). De même, plus la température est élevée, plus la dégradation est importante : après un an et demi de vieillissement, la résistance mécanique chute d'environ 40 % à 80°C, alors qu'elle reste stable à 20°C. La dégradation hydrolytique est donc, comme indiqué par les cinétiques établies par Morgan *et al.* [2], accélérée par la température.

#### Module sécant

Le tableau 1 présente les évolutions de module après un an de vieillissement à pH9 et à pH11. Le module sécant a été mesuré aux faibles déformations (entre 0,3 et 0,6 %).

		Module sécant mesuré entre 0,3 et 0,6 % (GPa)
Non-vieilli		80 ± 11
pH11	20°C	78 ± 10
	80°C	84 ± 8
pH9	20°C	81 ± 10
	80°C	84 ± 10

Tableau 1 : Évolution du module sécant des fibres *Twaron 1000* vieilles pendant un an en milieu alcalin.

Les variations de module observées sont négligeables, quelle que soit la condition de vieillissement. Même après un an à pH11 et 80°C, le module augmente légèrement de 80 ± 11 GPa à 84 ± 8 GPa, alors que la résistance mécanique chute de 3,2 ± 0,5 à 0,7 ± 0,2 GPa.

Comme le module dépend de l'orientation des chaînes et des cristallites [6-10], on peut conclure que dans ces conditions, aucune modification structurale n'implique une réorientation des cristallites et des chaînes polymères.

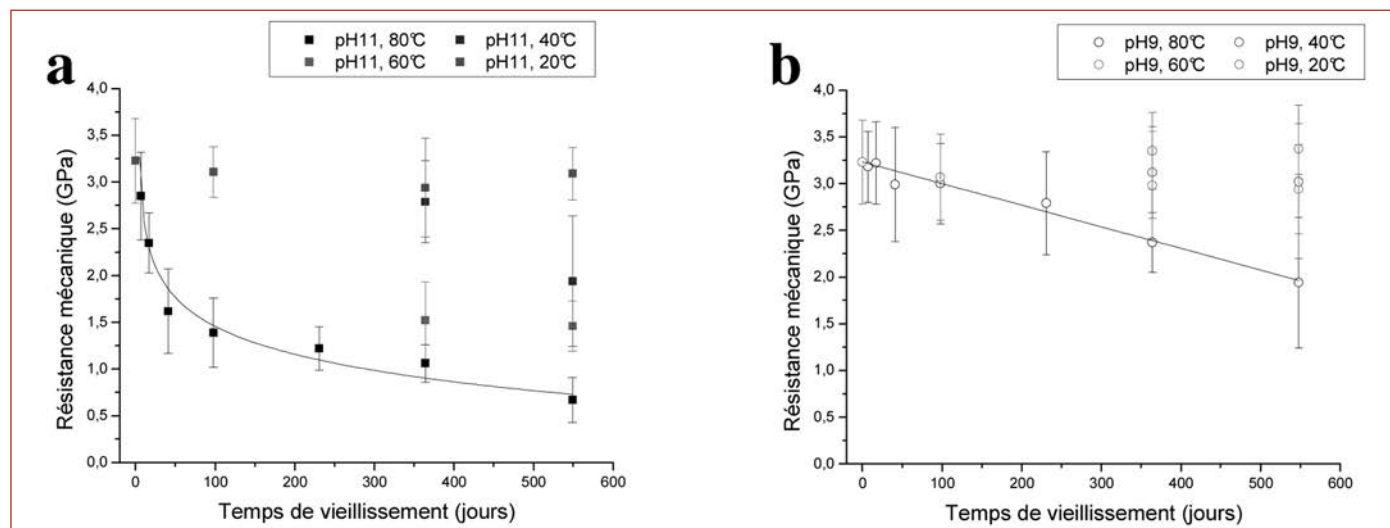


Figure 3: Évolution de la résistance mécanique des fibres *Twaron 1000* vieilles (a) à pH11 et (b) à pH9.

### 3. ANALYSES ET CARACTÉRISATIONS FINES

Après avoir suivi l'évolution des propriétés mécaniques des fibres *Twaron 1000* vieilles en milieu alcalin, nous tenterons d'identifier les caractéristiques chimiques, physiques et morphologiques à l'origine des chutes de propriétés observées.

#### 3.1. Dégradations en masse

Les polyaramides sont constitués de chaînes macromoléculaires susceptibles d'être hydrolysées. La mesure du temps d'écoulement d'une solution d'acide sulfurique concentrée à 96 % de concentration en polymère connue, au travers d'un viscosimètre capillaire, permet de calculer la viscosité réduite  $\eta$ , qui est elle-même liée à la masse molaire moyenne des chaînes polymères par une relation de Mark-Houwink :  $\eta = 8 \times 10^{-3} M_w^{1.09}$  [11]. Par conséquent, plus la viscosité réduite est élevée, plus la masse molaire moyenne en masse est élevée, et donc plus les chaînes sont longues. La viscosimétrie permet ainsi de mettre en évidence les phénomènes de coupure de chaînes tout au long du vieillissement.

La masse molaire moyenne en masse des fibres *Twaron 1000* non-vieilles est d'environ 32 000 g/mol. Cependant, contrairement à  $M_w$ , le calcul de la viscosité réduite à 0,2 g/dL n'implique aucune extrapolation et constitue donc un indicateur de vieillissement plus précis pour suivre la dégradation.

La figure 4a et 4b présente la diminution de la viscosité réduite avec le temps de vieillissement à pH11 et à pH9.

À pH11, la viscosité réduite suit, comme la résistance mécanique, une évolution logarithmique avec le temps de vieillissement à 40, 60 et 80°C. On constate que plus la température est élevée, plus la dégradation est importante. En effet, après un an et demi de vieillissement, la viscosité réduite chute d'environ 64 % à 80°C alors qu'elle ne diminue que d'environ 13 % à 20°C. À pH9 et 80°C, la viscosité réduite suit une évolution logarithmique avec le temps de vieillissement. De plus, plus la température est élevée, plus la dégradation est importante : en effet, la variation de

la viscosité réduite est négligeable à 20°C, alors qu'elle diminue d'environ 24 % à 80°C.

La dégradation en masse est donc, comme la diminution de la résistance mécanique, accélérée par la température et dépend du pH. On peut alors s'interroger sur l'influence des coupures de chaînes sur les propriétés mécaniques. La figure 5 présente l'évolution de la résistance mécanique en fonction de la viscosité réduite.

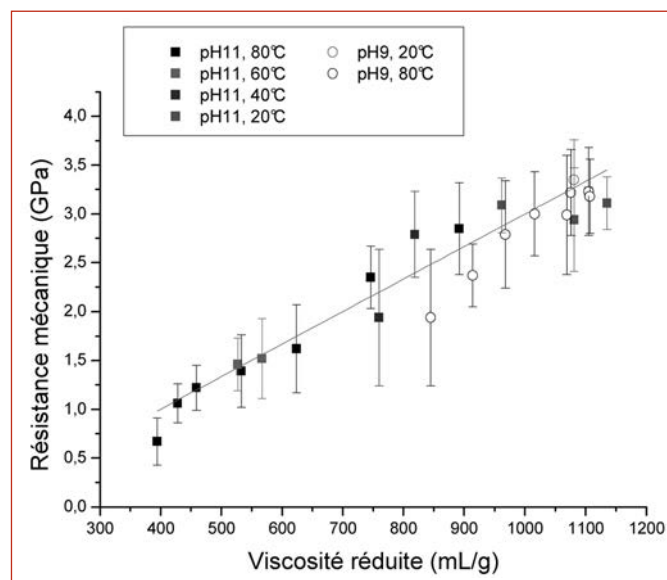


Figure 5: Relation entre la viscosité réduite à 0,2 g/dL et la résistance mécanique des fibres *Twaron 1000* vieilles en milieu alcalin.

Il apparaît, en première approximation, que la résistance mécanique et la viscosité réduite sont corrélées par une relation linéaire, ce qui est en accord avec de précédentes études [12] : plus la masse molaire moyenne des chaînes est faible plus la résistance mécanique est faible.

On constate que les points obtenus à pH9 divergent légèrement de cette droite, ce qui peut être dû, par exemple, à un développement de porosité plus important à pH9 qu'à pH11. Ceci sera vérifié par des mesures de densité.

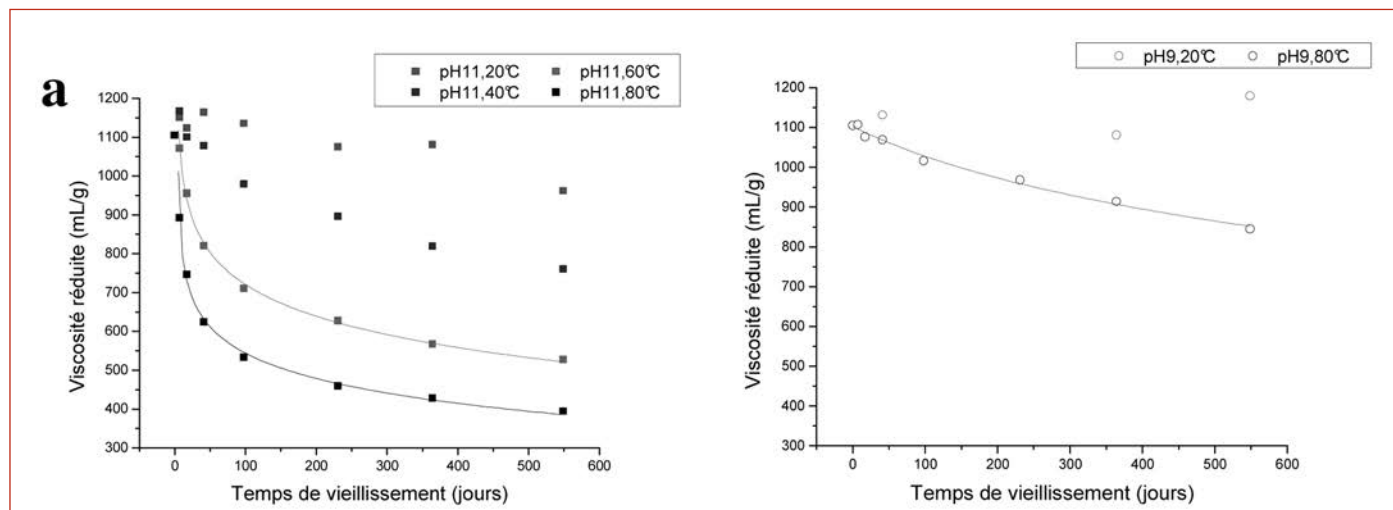


Figure 4: Évolution de la viscosité réduite à 0,2 g/dL des fibres *Twaron 1000* vieilles à pH11 et pH9.

## 3.2. Taux de porosité

La densimétrie permet de suivre le développement de la porosité au cours du vieillissement. Les fibres sont pesées successivement dans l'air et dans le dodécane, solvant inerte et non-absorbé par les fibres *Twaron 1000*, à température ambiante. La densité est ensuite calculée selon la relation suivante :

$$d = \frac{M_{air} \times \rho_{dodécane} - M_{dodécane} \times \rho_{air}}{M_{air} - M_{dodécane}}$$

Avec  $M_{air}$  la masse des fibres dans l'air,  $M_{dodécane}$  la masse des fibres dans le dodécane,  $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air soit  $6.10^{-4}$  et  $\rho_{dodécane}$  la masse volumique du dodécane soit 0,7487.

Les densités mesurées ont été corrigée en prenant en compte la densité de l'ensimage résiduel. L'évolution de la densité corrigée des fibres *Twaron 1000* vieilles à pH9 est présentée en figure 6.

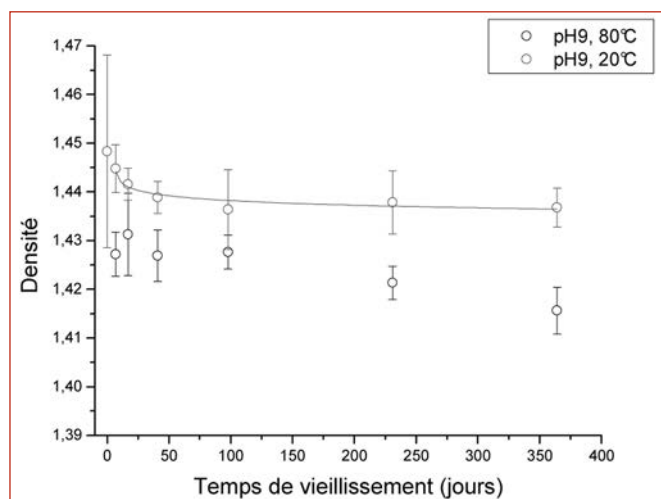


Figure 6 : Évolution de la densité corrigée des fibres *Twaron 1000* vieilles à pH9.

À pH9 et 20°C, la densité suit une évolution logarithmique avec le temps de vieillissement. Le tableau 2 présente la densité corrigée et la variation du taux de porosité après un an de vieillissement en milieu basique, en considérant une densité initiale de 0 %.

		Densité corrigée	Variation du taux de porosité (%)
Non-vieilli		1,448	0
pH11	20°C	1,452	0
	80°C	1,436	1
pH9	20°C	1,437	1
	80°C	1,416	2,5

Tableau 2 : Densité et variations du taux de porosité des fibres *Twarons 1000* vieilles un an en milieu alcalin

La variation du taux de porosité est plus élevée à 80°C qu'à 20°C quelle que soit la condition de vieillissement, et plus important à pH9 qu'à pH11. Deux hypothèses sont envisa-

geables à pH11 : soit peu de porosité fermée est développée, soit la porosité développée est ouverte. L'observation de l'état de surface des fibres par Microscopie Electronique à Balayage pourrait apporter un élément de réponse.

La figure 7, quant à elle, représente la variation de la résistance mécanique des fibres *Twaron 1000* vieilles à pH9 en fonction de la variation du taux de porosité.

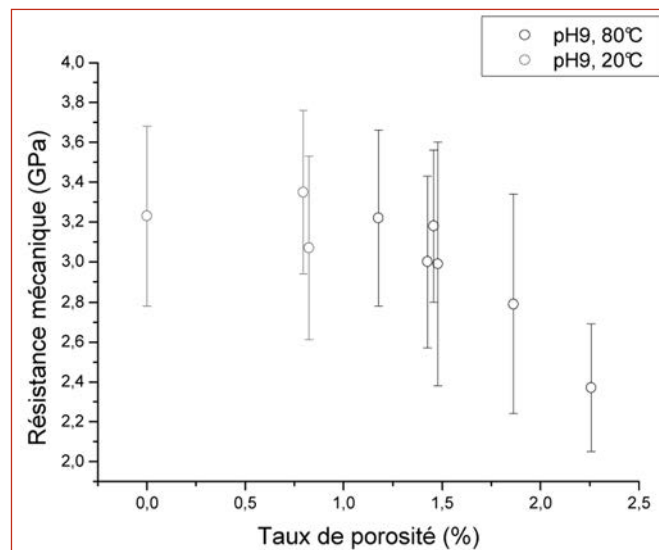


Figure 7 : Relation entre la variation du taux de porosité et la résistance mécanique des fibres *Twaron 1000* vieilles à pH9.

Une corrélation apparaît clairement : plus le taux de porosité est élevé, plus la résistance mécanique est faible. La résistance mécanique des fibres vieilles à pH9 est donc régie à la fois par la taille des chaînes et par le taux de porosité, ce qui explique la déviation de la relation linéaire entre la viscosité réduite et la résistance mécanique observée à pH9.

## 3.3. État de surface

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) permet d'observer l'état de surface des fibres au cours du vieillissement. Les images ont été réalisées en mode Electrons Secondaires (SE), afin d'accéder à la topographie des fibres. La figure 8 présente les images MEB de fibres *Twaron 1000* non-vieilles et vieilles à pH9 et à pH11.

La surface des fibres non-vieilles ne présente aucun défaut. Après un an à pH9 et 80°C, les fibres présentent des réarrangements locaux d'ensimage, ainsi qu'un départ de fibrilles qui laissent apparaître des rainures longitudinales en surface. Ce départ de fibrilles est vraisemblablement dû à une abrasion occasionnée lors du vieillissement. À pH11, seuls des réarrangements locaux d'ensimage sont observés. Ceux-ci forment des plaques hexagonales orientées aléatoirement. Aucune fissure ou cavité n'a été observée dans ces conditions, ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle il n'y aurait pas formation de porosité ouverte à pH11.

Il est cependant peu probable que ces défauts superficiels soient déterminants par rapport aux propriétés mécaniques.

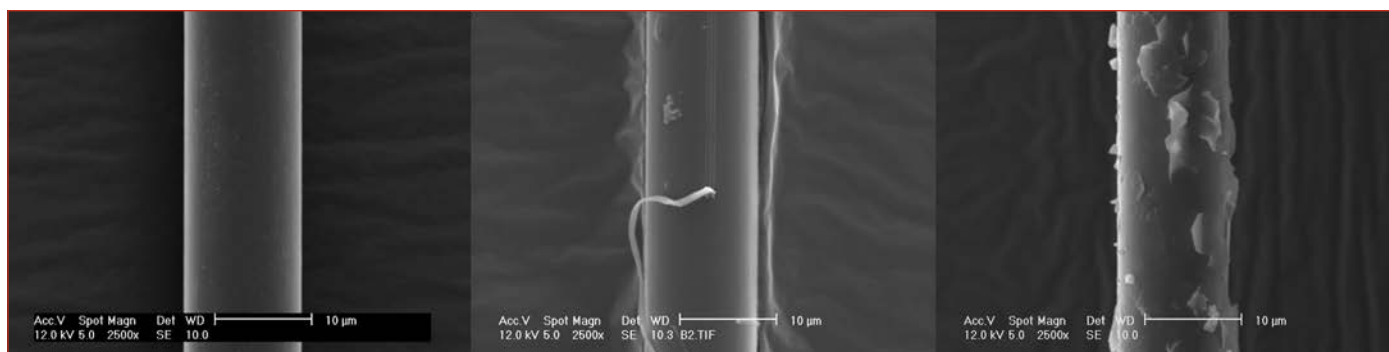


Figure 8: Observations MEB des fibres Twaron 1000 (a) non-vieillies, (b) après un an à pH9 et 80°C, et (c) après un an à pH11 et 80°C.

## 4. CONCLUSIONS

Pour étudier le comportement à long terme des fibres aramides en milieu modérément alcalin, des vieillissements accélérés en laboratoire ont été initiés. Les fibres Twaron 1000 ont ainsi été analysées et caractérisées jusqu'à un an et demi de vieillissement. Différents indicateurs de vieillissement ont ainsi pu être mis en évidence, permettant d'améliorer la compréhension des mécanismes de dégradation mis en jeu :

- À pH11, des dégradations en masse ont été révélées. Les chutes importantes de résistance mécanique (jusqu'à 80 % après un an et demi de vieillissement à 80°C) sont essentiellement dues aux coupures de chaînes induites par l'hydrolyse des fonctions amides. Le module sécant (entre 0,3 et 0,6 % de déformation), quant à lui, ne varie pas.
- À pH9, les diminutions de résistance mécanique au cours du vieillissement (jusqu'à 40 % après un an et demi de vieillissement à 80°C) ont été attribuées à la fois aux dégradations en masse et au développement d'une porosité fermée. Le module sécant (entre 0,3 et 0,6 % de déformation) est constant dans ces conditions également.

Un travail d'extrapolation des cinétiques tracées pourra, à terme, permettre d'estimer la durée de vie de ces fibres dans les conditions d'application réelles, et ainsi d'améliorer la qualité du dimensionnement des géotextiles aramides utilisés pour le renforcement des sols basiques.

## 5. REMERCIEMENTS

Un grand merci à Otto Grabandt et Bertil van Berkel de Teijin Aramid pour leurs conseils avisés et leur coopération permanente. Les auteurs sont également reconnaissants envers Dominique Duragrin, Nicolas Barberis (LCPC) et Nicolas Lacotte (IFREMER) pour leur grande implication dans cette étude.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Blivet, J.-C., et al., *Renforcement par géosynthétique sur cavités potentiels: exemples de la déviation sud-ouest de Meaux (77)*, in *Rencontres géosynthétiques*. 2006: Montpellier (France).
- [2] Morgan, et al., *The hydrolytic degradation of Kevlar 49 fibers*, in *29<sup>th</sup> National sampe Symposium*. 1984.
- [3] Auerbach, I., *Kinetics for the tensile strength degradation of Nylon and Kevlar Yarns*. Journal of Applied Polymer Science, 1989. **37**: p. 2213-2227.
- [4] Springer, H., et al., *Influence of Hydrolytic and Chemical Treatment on the Mechanical Properties of Aramid and Copolyaramid Fibers*. Textile Research Journal, 1998. **8**(68): p. 588-594.
- [5] Yang, H.H., *Kevlar Aramid Fiber*. Ed. John Wiley & Sons ed. 1993.
- [6] Rao, Waddon, and Farris, *Structure-property relation in poly(p-terephthalamide) (PPTA) fibers*. Polymer, 2001. **42**: p. 5937-5946.
- [7] Dobb and Robson, *Structural characteristics of aramid fibre variants*. Journal of Materials Science, 1990. **25**: p. 459-464.
- [8] Rao, Waddon, and Farris, *The evolution of structure and properties in poly(p-phenylene terephthalamide) fibers*. Polymer, 2001. **42**: p. 5925-5935.
- [9] Northolt and v. Aartsen, *Chain orientation distribution and elastic properties of poly(p-phenylene terephthalamide), a "rigid rod" polymer*. Journal of Polymer Science: Polymer Symposium, 1977. **58**: p. 283-296.
- [10] Lee, Barton, and Schultz, *Structure and Property Development in Poly(p-phenylene terephthalamide) During Heat Treatment Under Tension*. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 1995. **33**: p. 1-14.
- [11] Arpin, M. and C. Strazielle, *Characterization and conformation of aromatic polyamides: poly(p-phenylene terephthalamide) and poly(p-benzamide) in sulphuric acid*. Polymer, 1977. **18**: p. 591-598.
- [12] Weyland, H.G., *The Effect of Anisotropy in Wet Spinning Poly(P-Phenyleneterephthalamide)*. Polymer Bulletin, 1980(3): p. 331-337.



# **DES RESSOURCES RENOUVELABLES DANS LES CHANTIERS ROUTIERS. UNE ALTERNATIVE AU TOUT PÉTROLE**

---

**C. DENEUVILLERS, M. CHAPPAT**

Directrice de Laboratoires, Campus Scientifique et technique COLAS  
Directeur de la Recherche et du Développement. Colas S.A.

---

## **1. INTRODUCTION**

**L**a prise de conscience de la nécessité de revoir nos modes de vie dans l'avenir est aujourd'hui de plus en plus réelle. Le rapport de Madame Brundtland à la Commission Mondiale sur l'environnement et le développement (ONU) qui est à la base de cette notion de développement durable date de 1987 : il y a 20 ans. À l'époque déjà, la traduction entre le français et l'anglais faisait débat : le développement devait-il être durable (lasting, durable) ou soutenable (sustainable). La diplomatie a choisi. Comme nous le savons, sustainable development ; développement durable au double sens évident. Rappelons que c'est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre ceux des générations futures ». Quand on nous dit que le pétrole, c'est fini dans 40 ans (même avec les techniques les plus sophistiquées), ou que la disponibilité en pétrole commencera à décroître dans 15 ou 20 ans, il est grand temps de se poser les questions dès aujourd'hui.

L'humanité passera en 20 ans de 6 à 8 milliards d'individus qu'il faudra nourrir correctement ; avec quoi et comment ?

Dans cet exposé, je voudrais montrer comment nos métiers peuvent contribuer positivement à une évolution inéluctable. Pouvons nous remplacer le pétrole, et le bitume, dans nos travaux, si ce n'est totalement, du moins partiellement dès maintenant ? Les sources auxquelles j'ai fait appel sont indiquées, les chiffres sont publiés mais ils doivent être relativisés aux ordres de grandeur puisque les disciplines abordées ne font pas l'objet de statistiques strictes au plan local ou au plan mondial.

## **2. LE PÉTROLE ET L'ÉNERGIE DANS LES TRAVAUX ROUTIERS**

Nos métiers consomment du bitume : environ 90 MT par an réparties selon la carte ci-après (figure 1).

Le numéro un mondial de la route en consomme 3,5 MT, la France 3,3 MT.

Traduites en enrobés ou en revêtement superficiels, ces consommations s'établissent approximativement ainsi (tableau 1).

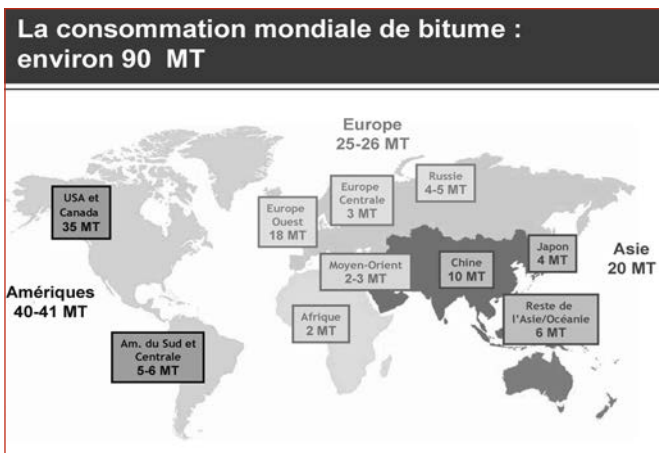


Figure 1

États-Unis *	500 MT	(30)
Canada *	40 MT	(2)
Europe des 27	320 MT	(18)
Reste du monde	640 MT	(35)
<b>Total</b>	<b>1 500 MT</b>	<b>(85)</b>
* Hors recyclage		

Tableau 1 : Enrobés bitumineux dans le monde.

Le tonnage mondial d'émulsions de bitume est estimé à 8 MT selon la répartition suivante (tableau 2).

Europe des 27	2,65 MT
US / Canada	2,75 MT
Brésil	0,40 MT
Mexique	0,65 MT
Autres Amérique du Sud	0,50 MT
Reste du monde	1,05 MT

Tableau 2 : Émulsions dans le monde.

Sur cette quantité, on estime les répartitions suivantes :

Revêtements superficiels	Enduits superficiels	2,4
	Enrobés coulés à froid	0,8
	Autres	3,6
Enrobés à froid		1,2

Tableau 3 : Applications des émulsions.

Sur ces quantités, on estime à 240 000 T la quantité de fluxants consommée.

Pour ce qui concerne les carburants des engins de chantiers et utilitaires, il n'est pas aisé d'avoir un recensement précis exact. Nous avons choisi de prendre en considération la consommation du Groupe Colas et de faire une extrapolation (certes hasardeuse) selon le poids de Colas dans notre monde professionnel.

Nous obtenons un chiffre mondial annuel de l'ordre de 6 000 M de litres de fuel léger.

Pour l'enrobage, une approche similaire aboutit à l'équivalent de 7 500 M de litres de fuel lourd. La mise en œuvre représente moins de 10 % de la fabrication (disons environ 6 %) soit 450 M de litres de fuel sur les 6 000 vu ci-dessus. Nous rappellerons que la production mondiale de pétrole oscille autour de 29 G bbls/jour soit 4 700 G l/an. Notre métier consomme donc à peu près 3 % de la production mondiale.

Devant ce résultat relatif, on peut se demander s'il y a matière à effort. Mais nous citerons les plus grands auteurs de l'antiquité : « Ce sont les petits ruisseaux qui font les grandes rivières ».

### 3. L'AGRICULTURE MONDIALE PERMET-ELLE DE NOUVELLES CULTURES ?

On remarque d'abord que, avant de chercher des substituts végétaux à nos carburants, l'humanité cherchera à se nourrir. Passant selon les estimations de 6 à 8 milliards d'individus hors d'Europe et d'Amérique du Nord dont les populations restent stables.

Nous ferons nos évaluations en considérant que dans un avenir « humain » de 30 à 50 ans, les surfaces du globe garderont le même partage entre terre et eau et que l'effet climat ne perturbera pas ce partage.

Les études de l'ONU (FAO) donnent une idée des surfaces disponibles pour de nouvelles cultures.

Zone en milliards d'hectares (G. Ha)	Terre	Forêts	Agricoles	Reste estimé
Monde	13,041	3,869	5,017	4,155
Pays dits développés	5,383	1,720	1,744	1,919
Pays dits en développement	7,658	2,149	3,273	2,236
Asie/Pacifique	2,014	0,512	1,029	0,473
Amérique du sud et Amérique centrale	2,018	0,964	0,784	0,270
Afrique – Proche Orient	1,263	0,029	0,455	0,779
Afrique subsaharienne	2,363	0,644	1,005	0,714
	7,658	2,149	3,273	2,236
Europe des 27	0,420	0,150	0,200	0,070
USA	0,916	0,226	0,411	0,279
Canada	0,922	0,245	0,075	0,602
Australie	0,768	0,155	0,455	0,158
russe	1,689	0,851	0,217	0,621
	4,715	1,627	1,358	1,730
Autres	0,668	0,093	0,386	0,189
Chine (inclus dans Asie)	0,929	0,163	0,554	0,212
Brésil (inclus dans Amérique du sud)	0,846	0,544	0,263	0,039

Tableau 4 : Répartition des surfaces terrestres (2003 / 2004).

Avant de poursuivre notre raisonnement, nous indiquerons quelques exemples d'utilisation des fertilisants et quelques résultats de rendements agricoles.

Blé	240 kg/Ha en France	25 kg/Ha en Russie
Maïs	257 kg/Ha aux États-Unis	12 kg/Ha en Tanzanie
Riz	320 kg/Ha en Corée du sud	4 kg/Ha au Cambodge
Coton	461 kg/Ha au Tadjikistan	41 kg/Ha au Bénin

Tableau 5 : Fertilisants.

Ces données montrent l'extrême disparité de l'utilisation des engrais dans le monde et la lente progression du rendement. Elles soulèvent les questions du futur : fait-il augmenter les rendements avec une consommation d'engrais (et donc d'énergie) ou laisser en l'état la question de l'alimentation des populations à venir.

**Une conclusion est certaine : en mobilisant la recherche et les progrès de la technique, on peut rendre l'agriculture plus productive avec des fertilisants adaptés aux exigences du développement durable ou avec des espèces plus productives.**

Quel était notre objectif : savoir si l'agriculture pourrait laisser assez de capacités pour nourrir les populations et se substituer au pétrole dans les 40 à 50 années à venir. Nous dirons que la situation n'est pas encore désespérée.

L'agriculture mondiale a-t-elle les capacités de faire face à ces multiples défis souvent contradictoires et controversés ? Gageons que oui.

Sur ces graphiques, on remarque que durant ces dernières années où la population mondiale a cru de 20 %, de 1 milliard d'individus, le rendement par habitant de l'agriculture s'est maintenu. Gageons qu'il en sera de même à l'avenir et que les Etats sauront trouver les solutions appropriées aux dossiers des OGM, des pesticides et des fertilisants en général (figures 2 et 3).

On remarquera aussi que des pays comme le Brésil n'hésitent pas à étendre la surface agricole au détriment de la forêt. Des pays comme la France connaissent une évolution inverse : réduction lente des surfaces agricoles cultivées (du fait des politiques agricoles européennes) au profit d'une progression lente de la forêt.

Là encore il y a matière à débat mais source possible de nouvelles capacités de productions agricoles.

Pour un pays comme la France, la répartition du territoire est ainsi faite (tableau 6).

	En M Ha
Forêts et haies	17,0
Cultures	16,6
Prairies et landes	15,2
Routes	1,1
Villes et terres bâties	1,6
Inaccessibles	1,8
Divers	1,5
Total	54,8

Tableau 6 : Situation en France.



Figure 2 : Céréales : Production/hab. selon le groupe de pays, 1961-2000.

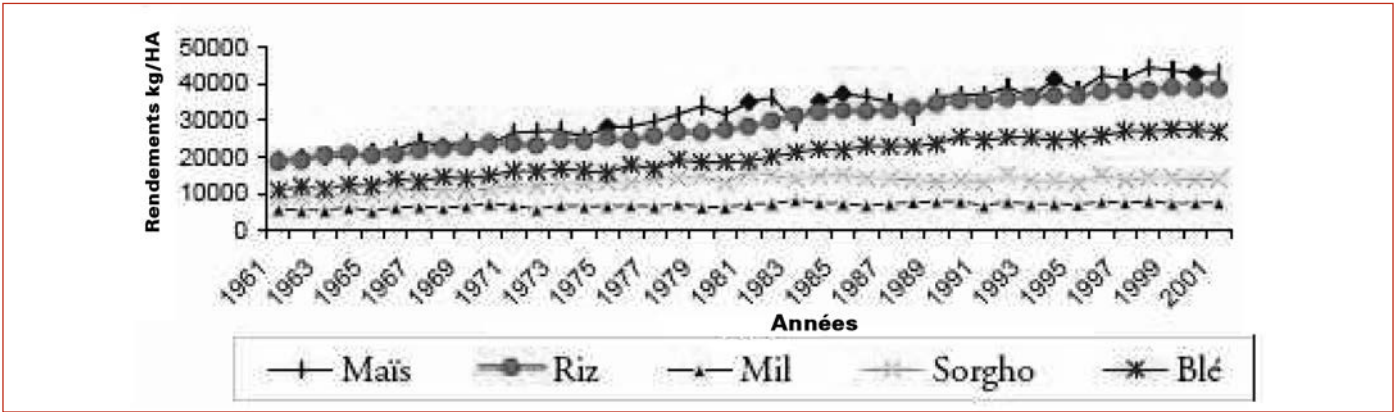


Figure 3 : Évolution des rendements des principales céréales par hectare.

Il reste peu de place mais il en reste quelques pourcents.

## 4. LES AGRORESSOURCES OU BIORESSOURCES

D'où peuvent venir les substituts du pétrole et de ses dérivés ?

On connaît maintenant très bien la manière de traiter certaines plantes sucrées ou certains oléagineux pour obtenir des carburants (figures 4 et 5).

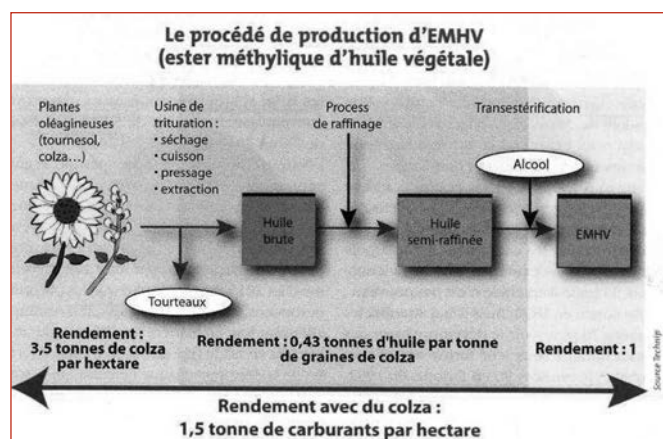


Figure 4 : La chaîne EMHV : un process en 3 étapes.

En Europe, les politiques de soutien existent avec des disparités assez sensibles.

Connaissant les rendements, on peut facilement évaluer les surfaces à planter pour faire fonctionner des usines de bio-éthanol ou de bio-diesel (tableau 7).

**On arrive très vite à la conclusion que les pays dits développés ne pourront même avec les meilleurs rendements faire évoluer leur agriculture pour continuer à nourrir leurs populations et, en même temps, trouver la solution pour remplacer le pétrole.**

Mais revenons à nos métiers :

Nous consommons chaque année : environ 6 000 M de litres de fuel pour faire fonctionner nos engins. Soit, sans

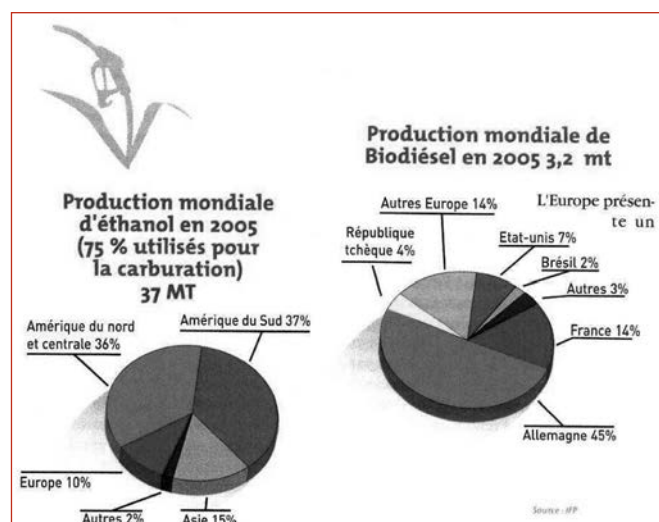


Figure 5 : Production biocarburants dans le monde.

modifier les moteurs en mélangeant 30 % d'agrocarburant : environ 2 000 M de litres soit 1 à 2 M d'hectares.

Pour substituer les fuels de nos postes de fabrications d'enrobés : 7,5 M de m<sup>3</sup> de fuel utilisées soit moins de 7 MT d'agrocarburant.

Pour les fluxants, il est très facile d'interdire les fluxants pétroliers pour les remplacer par des fluxants d'origine agricole : il suffit d'environ 150 000 hectares de cultures d'oléagineux (pour 1,5 T par hectare de rendement).

Quant aux substituts de bitumes, à raison d'une tonne pour une tonne et une tonne et demie par hectare de rendement, il nous faut compter sur 60 M d'hectares. C'est tout de même plus difficile ; mais puisqu'on nous dit que les ressources en bitume sont bien plus élevées que les ressources en pétrole ...

## 5. UNE EXPÉRIENCE CONCLUANTE POUR LA ROUTE

Nous nous contenterons ici de relater l'expérience récente acquise chez Colas pour imaginer, tester et produire des produits de substitution aux carburants pétroliers, aux fluxants pétroliers et au bitume.

Filière	Culture initiale	Énergie brute produite par H/A (tonnes équivalent pétrole)	Énergie nécessaire pour les engrais, la culture et la distillation (tonnes équivalent pétrole par ha)	Énergie nette produite par Ha (tonnes équivalent pétrole)	Nombre minimum de km <sup>2</sup> mobilisés pour produire 50 Mtep	En % du territoire français	En % des superficies cultivées 1997
Huile	Colza	1,37	0,50	0,87	574 000	104 %	365 %
Huile	Tournesol	1,06	0,29	0,77	648 000	118 %	413 %
Ethanol	Betterave	3,98	3,22	0,76	660 000	120 %	420 %
Ethanol	Blé	1,76	1,72	0,04	14 800 000 !	2 700 %	9 400 % !

Tableau 7 : Valeurs des paramètres de modélisation utilisés pour la construction des courbes  $F = f(L)$  dans les six configurations.



Depuis quelques années les équipes de recherche et, maintenant, de développement se sont mobilisées pour mettre au point des fluxants d'origine végétale (agro ou bio fluxant). Ces travaux débouchent sur plusieurs voies de développement : un premier substitut du bitume (les recherches se poursuivent) ; un biofluxant ou agrofluxant végétal et des produits dérivés comme les bio ou agromarquages.

Nous relaterons ici l'expérience des bio ou agrofluxants et des bionettoyeurs d'enrobage.

## 5.1. Recherches sur les biofluxants

Un des objectifs fixés aux travaux entrepris par nos équipes de recherche pour la mise au point de ces produits de substitution était le souci poussé de répondre aux critères du développement durable :

- le renouvellement des ressources naturelles ;
- les économies d'énergie ;
- la réduction des gaz à effet de serre ;
- la sécurité des personnes et de l'environnement naturel.

Ces travaux s'inscrivent dans les principes de la chimie verte puisqu'il s'agit de réduire voire d'éliminer l'usage ou la formation de substances dangereuses dans la conception, la production et l'utilisation des produits chimiques, de diminuer les déchets et l'énergie consommée tout en améliorant les performances des produits finis.

Les applications concernées par ces travaux sont dans un premier temps :

- les biofluxants, destinés à réduire la viscosité des bitumes dans les applications routières ;
- les bionettoyeurs destinée à protéger les équipements de la salissure ou à les nettoyer une fois souillés.

Dans un second temps, ce projet global pourra (vu les résultats très positifs en laboratoire) être étendu à la conception de bio-émulsifiants et de bio-marquages de sécurité pour la route dans les mêmes installations.

Il est bon de noter que les installations de fabrication de ces bioproduits pour la route peuvent aussi servir à la fabrication de bio-diesel pour utilisation interne dans nos engins de chantier (sous réserve des autorisations requises des autorités). Il faut compter un investissement de 300 à 400 euros par tonne de capacité de production pour une usine moyenne.

Les biofluxants sont destinés à remplacer l'emploi de fluxants volatils pétroliers ou carbochimiques. L'utilisation de ces derniers conduit à l'évaporation dans l'atmosphère de composés potentiellement gênants pour la santé des personnes et pour l'environnement et représente une énergie fossile gaspillée.

Les biofluxants pour bitume ont été obtenus en travaillant à base de dérivés de matières grasses naturelles renouvelables : dérivés d'huiles végétales ou d'acides gras de type tall oil.

Les bionettoyeurs pour les engins de chantiers (finisseurs, machines application d'enrobés coulés à froid), les camions, les ateliers sont destinés à remplacer des solvants pétroliers utilisés couramment par les équipes applicatrices et les ateliers (solvants de types fuel) pour nettoyer leur

matériels et équipements routiers. L'objectif de ce volet des travaux est de proposer deux types de produits, en remplacement du fuel qui lui s'évapore dans l'atmosphère une fois son utilisation terminée : **bioproduit qui présente une action préventive** (appliqué en protection sur les engins pour éviter qu'ils se salissent) et un **bioproduit de type curatif** (qui va nettoyer les équipements salis).

Dans les deux cas, des **matières premières d'origine naturelle végétale ont été employées pour synthétiser et/ou formuler les bionettoyeurs** présentant les caractéristiques voulues.

**Aspect environnemental** : une évaluation partielle du cycle de vie des biofluxants en comparaison de fluxants fossile a été réalisée sur les critères énergie et gaz à effet de serre. Ces impacts sont jugés les plus pertinents :

- l'énergie non renouvelable consommée par le bitume fluxé à base de biofluxant est inférieure d'environ 40 % à celle du bitume fluxé fossile ;

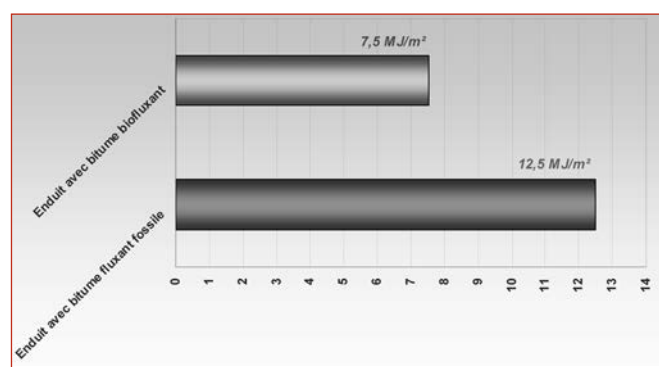


Figure 6 : Consommation d'énergie non renouvelable par m² d'enduit bi-couche.

- le dégagement de gaz à effet de serre (en équivalent CO<sub>2</sub>) est d'environ 12 % moindre avec les biofluxants.

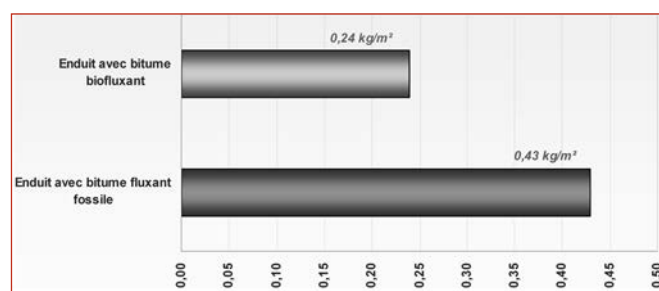


Figure 7 : Émission de GES par m² d'enduit bi-couche.

L'utilisation de ces bioproduits est une réponse aux problèmes posés par les utilisateurs. Le succès et la rapidité de conduite de ces travaux sont le résultat de leur motivation.

En complément de l'évaluation partielle décrite ci-dessus, les enseignements techniques ont montré :

- un gain matière et donc une économie de ressource fossile supplémentaire de l'ordre de 5-10 % de bitume ;
- un gain de température d'épandage des liants de l'ordre de 20°C et donc de l'énergie correspondante ;
- une économie de l'ordre de 30% de fluxant dans les mélanges.

La fabrication des produits a été testée en laboratoire puis dans une unité de fabrication pilote construite pour

la circonstance. Les fabrications pilotes ont été mises à l'épreuve sur le terrain. Les résultats sont excellents.

### *Mise au point en laboratoire*



Photo 1 : Exemple de synthèse d'ester éthylique de soja.

### *Sélection des meilleurs produits pour tests en grandeur réelle*

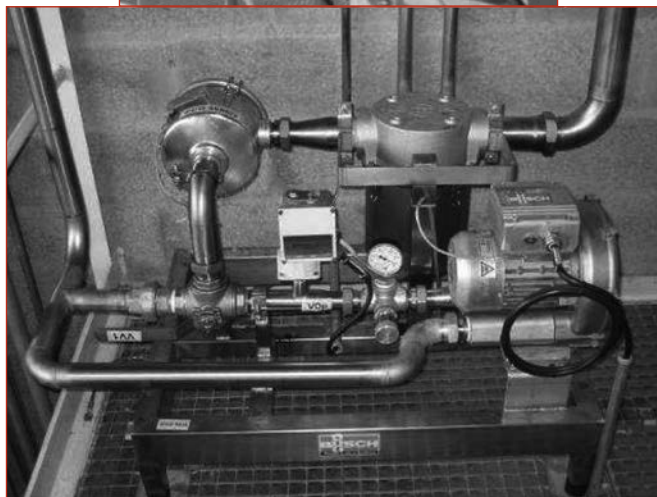
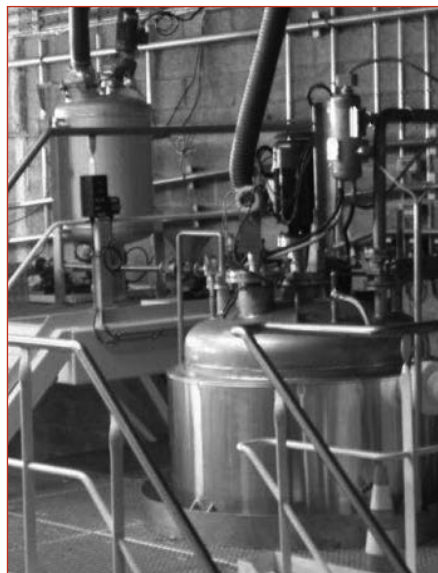


Photos 2-3 : Enduit superficiel appliqué dans le Gers en octobre 2005.



Photo 4 : Enduit superficiel appliqué dans l'Indre en juin 2006.

### *Conception et construction d'une installation pilote*



Photos 5-6 : Installation pilote.

## **5.2. Premiers bilans sur les biofluxants**

Les **bioproduits** issus de ces synthèses de laboratoire ont fait l'objet d'évaluations dans les formulations de produits routiers, en remplacement de fluxants d'origine fossile



habituellement utilisés pour les **biofluxants**. Pour les **bio-nettoyants**, leurs propriétés ont été comparées aux solvants pétroliers utilisés et testés par nos équipes d'application sur le terrain.

Les principales caractéristiques mesurées sont :

- **pas de dégagement de COV**, voire un gain matière du à la réaction des produits avec l'oxygène de l'air (jusque +1 %) ;
- **pour ce qui est des propriétés d'usage, vitesse de montée en cohésion des liants équivalente voire plus rapide** que ceux obtenus à partir de liants fossiles,
- **réduction de 30 % de la consommation de produits biofluxants** par rapport aux fluxants pétroliers pour le même usage, grâce à un pouvoir solvant meilleur.

Pour les **bionettoyants**, les formulations mises au point montrent des propriétés de nettoyage équivalentes à celle des nettoyeurs pétrochimiques traditionnels dans les métiers de la route.

Des travaux complémentaires sont déjà en cours pour substituer des produits d'origine végétale aux ressources fossiles dans :

- les formulations de **produits de marquage routiers (bio marquage)** employant des résines et des solvants pétroliers ;
- les **revêtements de types haute adhérence (bio revêtements)** employant aujourd'hui des résines ;
- la mise au point de **tensioactifs naturels (bio tensioactifs)**.

La plupart de ces produits pourront être fabriqués par l'usine industrielle sans modification. Certains coproduits seront réutilisés dans ces fabrications.

### 5.3. Un liant innovant d'origine végétale pour enrobés

Le liant est obtenu en mélangeant plusieurs composants issus de la transformation de matières premières végétales. L'invention est protégée par un brevet français et européen. Il est fabriqué en contrôlant strictement la proportion de ses composants, la température et le temps de mélange, ce qui garantit aux enrobés confectionnés avec ce liant végétal la cohésion et les performances mécaniques nécessaires aux matériaux utilisés en technique routière.

Classe	1	2	3
<b>Viscosité initiale (Pa.s)</b> Appareil Brookfield, (SC 4-27), 70 °C, 1.4 s <sup>-1</sup>	33 à 45	16 à 24	11 à 14
<b>Température de pompabilité (°C)</b>	100	100	100
<b>Densité à 25°C</b>	0,95 à 1,05	0,95 à 1,05	0,95 à 1,05
<b>Point d'Éclair Cleveland (°C)</b>	> 210	> 210	> 210
<b>Module G*(MPa) à 20°C ; 7,8 Hz</b>	> 2,5	> 0,8	> 0,2

*Tableau 8 : Classes actuelles et principales caractéristiques rhéologiques avant enrobage.*



*Photo 7 : Enrobé au liant végétal de couleur naturelle des granulats.*



*Photos 8 et 9 : Chargement d'un camion à la centrale de fabrication mise en œuvre des enrobés correspondants sur une route départementale très circulée.*

Ces liants peuvent être mis en émulsion. En fonction de la formulation retenue pour l'émulsion, la réalisation de divers revêtements est alors possible : enduits superficiels, enrobés coulés à froid, enrobés à froid élaborés en centrale de malaxage.

Nous présentons les applications suffisamment développées : les enrobés à chaud à base de liant végétal.

Ces recherches ont abouti à la formulation de liants végétaux dont les propriétés d'usages sont adaptées à la réalisation d'enrobés pour couche de surface ou couche de base.

### *Quelques propriétés intéressantes du liant végétal*

La composition du liant végétal peut être choisie pour conférer à ce liant un caractère transparent en couche mince, afin de confectionner des enrobés de couleur naturelle des granulats ou colorés au choix.

Comme il a été dit précédemment, le processus d'enrobage à chaud est identique à celui des enrobés bitumineux. **Il est réalisé avec des granulats secs et chauds à une température qui peut être réduite de 40 à 50°C sans perte de maniabilité. De ce fait, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre sont diminuées.**

### *Exemples de chantiers et performances in situ des enrobés au liant végétal*

La photo 10 montre la réalisation d'enrobés blancs, réalisés en 2002 dans l'Ouest de la France (0/6 dosé à 5,7 % ; granulats Bégard ; enrobage en poste discontinu). Ce chantier a été délicat vu la couleur de l'enrobé.



**Photo 10 : Mise en œuvre des tous premiers enrobés au liant végétal (couleur blanche).**

### *Principales caractéristiques de surface des enrobés*

Évaluée par mesure de la hauteur au sable vraie HSv, la macro texture du revêtement est correcte avec une moyenne de HSv de 0,71 mm.

Mesuré à 60 Km/H avec l'appareil SCRIM du CETE de Lyon, le coefficient de frottement transversal CFT est de 0,69 en moyenne après 4 mois.

Évalués par la remorque ADHÉRA du CETE Nord Picardie, après 6 et 30 mois, les coefficients de frottement longitudinal CFL [3], sont regroupés dans le tableau 4.

Age	6 mois	30 mois
CFL 40 Km/H	0,65	0,61
CFL 60Km/H	0,53	0,45

**Tableau 9 : CFL à différentes vitesses en fonction de l'âge.**

L'ensemble de ces mesures caractérise une adhérence très satisfaisante similaire à celle trouvée sur des revêtements de même type réalisés avec des bitumes élastomères SBS.

- Le Département du Haut-Rhin a décidé de renouveler en 2003 la couche de roulement d'ancienne chaussée supportant un trafic T3, avec un profil sinueux et en légère pente. Située dans le Jura alsacien, elle subit chaque année des cycles de gel dégel importants. Les enrobés (0/6 ; granulats du Rhin ; dosés à 5,7 %) ont été fabriqués dans une centrale discontinue à une température de fabrication de 110-120°C pour une durée de transport en camions bâchés de l'ordre d'une heure. La mise en œuvre est traditionnelle. Une pluie fine s'est pro-



**Photo 11 : Octobre 2003, mise en œuvre des enrobés 0/6 à Ligsdorf.**



**Photo 12 : Aspect de la chaussée après 30 mois.**



duite lors de l'application, mais ne l'a pas perturbé. La forte maniabilité des enrobés a été à nouveau observée, même à une température de l'ordre de 80 à 90°C.

- Réalisations 2004 à 2008



Photo 13: RD 419 (Haut-Rhin) après 20 mois de circulation.



Photo 14: Bormes les Mimosas et Palais du Luxembourg à Paris.

## 6. CONCLUSION

Dans ce court et approximatif tour d'horizon, nous avons pu montrer que les réserves de terres agricoles cultivables se trouvent plus dans les pays en développement que dans les pays développés.

Nous avons pu montrer aussi que, si nous prenons des dispositions rapidement, nous pourrions trouver une part de ressources nouvelles pour faire fonctionner nos engins de chantiers et de production.

Nous pourrions aussi trouver là des ressources de substitution partielle au bitume pour les revêtements superficiels voire une partie des enrobés.

Bien entendu, il faudra des études plus approfondies pour estimer l'empreinte environnementale réelle d'un tel changement.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

Ballié M., « Rugosoft, une nouvelle conception de bétons bitumineux peu bruyants à adhérence élevée », *RGRA* n° 829, juin 2004.

Bourgeois L., « Le Brésil sera-t-il la ferme du monde ? », *APCA*, mars 2005.

Chappat M., Bilal J., *La route écologique du futur*, Colas, 2003.

Deneuvillers C., « Les émulsions dans le monde, IBEF » – *ISSA Congress*, 2006-2007.

Deneuvillers C., Thouret D., Clarac A., « Des bioproduits sur nos routes », *RGRA* n° 845, décembre 2006.

Deneuvillers C., « Bioproducts on roads », *ISSA* 2008.

EAPA. *Données*, 2005.

F.A.O., *Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*, 2003-2004.

Griffon M., *Journal Le Monde*, 2 avril 2007

IFEN. Institut français de l'environnement.

Jancovici JM., *Que pouvons nous faire des biocarburants ?*, décembre 2004.

Le Brun S., *Pétrole et Gaz*, mars 2007.

Marmier F., « Sur la Route du Futur, route, véhicule et conducteur dialoguent », *RGRA* n° 805, avril 2002.

[www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)

## CONTENTS

SCIENTIFIC COMMITTEE.....	3
ORGANISING COMMITTEE.....	3
INTRODUCTION .....	4
THEMES AND TOPICS .....	5
CALL FOR PAPERS .....	5
PUBLICATION.....	6
YOUNG ENGINEERS PROGRAMME.....	6
TIME SCHEDULE.....	6
CONFERENCE FORMAT.....	7
LANGUAGE .....	7
PARTICIPANTS.....	7
PRE-REGISTRATION.....	7
COMMERCIAL EXHIBITION .....	7
DATE AND VENUE .....	7
TECHNICAL VISITS .....	8
SOCIAL PROGRAMME.....	8
PRE- AND POST-CONFERENCE TOURS .....	8
DUBROVNIK, CROATIA.....	8
LOCAL ORGANISERS .....	9
ABOUT IABSE.....	10
ABOUT FIB.....	10
FURTHER INFORMATION.....	10
USEFUL LINKS .....	10

## CONFERENCE SECRETARIAT

Croatian Society of Structural Engineers

Kačićeva 26

10 000 Zagreb

Croatia

Tel: +385 1 46 39 424

Fax: +385 1 46 30 632

E-mail: [Dubrovnik-2010@grad.hr](mailto:Dubrovnik-2010@grad.hr)

International Federation for Structural Concrete



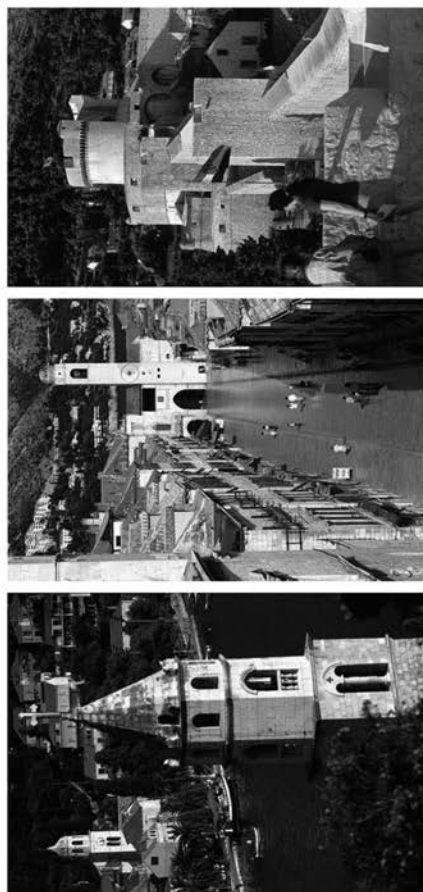
IABSE

International Association for Bridge and Structural Engineering

Preliminary Invitation and Call for Papers  
Joint IABSE-fib Conference on

## CODES IN STRUCTURAL ENGINEERING

Developments and Needs for International Practice



Cavtat, Dubrovnik-Neretva County, Croatia May 3-5, 2010

Organised by



Croatian Member  
Group



in association with



SECON - CSSE  
Structural  
Engineering  
Conferences



Civil  
Engineering  
Institute of  
Croatia



University of Zagreb  
Faculty of Civil  
Engineering



## SCIENTIFIC COMMITTEE

Manfred A. Hirt, Switzerland  
Chair

Joost Walraven, Netherlands  
Co-Chair

Danijel Močibob, Croatia  
Scientific Secretary

More members will be added  
for the Review Process

## ORGANISING COMMITTEE

Jure Radić, Croatia  
Chair

Croatian Society of Structural Engineers

Ana Mandić, Croatia  
Conference Secretary

Alok Bhowmick, India  
Michael Fardis, Greece  
Andrea Frangi, Switzerland  
Xi-Lin Lu, China  
Giuseppe Mancini, Italy  
Ante Milhanović, Croatia  
Hugo Corres Peiretti, Spain  
Jure Radić, Croatia  
Fathy Saad, Egypt  
Zlatko Savor, Croatia  
Luc Taerwe, Belgium  
Tsuyoshi Takada, Japan  
Roland Von Woelfel, Germany  
Jan Wium, RSA

György L. Balázs, Hungary  
Jelena Bleiziffer, Croatia  
Alex Kindij, Croatia  
Marija Kušter, Croatia  
Vlatka Rajčić, Croatia  
Krešo Saravanja, Bosnia  
and Herzegovina  
Damir Tkalčić, Croatia  
Roko Žarnić, Slovenia  
Željko Žderić, Croatia  
Danijla Živni, Croatia



Dubrovnik bridge – single pylon cable stayed bridge

3

## INTRODUCTION

The IABSE Conference held in Davos in 1992 (originally planned to be held in then Yugoslavia) covered the philosophy, the conceptual background and the basic elements of the Eurocodes, under development at that time. The conference in Davos addressed all those working towards unified codes in structural engineering in Europe, as well as those who wished to be informed on the ongoing development.

Since then, much progress has been achieved and most parts of the Eurocodes have been finalized. During the same time, national codes in many countries have been revised or are undergoing revision. Major codes exist or are under revision for example in the USA, Canada, Japan, India, China, and Australia. Many countries face the dilemma of choosing between parts from one or more of these codes while using existing national codes in parallel.

In the light of the globalisation of the construction market as well as of code writing, research and education, the joint IABSE-fib Conference addresses all persons worldwide interested to learn from each other, to exchange feedback from practical experience and to contribute to future harmonization of structural codes. Nevertheless, differences in geographical, climatic, environmental and social conditions as well as different safety or serviceability standards have to be considered.

The main objective of this IABSE-fib Conference 2010 in Cavtat is to obtain an overview of the present state of codes worldwide including the underlying legal and economical aspects. Based on feedback from practical applications and using the results of theoretical and experimental research, conclusions should be drawn for the development of future codes, striving for international harmonization in the ever more globalised market.

In addition to traditional topics related to safety and serviceability, new and special topics have emerged concerning for example robustness, assessment of existing structures, sustainability, aesthetics or the extensive use of information technology in the design process. Finally, the transition between codes and practice is made possible by adequate teaching of the fundamentals underlying the codes.

The Organising and Scientific Committees invite you to attend and exchange your views with people from all over the World.

Manfred A. Hirt

Chair of the  
Scientific Committee

Joost Walraven

Co-Chair of the  
Scientific Committee

Jure Radić

Chair of the  
Organising Committee

4



## THEMES AND TOPICS

### Codes in Structural Engineering - Developments and Needs for International Practice.

The main **Objectives of the Conference** are to provide:

- An overview of the present state of codes worldwide
- Comparisons of major codes
- Feedback from practical applications
- Incentives for harmonization and
- Development of future codes

Papers have to contribute to the overall objectives of this Conference and consider the **Themes and Topics** defined below.

#### 1. Objectives and Comparison of Codes

- Objectives: public procurement, international market, cost effectiveness, sustainability, energy efficiency, safety, comfort, ...
- Comparison between major structural codes in the World, benchmarking

#### 2. Format of Codes

- Format: user friendly, liberal or prescriptive, commentary, ...



Rector's Palace portico, Dubrovnik

- Basis of design: deterministic, probabilistic, performance-based, ...
- Actions: permanent, time dependant, live loads, accidental, ...
- Materials based or structures orientated

#### 3. Lessons from Application in Practice

- Buildings, bridges, sign structures, silos, tanks, ...
- Disaster reduction: earthquake, tsunami, avalanche, ...

#### 4. Additions to Future Codes

- Robustness, sustainability, aesthetics, ...
- Structural glass, composites, ...
- Existing structures: assessment, evaluation, maintenance, rehabilitation, strengthening, upgrading, remaining service life, inspection and inspection intervals, ...
- Life cycle costing, quality management, maintenance, ...

#### 5. Speciality Topics

- Action dependant structural resistance: fire, earthquake, stability, fatigue, impact, explosion, ...
- Safety concepts adapted to FE analysis: interaction formulas, nonlinear analysis, ...
- High performance materials
- Bridge equipment: bearings and expansion joints

#### 6. Codes and Teaching

- Scientific and technical background of codes, experimental results, commentary, textbooks, certification, ...

## CALL FOR PAPERS

Participants wishing to present a paper in accordance with the Themes and Topics are invited to submit a maximum 300 word abstract in English. Abstracts have to be submitted on-line using the web-based abstract submission system operated by the Conference Secretariat. Please note that hard copies, e-mails or fax submissions will not be accepted.

## YOUNG ENGINEERS PROGRAMME

All participants born in or after 1975 will benefit from a substantial reduction of their registration fee. An independent jury will judge the contributions by young authors' oral and poster presentations. Two prizes will be awarded at the Closing Ceremony of the Conference.



Cavtat, the largest and the only urban centre in Koranle region

## TIME SCHEDULE

Important dates for the organisation of the 2010 Conference:

<b>Deadline for receipt of abstracts:</b>	<b>Feb. 28, 2009</b>
<b>Notification of acceptance of abstracts:</b>	<b>May 15, 2009</b>
<b>Deadline for receipt of full papers:</b>	<b>Aug. 15, 2009</b>
<b>Notification of acceptance of papers:</b>	<b>Oct. 15, 2009</b>
<b>Final Invitation:</b>	<b>Nov. 11, 2009</b>
<b>Conference dates:</b>	<b>May 3-5, 2010</b>

To submit an abstract, please visit the Conference homepage at [www.iabse.org/dubrovnik2010](http://www.iabse.org/dubrovnik2010)

Instructions on submitting a paper are available at this site.

The Abstract should clearly indicate the specific relevance to the main Objectives of the Conference, introduce the proposed paper's subject, summarise its contents, explain unique aspects and give pertinent conclusions. Do not include photographs or figures in the abstract.

Abstracts should be submitted before **February 28, 2009**.

Information on the acceptance of abstracts and for the preparation of full papers will be given by May 15, 2009. Also, guidelines for paper formatting will be given at that time.

Full papers should be submitted before **August 15, 2009**.

In addition to the full paper (max 8 pages), a short version (max 2 pages) will have to be submitted.

The Scientific Committee will review the papers submitted for acceptance as either oral or poster presentations.

Authors will be notified on the acceptance of their papers by **October 15, 2009**.

Authors of accepted papers are expected to attend and present their papers at the Conference.

## PUBLICATION

All papers accepted by the Scientific Committee for oral or poster presentation will be available on the Conference CD-ROM. The short version of the papers will be published in the Conference Report.



## CONFERENCE FORMAT

The Scientific Programme includes Plenary, Concurrent, Poster and possibly workshop Sessions over three days. Specially selected Keynote Speakers will address the conference participants in the plenary sessions.

Oral presentations of the papers will be in one of maximum three concurrent sessions. Poster sessions will be structured such as to enable contact with the authors.

## LANGUAGE

The official language is English. Presenters must be able to answer questions in English.

## PARTICIPANTS

The Conference is intended for all persons interested in codes in structural engineering, their applications and consequences. Participants will include designers, researchers, code writers, consultants, owners, contractors, operators, suppliers and representatives of authorities from around the globe.

## PRE-REGISTRATION

For those interested in participating in this Conference please send an email with your contact information to the Conference secretariat at: [Dubrovnik-2010@grad.hr](mailto:Dubrovnik-2010@grad.hr). The Final Invitation providing registration details will be available in November 2009.

## COMMERCIAL EXHIBITION

A commercial exhibition for companies to display their projects, products and services will be hosted during the conference. Companies interested in exhibiting are invited to contact:

Ms Ana Mandić, Conference Secretary  
Phone: +385 1 46 39 424  
Email: [Dubrovnik-2010@grad.hr](mailto:Dubrovnik-2010@grad.hr)

7

## DATE AND VENUE

The Conference will take place from Monday to Wednesday, May 3-5, 2010. The Hotel Croatia in Cavtat will serve as the Conference venue and hotel. Cavtat is near Dubrovnik Airport, about 20 km south of Dubrovnik City.

Special hotel rates have been arranged for those attending the Conference. Please reserve directly with the Hotel Croatia quoting the IABSE /IB Conference 2010.

Phone: +385 20 475 555, +385 20 478 055  
Fax: +385 20 478 213  
Email: [info@hoteli-croatia.hr](mailto:info@hoteli-croatia.hr)  
Website: [www.hoteli-croatia.hr](http://www.hoteli-croatia.hr)

There may be additional events and tours before and after the Conference.



Hotel 'Croatia', Cavtat, Dubrovnik-Neretva County



Conference hall Ragusa, Hotel 'Croatia'

## TECHNICAL VISITS

A half-day technical visit is organised for Thursday, May 6, 2010, the day after the technical presentations. This visit is open to both participants and accompanying persons. Details will be provided in the Final Invitation.

## SOCIAL PROGRAMME

The Social Programme for participants and accompanying persons includes welcome reception, conference dinner and tours. Details will be provided in the Final Invitation.

## PRE- AND POST-CONFERENCE TOURS

There will be a selection of tours to places of historic and cultural interest in Dubrovnik and vicinity, offered to both participants and accompanying persons. Detailed information will be provided in the Final Invitation.

## DUBROVNIK, CROATIA

The most beautiful jewel of Croatia's cultural heritage, the old city of Dubrovnik, is located in the southernmost part of the sunniest Croatian tourist region of all: the Dalmatia. Dubrovnik area comprises one county, the County of Dubrovnik-Neretva, which extends almost entirely along the shore. Within it is Dubrovnik, the most beautiful and the most important, but by no means the only, cultural gem.

Also in this part of Croatia is the island of Korčula - the home of Marco Polo - the green islands of Mljet, Lastovo and the Elafiti with their picturesque settlements; the Pelješac peninsula, with its vineyards and the especially fine houses built by sea captains; the magical Konavle valley; the fertile River Neretva delta. The area of Dubrovnik underwent a quite distinct historical development, for it was here, in the period between the 13th and 18th centuries, that Croatian culture and art flourished, while the

remainder of Dalmatia was under foreign rule. It reached its zenith in the 16th century, when the power of the famous Dubrovnik Republic was at its mightiest.

The vista of the old city of Dubrovnik, approached from the direction of Dubrovnik airport, is one of the best known panoramas of Croatia and of the whole of the Mediterranean area. Indeed, the first sentence of the description of Dubrovnik in the UNESCO List of World Cultural Heritage begins with the words: "Pearl of the Adriatic on the Dalmatian coast...", for few are the cities which enjoy such a wonderful position on a rocky shoreline above the sea, and few are the places where medieval stone walls and fortresses are so well preserved.

Dubrovnik is famous for its museums too, attracting close to half a million visitors each year. Alongside the most popular, in the Rector's Palace, there is the Maritime Museum where one can learn everything about the maritime history of Dubrovnik, from the Middle Ages to the 20th century.

A walk through Stradun - the most famous city street and favourite promenade in Dubrovnik, through narrow streets and small squares, monumental ramparts and fortresses, provides excellent opportunities to experience the millennial beauty of its shell-shaped urban core, centuries of building, stone-cutting, carving and engraving, the history of the Rector's Palace, libraries, the oldest pharmacy in the south of Europe, etc.

Dubrovnik offers individual choice among numerous museums and galleries, which contain the jewels of Croatian heritage.



The vista of the old city of Dubrovnik

8



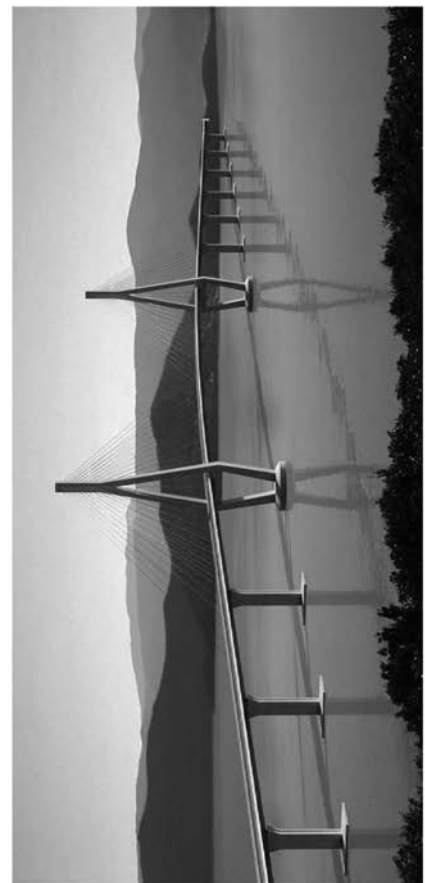
## LOCAL ORGANISERS

**A** Croatian Group of IABSE represented by CSSE - Croatian Society of Structural Engineers. CSSI is a professional association bringing together structural engineers and other civil engineers to promote the ethics of engineering vocation and advance the development of research in civil engineering. It will celebrate its 57<sup>th</sup> anniversary in 2010. Today the Society has approximately 1'000 members. More information about CSSE can be found at [www.grad.hr/hdggk/](http://www.grad.hr/hdggk/).

**IGH** IGH – Civil Engineering Institute of Croatia. IGH was founded in 1949, and has grown from a simple civil engineering laboratory to the present-day public shareholding company for research and development in civil engineering. IGH is mainly involved with the design of motorways, bridges, tunnels and various purpose building structures, design control, site supervision, material testing and certification, structural load testing, research and consulting. It has 20 accredited laboratory facilities with a total of 350 test methods. Today the Institute has over 880 full time employees of which 456 are engineers. More information about Institute can be found at [www.igh.hr](http://www.igh.hr).

**SECON** SECON- Structural Engineering Conferences. SECON was established under the auspices of the Croatian Society of Structural Engineers and has been responsible for the organisation of conferences, courses and workshops. Since the year 2005 SECON supports the Eurocode national implementation by organizing at least one main conference and a number of courses throughout Croatia dealing with topics of interest for structural engineers. Further information on SECON can be found at [www.secon.hr](http://www.secon.hr).

**University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering.** The Technical College established in Zagreb in 1919 integrated with the University of Zagreb as the Technical Faculty in 1926. Today the Faculty consists of 9 departments: Geotechnical Engineering, Materials, Water Research, Structures, Mathematics, Construction Management, Transportation Engineering, Engineering Mechanics and Buildings. Scientific-research work is being carried out within the framework of numerous scientific projects. Most of them are financed by the Ministry of Science and Technology and the rest by public enterprises. More information about the Faculty can be found at [www.grad.hr](http://www.grad.hr).



Simulation of the future Peješac bridge in construction, with the main span of 568 m

## ABOUT IABSE

**A** The International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) was founded in 1929. Today, IABSE has around 4000 members in over 100 countries. The mission of IABSE is to promote the exchange of knowledge and to advance the practice of structural engineering worldwide in the service of the profession and society. To accomplish its mission, IABSE organizes conferences and publishes the quarterly journal *Structural Engineering International* (SEI), as well as reports and other monographs. IABSE also presents annual awards for outstanding achievements in research and practice that advance the profession of structural engineering. Membership is open to individual engineers and organizations having technical or scientific interest related to Structural Engineering.

More information about IABSE can be found on [www.iabse.org](http://www.iabse.org).

## ABOUT FIB

**fib** The International Federation for Structural Concrete *fib* (Fédération Internationale du béton) was created in 1998 by the merger of the former CEB and FIP. Its mission is to promote, at the international level, the study of scientific and practical aspects related to concrete construction in order to advance its technical, economic, aesthetic and environmental performance. Membership is open to every engineer. *fib* publishes so-called "Bulletins", which continuously influence, in a pre-normative way, the development of national and regional codes, and also a scientific journal 'Structural Concrete'. Its national member groups organize every year international symposia and once every four years a comprehensive international congress covering all aspects of structural concrete.

Further information on *fib* can be found at [www.fib-international.org](http://www.fib-international.org).

## FURTHER INFORMATION

**Croatian Society of Structural Engineers, Kačićeva 26,  
10 000 Zagreb, Croatia**  
Tel: +385 1 46 39 424  
Fax: +385 1 46 30 632  
E-mail: [Dubrovnik-2010@grad.hr](mailto:Dubrovnik-2010@grad.hr)

**WELCOME TO  
DUBROVNIK AND  
CROATIA!**



## USEFUL LINKS

Conference website:	<a href="http://www.iabse.org/dubrovnik2010">www.iabse.org/dubrovnik2010</a>
IABSE website:	<a href="http://www.iabse.org">www.iabse.org</a>
<i>fib</i> website:	<a href="http://www.fib-international.org">www.fib-international.org</a>
Conference city Cavtat:	<a href="http://www.tzcavtat-konavle.hr">www.tzcavtat-konavle.hr</a>
Dubrovnik:	<a href="http://www.visitdubrovnik.hr">www.visitdubrovnik.hr</a>
Croatia:	<a href="http://www.croatia.hr">www.croatia.hr</a>

# Concevoir et Construire en BFUP : État de l'art et Perspectives

17 et 18 novembre 2009, MARSEILLE

Nom : .....  
Prénom : .....  
Société : .....  
Adresse : .....  
.....  
Tél : ..... Fax : .....  
E-mail : .....

☐ Je suis intéressé(e) par les journées Marseille -  
BFUP 2009 et je souhaite des informations  
concernant :

- ☐ l'inscription  
☐ l'exposition technique  
☐ J'ai l'intention de présenter un résumé  
☐ J'ai l'intention de présenter un poster

## Calendrier

Envoi des résumés	28 février 2009
Acceptation des résumés	31 mars 2009
Envoi des articles et posters	30 juin 2009
Envoi des présentations	15 octobre 2009

## INFORMATIONS PRATIQUES

La manifestation aura lieu à Marseille, les 17 et 18 novembre 2009. Les articles et présentations sont acceptés en français ou en anglais. Une traduction simultanée anglais - français sera mise en œuvre lors du colloque.

### Proposition de communications

Si vous souhaitez présenter une communication, votre résumé (300 mots) doit parvenir au secrétariat de la manifestation ([jocelyne.jacob@wanadoo.fr](mailto:jocelyne.jacob@wanadoo.fr)) avant le **28 février 2009** en précisant le ou les thèmes des conférences.

### Exposition technique - Poster

Un espace d'exposition technique est proposé aux entreprises et industriels intéressés à la promotion de leur savoir-faire et de leurs produits.

### Comité d'organisation

Président : Jacques RESPLENDINO  
Vice-président : François TOUTLEMONDE  
Membres : Jean-François BATOZ, Martine BRESSO Christian CLERGUE, Daniel FOISSAC, Bruno GODART, Patrick GUTRAUD, Jocelyne JACOB, Pierre MARCHAND, André MASCARELLI, Michel MOUSSARD, Jacques PORTELATINE, Christophe RAULET, René-Gérard SALE, Jean-Michel TORRENTI.

### Comité Scientifique

J RESPLENDINO, DIRMED, MEEDDAT France Président  
Dr F TOUTLEMONDE, LCPC, France coprésident  
Pr F J ULM, MIT, USA coprésident  
et plus de 20 experts de divers pays :  
Autriche, France, Allemagne, Italie, Japon, Pays-Bas, Suisse, États-Unis.

### Droits d'inscription aux deux journées

Membres AFGC ou fib	280 € TTC
Non Membres AFGC - fib	320 € TTC
Administrations, Collectivités	130 € TTC

Ces tarifs comprennent l'accès à l'ensemble des conférences, les documents, les déjeuners, pauses café et dîner de Gala.

Les étudiants pourront assister gratuitement aux séances, (mais pas aux déjeuners et dîner) dans la limite des places disponibles.

### Programme pour les accompagnant

Des activités touristiques et culturelles à Marseille et aux alentours seront proposées aux accompagnants.



**BFUP 2009**

**Invitation préliminaire  
Appel à communications**

**Colloque international sur les  
Bétons Fibrés à Ultra-hautes  
Performances (BFUP)**

**Concevoir et Construire en  
BFUP : État de l'art et  
Perspectives**

**MARSEILLE**

**17 et 18 novembre 2009**



## OBJECTIFS

Sept ans après la sortie des recommandations AFGC - SETRA sur les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP), l'objectif du Colloque est de faire le point sur le savoir faire et l'expérience dans le domaine des BFUP, et analyser les perspectives de développement.

Après un rappel des performances et caractéristiques principales de ces matériaux, le colloque présentera des réalisations concrètes récentes tant en génie civil, en bâtiment que dans le domaine des équipements et infrastructures diverses.

La manifestation est organisée en trois temps :

- Présentation de projets, réalisations remarquables récentes tant en France qu'à l'étranger,
- Présentation des nouvelles recommandations AFGC, qui profitent des dernières réflexions conduites au travers des Eurocodes et au sein de la fib,
- Présentation d'un important projet de la métropole Marseillaise : le MuCEM qui utilise de façon très importante les bétons à ultra hautes performances.

Pour le volet présentation de réalisations, l'AFGC fait un appel à communication et invite tous les acteurs de la Construction, maîtrises d'ouvrage, maîtrises d'œuvre, entreprises, industries, sociétés d'ingénierie, architectes, laboratoires, universités qui ont été impliqués dans des réalisations en BFUP à venir les présenter. L'objectif de ces communications est d'expliquer les raisons du recours au BFUP (esthétique, technique, structurelle ou environnementale), de faire le bilan de l'expérience acquise et d'en tirer des enseignements pour les réalisations futures notamment vis-à-vis des concepts du développement durable.

## CONTACTS - INFORMATIONS

Pour tous renseignements complémentaires :

AFGC

15 rue de la Fontaine au Roi F- 75127 Paris Cedex 11

Tel : (33) 1 44 58 24 70 - Fax : (33) 1 44 58 24 79

courriels : [jocelyne.jacob@wanadoo.fr](mailto:jocelyne.jacob@wanadoo.fr); [afgc@enpc.fr](mailto:afgc@enpc.fr);

[martine.bresso@developpement-durable.gouv.fr](mailto:martine.bresso@developpement-durable.gouv.fr)

## THÈMES DES CONFÉRENCES

Les trois premières demi-journées seront consacrées à la présentation de réalisations récentes sur les thèmes suivants :

- 1 Des possibilités architecturales renouvelées
  - prise en compte des performances spécifiques dans la réalisation de structures innovantes, de nouvelles formes, de nouvelles méthodes de mise en œuvre, pour les bâtiments ou les structures diverses
- 2 Des ponts qui repoussent les limites du possible
  - Utilisations dans la réalisation de passerelles, piétons, de ponts routiers et ferroviaires,
3. Des équipements ou composants innovants
  - Composants innovants pour le bâtiment et le génie civil
  - Mobiliers et/ou équipements urbains,
4. Les BFUP au service d'une nouvelle vie des ouvrages
  - Utilisations en réparation, renforcement,
  - reprises en sous-œuvre des ouvrages
5. Les BFUP et le développement durable
  - Utilisations spécifiques des performances de durabilité, résistance à l'environnement,
  - Possibilité de recyclage, bilan environnemental

La fin de la manifestation sera consacrée à la présentation des nouvelles recommandations AFGC et du futur projet du MuCEM.

Le soir de la première journée un dîner de gala est prévu et permettra de visiter une exposition de divers composants innovants en BFUP.

AFGC

A l'attention de Jocelyne Jacob  
15, rue de la Fontaine au Roi  
75127 - PARIS - Cedex 11