

ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE N° 1/2009

(anciennement : *Annales de l'I.T.B.T.P.*,  
Revue créée en 1948)

FÉVRIER 2009

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Serge KEBABTCHIEFF

**RÉDACTION**

*Rédacteur en chef*

François Buyle-Bodin

Tél. : 03 20 43 46 10

Fax : 03 28 76 73 31

Polytech'Lille, Cité Scientifique

59655 Villeneuve d'Ascq

francois.buyle-bodin@univ-lille1.fr

**En chantier**

**ABONNEMENT :** [ <http://www.eska.fr> ]

Editions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35

**FABRICATION :** AGPA EDITIONS

4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne

Tél. : 04 77 43 26 70 - Fax : 04 77 41 85 04

E-mail : [agpaedit@yahoo.com](mailto:agpaedit@yahoo.com)

**PUBLICITÉ** - À la rédaction

**IMPRESSION**

# sommaire

## éditorial

### ORGAGEC'08

#### suite des présentations sélectionnées

Évaluation de l'efficacité des traitements physicochimiques sur les performances mécaniques des bétons lignocellulosiques confectionnés à partir de pulpes de betterave – P. MONREAL, L.B. MBOUMBA-MAMBOUNDOU, R.M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC ..... 6

Concept de pont précontraint : Application à une passerelle en matériaux composites – O. BAVEREL, J.-F. CARON ..... 11

Optimisation du transfert des efforts d'un joint collé – Utilisation d'un joint « courbe » pour un collage structural – S. CHATAIGNER, J.-F. CARON ..... 18

Évolutions des propriétés mécaniques de géotextiles polyester après un an de vieillissement en milieu alcalin – L. VOYOVITCH VAN SCHOORS, S. LAVAUD, D. DURAGRIN, N. BARBERIS ..... 29

résumés — abstracts ..... 4  
annonces de colloques ..... 35  
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

\* 1/2009

## LISTE DES ANNONCEURS

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

Chères lectrices, chers lecteurs,

Ce premier numéro de 2009 s'inscrit dans la continuité de 2008, en attendant les évolutions à venir dont j'ai déjà eu l'occasion de vous parler.

Il comprend quatre présentations faites à ORGAGEC'08 dont je vais essayer dans cet éditorial de mettre en évidence l'intérêt.

La première porte sur l'évaluation de l'efficacité des traitements physicochimiques sur les performances mécaniques des bétons lignocellulosiques confectionnés à partir de pulpes de betterave. Le sujet paraît marginal, mais la prise en compte du développement durable dans notre secteur passe par ce genre d'investigation. La valorisation des sous-produits agricoles nous concerne, au même titre que par exemple le secteur de l'énergie.

La seconde s'intéresse à un nouveau concept de pont précontraint avec une application à une passerelle en matériaux composites. Le sujet est clairement illustré, tant en couverture que dans le corps du numéro. Cela montre les possibilités qu'offrent aujourd'hui les matériaux composites, sur le thème de la bonne utilisation des bons matériaux pour un usage donné. Vous pourrez apprécier la simplicité et la légèreté du procédé.

La troisième se consacre à l'optimisation du transfert des efforts d'un joint collé par l'utilisation d'un joint « courbe ». Le sujet peut paraître complexe, mais il tente de répondre à une des problématiques liées à l'usage des composites et des assemblages collés. La technique proposée a fait l'objet d'un brevet, et nous devrions certainement la voir se répandre dans les prochaines années sur nombre de nos ouvrages.

La quatrième porte sur un sujet apparemment déjà traité dans le précédent numéro. La problématique de la durabilité des géotextiles est pourtant fortement dépendante de la nature du matériau organique utilisé, et dans ce papier sont abordées les évolutions microstructurales et morphologiques de géotextiles polyester en milieu alcalin. Voilà un sujet qui réunit nombre de nos préoccupations : quel matériau utiliser comme géotextile et quelle est sa durabilité, question d'aujourd'hui alors qu'il y a quelques années seules les caractéristiques mécaniques de ces géotextiles nous intéressaient.

Enfin j'attire votre attention sur les nouvelles recommandations aux auteurs présentées en fin de numéro, espérant qu'elles vous donneront envie d'apporter une contribution précieuse au développement de la revue.

François BUYLE-BODIN  
*Le rédacteur en chef*

## r é s u m é s — abstracts

### **ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS PHYSICOCHIMIQUES SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES BÉTONS LIGNOCELLULOSIQUES CONFECTIÖNNÉS À PARTIR DE PULPES DE BETTERAVE**

P. MONREAL, L.B. MBOUMBA-MAMBOUNDOU,  
R.M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC

De récents travaux menés au LTI ont montré que la pulpe de betterave obtenue à partir de procédés d'extraction industrielle du sucre, pouvait être valorisée par son incorporation dans la fabrication de bétons lignocellulosiques à destination de l'industrie du bâtiment. Cependant, malgré de très bonnes caractéristiques d'isolation thermique et des performances mécaniques acceptables, il s'avère que les composites formulés à partir de pulpes de betteraves non traitées présentent des problèmes des variations dimensionnelles et des retards de prise, en raison du caractère hydrophile de la pulpe et à l'extraction de composés organiques dans la matrice de ciment. Des traitements physico-chimiques ont été effectués afin de réduire ces problèmes. L'efficacité de ces traitements a été évaluée via une comparaison des performances mécaniques entre les composites contenant la pulpe traitée ou non.

### **ASSESSMENT OF PHYSICOCHEMICAL TREATMENTS EFFICIENCY ON MECHANICAL PERFORMANCES OF CONCRETE INCLUDING BEET PULP**

*Recent work conducted at LTI on lignocellulosic concrete has showed that the beet pulp, obtained from industrial process on sugar extraction, could be successfully used for the development of composites for the construction industry. However, in spite of very good heat insulation characteristics and acceptable mechanical performances, it appears that composites containing untreated beet pulp carry problems of dimensional variations and set-retarding, owing to both the hydrophilic character of the pulp and the organic compound secretion in the cement matrix. Physicochemical treatments were carried out in order to reduce these problems in contrast with untreated beet pulps. The effectiveness of the treatments carried out was evaluated via a comparison of the mechanical performances between composites containing either treated or untreated pulp.*

### **CONCEPT DE PONT PRÉCONTRAINTE : APPLICATION À UNE PASSERELLE EN MATÉRIAUX COMPOSITES**

O. BAVEREL, J.-F. CARON

Ce document propose un concept de pont précontraint par flexion. Ce concept est illustré par un exemple de passerelle sur trois appuis dont l'appui central est un câble qui est mis en tension en fléchissant le pont. Le câble, une fois tendu, est alors en mesure d'agir comme un poteau. Ce poteau ne présente donc pas de risque de flambement et peut donc être extrêmement élancé. Les calculs montrent que les matériaux composites sont bien adaptés pour ce type d'application. Enfin, la construction d'un prototype est présentée et les auteurs concluent sur la faisabilité économique de ce concept.

### **CONCEPT OF PRESTRESSED BEAM APPLIED TO A SCALE ONE FOOTBRIDGE MADE OF COMPOSITE MATERIALS**

*This paper proposes a concept of a beam prestressed by bending. An application through an example of footbridge with three supports is shown and illustrated. The prestress by bending in the beam will prestress in tension the central support that is a cable. The cable is then able to act as column which is an advantage as it cannot buckle. In this example, the method of calculation is given and shows that composite materials are well suited for this application. Finally the construction of a scale one model is shown and the authors conclude on the economical feasibility of such concept.*

### **OPTIMISATION DU TRANSFERT DES EFFORTS D'UN JOINT COLLÉ – UTILISATION D'UN JOINT « COURBE » POUR UN COLLAGE STRUCTURAL**

S. CHATAIGNER, J.-F. CARON

La technique du collage structural s'avère être de plus en plus utilisée dans le domaine du génie civil que ce soit dans le cadre de travaux de renforcements pour le collage d'éléments additionnels ou que ce soit dans le cadre de la réalisation de nouvelles structures en remplacement des techniques d'assemblages usuelles. Le collage structural induit cependant des concentrations de contraintes aux extrémités du joint collé et de nombreux auteurs se sont donc attachés à les étudier pour les réduire et par conséquent augmenter la capacité du joint collé, voire sa durée de vie. Toutes ces études concernent donc l'optimisation du transfert des efforts par collage. On s'intéresse ici à l'étude du rôle de la pression hydrostatique sur les capacités ultimes des adhésifs utilisés. Celle-ci permet de nous intéresser ensuite à une nouvelle forme de joint collé, à savoir, le joint « courbe » qui permet de créer naturellement une composante de compression hors plan du joint collé en extrémité. Dans un premier temps, une modélisation en mécanique linéaire classique est conduite pour étudier l'influence de différents paramètres géométriques sur les contraintes, puis nous nous intéressons à la mécanique de la rupture pour étudier la propagation d'éventuelles fissures pour cette nouvelle géométrie. Après avoir mené notre étude théorique, nous présentons ensuite quelques essais quasi-statiques comparant joint plan et joint courbe. Les résultats de ces investigations sont ensuite exploités au regard des divers développements théoriques exposés. Un brevet vient d'être déposé pour cette nouvelle géométrie, et des essais additionnels sont en cours de réalisation, mais le joint courbe semble prometteur.

### **SHEAR STRESS TRANSFER OPTIMISATION IN THE CASE OF AN ADHESIVELY BONDED JOINT – USED OF A “CURVED” BONDED JOINT FOR A STRUCTURAL BONDED ASSEMBLY**

*Structural adhesive bonding is nowadays often used in the field of civil engineering for reinforcement operations for instance, or even instead of traditional assembly techniques to realize new composite structures. Yet, structural adhesive bonding induces stress concentrations at the edges, and consequently, numerous authors have tried to study them in order to reduce these phenomena and to increase the bonded joint's capacity, and service life. All these studies may be gathered as shear stress optimisation for adhesively*

*bonded joints. In this article, the role of the hydrostatic pressure on the ultimate capacities of common adhesives used in civil engineering is studied. This research allowed us to get interested in a new joint geometry being the “curved” bonded joint that naturally creates compressive stresses on the edge of the bonded joint. In a first step, a classical modelling is conducted to determine the influence of the geometry on the stresses existing in the joint. Then, failure mechanics is used to investigate crack propagation. Following these theoretical modelling, several experimental investigations are then presented. These are quasi-static tests comparing classic shear lap joints to curved joints. The experimental are then treated using the modelling described before. A patent has been produced, and additional testing is currently conducted, but the curved joint seems to offer good prospects.*

## **ÉVOLUTIONS DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE GÉOTEXTILES POLYESTER APRÈS UN AN DE VIEILLISSEMENT EN MILIEU ALCALIN**

L. VOUVYOVITCH VAN SCHOORS, S. LAVAUD,  
D. DURAGRIN, N. BARBERIS

Cette étude consiste à évaluer les évolutions des caractéristiques mécaniques de géotextiles utilisés pour des applications de

renforcement lors de vieillissement en milieu modérément alcalin (pH 9-11). Les géotextiles analysés sont constitués de fibres tissées de polyéthylène téraphthalate. Par corrélation entre les propriétés mécaniques utilisées généralement comme indicateur de vieillissement et les propriétés physico-chimiques à différentes échelles des matériaux non vieillis et vieillis un an en laboratoire, la compréhension des mécanismes de dégradation a ainsi pu être approfondie.

## **MECHANICAL PROPERTIES OF POLYESTER GEOTEXTILES AFTER ONE YEAR AGING IN ALKALINE MEDIUM**

*This study consists in assessing evolutions of the mechanical characteristics of geotextiles used for reinforcement application during ageing in moderately alkaline medium (pH 9-11). The analyzed geotextiles consist of polyethylene terephthalate woven fibres. By correlation between the mechanical properties usually used as indicator of ageing and the physico-chemical properties on various scales of as-received materials and aged for one year in laboratory, the understanding of the behaviour of degradation could be improved.*

# **ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS PHYSICOCHIMIQUES SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES BÉTONS LIGNOCELLULOSIQUES CONFECTIONNÉS À PARTIR DE PULPES DE BETTERAVE**

---

**P. MONREAL\*, L.B. MBOUMBA-MAMBOUNDOU, R.M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC**

\*Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI)

Equipe Ingénierie des Matériaux et des Procédés (IMaP)

Université de Picardie - Jules Verne (UPJV)

41, avenue Paul Claudel. 80480 Dury les Amiens (France)

---

## **1. INTRODUCTION**

**I**l est logique de penser que, dans l'avenir immédiat, la croissance urbaine et de ses infrastructures va continuer à produire un impact important sur l'environnement par l'utilisation de matériaux et par la consommation de matières premières et d'énergie. Le volume de travaux du BTP va augmenter progressivement et ceux-ci doivent être entrepris en tentant d'atteindre la durabilité afin de réduire au minimum l'impact sur l'environnement (Peris Mora, 2007).

Dans la production du sucre, et en général dans toute production de produits alimentaires, de grandes quantités de résidus, effluents et coproduits sont obtenues. Ces produits doivent être récupérés et recyclés ou traités pour obtenir des produits utiles et de plus haute valeur ajoutée ou utili-

sés comme matières premières pour d'autres industries. Un de ces coproduits est la pulpe de betterave qui représente environ 3 000 000 de tonnes par an. Actuellement elle est déshydratée et pelletisée pour être utilisée dans l'alimentation du bétail générant un faible bénéfice.

C'est dans le cadre de l'éco-construction, du développement durable et de stratégies de productions propres qu'une nouvelle voie de valorisation des pulpes de betterave à plus haute valeur ajoutée serait leur utilisation comme charge végétale dans des bétons lignocellulosiques.

L'incorporation de pulpe de betterave dans une matrice cimentaire est une des études de valorisation initiée par l'équipe IMaP du LTI dans sa recherche de solutions de valorisation de ce type d'agro ressources. Des travaux effectués ces dernières années (Mboumba-Mamboundou, 2005) ont

montré la possibilité d'une confection de composites possédant de bonnes caractéristiques d'isolation thermique. Toutefois, même si les résistances mécaniques de ces composites sont compétitives au regard de la classification fonctionnelle de la RILEM (RILEM, 1978), et par comparaison avec d'autres matériaux composites lignocellulosiques à matrice cimentaire, le caractère hydrophile des pulpes de betterave ainsi que leur forte propension à gonfler en présence d'eau entraîne des variations dimensionnelles non négligeables pour le composite. D'autre part, les composés organiques relargués par les pulpes dans l'eau entraînent des retards de prise d'autant plus importants que la proportion de pulpe dans le composite est élevée ( $\text{Pulpe/Ciment} > 2$ ). Afin de s'affranchir de ces effets nuisibles, nous avons effectué des traitements physicochimiques visant à minimiser le caractère hydrophile des pulpes de betterave (Monreal, 2007). Cette étude vise à évaluer l'impact de ces traitements sur les résistances mécaniques des bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betterave.

## 2. LES BÉTONS LIGNOCELLULOSIQUES

Aujourd'hui, tenant compte de ce que les quantités disponibles de granulats d'origine artificielle ou minérale sont limitées, et que les coproduits d'origine industrielle ou provenant de l'agriculture sont très abondants, ces derniers représentent une ressource alternative potentielle pour l'industrie de la construction. Leur utilisation présenterait le double avantage d'une meilleure gestion des ressources fossiles et de permettre de nouvelles valorisations de ces coproduits peu ou pas valorisés (Mannan et Ganapathy, 2004). L'utilisation des coproduits agricoles dans le béton conduit à une classe de bétons de granulats légers (BGL) appelés bétons lignocellulosiques. Il s'agit de matériaux composites à matrice cimentaire, dans lesquels les granulats minéraux ont été partiellement ou totalement remplacés par des granulats végétaux. Les domaines d'application des bétons lignocellulosiques sont variés. La plupart des industriels qui ont investi ce domaine, proposent des chapes isothermiques et isophoniques ultra légères, des dalles isolantes et des panneaux coupe son pour routes et autoroutes.

Ces matériaux composites à base de ciment et de matières végétales présentent donc les avantages propres aux bétons légers, qui sont principalement des performances mécaniques intéressantes pour des masses volumiques nettement diminuées par rapport à des bétons dits normaux et des avantages au niveau de l'isolation thermique et acoustique (Pimienta *et al.*, 1994). Mais, du fait de leur nature, les coproduits végétaux présentent aussi l'avantage de constituer des ressources renouvelables annuellement, dont la biodégradabilité peut être contrôlée et qui, par plusieurs aspects, participent à la lutte contre l'effet de serre. Toutefois, un certain nombre de difficultés subsistent et rares sont les matières végétales qui peuvent être additionnées au ciment sans provoquer des problèmes.

La première difficulté rencontrée concerne la compatibilité entre la matrice cimentaire et le granulat lignocellulosique. En effet, certains composés présents dans les parois cellu-

laires des cellules végétales ont une action retardatrice ou même inhibitrice de la prise et de l'hydratation du ciment qui se traduit par un affaiblissement des résistances mécaniques (Hachmi et Moslemi, 1989 ; Garcí Juenger et Jennings, 2002 ; Luke et Luke, 2000). Une autre difficulté rencontrée est relative aux variations dimensionnelles des matériaux composites. Les matières lignocellulosiques changent de dimensions avec le changement de leur taux d'humidité. Ce processus est réversible et les granulats varient dimensionnellement au fur et à mesure qu'ils échangent de l'humidité (Rowell, 1998). Ces variations dimensionnelles sont susceptibles de créer des pathologies dans la construction, aussi bien au niveau macroscopique, en raison des contraintes développées, qu'au niveau microscopique, par le développement de microfissurations qui peuvent favoriser la pénétration d'agents agressifs. Pour surmonter ces problèmes, différents traitements de natures diverses ont été mis en place agissant soit sur la matrice cimentaire, soit sur le granulat végétal. Il peut s'agir de traitements physiques, thermiques ou chimiques.

Le choix du traitement doit se faire en cherchant la meilleure amélioration possible des caractéristiques du granulat en termes de compatibilité avec la matrice cimentaire et de diminution du caractère hydrophile. De plus, ce traitement doit nécessiter un nombre d'étapes qui soit le plus petit possible, il doit pouvoir s'effectuer avec la moindre consommation énergétique possible et représenter un coût économique et environnemental minimum.

## 3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 3.1. Pulpe de betterave

Les pulpes de betterave ont été fournies par l'USICA, Union des SICA de transformation de pulpe de betterave, sous forme déshydratée, en paillettes.

### 3.2. Ciment et chaux

Le ciment utilisé pour le traitement et pour la fabrication de toutes les éprouvettes est un ciment Portland de type CPA CEM I 52,5 NCP 2 répondant aux caractéristiques de la norme NF EN 197-1 (AFNOR, 2004). La chaux utilisée pour le traitement des pulpes est de type NHL-5 selon la norme NF EN 459-1 (AFNOR, 2002).

### 3.3. Traitements sur les pulpes de betterave

Les traitements appliqués consistent en un enrobage des pulpes de betterave afin d'atténuer leur forte affinité à l'eau. L'enrobage a été effectué avec deux liants hydrauliques différents (ciment et chaux) et avec huile de lin qui est une huile siccative, c'est-à-dire, un liquide visqueux qui durcit par oxydation à l'air pour former une pellicule solide (Abraham, 1996). Plusieurs essais préliminaires ont été réalisés pour avoir un enrobage complet et homogène de la surface extérieure des particules de pulpe. À l'issue de ces

essais, les rapports eau/liant et pulpe/liant ont été fixés respectivement à 1,0 et 0,8 dans le cas du ciment et à 1,0 et 0,6 dans le cas de la chaux. L'application de l'enrobage est suivie d'une période de cure, nécessaire pour le durcissement du liant sur les pulpes traitées, en chambre humide à 20°C et 98 % d'humidité relative. Pour le traitement à l'huile de lin un rapport pulpe/huile de lin égal à 1,0 est utilisé. Le traitement se poursuit par un temps de polymérisation de la couche d'huile de lin de 21 jours à une température de 50°C.

### 3.4. Caractérisation du composite à l'état durci

Des essais de résistance, en traction par flexion et en compression, ont été menés suivant la norme EN 196-1 (AFNOR, 2006) respectivement à l'aide d'un banc d'essai de type PERRIER 41.04 et d'une presse hydraulique de type PERRIER 68.7, afin d'établir les performances mécaniques des composites. Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  après une cure de 28 jours en chambre humide à 20°C et environ 98 % d'humidité relative, suivie d'un séchage jusqu'à masse constante dans une étuve à 50°C.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Influence des traitements appliqués sur les pulpes de betterave

L'étude des caractéristiques physico-chimiques met en évidence des différences entre les pulpes issues des différents traitements élaborés et celles non-traitées. Globalement, nous pouvons remarquer que l'enrobage des particules de pulpe de betterave n'est pas totalement homogène, ce qui ne devrait pas permettre de supprimer entièrement le côté hydrophile de la pulpe. En même temps, le dépôt de l'enrobage autour des particules de pulpe induit une augmentation de la masse volumique apparente. Toutefois, ces masses volumiques apparentes sont encore très faibles ( $\approx 300 \text{ kg/m}^3$ ) et les pulpes traitées peuvent donc être utilisées comme granulat pour la confection de bétons légers. D'autre part, les traitements appliqués ont une efficacité similaire en ce qui concerne le contrôle de l'absorption. Le taux d'absorption d'eau à saturation et celui du gonflement qu'elle entraîne sont fortement diminués par l'application des traitements aux pulpes : ils permettent de diviser respectivement par trois et par quatre l'absorption d'eau et le gonflement des pulpes. Des valeurs proches de 80 % en masse et en volume de matière sèche sont obtenues (Monreal *et al.*, 2008).

### 4.2. Résistances mécaniques des bétons

Les résistances à la traction par flexion des composites élaborés avec des pulpes de betterave se situent entre 0,1 et 0,2 MPa (Tableau 1). Ces valeurs sont en concordance

Nature du traitement	$P_{\text{saturée}}/\text{C}$ (volumique)	Résistance à la traction par flexion (MPa)
Sans traitement	3	0,11
Enrobage à la chaux	3	0,10
Enrobage au ciment	3	0,13
Enrobage à l'huile de lin	2	0,17

Tableau 1 : Résistances mécaniques à la traction par flexion des matériaux selon la nature du traitement appliqué aux pulpes ( $\square \approx 800 \text{ kg/m}^3$ ).

avec les résistances à la traction des bétons lignocellulosiques élaborés avec d'autres granulats (Dupré, 2005).

Des essais de résistance mécanique à la compression des composites élaborés avec des pulpes traitées avec un liant hydraulique ont été faits en fonction du rapport E/C (eau/ciment) utilisé lors du gâchage et en fonction du temps de cure de la couche d'enrobage respectivement afin d'optimiser ces deux paramètres.

Les résultats des tests de résistance à la compression montrent que le rapport E/C optimal pour l'élaboration des matériaux avec des pulpes enrobées avec un liant hydraulique se situe entre 0,2 et 0,3 et que le temps de cure de la couche d'enrobage n'a pas beaucoup d'influence sur la résistance finale des matériaux. Ce sont le rapport E/C = 0,3 et le temps de cure de 28 jours qui ont été retenus et ceci pour un rapport P/C (pulpe/ciment = 3). Le rapport E/C = 0,3 a été préféré au 0,2 parce qu'il confère au matériau une meilleure ouvrabilité à l'état frais. Le temps de cure de 28 jours a été retenu pour être en accord avec les conditions usuelles de maturation des matériaux cimentaires. Dans ce sens, la meilleure formulation pour l'élaboration des bétons avec des pulpes traitées à l'huile de lin consistant dans les rapports P/C = 2 et E/C = 0,3 a été retenue après les tests préliminaires de faisabilité.

Les résistances mécaniques à la compression, rapportées aux masses volumiques des composites élaborées, en fonction de la nature du traitement appliqué préalablement aux pulpes sont représentées dans la Figure 1 pour la formulation optimum de chaque traitement.

L'enrobage des pulpes à la chaux (P/C = 3 ; E/C = 0,3) est le traitement pour lequel les résistances des matériaux sont les plus faibles. Les matériaux élaborés avec des pulpes

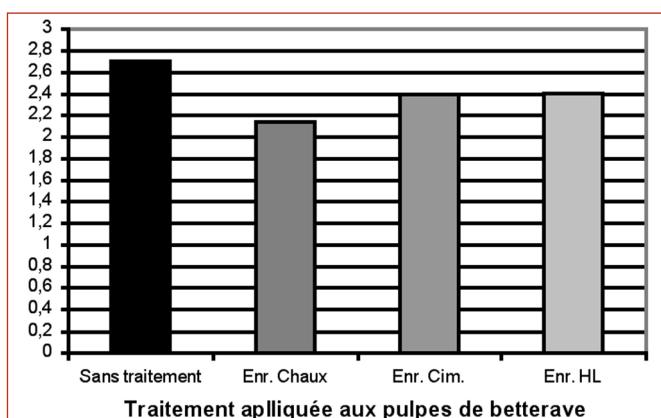


Figure 1 : Résistance à la compression des composites élaborés selon la nature du traitement appliqué aux pulpes.

issues des traitements d'enrobage au ciment ( $P/C = 3$  ;  $E/C = 0,3$ ) et d'enrobage à l'huile de lin ( $P/C = 2$  ;  $E/C = 0,3$ ) développent des résistances similaires, mais il faut noter une présence plus importante de ciment dans les composites élaborés avec l'huile de lin.

Toutefois, le traitement des pulpes semble ne pas présenter un avantage du point de vue de la résistance mécanique à la compression des matériaux. En effet, indépendamment du traitement utilisé, les résistances des bétons élaborés avec les pulpes traitées sont légèrement inférieures à celles des bétons élaborés avec des pulpes non traitées (Tableau 2).

Type de traitement	$P_{\text{saturée}}/C$ (volumique)	Résistance à la compression (MPa)
Sans traiter	3	2,1
Enrobage à la chaux	3	1,4
Enrobage au ciment	3	1,8
Enrobage à l'huile de lin	2	1,9

Tableau 2 : Résistances mécaniques à la compression des matériaux selon le traitement utilisé ( $\square \approx 800 \text{ kg/m}^3$ ).

Or, étant donné que le gonflement des pulpes est moindre quand elles ont été traitées, pour un même rapport volumique apparent  $P_{\text{saturée}}/C = 3$ , la proportion relative de pulpes par rapport à la quantité de ciment est plus élevée que dans le cas des pulpes non traitées. Si on compare les résistances à quantité de pulpes égales, on obtient des résistances mécaniques du même ordre que pour les matériaux élaborés avec des pulpes non traitées.

## 5. CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif l'évaluation des performances mécaniques des bétons lignocellulosiques élaborés avec des pulpes de betterave issues de différents traitements appliqués visant le contrôle de leur caractère hydrophile.

Les pulpes traitées ont une capacité d'absorption d'eau et un gonflement réduits par rapport à celle des pulpes non traitées. Ceci permet d'augmenter l'incorporation de pulpes dans les bétons élaborés avec des pulpes traitées. Les résultats obtenus dans les tests mécaniques des matériaux élaborés avec des pulpes traitées montrent que malgré cette présence plus importante de pulpes, les résistances mécaniques des meilleures formulations étudiées sont du même ordre de grandeur que celle obtenues avec des pulpes non traitées.

## 6. REMERCIEMENTS

Les auteurs veulent remercier l'USICA (Union des SICA de transformation de pulpe de betterave) et l'ARTB (Association de Recherche Technique Betteravière) pour le support fourni à ces travaux.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abraham C.J. « A solution to spontaneous combustion in linseed oil formulations ». Polymer degradation and stability, 54, pp. 157-166. 1996.
- [2] AFNOR NF EN 196-1, « Méthodes d'essai des ciments Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques ». 2006.
- [3] AFNOR NF EN 459-1, « Chaux de construction. Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité ». 2002.
- [4] AFNOR. NF EN 197-1, « Ciment Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». 2004.
- [5] Dupré B., « Valorisation des coproduits du lin, étude de l'impact du vécu et de la variabilité génétique de la plante sur les propriétés des matériaux composites élaborés », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2005.
- [6] Garcí Juenger M.C., Jennings H.M. « New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes ». Cement and Concrete Research, Vol. 32, Issue 3, pp. 393-399. 2002.
- [7] Hachmi M., Moslemi A.A. « Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives ». Forest products journal, Vol.39, N°6, pp. 55-58. 1989.
- [8] Luke K., Luke G. « Effect of sucrose on retardation of Portland cement ». Advances in Cement Research, 12, n° 1. pp. 9-18. 2000.
- [9] Mannan M.A., Ganapathy C. « Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS) ». Building and Environment, Vol. 39, Issue 4, pp. 441-448. April 2004.
- [10] Mboumba-Mamboundou L.B. « Analyse des facteurs de risques liés à l'incorporation des pulpes de betterave dans des matrices cimentaires ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2005.
- [11] Monreal P. « Etude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves : traitements physico-chimiques des granulats et évaluation de l'influence sur les performances mécaniques, hydriques et thermiques ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2007.
- [12] Monreal P., Mboumba-Mamboundou L.B., Dheilly R.M., Quéneudec M. « Evaluation de l'efficacité des traitements physicochimiques sur la performance de composites cimentaires lignocellulosiques confectionnés à partir de pulpes de betterave ». Actes du troisième colloque européen Orgagec : Matériaux organiques pour la construction : performances techniques et environnementales. Paris (France). 2008.

- [13] **Peris Mora E.** « Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials », Building and Environment, 42, pp. 1329-1334. 2007.
- [14] **Pimienta P., Chandellier J., Rubaud M., Dutruel F., Nicole H.** « Étude de faisabilité des procédés à base de bétons de bois ». Cahier du CSTB 2703. 1994.
- [15] **RILEM.** Materials and structures, n° 64 Vol 11, pp. 281-288. 1978.
- [16] **Rowell R.M.** « Property enhanced natural fiber composite materials based on chemical modification ». Dans Science and Technology of Polymers and Advanced Materials: Emerging Technologies and Business Opportunities. Edited by P. N. Prasad *et al.*, Plenum Press, pp. 717-732. New York. 1998.

# CONCEPT DE PONT PRÉCONTRAINTE : APPLICATION À UNE PASSERELLE EN MATERIAUX COMPOSITES

**O. BAVEREL\*, \*\* – J.-F. CARON\***

\* Université Paris-Est, Institut Navier, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées  
6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne, Marne-la-Vallée Cedex 2

\*\* Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble  
60 rue de Constantine 38000 Grenoble

## 1. INTRODUCTION

**A**u cours des vingt dernières années, de nombreuses applications en matériaux composites ont été réalisées dans l'industrie de la construction. Le principal domaine d'application concerne le renforcement des poutres en béton par plats ou tissus de fibres de carbone [1] ou l'utilisation de câbles pour haubans ou tirants divers. Ainsi entre autres, une passerelle entièrement en composites a été construite à Aberfeldy (Écosse, 1993) et un pont mobile à Stonehouse (Angleterre, 1995). Une autre passerelle avec des câbles en fibres de carbone a été construite à Laroin (France, 2002). Néanmoins, les applications utilisant des matériaux composites comme éléments de structure restent exceptionnelles en comparaison avec le béton, l'acier ou le bois. Bien que les qualités de leurs propriétés mécaniques soient évidentes (faible densité, haute résistance et une haute résistance à la corrosion et à la fatigue), leur faible module d'élasticité rend leur utilisation dans les bâtiments plus chère que celle d'autres matériaux traditionnels. Afin d'utiliser au mieux les caractéristiques des matériaux composites, de nouveaux concepts structuraux doivent être trouvés.

L'Institut Navier a développé des projets innovants de passerelles et de coques de type Grid Shell [2] [3] [4] [5].

Dans cet article, un concept de pont précontraint est présenté. Le principe physique utilisé pour la réalisation de ce système peut être illustré par une catapulte dont le lanceur en bois est fléchi élastiquement. Lorsque la catapulte est chargée par une pierre, cette charge ne crée qu'un déplacement très faible (figure 1, dessin de L. Da Vinci). Cela est dû au fait que la corde agit comme un poteau et reprend la charge de la pierre. La corde a été précontrainte par l'énergie élastique de flexion emmagasinée dans la poutre de bois. En ajoutant du poids sur la catapulte, la corde devient simplement moins tendue.

Le concept de la catapulte peut être utilisé pour réduire la portée d'une poutre ou d'un pont. Par exemple, un câble

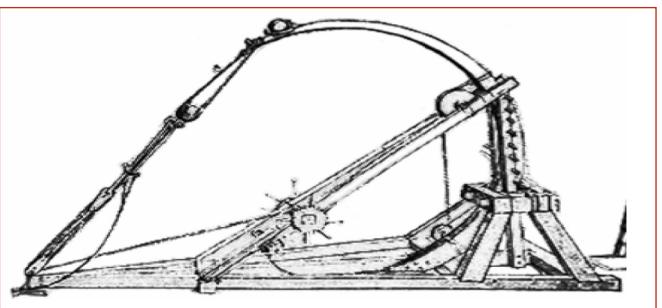


Figure 1: Schéma d'une catapulte conçue par L. De Vinci.

peut être mis en place à mi-portée d'une poutre courbe. Afin d'avoir une poutre approximativement plate lorsque l'appui central est mis en place, la poutre doit être initialement courbe comme le montre la figure 2.

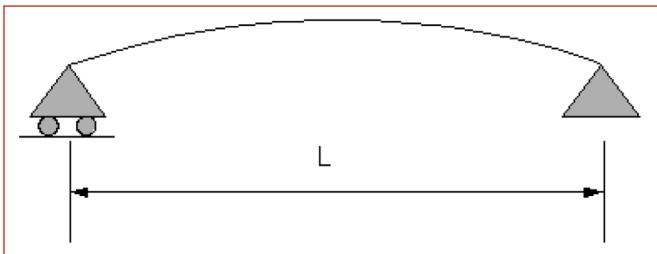


Figure 2: Configuration initiale courbe.

La deuxième étape consiste à charger la poutre avec un câble qui va agir comme un poteau.

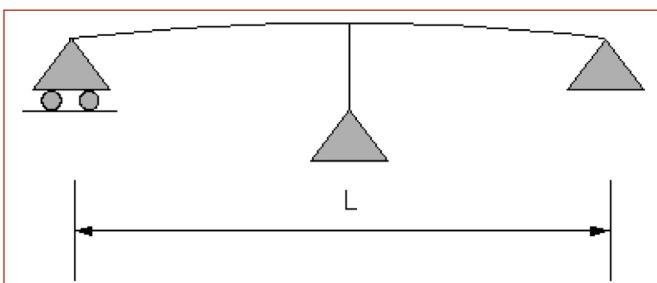


Figure 3: Configuration finale.

En faisant l'hypothèse que la raideur  $K$  du câble est bien plus grande que la rigidité du pont et que le pont supporte une charge uniformément répartie  $p$ , l'équation de la flèche est de la forme :

$$d = c \frac{pL^4}{EI} \quad (1)$$

Où  $d$  est la flèche,  $c$  est une constante qui dépend des conditions aux limites,  $E$  est le module de Young,  $I$  le moment d'inertie et  $L$  la portée. En ajoutant le câble, la portée est divisée par 2 et donc la flèche entre appuis est divisée par 16. Ce n'est pas tout à fait exact car la constante  $c$  est différente lorsque le câble est en place puisque le système est hyperstatique. La configuration de la figure 3 a de plus un champ de contrainte initiale avant chargement extérieur qui pourrait être un inconvénient et ceci doit être étudié. Après une explication des avantages de ce concept, des calculs détaillés sont présentés et démontrent l'intérêt à utiliser des GRFP (Glass Reinforced Fibber Polymer) pour ce type de structure. Enfin, la construction d'un prototype de 12 m est détaillée.

## 2. AVANTAGES DU CONCEPT

Aujourd'hui, les structures du bâtiment et du génie civil sont conçues en utilisant la notion d'état limite. L'état limite l'ultime est souvent basé sur la résistance du matériau. L'état limite de service est principalement basé sur la raideur de la structure et du matériau. Très souvent, les structures élancées sont conçues selon le deuxième critère.

Ce critère et les problèmes d'instabilité élastique dépendent linéairement du module de Young de l'élément structurel. Par conséquent, un matériau à faible module de Young tel que le GRFP aura des difficultés à entrer en concurrence avec l'acier.

Les avantages de ce concept sont les suivants :

- L'appui câble ne risque pas de flamber et sera donc sensiblement plus élancé que le poteau équivalent, ceci permet aussi d'avoir un appui câble très long.
- Le câble n'a pas besoin de fondations, mais juste d'un poids mort ou d'un ancrage.
- Les tassements différentiels créeront moins de préjudices que pour une structure hyperstatique sur trois appuis classique.
- Le câble peut facilement être réajusté en cas de tassement.
- D'un point de vue esthétique, l'appui câble ne ressemble pas à un poteau, et il est visuellement presque inexistant.

## 3. CRITÈRES DE CONCEPTION DE LA POUTRE

Dans cette section, deux formules pour la conception du système sont démontrées. La première formule est basée sur les contraintes et la seconde sur la flèche ou la rigidité de la poutre.

### 3.1. Conception basée sur la résistance du pont

- a) Considérons la poutre de la figure 4, la force  $T$  du câble crée une flèche  $d$  au centre de la poutre.

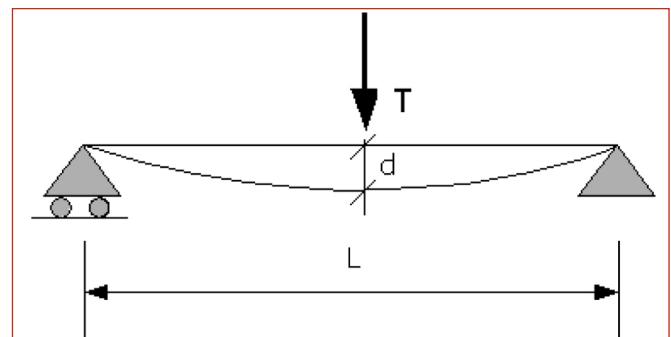


Figure 4: Flèche de la poutre due à la tension du câble.

$$d = \frac{TL^3}{48EI} \quad (2)$$

Où  $T$  est la tension dans le câble,  $E$  est le module de Young de la poutre et  $I$  est le moment d'inertie de la poutre.

Le moment de flexion à mi-travée est :

$$M = \frac{TL}{4} \quad (3)$$

Le champ de contrainte est (en considérant une section rectangulaire)

$$\sigma_{max} = \frac{Mh}{2I} \quad (4)$$

Où  $\sigma_{max}$  est la contrainte admissible dans le matériau

b) Considérons maintenant la figure 5 où le pont est uniformément chargé et où l'appui central est assuré par le câble tendu.

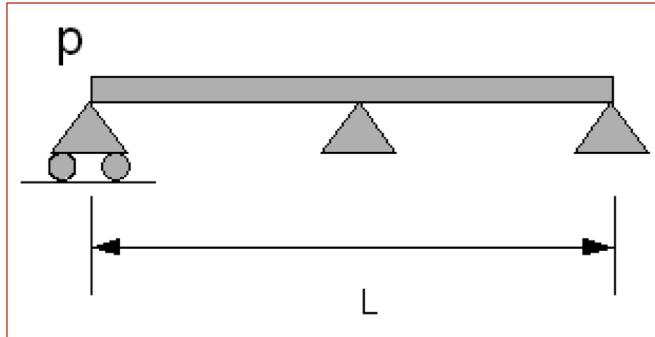


Figure 5: Poutre uniformément chargée.

Le moment fléchissant créé par  $p$  au niveau de l'appui central est pour cette configuration hyperstatique:

$$M = \frac{pL^2}{32} \quad (5)$$

Ce moment est de signe opposé à celui calculé en (3).

Pour garder le câble en tension, la condition suivante doit être satisfaite :

$$R_c = \frac{5}{8} pL < T \quad (6)$$

Où  $R_c$  est la réaction du support central due à la charge  $p$  dans le cas hyperstatique décrit en b).

Ainsi, en combinant (3) et (6) le moment fléchissant limite créé par le poteau tendu pour résister une charge  $p$  est :

$$M = \frac{5pL^2}{32} \quad (7)$$

Ce moment fléchissant est 5 fois plus important que celui de l'équation (5). L'équation (7) est donc dimensionnante et correspond finalement au cas où la poutre n'est pas chargée par  $p$ .

En combinant (4) et (7), on trouve un premier critère de dimensionnement du système qui donne la charge  $p$  limite admissible pour la passerelle et au-delà de laquelle on a rupture de la poutre causé par la mise en charge par tension du poteau et non pas par le chargement  $p$  lui-même.

$$p < \frac{(64 \sigma_{max} I)}{5hL^2} \quad (8)$$

On peut observer que dans l'équation (8),  $p$  dépend de la résistance du matériau utilisé et pas du module de Young.

### 3.2. Conception basée sur la rigidité de la poutre

La poutre à moitié chargée donne la flèche maximum. Dans ce cas, cette flèche maximum se situe aux environs du quart de la travée.

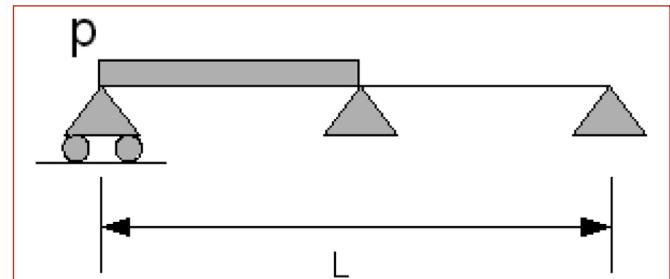


Figure 6: Chargement sur une moitié de poutre.

Le support central est considéré comme un support rigide. En considérant que la flèche admissible en fonction de la portée est de  $(L/2) / 300$ , qui est le ratio classique utilisé pour la conception des poutres, l'équation de la flèche maximale donne le second critère de dimensionnement de la poutre:

$$p < \frac{437EI}{150L^3} \quad (9)$$

Dans cette équation la charge dépend du module de Young et non de la résistance du matériau utilisé.

## 4. DOMAINE DE SOLUTION DES ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT

Avant de comparer les équations (8) et (9) qui ont été introduites dans la section précédent c'est à dire avant de classer les deux critères afin de déterminer lequel est le plus critique en fonction des données du problème, il est nécessaire de vérifier si le câble est structurellement utile ou pas.

### 4.1. Comparaison avec une poutre sans le câble central

La flèche d'une poutre sur deux appuis

$$d = \frac{(5pL^4)}{384EI}$$

Si on choisit une flèche de  $L/300$  et l'équation est la suivante:

$$p < \frac{(32EI)}{(125L^3)} \quad (10)$$

Les critères (8) et (10) sont équivalents lorsque :

$$\frac{E}{\sigma_{max}} = 50 \frac{L}{h} \quad (11)$$

Dans cette équation, les propriétés des matériaux sont mises dans la partie gauche de l'équation et les propriétés géométriques de la poutre sont dans la partie droite. Cette équation est représentée par une ligne pleine sur la figure 7. L'équation est de la forme  $Y = AX$  où A vaut 50. Si A est supérieur à 50, l'équation montre que le câble est inutile.

#### 4.2. Comparaison des équations (8) et (9)

Afin de trouver laquelle des deux formules donne la plus petite charge  $p$  et donc le critère de dimensionnement, il suffit de trouver la droite pour laquelle les deux critères (8) et (9) sont équivalents. L'équation de cette droite est :

$$\frac{E}{\sigma_{max}} = \frac{1920}{437} \frac{L}{h} \quad (12)$$

Cette droite est montrée sur la figure 7 (en pointillé) et délimite deux zones du plan.

Si

$$\frac{E}{\sigma_{max}} > \frac{1920}{437} \frac{L}{h} \quad (13)$$

C'est à dire la zone 2, alors c'est le critère (8) de résistance du matériau qui donne la plus petite valeur de  $p$ . Cela signifie que le critère de conception le plus important sera la résistance du matériau. *A contrario*, dans la zone 3, alors c'est le critère de raideur (9) qui dimensionnera la poutre.

#### 4.3. Représentation graphique du domaine de solutions et application à quelques matériaux

Les droites (11) et (12) sont reportées sur la figure 7. Ce graphique a en abscisse le rapport de la portée sur la hauteur de la poutre et en ordonnée le rapport du module de Young sur la résistance du matériau étudié.

On peut distinguer trois régions :

- Région 1, où le câble est inutile,
- Région 2, où la charge maximale est donnée par l'inéquation 8 (critère de résistance du matériau),
- Région 3, lorsque la charge maximale est donnée par l'inéquation 9 (critère de flèche).

Les proportions géométriques usuelles d'un élément structural sont principalement dans la région 2 et 3. Si les pro-

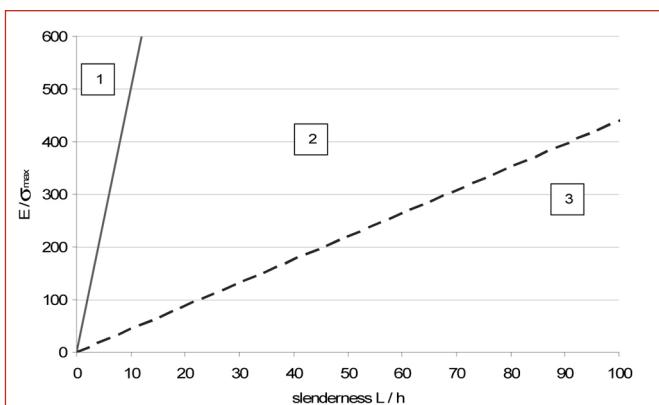


Figure 7 : Représentation graphique des domaines solutions.

portions géométriques sont dans la région 2, c'est la résistance du matériau qui donnera la charge maximale.

Le tableau 1 montre les résistances et raideur de divers matériaux et leurs comparaisons à la raideur et la résistance de l'acier. On peut remarquer que dans la région 2, malgré un module de Young inférieur à celui de l'acier, le CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) et le titane pourront reprendre une charge supérieure à l'acier car les contraintes maximales admissibles de ces matériaux sont supérieurs à celles de l'acier.

La figure 8 montre le rapport  $E / \sigma_{max}$  des matériaux du tableau 1. Pour être compétitif, avec de l'acier, le CFRP doit rester dans la région 2, ce qui signifie que le ratio porté sur épaisseur de la poutre doit être de 30 au maximum. Néanmoins, la pente de la ligne entre la région 2 et 3, est donnée par la flèche maximale autorisée au quart de la travée. En permettant de plus grands déplacements, cette ligne aura tendance à être plus horizontale et permettra d'augmenter la taille de la région 2 et donc d'augmenter l'élancement max de 30.

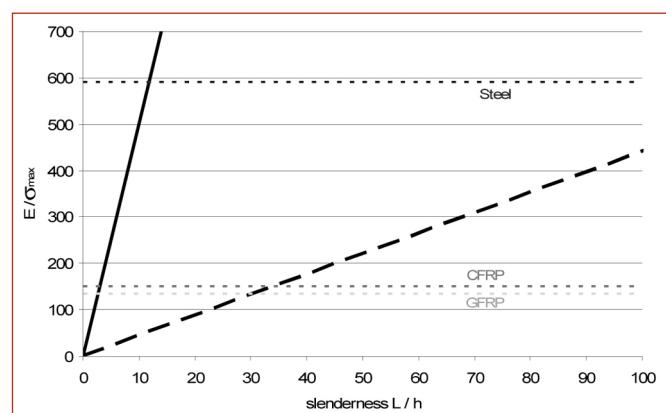


Figure 8 : Localisation de différents matériaux.

	Steel	Aluminium	GFRP	CFRP	Titanium	Wood
$\sigma_{max}$ (Mpa)	355	130	200	800	670	20
E (Mpa)	210 000	70 000	27 000	120 000	110 000	10 000
$E_{steel}/E$	1	0,33	0,13	0,57	0,52	0,05
$\sigma_{max\ steel}/\sigma_{max}$	1	0,37	0,56	2,25	1,89	0,06

Tableau 1 : Comparaison du module de Young et de la contrainte maximale de divers matériaux.

## 5. CONSTRUCTION D'UN PROTOTYPE

Afin de vérifier les calculs et la faisabilité technique du concept, un prototype de 12 mètres a été construit à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Comme il est difficile de fabriquer des matériaux composites courbes, la première étape de la construction a été de créer un élément courbe avec éléments pultrudés droits. La solution fut donc de cintrer deux éléments élastiquement et de les fixer dans cette position comme le montrent les figures 9 et 10. Une fois les deux éléments collés ensemble, on observe une petite perte de courbure due au retour élastique après collage comme démontré ci-après.

Le moment global créé par n poutres fléchies est égal à :

$$nM_0 = M_{relachement} \quad (14)$$

avec

$$M_0 = \frac{EI}{r_0} \quad (15)$$

Et

$$M_{relachement} = EI' \Delta \kappa, \quad (16)$$

où  $\Delta \kappa$  est le changement de courbure entre la configuration où les poutres sont maintenues pour le collage et la configuration où les poutres sont collées et relâchées (on observe un relâchement élastique).  $I'$  est l'inertie globale de la poutre constituée des deux profils collés parfaitement,  $I' = 8 I$  ici.

Le changement de courbure peut aussi s'écrire de la manière suivante :

$$\Delta \kappa = \frac{1}{r_o} - \frac{1}{R} \quad (17)$$

Où  $R$  est le rayon de courbure de la configuration finale. On peut généraliser et écrire que  $I'$  l'inertie de n poutres collées est donnée par :

$$I' = n^3 I \quad (18)$$

On considère dans ce calcul des sections rectangulaires pleines (ce qui n'est pas été réalisé dans notre prototype mais donne les ordres de grandeurs).

En combinant (14) (15) (16) (17) et (18) on trouve :

$$\Delta \kappa = \frac{1}{n^2 r_0} \quad (19)$$

Et donc ;

$$R = \frac{n^2}{n^2 - 1} r_0 \quad (20)$$

Ainsi, si deux poutres sont collées, le rayon de courbure  $R$  de la configuration finale est de  $R = (4/3) r_0$ . Si  $n$  est grand, le retour élastique est alors quasi nul.



Figure 9 : Préparation du collage.



Figure 10 : Collage des poutres.

Une fois que la colle a solidarisé les deux éléments, la poutre a été déchargée puis retournée afin de placer la courbure dans la bonne direction (Figure 11).



Figure 11 : Positionnement de la poutre dans sa position finale.

L'étape suivante a été de mettre en place le câble. On charge la poutre afin d'ajuster le câble (figure 12).



**Figure 12 : Chargement de la poutre afin de mettre en place le câble central.**

Des tiges filetées en inox ont été préférées à la place de câble pour de raisons de simplicité d'ajustement. Ces tiges ont été croisées pour de raisons de stabilité et être capable de reprendre des efforts horizontaux (figure 13).



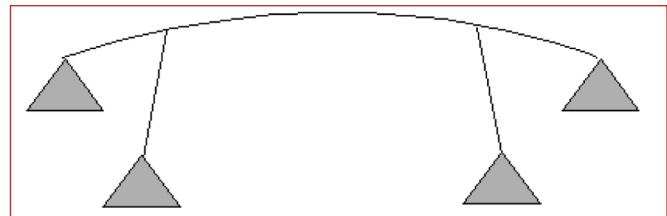
**Figure 13 : Appui central croisé.**



**Figure 14 : Vue d'ensemble de la passerelle.**

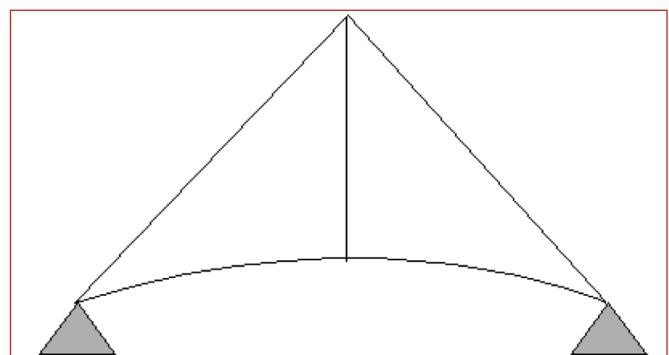
## 6. AUTRES CONFIGURATIONS

De nombreuses configurations peuvent être créées en utilisant le principe de la précontrainte par flexion. Par exemple, deux câbles peuvent être placés au lieu d'un, ce qui aura pour effet d'augmenter la taille de la région 2 de la figure 7.



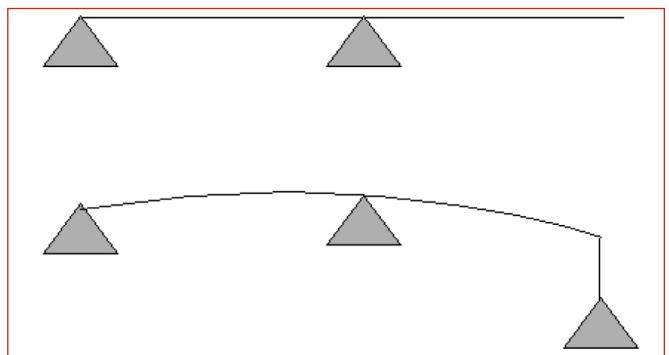
**Figure 15 : Configuration avec deux câbles.**

Afin d'éviter de créer des supports supplémentaires, un poteau central peut être mis en place et tenu avec les câbles inclinés comme indiqué dans la figure 16. Cette configuration ne sera pas aussi rigide que celle avec un câble central en raison de l'inclinaison des câbles.



**Figure 16 : Configuration avec un poteau central.**

Le principe peut également être utilisé pour une poutre en porte-à-faux comme le montre la figure 17. La partie supérieure de la figure montre la configuration initiale et la partie inférieure de la figure montre la configuration avec un câble.



**Figure 17 : Configuration pour une poutre en porte-à-faux.**

## 7. CONCLUSION

Ce document présente une configuration originale de passerelle sur trois supports. L'appui central est constitué d'un câble. La tension dans le câble vient de la précontrainte par flexion élastique de la poutre. L'appui central présente l'avantage de ne pas pouvoir flamber tant qu'il reste tendu. Selon la géométrie et les matériaux utilisés, les calculs ont montré que le plan ( $L/h$ ,  $\sigma/E$ ), (c'est-à-dire l'élancement versus la contrainte maximun /module de Young) peut être divisé en trois régions. Dans la première région, le câble

est inutile, dans la deuxième région, la résistance des matériaux est le principal critère de conception et enfin dans la troisième région le module de Young est le principal critère de conception. Dans la deuxième région, les matériaux composites sont bien adaptés car ils ont une résistance élevée et un faible module de Young. En revanche, dans la troisième région les matériaux composites sont peu adaptés car leur module de Young reste trop faible au regard du module de l'acier. La construction d'un prototype a montré que la structure peut facilement être réalisée avec des éléments standards pultrudés. Les essais ont également montré que le concept fonctionne mécaniquement. La construction de ce prototype n'ayant utilisé que des poutres standards, le prix global du prototype reste acceptable. Les matériaux composites restant légers et compte tenu de leur haut ratio résistance sur poids propre, une passerelle utilisant ce principe peut être facilement mise en place dans des environnements complexes et fortement urbanisés.

## 8. REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier les étudiants de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées qui ont participé très activement à ce projet (A. Cordero, F. Pineau, D. Gary, A.

Brax, S. Bertoux, L. Missemer, S. Martin, M. Beaugelin, J. Bonthoux et J. Jacquemin) ainsi qu'au financeur du projet, le consortium V.I.T.R.E.S de l'institut Carnot.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Limam, O., Nguyen, V.T. and Foret, G.**, « Numerical and experimental analysis of two way slabs strengthened with CFRP strips », *Engineering Structures*, n° 27, 2005, p. 841-845
- [2] **Douthe C., Baverel O., Caron J.F.**, « Formfinding of a grid shell in composite materials », *Journal of the international association for shell and spatial structures*, vol. 47, n° 1, 2006, p. 53-62.
- [3] **Douthe C., Baverel O., Caron JF** Gridshell in composite materials: towards wide span shelters *Journal of the international association for shell and spatial structures*, vol. 48 (2007 n° 3 p175-180 )
- [4] **Baverel O., Nooshin H.** « Configuration processing of Nexasade using genetic algorithm »; *Journal of the International Association for Shells and Space Structures*. 2004, vol. 45, n° 2, pp. 99-108
- [5] **Julich S., Caron J.F., Baverel O.**, « Selfstressed Bowstring Footbridge in FRP », *Composite structures*, in press 2008.

# **OPTIMISATION DU TRANSFERT DES EFFORTS D'UN JOINT COLLÉ UTILISATION D'UN JOINT « COURBE » POUR UN COLLAGE STRUCTURAL**

---

**S. CHATAIGNER\*, J.F. CARON\*\***

\* Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun  
Bd de l'Industrie BP 141, 71405 AUTUN, Cedex  
[sylvain.chataigner@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sylvain.chataigner@developpement-durable.gouv.fr)

\*\* Université Paris-Est, Institut Navier, École des Ponts  
6-8 Av Blaise Pascal, Champs Sur Marne, 77455 Marne la vallée, Cedex 2

---

## **1. INTRODUCTION**

**L**a technique du collage comme moyen d'assemblage n'est pas récente, mais son utilisation pour des applications de nature structurale l'est davantage. Cette notion de collage structural est apparue au milieu du vingtième siècle avec l'avènement des résines de synthèse, et la technique est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines : aéronautique, nautique, et génie civil. Dans le cas du génie civil, le collage structural est employé principalement dans le domaine de la réparation ou du renforcement des structures par collage de tôles en acier ou encore par collage de matériaux dits composites (Hamelin, 2002). Mais, de nombreuses études s'attachent aujourd'hui à l'utiliser également comme technique d'assemblage à part entière dans le cas de structures neuves. En ce qui concerne les techniques de réparation ou de renforcement, l'Unité mixte de Recherche Navier, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et aussi plus récemment le LRPC d'Autun qui vient de créer une équipe ressource du Réseau Scientifique et Technique sur le sujet

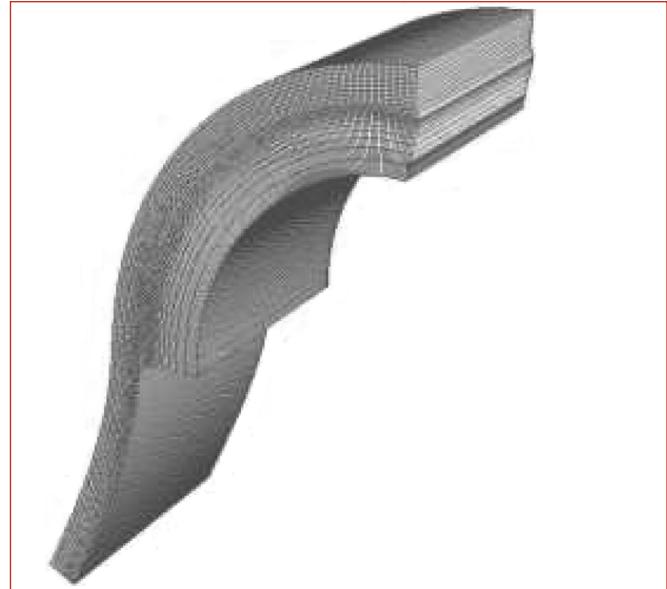
« collage et matériaux composites » s'investissent fortement sur la compréhension du fonctionnement du collage et sur son évolution dans le temps (Limam *et al.*, 2003 ; LCPC, 2006; Chataigner *et al.*, 2008a). Des études expérimentales sont en cours sur le sujet, mais au vu des premières investigations, il est certain que la conception des joints collés réalisés et les phases de mise en œuvre du collage structural ont un impact évident sur la tenue des joints réalisés dans le temps. Cette étude s'attache à mieux comprendre les soucis liés à la conception des joints collés et pose une première réflexion sur une optimisation du fonctionnement du collage.

En ce qui concerne les structures neuves, le collage structural peut intervenir pour deux types d'assemblages différents : les assemblages classiques entre éléments d'un même matériau, et les assemblages pour structures multi-matériaux. Pour les structures acier, il paraît évident que le collage structural ne constituera qu'une technique mineure par rapport à celle de la soudure. Mais dans le cas d'autres structures (bois, béton ou encore composites), la technique du collage structural semble avoir sa place et offre des

perspectives intéressantes. Elle ne doit pas supplanter les techniques existantes mais elle peut sans doute permettre de pallier à certains défauts de techniques d'assemblages comme les concentrations de contrainte ou la souplesse trop importante des connecteurs locaux par exemple. Dans le cas des structures composites, le collage structural se révèle être la technique d'assemblage par excellence, car il existe bien souvent une réelle compatibilité chimique entre résine et matériaux puisque les résines les plus utilisées sont des résines époxydes, et que les matrices des matériaux composites sont généralement de base époxyde. Dans le cas des structures multi-matériaux, on peut citer à titre d'exemple le cas de structures bois-béton étudiées par l'UR Navier et qui comportent une semelle en béton et une âme en bois pour lesquelles les traditionnels connecteurs métalliques ont été remplacés par un adhésif époxy bi-composant (Pham, 2007). Cette structure a fait l'objet d'investigations de fatigue, et des résultats très prometteurs ont été obtenus. Il est certain que ces structures multi-matériaux ont de bonnes perspectives puisqu'elles permettent d'utiliser chacun des matériaux selon leurs performances optimales. A l'heure où les problématiques de développement durable sont à l'ordre du jour, la technique du collage structural permet de créer de nouveaux concepts de structures pour lesquels chacun des matériaux est utilisé en fonction de ses propriétés physiques et mécaniques. Afin de pouvoir s'assurer d'un fonctionnement adéquat des structures réalisées, il convient de comprendre le transfert des effort entre les parties assemblées par collage et de l'optimiser.

Ces deux remarques nous ont conduit à approfondir les travaux sur cette technique portant sur les phénomènes de transfert, mais surtout à optimiser le fonctionnement d'un joint collé. Le point de départ de cette étude est l'ancrage d'un hauban appartenant à un concept de passerelle tout composite développé à l'UR Navier (Caron *et al.*, 2008). Le hauban en question est un plat composite à fibres de carbone et à matrice époxy, et il est ancré par collage à la structure.

La tenue d'un collage est assujettie à la tenue des différents matériaux en présence (adhésifs et adhérents), mais aussi à celle des efforts d'interface qui sont conférés à l'assemblage lors des phases de préparation de surface. Cette préparation de surface a une influence non seulement sur les efforts d'adhésion mais aussi sur l'évolution et la dégradation de ceux-ci au cours du temps. Cet aspect ne sera pas approfondi, et nous ne nous attacherons donc ici qu'à l'étude de matériaux en présence dans le joint collé, et à l'optimisation de l'assemblage. Dans un premier temps, le rôle de la pression hydrostatique sur le matériau adhésif sera mis en relief. On remarquera que celle-ci permet d'augmenter la capacité des adhésifs étudiés, et ceci nous permettra d'introduire le concept d'un joint optimisé, dit « joint courbe » (Figure 1). La seconde partie s'attachera à décrire succinctement des investigations théoriques sur cette géométrie pour vérifier qu'elle joue le rôle attendu, et étudier d'autres aspects particuliers. Enfin, la dernière partie sera vouée à la description de premiers essais réalisés à l'UR Navier et qui nous offrent de bonnes perspectives concernant ce joint optimisé. Un brevet portant sur cette



**Figure 1 : Illustration du joint courbe.**

géométrie vient d'être déposé, et des applications sont en cours de réalisation.

## 2. RÔLE DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE

Le terme pression hydrostatique n'est pas couramment utilisé dans le domaine de la structure en génie civil, il est plus fréquent dans le domaine de la géotechnique. Afin de clarifier celui-ci, nous aborderons quelques généralités sur ce sujet dans un premier temps. Ceci nous permettra ensuite de présenter les différents essais qui nous ont permis d'étudier l'influence de cette pression sur le comportement d'adhésifs élastiques fragiles qui sont couramment utilisés en génie civil ou encore sur celui d'un adhésif industriel dont le comportement est élastoplastique. Enfin, les résultats de ces essais seront ensuite décrits, et exploités pour conclure sur l'influence de ce paramètre.

### 2.1. Généralités sur la pression hydrostatique

Il est fréquent de décomposer le champ des contraintes s'appliquant sur un élément en deux parties distinctes : la partie déviatorique qui est associée au champ de cisaillement, et la partie hydrostatique qui, elle, n'est pas associée aux contraintes de cisaillement. La contrainte déviatorique considérée correspond dans la majorité des cas à la contrainte de Von Mises, et ce pour utiliser ce paramètre courant dans le domaine de la mécanique. La contrainte hydrostatique correspond à la moyenne des contraintes normales. Ceci est bien résumé par les équations (1) et (2) où  $\sigma_{ij}$  est la composante du tenseur de contraintes dans le repère (1,2,3), i et j variant entre 1 et 3, où p est la pression hydrostatique, et q, la contrainte déviatorique.

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + 3\sigma_{12}^2 + 3\sigma_{13}^2 + 3\sigma_{23}^2} \quad (2)$$

À titre indicatif, et peut être pour éclairer les raisons qui conduisent à décomposer un champ de contraintes suivant ces deux composantes, de nombreuses études conduisent à prendre pour critère de rupture ou de plasticité la contrainte de Von Mises pour certains matériaux comme les métaux. Pour d'autres matériaux, comme de nombreux sols, il est nécessaire d'utiliser un critère mixte linéaire prenant en compte les deux composantes : ce type de critère est connu sous le nom de critère de Drucker Prager. Dans le cas d'un matériau respectant un critère de Von Mises, son comportement est donc indépendant de la pression hydrostatique. Dans le cas d'un matériau respectant un critère linéaire de type Drucker Prager, celui-ci est linéairement lié à la composante hydrostatique. Ceci est résumé en figure 2 où les enveloppes des critères de rupture dans les deux cas sont projetées dans deux plans caractéristiques : à savoir le plan contrainte déviatorique/ contrainte hydrostatique, et le plan pour une contrainte hydrostatique nulle.

## 2.2. Présentation des différents essais de caractérisation réalisés

Afin de pouvoir déterminer si dans notre cas, la capacité des adhésifs étudiés utilisés couramment en génie civil dépend ou non de la pression hydrostatique, il est donc nécessaire de disposer de résultats de plusieurs essais destructifs permettant d'obtenir des couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique différents. En théorie, deux essais seuls peuvent suffire. Nous avons décidé de nous appuyer ici sur trois essais en s'inspirant de ce qui est réalisé dans le domaine des matériaux de type céramique (Wang, 2007). Les trois essais utilisés sont des essais sur adhésifs à l'état massique qui caractérisent donc les capacités du matériau et non des interfaces dans le cas du collage: l'essai de traction simple réalisés sur haltères, l'essai de compression réalisé sur cylindres, et l'essai Brésilien réalisé également sur cylindres (Fig. 3). On notera qu'il existe une controverse sur l'adéquation d'essais sur matériaux à l'état massique pour des matériaux fonctionnant sous forme de joints minces. Dans le cas du collage en génie civil, nous avons considéré que les épaisseurs des

joints de colle étaient suffisamment importantes (supérieures à 0.25 mm) pour pouvoir corrélérer les propriétés des matériaux à l'état massique à celles des joints de colle.

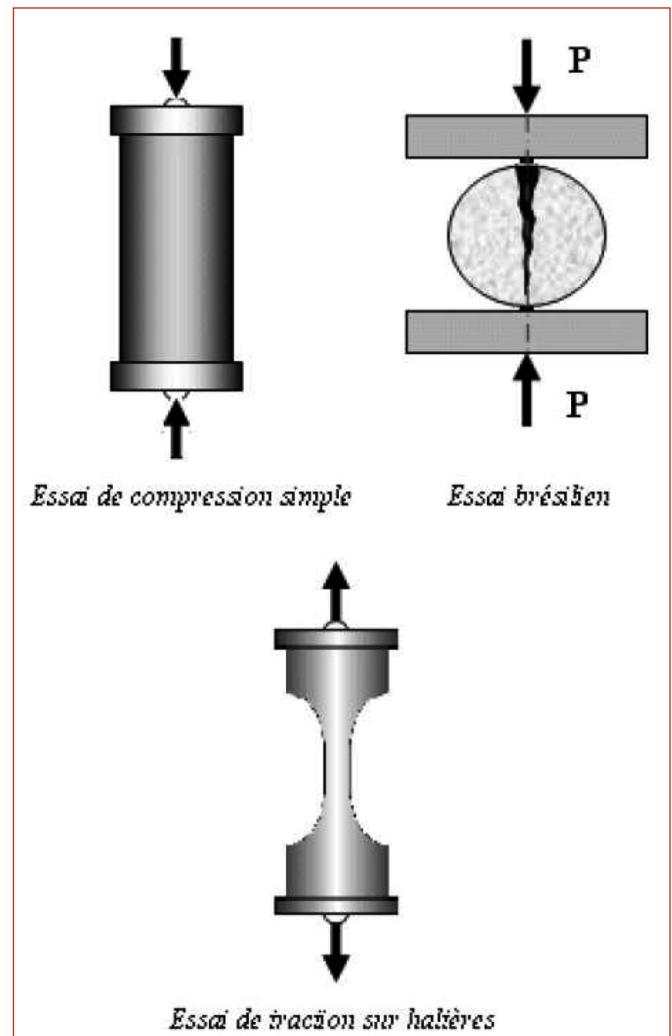
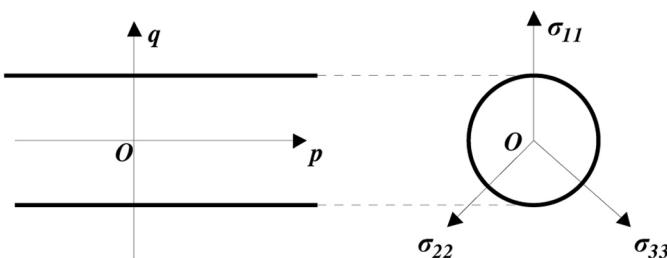


Figure 3 : Description des trois différents essais réalisés.

À partir des résultats à la rupture ou en terme de limite élastique pour ces différents essais, il est possible de déterminer trois points de l'enveloppe de rupture ou du domaine élastique du matériau adhésif étudié. Les formules permettant d'obtenir les couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique (de Von Mises) pour chacun de ces trois essais sont donnés dans le tableau 1. On notera que P correspond

### Critère de Von Mises



### Critère de Drucker-Prager

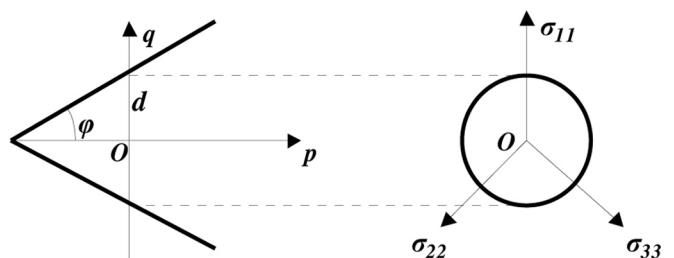


Figure 2 : Projection des deux critères dans les deux plans caractéristiques.

	Résultat	Pressio hydrostatique	Contrainte de Von Mises
Compression simple	$\sigma_c = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4}}$	$\frac{1}{3} \sigma_c$	$\sigma_c$
Essai brésilien	$\sigma_b = \frac{2P}{\pi D L}$	$\frac{2}{3} \sigma_b$	$\sqrt{13} \sigma_b$
Traction simple	$\sigma_t = \frac{P}{A}$	$-\frac{1}{3} \sigma_t$	$\sigma_t$

Tableau 1 : Formules des couples Pression hydrostatique/Contrainte déviatorique pour les trois essais.

à l'effort à rupture ou l'effort limite, D au diamètre du cylindre, L à la hauteur du cylindre, et A à la section de l'éprouvette haltère en son milieu.

### 2.3. Résultats des essais et conclusion

Deux matériaux adhésifs utilisés en génie civil dans le domaine du renforcement par matériaux composite ont été plus précisément étudiés : l'Etancol 492, et la Sikadur 330. Ils ont tous deux un comportement élastique fragile avant d'avoir été soumis au vieillissement, et sont tous deux des résines époxys bi-composants. Un adhésif industriel a également été étudié : la DP460. Pour ce dernier, le comportement déterminé est de type élasto-plastique, et les résultats donnés correspondent donc à la limite d'élasticité. Les cylindres et les haltères d'essais ont été réalisés en utilisant des moules en silicium. Les essais ont été effectués 48h après le début de polymérisation. Les résultats des essais sont rassemblés dans le diagramme de la figure 4 et illustrés de deux manières différentes : pour clarifier ces illustrations, à gauche, les trois différents essais menés ont

été matérialisés ; à droite, les trois enveloppes de rupture ou de limite élastique ont été identifiées.

On remarque que les enveloppes de rupture ou de plasticité sont loin d'être horizontales, et que la dépendance de la capacité des adhésifs considérés par rapport à la pression hydrostatique est importante. Le critère de rupture ou de plasticité des matériaux adhésifs est donc plus proche d'un critère de type Drucker Prager. Cela signifie que si la présence d'arrachement (contrainte de pression hydrostatique négative) est en effet néfaste au joint collé, puisqu'il tend à diminuer les capacités de l'adhésif en cisaillement ; la présence de compression, elle, est bénéfique, et tend à augmenter la capacité en cisaillement de l'adhésif en question. Ceci a été également mis en relief dans le cas du collage béton/acier dans (Si Larbi *et al.*, 2009). Cette observation nous a convaincu de travailler sur un joint dont la géométrie créerait de manière naturelle ces efforts de compression en bout de joint, à savoir le joint « courbe ». Bien entendu, il existe d'autres moyens de conférer une contrainte de compression à un joint collé comme un système de frettage par exemple. La différence entre un système de frettage et l'utilisation d'un joint courbe

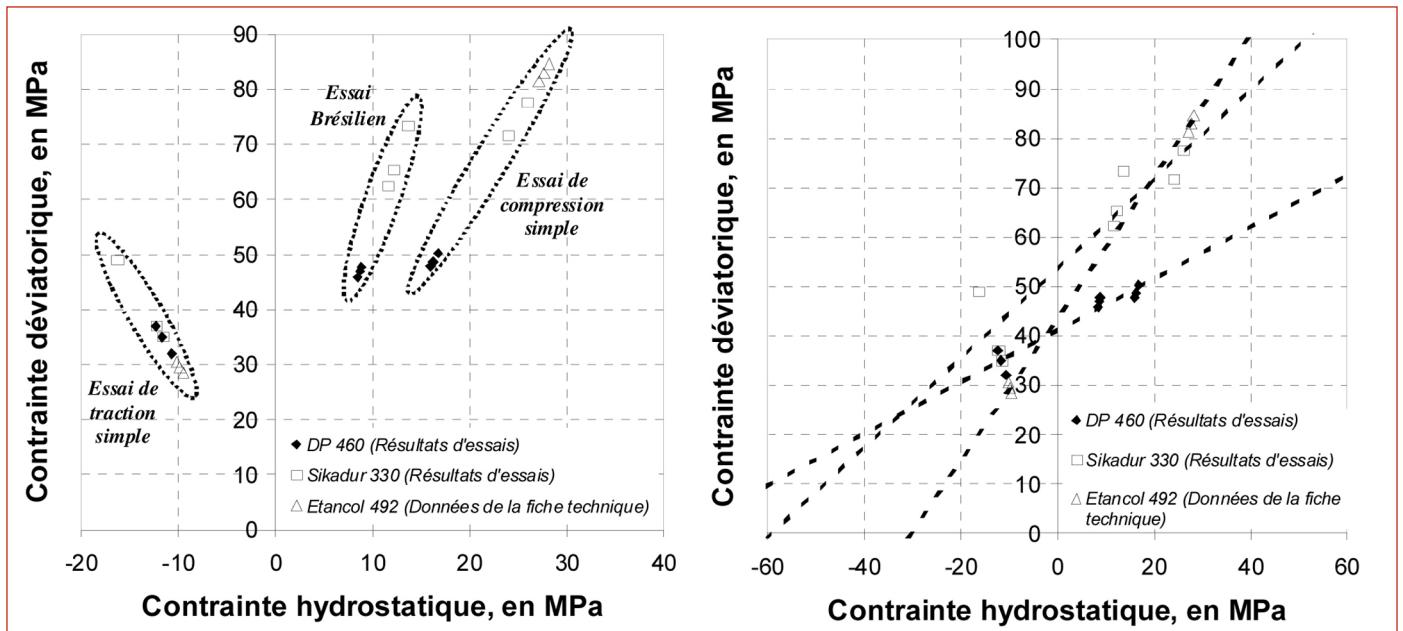


Figure 4 : Résultats des essais dans le diagramme Contrainte de Von Mises/Pression hydrostatique et illustration des résultats des trois essais menés à gauche, des enveloppes de rupture ou de limite élastique à droite.

résidé dans l'évolution ou non de l'effort de compression. Dans le cas, d'un système de fretage, celui-ci est constant et déterminé par le serrage initial. Dans le cas du joint courbe, celui-ci évolue avec l'effort appliqué.

Pour la suite de l'étude menée, nous avons adopté un critère de plasticité de type Drucker-Prager linéaire pour l'adhésif DP460. Il existe d'autres versions de ce critère (hyperbolique ou exponentiel) qui permettent d'obtenir des enveloppes plus proches des enveloppes réelles. Celles-ci ont été étudiées dans (Thibon, 2008) et pourraient constituer une des perspectives de travail concernant la caractérisation de l'adhésif. On notera que le comportement pris en compte est un comportement non vieilli, et qu'il conviendrait de vérifier que le vieillissement de la résine organique ne modifie pas de manière trop significative les critères de rupture ou de plasticité considérés.

### 3. DÉVELOPPEMENTS THÉORIQUES SUR LE TRANSFERT DES EFFORTS PAR UN JOINT COURBE

Dans un premier temps, quelques analyses théoriques seront présentées. Deux principales méthodes ont été suivies et permettent d'obtenir des résultats intéressants. La première relève de la mécanique linéaire classique qui permet de s'intéresser aux champs de contrainte dans le joint collé. On notera que deux champs de contrainte nous ont particulièrement intéressés : le champ de cisaillement hors plan, et le champ d'arrachement dans le joint de colle. La seconde relève de la mécanique linéaire de la rupture, et repose sur un équilibre énergétique. Elle permet d'étudier le comportement des fissures au sein des structures, et la facilité qu'elles ont à se propager. Ces deux approches sont complémentaires, puisque la première permet d'étudier l'influence de la géométrie sur les champs de contrainte, et donc sur la capacité du joint collé au vu des observations faites dans la partie précédente. La seconde permet de s'intéresser au comportement en fatigue du joint réalisé.

### 3.1. Analyse des contraintes

Deux modèles ont été utilisés pour déterminer les champs de cisaillement et d'arrachement existant dans le joint de colle pour le cas du joint à simple recouvrement, et le cas du joint « courbe » : un modèle analytique développé dans (Chataigner, 2008b), et un modèle numérique basé sur un code aux éléments finis. Nous ne présenterons ici que les résultats de ce second modèle, en se penchant sur les différences induites par la courbure en ce qui concerne les deux champs de contrainte étudiés et l'influence de la valeur du rayon de courbure.

Le modèle éléments finis a été effectué en utilisant le code commercial Abaqus, et repose sur une hypothèse de déformations planes. Les éléments utilisés sont des éléments linéaires quadrilatéraux non réduits. On notera que la présence aux extrémités du joint de colle de sauts du module conduit à des phénomènes de singularités. Les valeurs extrêmales des champs de contrainte au bord sont donc dépendantes du maillage, et il faut considérer ces valeurs avec précaution. La densité du maillage choisie dans notre étude permet d'obtenir quatre éléments carrés dans l'épaisseur de la couche de colle. La géométrie ainsi que le maillage sont donnés en figure 5. Une couche de matériau composite d'épaisseur 1,2 mm repose sur une couche de matériau adhésif d'épaisseur 0,25 mm. Le troisième adhérent (de l'acier dans le cas des essais réalisés) n'est pas modélisé ; il est supposé infiniment rigide par rapport à l'assemblage.

Deux contraintes dans le joint collé sont étudiées : le cisaillement et l'arrachement. On notera que le fretage aura une incidence sur l'arrachement. Il convient de comparer les résultats entre un joint courbe et un joint plan pour étudier l'influence de la géométrie sur ces deux composantes. Deux comportements d'adhésifs ont été étudiés : un comportement élastique fragile dont les résultats sont donnés en figure 6 et un comportement élasto-plastique de type Drucker-Prager conformément aux conclusions de la première partie dont les résultats sont donnés en figure 7.

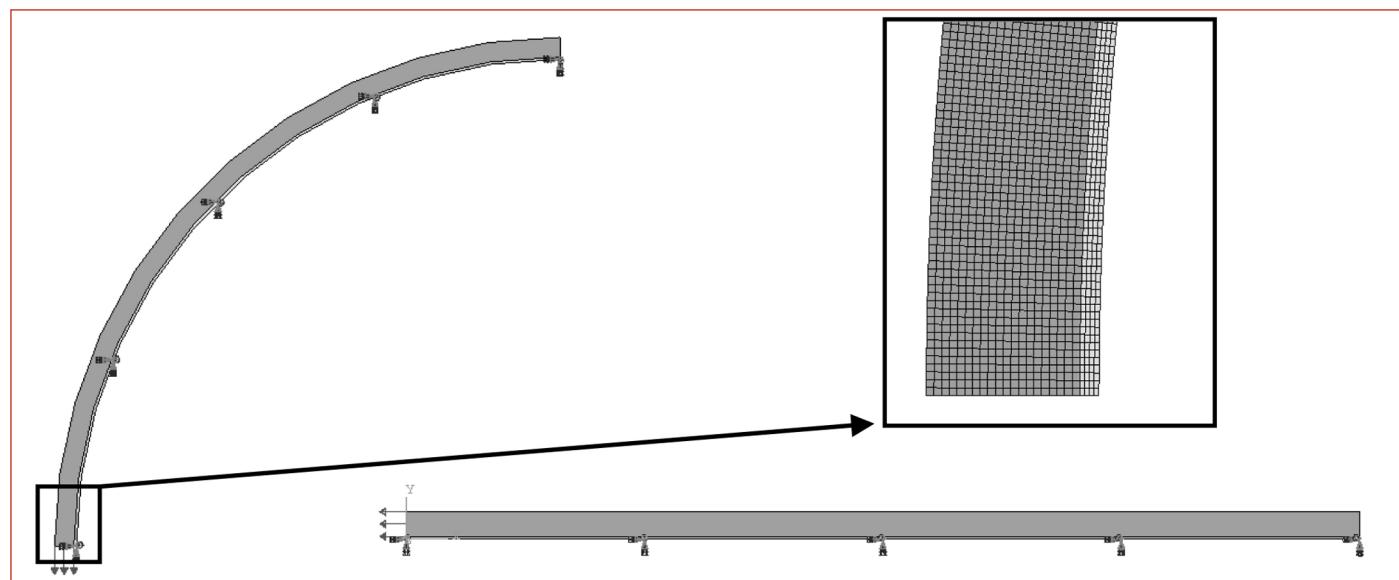
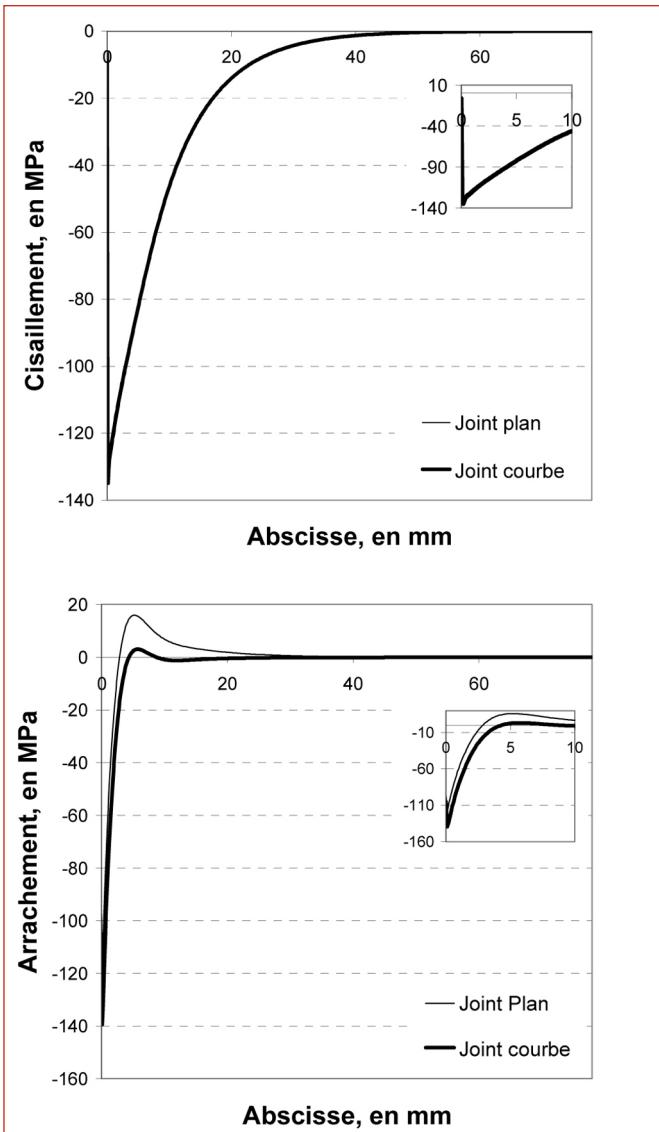
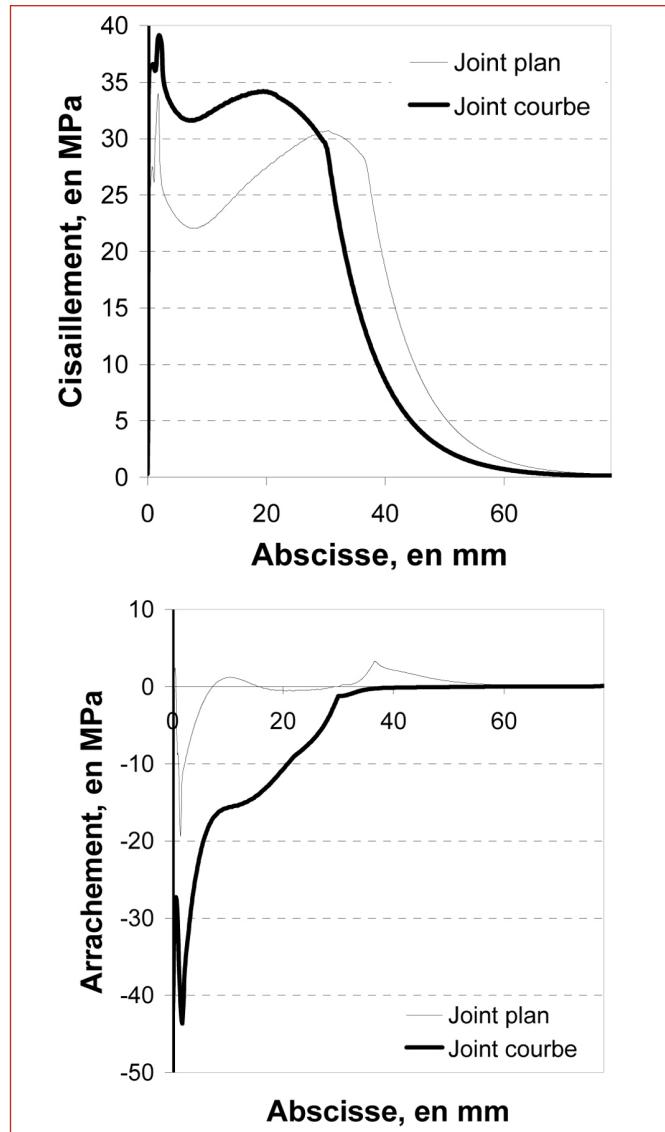


Figure 5 : Géométrie et détail du maillage du modèle en éléments finis.



**Figure 6 : Comparaison des contraintes de cisaillement et d'arrachement entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliquée et pour un adhésif élastique.**

Dans le cas d'un adhésif à comportement élastique fragile (Figure 6), on constate que la courbure a peu d'incidence sur le profil de la contrainte de cisaillement. Les phénomènes de transfert sont bien associés à une longueur caractéristique qui est dans notre cas de l'ordre de 40 mm et qui est plus connue sous le nom de longueur d'ancrage. En revanche, la courbure affecte fortement la contrainte d'arrachement puisqu'elle permet d'augmenter la contrainte de compression en bout de joint, et surtout, élimine quasiment toute contrainte de traction présente en milieu de joint. Une étude de l'influence du rayon de courbure a également été menée, et bien qu'elle ne soit pas décrite ici, on retiendra que plus le rayon de courbure est faible, plus la contrainte de compression est importante. Ceci est compréhensible d'un point de vue physique, et permet en s'appuyant sur l'étude de l'influence de la contrainte hydrostatique effectuée précédemment, d'affirmer que la capacité du joint courbe doit être plus importante que celle du joint plan. Dans le cas d'un adhésif élastoplastique (Figure 7), en ce qui concerne le cisaillement, la courbure permet bien d'augmenter la valeur du palier de cisaillement en augmentant la



**Figure 7 : Comparaison des contraintes de cisaillement et d'arrachement entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliquée et pour un adhésif élastoplastique.**

contrainte de compression en bout de joint. La limite de plasticité est atteinte plus tardivement pour le joint courbe, et la longueur sur laquelle l'adhésif plastifie est alors moins importante. Si on s'appuie sur un critère de rupture en terme de longueur plastique comme exprimé dans (Chataigner *et al.*, 2009), on obtient un joint collé ayant une capacité plus importante. Cette hypothèse reste cependant à vérifier. Dans les deux cas, la courbure permet donc d'augmenter la capacité du joint collé en conférant à l'assemblage une contrainte de compression additionnelle en bout de joint. Il est important de retenir que c'est la dépendance de l'adhésif à la contrainte hydrostatique qui entraîne ensuite une augmentation de la capacité du joint collé avec l'augmentation de cette compression. En outre, on retiendra que les phénomènes de transfert en cisaillement dans le cas d'un adhésif élastique fragile sont peu affectés, et que le paramètre longueur d'ancrage utile pour les phases de conception reste par conséquent identique. On vérifie que dans le cas d'un adhésif élasto-plastique, la valeur de cette longueur d'ancrage augmente considérablement comme remarqué dans (Chataigner, 2008b).

### 3.2. Influence de la pression hydrostatique sur la propagation d'une fissure éventuelle

La mécanique linéaire de la rupture s'intéresse à l'équilibre global en énergie du système. En se basant sur le calcul de la raideur de joints collés ayant des longueurs fissurées différentes (Figure 8), on peut déterminer un taux de restitution d'énergie qui représente la puissance mécanique disponible pour ouvrir une fissure (Griffith, 1920). Lorsque ce taux augmente en fonction de la longueur fissurée, la propagation n'est pas contrôlée puisqu'on accorde au système plus d'énergie que nécessaire. Lorsque celui-ci diminue, la propagation de la fissure est contrôlée. Les calculs sont effectués en utilisant le modèle en éléments finis présenté précédemment. La fissure est représentée par une zone de contact qui peut ou non avoir un comportement frottant.

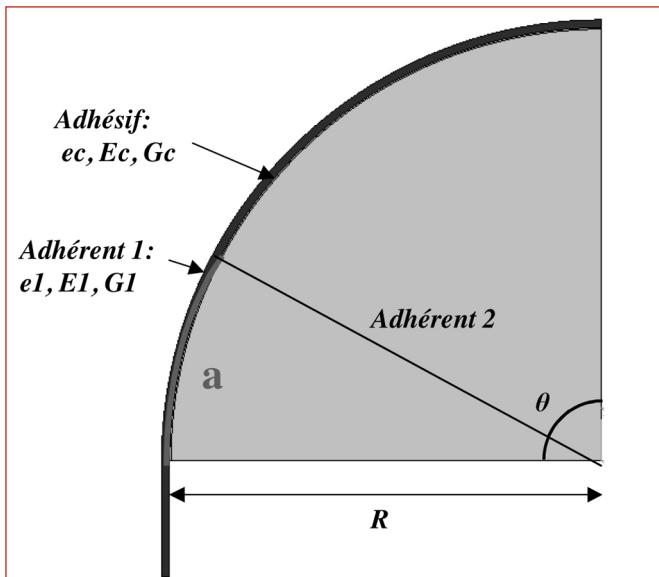


Figure 8 : Schéma du joint collé avec une longueur de fissure  $a$ .

Les résultats des calculs effectués sont donnés en figure 9. Chacun des points est déterminé à partir d'un calcul aux éléments finis. On remarque que dans tous les cas, lorsque le frottement n'est pas pris en compte, la propagation de la fissure n'est pas contrôlée. La géométrie dans ce cas n'a pas d'importance. En réalité, il existe forcément des phénomènes de frottement au niveau de la fissure. Si ceux-ci sont pris en considération, on observe une stabilisation de la fissure dans le cas du joint courbe. Pour illustrer clairement notre propos, un coefficient de frottement important de 0,9 a été pris en compte (ceci augmente l'amplitude des phénomènes observés, notamment en ce qui concerne la pente de la partie décroissante de la caractéristique en figure 9). Celui-ci est plus faible en réalité (de l'ordre de 0,4), mais les observations qualitatives restent identiques. La géométrie du joint courbe permet donc à la fois d'augmenter la capacité de l'assemblage collé, mais aussi de contrôler la propagation d'éventuelles fissures de fatigue, et donc d'améliorer à priori le comportement du joint à long terme.

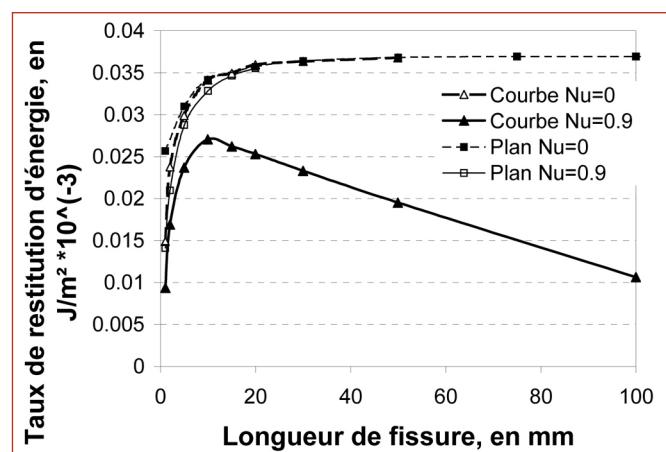


Figure 9 : Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de la fissure pour les deux types de joints (plan et courbe) et sans frottement en fissure, ou avec un coefficient de frottement de 0,9.

## 4. INVESTIGATIONS EXPÉRIMENTALES

Afin de vérifier, ou d'infirmer nos attentes théoriques, des investigations expérimentales ont été réalisées à l'UR Navier. Des investigations supplémentaires sont en cours de réalisation sur ce sujet, mais les premiers résultats sont prometteurs.

### 4.1. Présentation des essais, et réalisation des éprouvettes

Trois géométries d'éprouvettes ont été réalisées avec la même longueur collée, et donc la même quantité de matériaux : un joint plan, un joint courbe, et un joint courbe avec surface de frottement. Cette surface de frottement permet de diminuer l'effort à transmettre par le joint collé. Les trois géométries sont représentées en figure 10. Dans tous les cas, l'adhérent support est un cylindre en acier dont la surface était abrasée et dégraissée à l'acétone avant collage, et la longueur de collage  $L_c$  est identique.

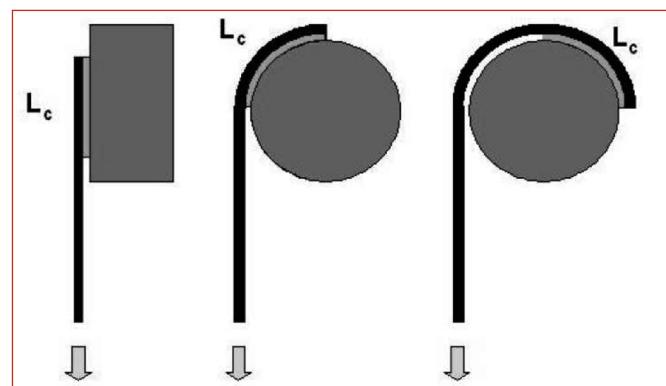


Figure 10 : Schéma des trois échantillons testés.

Différents adhérents et adhésifs ont été testés pour cette première série d'essais. En ce qui concerne les adhérents, deux systèmes composites ont été appliqués : un système de type plat uni-directionnel à fibres de carbone (Module longitudinal de 120 Mpa), et un système de type tissu car-

bone couramment utilisé dans le domaine du renforcement de structures de génie civil.

Le plat uni-directionnel a été réalisé à partir de plis pré-imprégnés de résine époxy polymérisant à chaud sous pression. La réalisation de ceux-ci a été constituée de plusieurs étapes : empilement des plis pré-imprégnés sur une surface courbe comportant les différentes strates utiles pour la cuisson sous vide du tout (Figure 11), cuisson sous vide du plat UD ayant une forme courbe, double encollage et application du plat sur l'adhérent acier. Un temps de polymérisation de l'adhésif de 48h est ensuite respecté avant essai. Cette technique de réalisation de l'adhérent a été utilisée car elle permet de conférer à celui-ci la courbure du joint avant encollage.

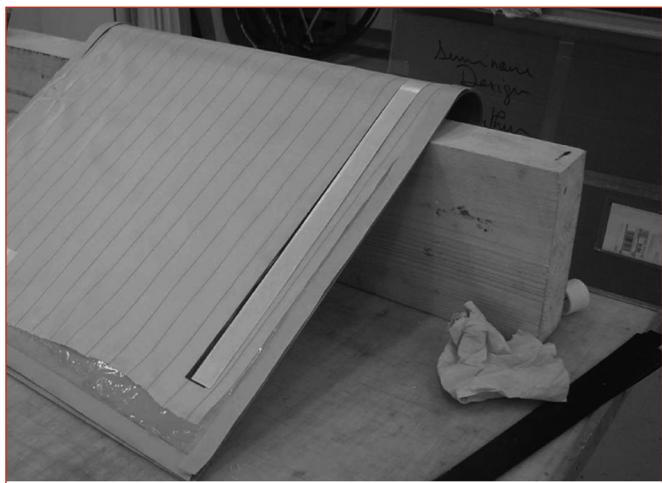


Figure 11 : Photo de la réalisation des empilements composites, et schéma du système de leur mise en cuisson.

Le second système composite utilisé est un tissu carbone imprégné de résine bi-composant polymérisant à froid. Après avoir imprégné le tissu, et encollé le support acier, le tissu est appliqué sur la surface acier. Le tout est ensuite laissé pendant 48h en polymérisation. De nouveau, dans ce cas, le type de procédé utilisé permet d'adopter facilement la courbure du joint collé. Dans le cas, où on souhaiterait utiliser d'autres types d'adhérents, comme des éléments linéaires pultrudés (les pultrudés sont des éléments composites fabriqués par le processus de pultrusion qui est aujourd'hui un des processus industriel qui permet de réaliser de grands éléments à fibre longue ayant une raideur relativement importante supérieure à 160 Gpa en général),

la question de la mise en œuvre de la courbure se pose et il s'agit d'une des pistes de perspectives à ce travail. En particulier, les deux résines étudiées sont une résine élastique fragile, la sikadur 330, appliquée pour les deux systèmes composites ; et une résine élastoplastique industrielle, la DP460 appliquée pour le plat uni-directionnel à fibres carbone seulement. Des photos des échantillons sont données en figure 12.



Figure 12 : Photo des joints collés réalisés avec empilements d'UD pré-imprégné avec une résine polymérisant à chaud à gauche, et tissu imprégné de résine polymérisant à froid à droite.

## 4.2. Résultats des investigations expérimentales

Un dispositif spécifique d'essai a été conçu à l'UR Navier. Celui-ci est présenté en figure 13 et permet de tester des assemblages courbes et plans en assurant un alignement de l'adhérent composite avec l'axe de la machine de traction utilisée. La capacité de la machine de traction est de 100 kN. L'essai est piloté en déplacement à vitesse de traverse constante.

Deux types de ruptures différentes ont été observés : une rupture cohésive dans l'adhésif (lieu de rupture dans le joint de colle), ou une rupture du renfort en traction. On notera également que l'observation après essai des surfaces d'acier dans la zone de frottement permet de relever un marquage conséquent de la surface, indiquant qu'il est important de le prendre en compte d'un point de vue théo-

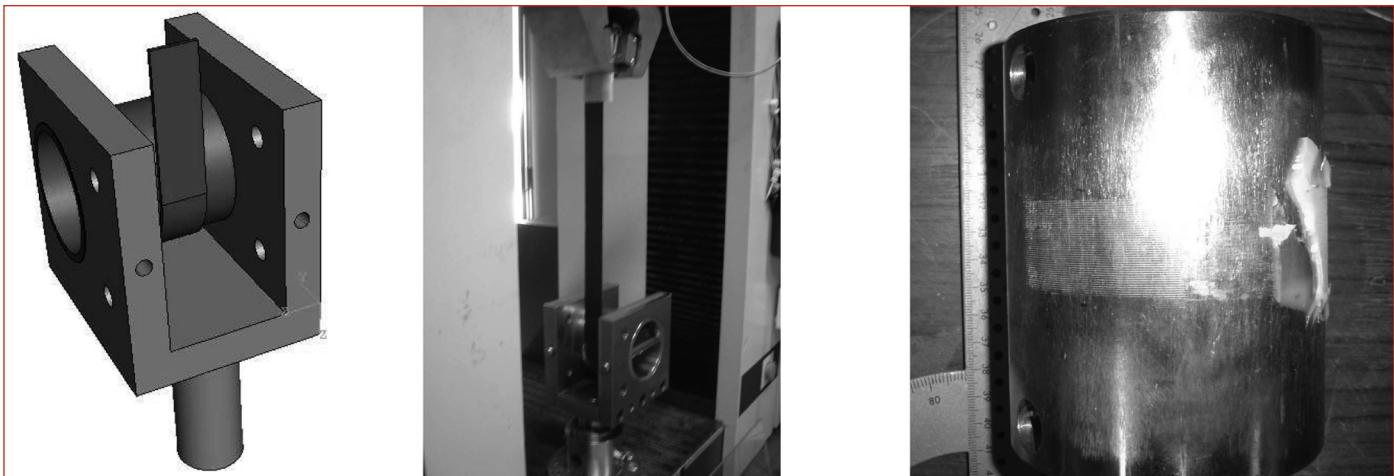


Figure 13 : De gauche à droite : Schéma du dispositif d'essai, photo d'un essai, photo d'une éprouvette après rupture montrant la marquage de l'acier dans la zone de frottement.

rique. Les résultats des investigations pour chacun des échantillons en terme de mode de rupture, et de capacité sont donnés dans le tableau 2.

On remarque dans tous les cas une augmentation de la capacité de l'assemblage avec l'utilisation du joint courbe. Pour le cas du plat carbone collé avec une colle ductile, cette augmentation est conséquente, et montre l'intérêt d'une zone de frottement en entrée de joint. Il reste cependant à vérifier que dans le cas de sollicitations cycliques de type fatigue, les phénomènes de frottement ne sont pas trop dégradés. Pour le cas du plat collé avec une colle élastique fragile, l'augmentation de capacité est très importante et elle mène à une modification du mode de rupture qui passe de cohésif dans la résine à un mode de rupture en traction de l'adhérent. Cette modification du mode de rupture est matérialisée par des parenthèses dans la colonne « Augmentation par rapport au joint plan » du tableau 2 puisque cette augmentation sous-estime la capacité réelle du joint collé. De nouveau essais doivent être réalisés en modifiant la géométrie pour obtenir un mode de rupture dans le joint de colle et non dans le renfort. Dans le cas du tissu collé avec une résine élastique fragile, le mode de rupture est lui aussi modifié : de cohésif dans la résine, à un mode en traction de l'adhérent composite. On observe une légère augmentation de la capacité de l'assemblage

qui, de nouveau, est une borne inférieure de l'augmentation de capacité du joint de colle.

### 4.3. Interprétation des résultats

Pour le cas du plat collé avec une résine élastoplastique, l'augmentation de la capacité vient de l'augmentation de la limite de plasticité due à la présence dans le cas du joint courbe d'une pression hydrostatique. Ainsi, de manière schématique et si on adopte un critère de rupture, en terme de longueur plastique critique comme effectué dans (Chataigner *et al.*, 2009), on peut visualiser l'augmentation de l'effort par l'augmentation de l'aire sous la courbe de cisaillement pour une même longueur plastifiée. Ceci est représenté de manière schématique en figure 14. Comme on peut le voir, dans le cas où la dépendance par rapport à la pression hydrostatique est faible (critère de Von Mises), ou encore dans le cas où la pression hydrostatique est faible (cas du joint plan), on obtient un plateau horizontal en terme de contrainte de cisaillement. La prise en compte de la pression hydrostatique qui est importante dans le joint courbe permet d'augmenter la limite de cisaillement linéairement (cas du critère linéaire de Drucker Prager), et ainsi d'augmenter pour une même longueur plastique l'aire sous la courbe de cisaillement, donc l'effort transmis par le joint

Procédé	Adhésif	Configuration	Lieu de rupture	Capacité en Mpa	Écart-type en %	Augmentation par rapport au joint plan
Plat carbone	DP 460 (Ductile)	Plan	Joint de colle	641	13	—
		Courbe	Joint de colle	785	23	22 %
		Courbe et frottement	Joint de colle	1 167	4	82 %
Plat carbone	Sikadur 330 (Élastique fragile)	Plan	Joint de colle	656	13	—
		Courbe	Renfort en traction	2 242	5	(242 %)
		Courbe et frottement	Renfort en traction	1 935	8	(195 %)
Tissu carbone	Sikadur 330 (Élastique fragile)	Plan	Joint de colle	283	25	—
		Courbe	Renfort en traction	349	6	(23 %)
		Courbe et frottement	Renfort en traction	374	6	(32 %)

Tableau 2 : Résultats des essais sur joints plans et joints courbes.

collé (cette aire est hachurée en figure 14). Ceci est vérifié expérimentalement, et l'augmentation de l'ordre de 22 % paraît cohérente avec les données expérimentales relevées lors de la caractérisation de l'adhésif DP460.

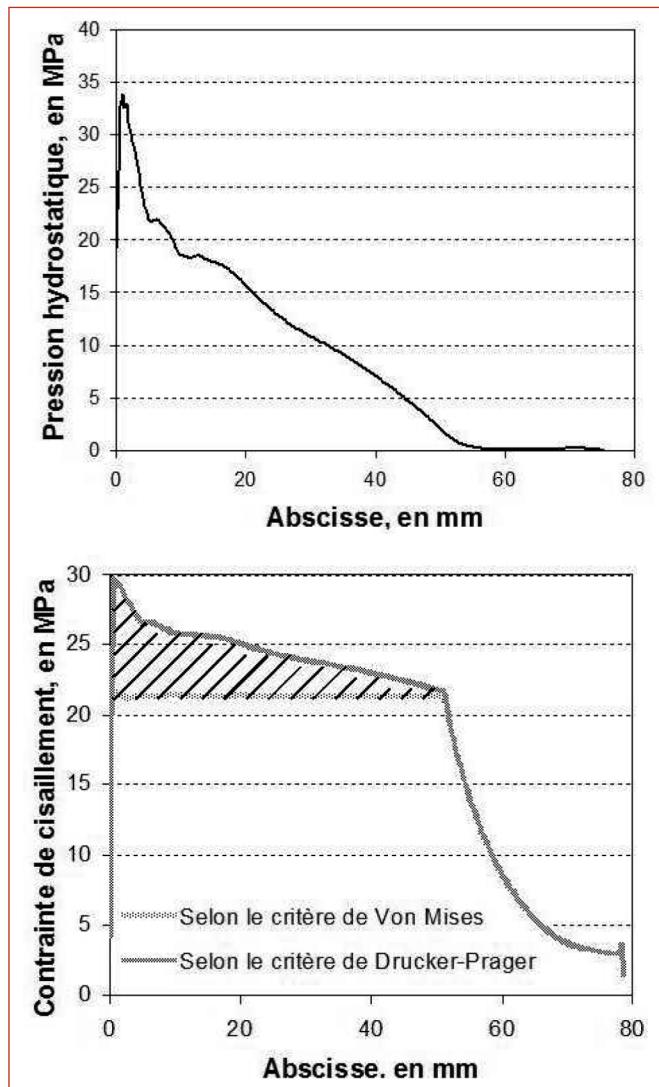


Figure 14 : Visualisation de l'influence de la pression hydrostatique (en haut) sur le profil de cisaillement dans le cas d'un critère de Drucker-Prager et de Von Mises.

Dans le cas du joint collé avec la résine élastoplastique DP460 présentant une longueur de frottement, l'augmentation de capacité supplémentaire vient des phénomènes de frottement. On peut calculer à partir de l'augmentation de capacité constatée, de la longueur de frottement, et en considérant que les phénomènes sont uniformes, un coefficient de frottement moyen de la surface acier en contact avec le renfort composite. Ceci est davantage développé dans (Chataigner, 2008b) et repose sur le principe de l'effet courroie. Celui-ci vaut dans le cas de notre étude environ 0,45. Ce coefficient de frottement est un coefficient usuel, et on vérifie donc que ce phénomène peut permettre d'expliquer l'augmentation observée. La question de l'évolution de ce coefficient de frottement doit être approfondie pour pouvoir se pencher sur le comportement à long terme du joint collé. Mais, on notera que ceci constitue une piste intéressante d'augmentation de la capacité de l'ancre.

Pour le cas du tissu et du plat collés avec une résine élastique fragile, on constate une augmentation de la capacité du joint collé, mais aussi et surtout une modification du mode de rupture. On constate en effet des ruptures cohésives dans l'adhésif pour les joints plans, puis des ruptures en traction du renfort pour les joints courbes. Les valeurs expérimentales de capacité des joints courbes constituent donc des valeurs minimales et doivent être prises en compte comme des bornes inférieures. On relèvera toutefois que dans le cas du plat collé avec la résine élastique fragile la capacité du joint collé est multipliée par un facteur trois indiquant un fort potentiel de la géométrie courbe. Des investigations supplémentaires sont en cours sur ce sujet, mais il est évident que la dépendance du comportement de l'adhésif par rapport à la pression hydrostatique seule ne peut pas expliquer l'augmentation de capacité constatée. Les réponses résident certainement davantage dans le contrôle de la propagation de la fissure permis par la géométrie du joint courbe, et peut-être par la création au cours de l'essai d'une surface de frottement après le début de la fissuration du joint collé.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a vocation à présenter les investigations réalisées sur une nouvelle géométrie d'ancrage par collage de haubans plats. Bien entendu, l'étude portant sur l'influence de la géométrie sur les joints collés, elle peut être utilisée pour toute autre application impliquant l'utilisation du collage structural, que ce soit pour le renforcement ou la réparation de structures du génie civil, ou la réalisation de nouvelles structures.

La première étape a consisté à caractériser plus précisément le comportement de différents adhésifs pour étudier leur dépendance vis à vis de la pression hydrostatique. Un adhésif élastoplastique, et deux adhésifs élastiques fragiles ont été étudiés, et via l'utilisation de trois différentes configurations d'essais sur adhésif à l'état massique, pour chacun, l'enveloppe de limite de plasticité ou le domaine de rupture ont pu être identifiés partiellement. On remarque clairement que la pression hydrostatique a un rôle conséquent sur les propriétés des adhésifs et qu'il convient donc d'adopter un critère en conséquence. Dans cette étude, on adopte le choix du critère de Drucker Prager de type linéaire pour effectuer ensuite des investigations sur différentes géométries de joints collés.

La seconde étape porte sur la modélisation mécanique de deux types d'assemblages collés : le classique joint plan, et une nouvelle géométrie, le joint courbe, inspiré par les remarques effectuées sur la dépendance de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique. Après avoir étudié les champs de contrainte en utilisant une modélisation surfacique en éléments finis, l'attention est portée sur une étude du taux de restitution d'énergie des assemblages. L'étude des champs de contrainte met en relief l'absence d'influence de la géométrie du joint sur le transfert des efforts en cisaillement, et l'augmentation conséquente de la contrainte de compression (donc de la contrainte de pression hydrostatique) en extrémité de joint. L'étude utilisant

les concepts de la mécanique de la rupture permet quant à elle de montrer que la géométrie courbe permet de stabiliser la propagation de la fissure, et donc d'obtenir théoriquement de meilleures performances en fatigue.

La troisième étape a consisté à vérifier certaines des attentes théoriques via des investigations expérimentales sur le joint courbe. Elle nous a permis de vérifier pour le cas de l'adhésif élastoplastique l'augmentation de capacité, et a mis en relief l'importance du phénomène de frottement sur la capacité de l'assemblage. Dans le cas de l'adhésif élastique fragile, des investigations supplémentaires sont nécessaires, mais une augmentation très significative de la capacité portante de l'assemblage a pu être démontrée (multipliée par trois dans le meilleur des cas et correspondant de plus à une rupture dans le renfort et non une rupture dans le joint de colle). On retiendra que dans ce cas, la dépendance des capacités de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique ne permet pas d'expliquer, seule, l'augmentation observée. Il sera nécessaire pour les investigations futures de porter l'attention sur les phénomènes de fissuration.

Un brevet a été déposé sur la géométrie courbe qui semble offrir des perspectives intéressantes. Bien que l'application envisagée ici ait été l'ancrage d'un hauban de passerelle, d'autres perspectives d'utilisation peuvent être envisagées. Des études additionnelles portant sur le comportement de l'assemblage en fatigue sont en cours et devraient permettre de pouvoir répondre à certaines des questions soulevées dans cette étude. On en retiendra les principales qui portent sur la définition des domaines de résistance ou de plasticité des adhésifs et leur évolution dans le temps, le contrôle de la fissuration dans le cas de la géométrie courbe, les questions associées à la tribologie des surfaces présentes, et l'influence d'éventuels traitements. Outre la question de fatigue de l'assemblage, des études portant sur le vieillissement des résines époxy sont en cours au LCPC et au LRPC d'Autun (Benzarti, 2008). Ceci permettra d'obtenir davantage d'informations sur l'évolution des structures collées dans le temps et sur la durée de vie de ce type d'assemblage.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Benzarti K., Quirant M., Aubagnac C., Chataigner S., Nishizaki I., Kato Y.** Durability of CFRP-strengthened concrete structures under accelerated or environmental ageing conditions, Second International Conference on Concrete Repair,
- [2] **Caron J.F., Julich S., Baverel O.** "Self-stressed bowstring footbridge in FRP", *Composite Structures*, In Press, 2008.
- [3] **Chataigner S., Caron J.F., Quirant M., Benzarti K., Aubagnac C.** "Characterization of composite-to-concrete interface: use of the cohesive zone approach", *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, CICE, 2008a.
- [4] **Chataigner S.** *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008b.
- [5] **Chataigner S., Caron J.F., Diaz Diaz A., Aubagnac C., Benzarti K.** "Non linear failure criteria for a double lap bonded joint", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Under Review, 2009.
- [6] **Griffith A.A.** *The phenomena of rupture and flow in solids*, Philosophical transactions Royal Society of London, A221: 163-198, 1920.
- [7] **Hamelin P.** *Réparation et renforcement des structures au moyen des matériaux composites : Recommandations provisoires*, Techniques de l'Ingénieur, AM5615, 2002.
- [8] **Limam O., Foret G., Ehrlacher A.** "RC two-way slabs strengthened with CFRP strips: experimental study and a limit analysis approach", *Composite Structures*, Vol. 60, pp.467-471, 2003.
- [9] **LCPC.** *Renforcement des ouvrages en béton : bilan de deux opérations de recherche du LCPC*, OA54, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2006.
- [10] **Pham H.S.** *Optimisation de la connexion et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [11] **Si Larbi A., Ferrier E., Hamelin P.** Concrete to steel lap joint failure criteria under combined shear and peeling stress, *Journal of constructional steel research*, Vol. 65, Issue 2, pp. 386-394, 2009.
- [12] **Thibon A.** *Optimisation du transfert des efforts d'un joint collé par la prise en compte de l'influence des contraintes hors plan*, Rapport de stage scientifique, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [13] **Wang W.** *Towards an improved understanding of strength and anisotropy of cold compacted powder*, Thèse de doctorat, Drexel University, 2007.

Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2008, Cape Town, South Africa, pp. 24-26, 2008.

**ORGAGEC'08**  
**suite des présentations sélectionnées**

# **ÉVOLUTIONS DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE GÉOTEXTILES POLYESTER APRÈS UN AN DE VIEILLISSEMENT EN MILIEU ALCALIN**

**L. VOUVITCH VAN SCHOORS, S. LAVAUD, D. DURAGRIN, N. BARBERIS**  
Division Physico-chimie des matériaux - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
58 boulevard Lefebvre - 75732 Paris Cedex 15

## **1. INTRODUCTION**

**L**es polyéthylènes téréphthalate (PET) sont des polymères utilisés en génie civil depuis environ un demi-siècle. Ces matériaux manufacturés sous forme de tissus sont utilisés notamment pour des applications de renforcement, du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques initiales (module et résistance élevés). Cependant, pour ces applications où l'environnement peut être agressif, ces polymères peuvent subir des dégradations. De nombreuses études ont en effet permis de montrer que ces polymères présentaient principalement un point faible : ils s'hydrolysent en milieu aqueux. Toutefois, les dégradations liées à ces phénomènes d'hydrolyse sont fortement dépendantes du pH. Pour les pH neutres ou faiblement acides (Risseeuw *et al.*, 1990) (Elias *et al.*, 1998) (Bellenger *et al.*, 1995) (Zimmerman *et al.*, 1980) (Doll *et al.*, 1995), la chute des propriétés est lente, car la cinétique d'hydrolyse l'est également ; ainsi, des durées de vie d'un siècle peuvent être raisonnablement prédites. En contrepartie, à des pH très

alcalins ( $> 12$ ), compte tenu de la diminution rapide des propriétés au cours du temps (Halse *et al.*, 1987) (Haghighatkish *et al.*, 1992) il est désormais établi d'exclure l'usage de géotextiles en polyester.

Aux pH intermédiaire, des études déjà réalisées à pH 10 et 12 (Elias *et al.*, 1998) (Halse *et al.*, 1987) ont mis en évidence que le comportement à long terme des PET à pH 10 pouvaient être satisfaisant. Elias *et al.* ont ainsi pu estimer que des PET tissés perdaient environ 0,35 % de leur résistance par an à 20°C. Cependant, de nombreuses questions restent en suspens, notamment sur les évolutions morphologiques et microstructurales induites par cette nature de vieillissement en milieu modérément alcalin et sur les conséquences sur d'autres caractéristiques mécaniques comme le module. Cette étude constitue donc une analyse complémentaire concernant le comportement de cette nature de géotextiles à des pH compris entre 9 et 11. Ainsi, elle devrait permettre d'apporter des précisions à la profession quant à l'utilisation des PET utilisés comme géotextiles en milieu modérément alcalin.

## 2. MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉIMENTALES UTILISÉES

### 2.1. Matériaux

Les géotextiles utilisés dans cette étude sont constitués de fibres de polyéthylène téraphthalate (PET) tissées. Ces fibres sont caractérisées par un diamètre d'environ 22 µm (cf. figure 1) et une résistance en traction de l'ordre de 100 kN/m.

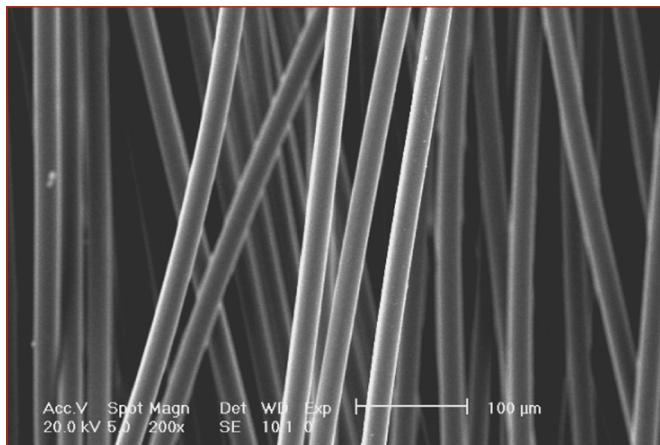


Figure : Observation par Microscopie électronique à balayage d'un réseau de fibres de PET (grossissement x 200).

### 2.2. Vieillissement

Afin d'améliorer nos connaissances sur les phénomènes de dégradation de ces matériaux en milieu modérément alcalin, des vieillissements accélérés en laboratoire ont été réalisés. Les vieillissements ont été effectués dans des solutions tampons de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  à pH 9 et 11. À l'issue d'une analyse bibliographique (Datye *et al.*, 1989), les systèmes ont été soumis à des températures de vieillissement inférieures à la température de transition vitreuse des PET ( $75^\circ\text{C}$ ) pendant des temps de vieillissement allant jusqu'à 1 an.

Les températures de vieillissement accéléré ( $45^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$ ) ont été définies en s'appuyant sur les travaux de Datye *et al.* Ces auteurs ont montré une discontinuité des propriétés de part et d'autres de la température de transition vitreuse. Il paraît donc inadapté d'utiliser des résultats issus de vieillissements accélérés à haute température ( $T > T_g$ ) pour prédire la durabilité de PET à température ambiante ( $T < T_g$ ).

### 2.3. Techniques expérimentales utilisées

#### 2.3.1. Viscosimètre capillaire

Les évolutions de viscosité intrinsèque induites par le vieillissement ont été déterminées à l'aide d'un viscosimètre Ubbelohde. Les masses moléculaires moyennes en nombre des chaînes polymères ont ensuite pu être calculées à partir de ces mesures de viscosité en se basant sur les travaux de Pawlak (Pawlak *et al.*, 2000)

#### 2.3.2. Microscopie électronique à balayage

Les évolutions morphologiques induites par le vieillissement ont été observées au moyen d'un microscope électronique à balayage Philips XL30. Les modes d'analyse en électrons secondaires et rétro-diffusés ont été utilisés pour évaluer respectivement l'état de surface des fibres vieillies et déterminer les variations de leur diamètre. Pour accéder à cette caractéristique dimensionnelle, un traitement d'images a été réalisé via le logiciel « Picture » développé au LCPC.

#### 2.3.3. Essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés à l'échelle du monofilament. Les fibres de PET ont été caractérisées mécaniquement sur une presse de traction ZWICK 1474. Ces essais ont permis de déterminer l'effet du vieillissement, entre autres sur le module tangent (entre 2 et 4 % de déformation) et la résistance mécanique des polyéthylènes téraphthalate.

## 3. IMPACT DU VIEILLISSEMENT SUR LES PROPRIÉTÉS DES GÉOTEXTILES POLYESTER

Dans un premier temps les modifications induites par des vieillissements ont été étudiées par différentes techniques d'analyse, puis les conséquences de ces évolutions sur les propriétés mécaniques ont été évaluées.

#### 3.1. Analyse chimique par mesure de la viscosité intrinsèque

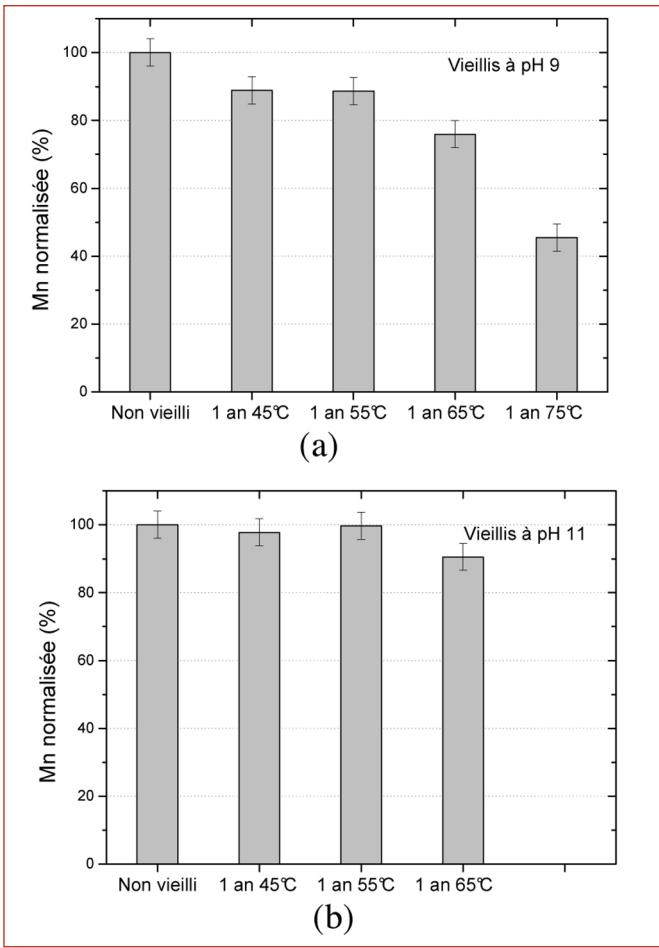
Pour mettre en évidence les phénomènes d'hydrolyse induits par le vieillissement en milieu alcalin, des mesures de viscosité intrinsèque ont été réalisées sur les matériaux vieillis et non vieillis. En se basant sur les travaux de Pawlak *et al.* (cf. équation (1)), les masses moléculaires moyennes en nombre ont ainsi pu être calculées à partir des mesures de viscosité.

$$M_n = 3,29 \cdot 10^4 [\eta]^{1,54} \quad (1)$$

Comme le montrent les figures 2(a) et 2(b), les diminutions de masse moléculaire sont très variables selon les conditions de vieillissement. À pH 9, elles sont d'autant plus importantes que les températures de vieillissement sont élevées. Ainsi, à  $75^\circ\text{C}$ , après un an de vieillissement, les chutes de masse peuvent atteindre plus de 55 %.

En opposition, à pH 11, les chutes de masse sont beaucoup moins importantes qu'à pH 9. Notons toutefois que ces analyses n'ont pas pu être réalisées sur les matériaux vieillis 1 an à pH 11  $75^\circ\text{C}$  car la quasi-totalité des fibres avait été dissoute dans la solution alcaline à cette température et à ce pH.

Cette technique de caractérisation a donc permis de révéler que le vieillissement réalisé en milieu alcalin entraîne des dégradations chimiques. Ces diminutions de masse moléculaire



**Figure 2 : Évolution des masses moléculaires moyennes en nombre de PET non vieillis et vieillis pendant 1 an à 45, 55, 65 et 75°C à pH 9 (a) et à pH 11 (b).**

laire moyenne sont plus marquées à pH 9 qu'à pH 11. Il semblerait donc que des scissions des chaînes au sein du matériau soient plus importantes au pH le plus modéré (pH 9).

### 3.2. Analyse Morphologique

Pour compléter cette étude, les évolutions morphologiques générées par le vieillissement ont été analysées. Plus spécifiquement, les variations du diamètre des fibres et les modifications de leur état de surfaces ont été suivies.

#### 3.2.1. Diamètre des fibres

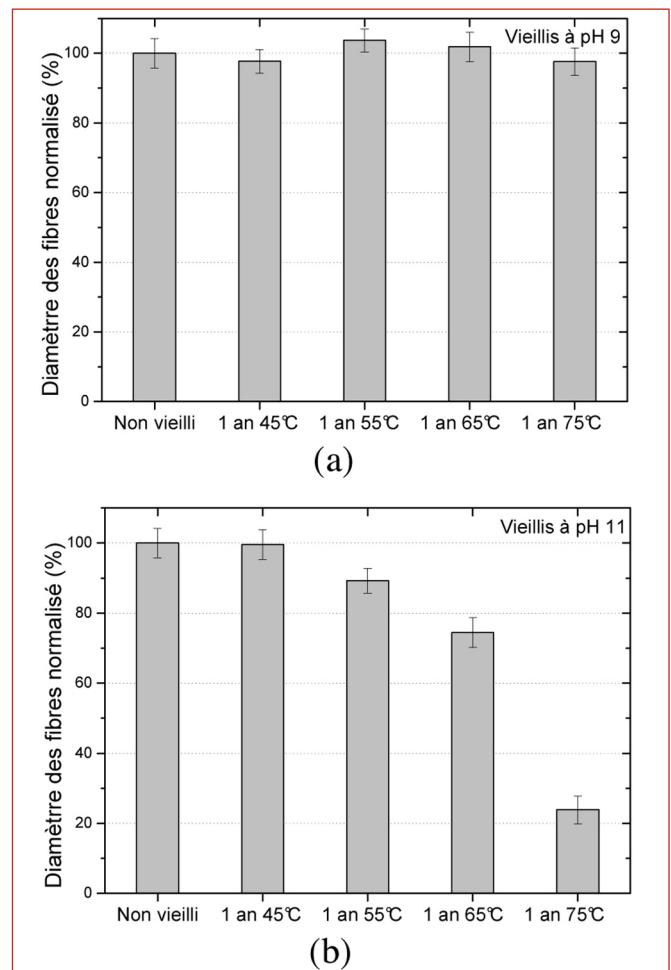
Pour caractériser les variations du diamètre des fibres, ces dernières ont été enrobées dans une résine puis polies jusqu'à obtenir une surface polie miroir. Les observations ont ensuite été réalisées par microscopie électronique à balayage en mode de détection « électrons rétro-diffusés ».

Pour accéder aux diamètres des fibres, différentes étapes de traitement d'images ont été nécessaires. Pour cela, le logiciel « picture » développé au LCPC par J-M. Moliard a été utilisé. Les étapes sont les suivantes :

- photographie par microscopie électronique à balayage d'un réseau de fibres,
- amélioration du contraste et de la luminosité de l'image,
- squelettisation afin d'isoler les fibres les unes des autres,

- binarisation de l'image,
- calcul possible de différents paramètres dimensionnels dont le diamètre de chaque fibre colorisée par le logiciel « picture ».

Ainsi, les variations des diamètres des fibres en fonction des vieillissements ont pu être quantifiées. Comme le montre la figure 3, les évolutions de diamètre sont très fortement influencées par le milieu dans lequel les fibres sont vieillies. À pH 9, aucune évolution significative n'est observée, même après un an de vieillissement à la température la plus élevée, c'est-à-dire 75°C (cf. figure 3a). En revanche, à pH 11, les chutes de diamètre peuvent être très importantes, comme le montre la figure 3b. Ainsi, après un an de vieillissement à 75°C (pH 11), le diamètre des fibres a chuté de plus de 75% passant de 22 m à 5 m environ. Ces diminutions de diamètre sont moins importantes aux températures plus faibles (55 et 65°C) mais sont tout de même significatives.

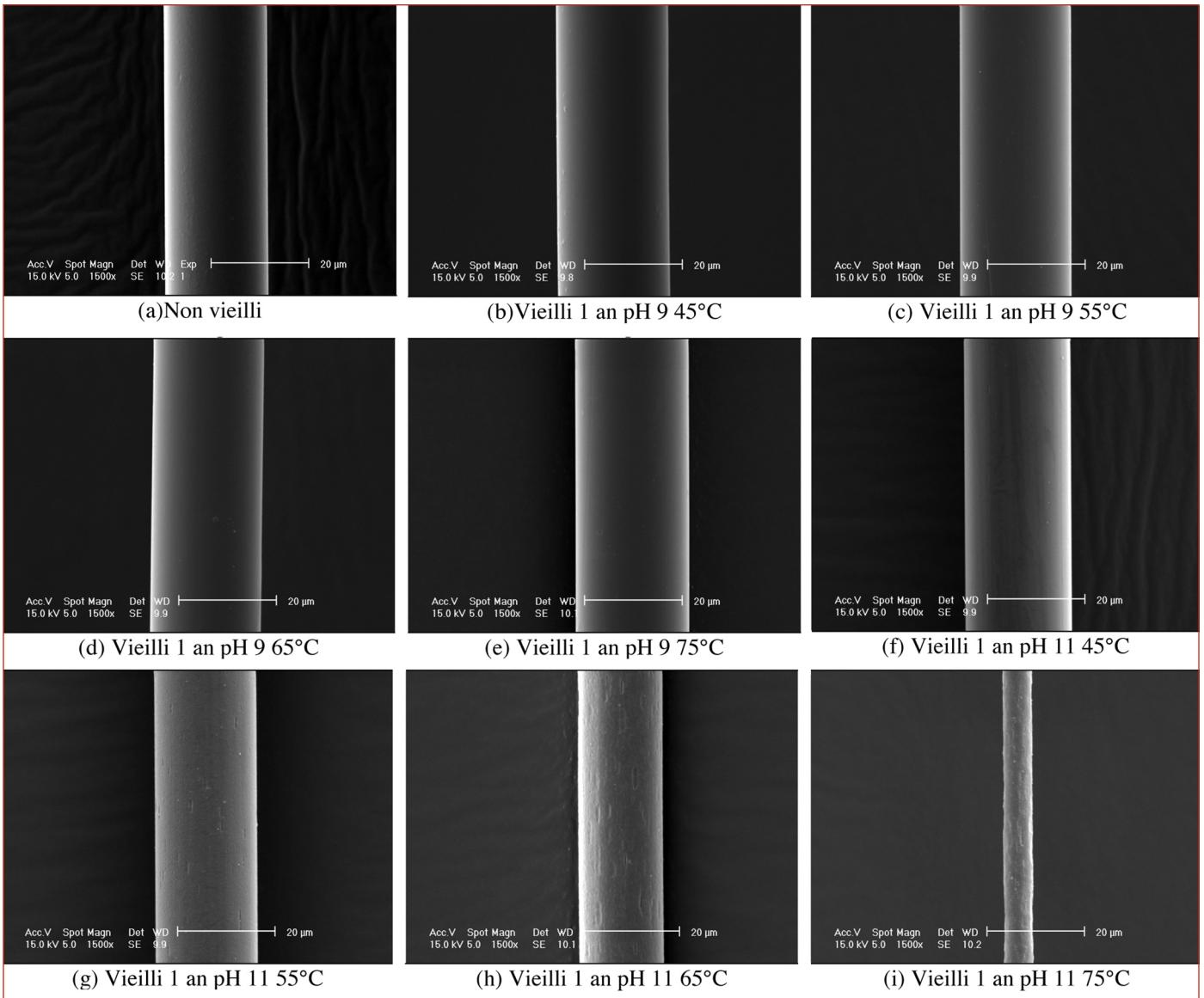


**Figure 3 : Distribution du diamètre des fibres non vieillies, vieillies 1 an à pH 9 (a) et à pH 11 (b) à 45, 55, 65 et 75°C.**

Dans un second temps, les états de surface ont été visualisés par microscopie électronique à balayage.

#### 3.2.2. Etat de surface

Les états des surfaces des fibres vieillies et non vieillies sont présentés figure 4. Le vieillissement d'un an à pH 9 ne génère aucune dégradation de surface quelle que soit la température de vieillissement (cf. figures 4b, 4c, 4d, 4f). En revanche, à pH 11, des microcavités sont observées dès



**Figure 4 : Images de microscopie électronique à balayage (mode d'analyse en électrons secondaires) fibres de PET (a) non vieillies, vieillies 1 an à pH 9 (b) 45°C, (c) 55°C, (d) 65°C, (e) 75°C et vieillies 1 an à pH 11 (f) 45°C, (g) 55°C, (h) 65°C, (i) 75°C.**

55°C. De plus, ces microcavités sont d'autant plus nombreuses et profondes que la température de vieillissement augmente. Ces microcavités semblent avoir une orientation préférentielle suivant l'axe des fibres.

Ainsi, par comparaison des évolutions d'une part de la masse moléculaire moyenne en nombre et d'autre part du diamètre des fibres et des états de surface au deux pH considérés, il semble que les dégradations chimiques sont localisées préférentiellement en masse à pH 9 et en surface à pH 11. En effet, à pH 9, aucune évolution significative de diamètre et altération de surface n'est observée quelle que soit la température pour un an de vieillissement, alors que les masses moléculaires moyennes diminuent significativement. En opposition, à pH 11, les dégradations chimiques se font principalement en surface, du fait d'une part des fortes chutes de diamètre des fibres et de la formation de microcavités et, d'autre part, des faibles diminutions de masse moléculaire moyenne. À pH 11, les produits de dégradation de surface se sont vraisemblablement solubilisés dans la solution alcaline donc ne sont pas mis en évidence par viscosimétrie.

### 3.3. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des matériaux vieillis ont été déterminées dans le but d'estimer l'effet des modifications chimiques et morphologiques décrites précédemment sur ces propriétés fonctionnelles. L'évolution de la résistance mécanique et du module tangent entre 2 et 4 % de déformation a ainsi été déterminée.

Les essais de traction révèlent que le vieillissement entraîne globalement une diminution de la résistance mécanique. Ces baisses sont d'autant plus importantes que les températures de vieillissement sont élevées mais surtout que le pH est haut (cf. Figures 5a et 5b). Ainsi à 45°C, à pH 9 les chutes sont négligeables alors qu'elles avoisinent les 10 % à pH 11. A plus haute température (65°C) ces évolutions sont encore plus marquées car les résistances diminuent de 10 % à pH 9 et de plus de 40 % à pH 11. De plus, notons que les essais mécaniques n'ont pas pu être réalisés à pH 11 et 75°C, car les fibres étaient trop détériorées pour être manipulées.

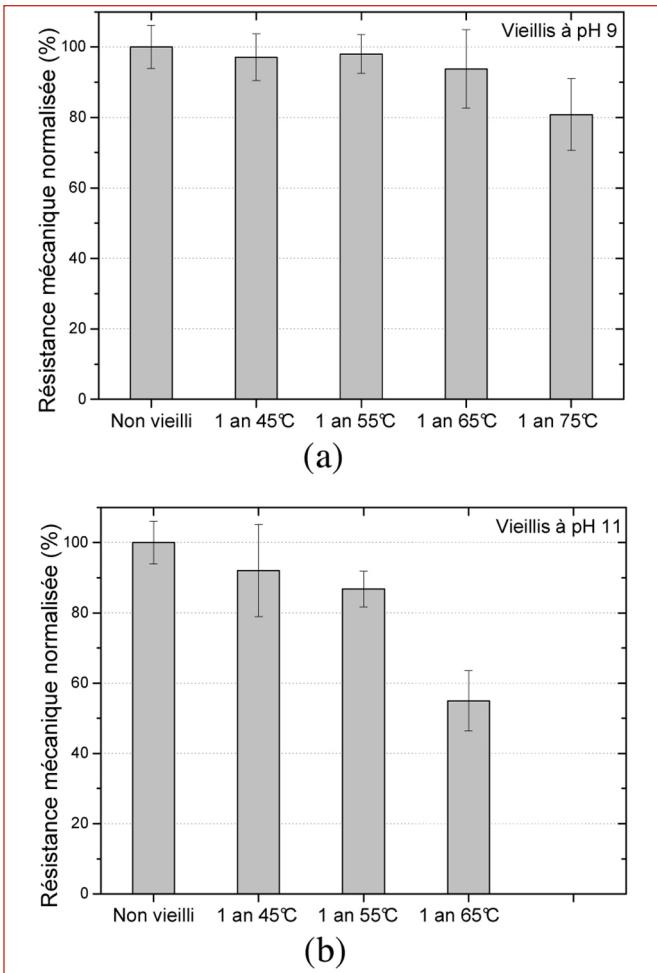


Figure 5 : Évolution des résistances mécaniques normalisées en fonction du temps de vieillissement de PET non vieillis et vieillis pendant 1 an à 45, 55, 65 et 75°C à pH 9 (a) et à pH 11 (b).

Ces diminutions de résistance mécanique peuvent être liées d'une part à la diminution de la masse moléculaire moyenne en nombre à pH 9 et 11 et surtout, à la réduction du diamètre des fibres à pH 11.

Par ailleurs, ce même vieillissement semble avoir un effet plus néfaste sur d'autres caractéristiques mécaniques comme le module tangent (entre 2 et 4% de déformation). En effet, pour les vieillissements en laboratoire à 65°C, des chutes de 30% du module sécant sont observées à pH 9 et pH 11 après un an de vieillissement. Cette diminution signifie que les matériaux vieillis résistent moins aux contraintes et ont tendance à se déformer plus facilement pour une contrainte donnée. Ainsi, ces évolutions pourraient favoriser les phénomènes de fluage et de ce fait, les matériaux ne pourraient plus remplir pleinement leur fonction de renforcement. Cette diminution du module peut s'expliquer à pH 9 et à pH 11 par la chute de la masse moléculaire moyenne des chaînes macromoléculaires. En effet, compte tenu que les chaînes polymères sont plus courtes, il y a probablement moins d'enchevêtrements facilitant ainsi les phénomènes de glissement des macromolécules les unes par rapport aux autres. Cette décohésion entre chaînes au sein de la matrice polymère peut donc entraîner un affaiblissement du module tangent. À pH 11 s'ajoutent d'importantes diminutions du diamètre des fibres. Le vieillissement en milieu modérément alcalin peut donc entraîner une diminution importante du module sécant des polyesters.

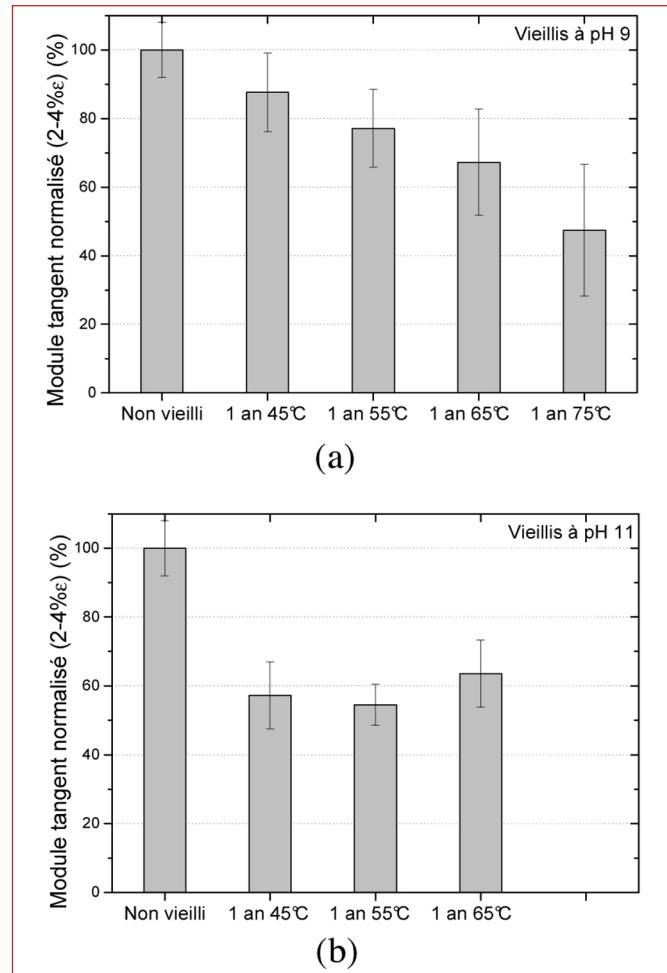


Figure 6 : Évolution du module tangent normalisé (2 et 4 % ε) en fonction du temps de vieillissement de PET non vieillis et vieillis pendant 1 an à 45, 55, 65 et 75°C à pH 9 (a) et à pH 11 (b).

## 4. CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence des dégradations des fibres PET, d'autant plus importantes que les températures sont élevées, mais surtout très différentes suivant le pH du milieu considéré.

Ainsi, à pH 9, les dégradations sont localisées exclusivement en masse comme le montrent les importantes diminutions de masse moléculaire moyenne en nombre. En opposition, à pH 11, les fortes chutes du diamètre des fibres et la formation de microcavités révélées par microscopie électronique à balayage témoignent de dégradations situées principalement en surface.

Ces évolutions ont bien évidemment des conséquences importantes sur propriétés fonctionnelles c'est-à-dire mécaniques. Ainsi concernant la résistance mécanique, les diminutions étant plus importantes à pH 11 qu'à pH 9, on peut penser que les dégradations en surface altèrent plus cette caractéristique mécanique que la dégradation en masse. Les chutes de module tangent quant à elles sont importantes au deux pH même si elles semblent plus marquées à pH 11. En conséquence, cette étude a permis de montrer qu'en milieu modérément alcalin pour des temps de vieillissement de 1 an, les propriétés mécaniques des polyesters chutent notablement. Les premières extrapolations utilisant des lois de type Arrhenius semblent révéler des chutes de résistance méca-

nique relativement faibles à 20°C (<< 1 %/an) aux deux pH étudiés, mais des diminutions de module beaucoup plus importantes (également à 20°C) et cela aux deux pH étudiés.

## 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Jean-Marc Moliard (LCPC) pour avoir développé et adapté le logiciel d'analyse d'images « Picture » à cette étude spécifique.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Bellenger V., Ganem M., Mortaigne B., Verdu J.** "Lifetime prediction in the hydrolytic ageing of polyesters", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 49, n°1, 1995, p. 91-97.
- [2] **Datye K.V., Palan B.H.** "Effect of alkali on filaments of poly(ethylene terephthalate) and its copolymers", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 38, n° 8, 1989, p. 1447-1468.
- [3] **Doll W.W., Goodrum R., Sprague C.J.** "Alkaline Hydrolysis Testing of polyester To-Date", *Geosynthetics'95*, 1995, p. 975-988.
- [4] **Elias V., Salman A., Goulias D.** "Effect of pH, resin properties and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics", *Geosynthetics International*, vol. 5, n° 5, 1998, p. 459-490
- [5] **Haghighatkish M., Yousefi M.** "Alkaline hydrolysis of polyester fibres - structural effects", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, vol. 1, n° 2, 1992, p. 56-61.
- [6] **Halse Y., Koerner R.M., Lord Jr A.E.** "Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. part 2: NaOH solution", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 6, n° 4, 1987, p. 295-305.
- [7] **Halse Y., Koerner R.M., Lord Jr A.E.** "Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. part 1: Ca(OH)<sub>2</sub> solutions". *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 5, n° 4, 1987, p. 261-282.
- [8] **Ladouce L., Perez J., Vassouille R., Vigier G.** "Non-linear creep behaviour of PET", *Journal of Materials Science*, vol. 29, n° 20, 1994, p. 5399-5406.
- [9] **Pawlak A., Pluta, M., Morawiec J., Galeski A., Pracella M.** "Characterization of scrap poly(ethylene terephthalate)" *European Polymer Journal*, vol. 36, n° 9, 2000, p 1875-1884.
- [10] **Risseeuw P., Schmidt H.M.** "Hydrolysis of HT polyester yarns in water at moderate temperatures", *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, 1990, p. 691.
- [11] **Zimmerman H., Kim N.T.** "Investigations on thermal and hydrolytic degradation of poly(ethylene terephthalate)". *Polymer Engineering and Science*, vol. 20, n° 10, 1980, p. 680-683.

## Registration

- The registration fee includes a copy of the conference proceedings, coffee/tea breaks and lunch and Conference Dinner. An additional fee will be charged for the technical day (lunch included).
- Submissions of papers are closed.** Nevertheless, a poster session will be organized during the conference and authors can still submit a poster. Accepted papers and posters abstracts will be published in the conference proceedings. Abstracts for poster submissions (300 words) should be sent by electronic mail to [rilem-pae@insa-toulouse.fr](mailto:rilem-pae@insa-toulouse.fr) by **15 April 2009**
- For registration, please see the details on the conference website: [http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem\\_pae/registration.htm](http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem_pae/registration.htm)

## Registration fee

Conference 3-4 June 2009	2009	€/pers.
RILEM member	Before 01 April	280
RILEM non-member	After 01 April	320
TC-PAE member	Before 01 April	310
		360
		150
<i>Technical day</i> (5 June)		60
Accompanying Person	Conference Dinner	60
	Social programme	120
	Registration by 30 April 2009	

- Payments can be made by bank transfer or VISA/EuroCard/MasterCard.
- At the website of the 211-PAE conference: [http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem\\_pae/accueil.htm](http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem_pae/accueil.htm), you can find more information about the programme, accommodation, venues...



## annonces de colloques

### RILEM TC 211-PAE FINAL CONFERENCE



## Organized by

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – LMDc  
(Laboratory of Materials and Structures Durability)  
INSA-UPS Génie Civil  
135 Avenue de Rangueil  
31077 Toulouse Cedex 4 France  
<http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/>

### Concrete in Aggressive Aqueous Environments Performance, testing and modeling

Special sessions: 218-SFC (sonic methods control) and PSC (performance-based specifications)

**03-05 June 2009, Toulouse, France**  
[http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem\\_pae/accueil.htm](http://www.lmdc.insa-toulouse.fr/rilem_pae/accueil.htm)

Ideally situated in the heart of Southern France, between the Mediterranean and the Atlantic Ocean, the cosmopolitan and enthusiastic "Ville Rose" joyously mixes heritage, lifestyle and regional gastronomy.



## Secretariat

For registration only:

Miss Patricia Jarry  
INSATRANSFERT–SAIC INSA  
135 Avenue de Rangueil  
31077 Toulouse Cedex 4 France  
[patricia.jarry@insa-toulouse.fr](mailto:patricia.jarry@insa-toulouse.fr)

## Toulouse



# Welcome

- RILEM TC 211-PAE "Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments" focuses especially on the problems of concrete and cement-based infrastructure having to operate in aggressive aqueous environments:
- natural environments such as soft or aggressive waters giving rise to concrete leaching
- public health environments with their associated drainage and treatment structures such as sewers, conduits, waste tanks etc
- water supply infrastructure with the provision of dams and canals
- groundwater and other sulphate-bearing solutions
- industrial and marine structures with natural or artificial highly aggressive environments.

In all these cases, concrete is subjected to a process of degradation whereby mass/ionic exchange processes occur leading to a breakdown of the matrix microstructure and a weakening of the material. In some cases this can be extremely rapid and serious, such as in acidic environments, whether industrially or biogenically generated. In other cases degradation occurs over long periods of time, but the scale of the problem is such that the consequences are also severe, e.g. major dams, marine works, etc. Many industrial processes also generate aggressive aqueous solutions some of which can leach or attack concrete. Furthermore with increasing levels of acid rain being experienced worldwide, the ability of concrete to withstand this form of aggressive attack is also important.

- Degradation and service life prediction models for concrete structures in such environments and their effectiveness in being universally applicable
- Appropriate test methods to assess performance of cement-based materials in such environments, which can be used to characterise and rate relative performance, as well as to inform long term predictions
- Survey and analysis of the scale of the problem worldwide. Studies of in-situ performance of concrete structures in such environments

## Special sessions of other RILEM Technical Committees:

- 218-SFC: sonic methods of quality control of fresh cementitious materials
- PSC: performance-based specifications and control of concrete durability

# Technical day

**05 June 2009:** Conference by Laurent Thannberger (VALGO) (Deconstruction, depollution and development of industrial sites) and visit of AIRBUS A350 final assembly line hanger (GBMP) (Steel construction and durability of concrete floors exposed to acid attack)

**Social programme**  
A social programme will be provided for accompanying persons (03 and 04 June). It includes a one-day commented visit of historical sites of Toulouse city and a one-day commented visit of the fortified medieval city of Carcassonne (Unesco World Heritage site).  
**Registration by 30 April 2009.**

# Committees

## This two-day conference (03-04 June 2009) will focus on the following topics, in 4 sessions:

- Nature of aggressive aqueous environments including measures of aggressivity; nature of degradation and deterioration mechanisms for different cement-based materials in such aggressive aqueous environments

- Dr. Eric Samson, SIMCO Technologies Inc., Québec (Qc), Canada
- Dr. Alexandra Bertron, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA-UPS, Toulouse, France
- Dr. Marie Coutand, LMDC, Toulouse, France
- Dr. Laurie Buffo-Lacarrière, LMDC, Toulouse, France
- Dr. Franck Cassagnabère, LMDC, Toulouse, France
- Dr. Pierre-Yves Matheux, LMDC, Toulouse, France
- Dr. Fabrice Debry, LMDC, Toulouse, France
- Prof. Nele De Belie, Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Belgium
- The above, plus:
  - Prof. Karen Scrivener, Laboratory of Construction Materials, EPFL, Lausanne, Switzerland
  - Prof. Gilles Escadillas, LMDC, INSA-UPS, Toulouse, France
  - Prof. Josée Duchesne, Department of Geology and Geological Engineering, CIRIB, Université Laval, Québec, Canada
  - Mr. Alastair Goyns, PIPES Consultancy, South Africa
  - Dr. Emmanuel Guillou, Lafarge Centre de Recherches, France
  - Dr. Patrick LeBescop, CEA Saclay, Lab. d'Etude du comportement des bétons et des argiles, France
  - Dr. María Castellote, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Spain
  - Dr. Kenneth A. Snyder, NIST, Gaithersburg, USA
  - Dr. Barbara Lothenbach, EMPA, Switzerland
  - Dr. Esperanza Menendez, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Spain
  - Dr. Arjan Chatterjee, Associated Cement Co., India
  - Prof. Fred Glasser, Engineering & Physical Sciences School, University of Aberdeen, UK
  - Dr. Neil Milestone, Immobilisation Science Laboratory, Engineering Materials, University of Sheffield, UK
  - Prof. Doug Hooton, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada

# Organizing committee:

- Prof. Mark Alexander, Department of Civil Engineering, University of Cape Town

## Inscription & Contact

Inscription (gratuite mais **obligatoire**) et informations auprès de Stéphane LAURENS.

Mél. stephane.laurens@insa-toulouse.fr – Tél. 05.61.55.99.21

Date limite d'inscription : 10 juin 2009

## Lieu

**Grand Auditorium – Bâtiment Administratif  
Université Paul Sabatier - Toulouse**  
118, Route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 9

Metro Ligne B – Station Université P. Sabatier  
Plan et informations d'accès : <http://www.ups-tlse.fr/>

## Projet ANR SENSO

### Journée de restitution des connaissances



### Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton

Toulouse – 9 juillet 2009

#### Pilotage du projet

**LMDc – Université de Toulouse**  
G. Arliguie et J.P. Balayssac

#### Partenaires industriels

GETEC  
EDF - CEIDRE – TECC  
EXAM-BTP  
SOVEP  
Port Autonome Nantes St-Nazaire

#### Partenaires scientifiques

LMDc - Université de Toulouse  
GHYMAC - Univ. de Bordeaux I  
GEA - UMR 9929 - Centrale Lille  
LCP/C - Nantes  
LCND - Univ. De la Méditerranée  
ONERA - Toulouse  
LEAT - UMR 6071 - Univ. Sophia Antipolis



## SENSO

### STRATEGIE D'END POUR LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN BETON

SENSO est un projet de recherche ANR impliquant sept partenaires institutionnels (universités, EPST) et cinq partenaires industriels. L'objectif général du projet consiste à définir des protocoles de mesure non destructive d'indicateurs de durabilité des bétons *in situ* basés sur le couplage de techniques d'évaluation non destructive (END).

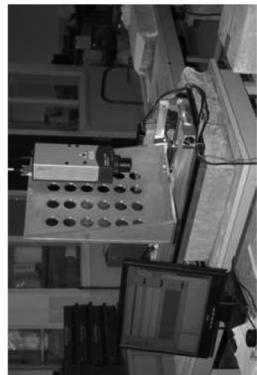
Les principaux enjeux scientifiques et techniques du projet SENSO ont trait à la méthodologie de l'auscultation des ouvrages en béton, depuis l'acquisition de données pertinentes *in situ* jusqu'au traitement et à l'analyse de ces données dans le but d'en extraire des informations fiables et utiles.

# Ouvrages en Béton Auscultation multi-techniques, Fusion de données,

## Statistiques

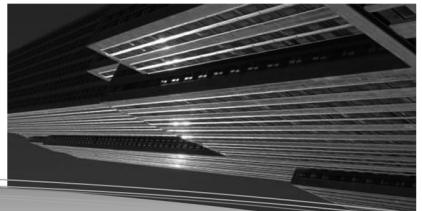
### TECHNIQUES

- Radar
- Ultrasons
- Résistivité électrique
- Capacité électrique
- Thermographie infrarouge



### OBJECTIFS

La nécessité de l'évaluation non destructive (END) des constructions résulte de besoins croissants en termes de diagnostic pathologique, de recalculation ou requalification et de prédition de la durée de vie des structures. Dans ce cadre, il est possible de classer les informations issues de l'END en 2 catégories interdépendantes : les indicateurs pathologiques et les indicateurs de durabilité. Les objectifs du projet SENSO sont axés sur l'évaluation quantitative et non destructive *in situ* de 6 des principaux indicateurs : teneur en eau, porosité, teneur en chlorures, rigidité, résistance mécanique, front de carbonatation.



### PROGRAMME DE LA JOURNÉE

- Début 9h45
  - Accueil et présentation du déroulement de la journée
  - Présentation du projet
- Objectifs
- Stratégie mise en place
- Mini-ateliers de présentation des techniques
- Description et développements récents
- Démonstrations sur corps d'épreuves de la mise en œuvre des techniques
- Présentation des modes de traitement des résultats
- 12h30 – 14h00 : Déjeuner
- Acquisition des données expérimentales : programmes d'investigation en laboratoire et sur sites
- Objectifs
- Méthodologie
- Résultats
  - Traitement, analyse et fusion des données recueillies dans le périmètre de SENSO
  - Objectifs
  - Méthodologie
  - Résultats
  - Bilan du projet, perspectives

## London 2009: The future of concrete structures

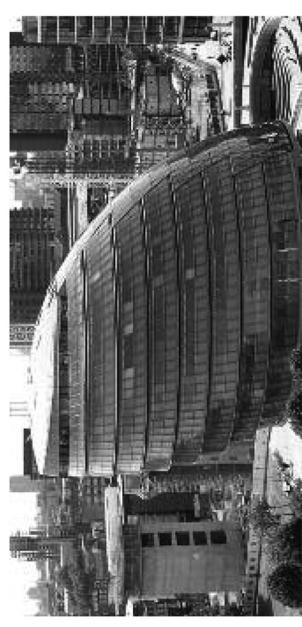
Keynote speakers

**Dr Ahmad Rahimian** is President of WSP Cantor Seinuk Structural Engineers, New York Division of WSP Group. An expert in the behaviour of structures under seismic and wind loading, he has written widely on designing towering structures, and has been involved in the design and engineering of buildings, stadiums, and bridges around the world.

**Event overview**  
This major event will be a forum for all persons involved in concrete design and construction. Leading engineers, designers and researchers will examine the evolution of concrete into a cost-effective, sustainable structural material, solutions to meet design needs, and the future of concrete structures.

With over 200 papers submitted to the review process, the symposium organisers are confident of a highly successful event. The topics addressed will fall within the symposium's main themes: sustainability, durability materials, structures & construction, design & analysis. The complete programme can be downloaded from [www.fiblondon09.com](http://www.fiblondon09.com).

Technical tours will take advantage of the current construction boom in London, allowing visitors access to some of the most pioneering projects in the city.



London city hall against a backdrop of construction activity.

*fib-news is produced as an integral part of the fib Journal Structural Concrete. Larger quantities of offprints are made available to National Members Groups on request.*

March 2009

## The new *fib* Model Code

An interview with JOOST Walraven



**Special Activity Group 5 (SAG 5), New Model Code**, held their latest meeting in Lausanne in January 2009. We took the opportunity to ask the group's chair, Prof. Joost Walraven, a few questions about the progress of the work.

**What is the current state of the work, and when do you expect the Model Code will be published?**

JW: We will meet in June of this year to see if the drafts are really complete and evaluate what we're missing; if the group members agree on that draft, then we can start to harmonize and finalize it, and then send it to the commissions. The commissions will have maybe half a year to give their comments and suggestions for improvements. And then we are in 2010 and we should be able to present the document as it is to the General Assembly of fib in Washington.

**Prof Odd E. Gjærn** is a Professor Emeritus of Structural Engineering at the Norwegian University of Science and Technology in Trondheim. His research includes advanced concrete materials and concrete technology as well as durability of concrete structures in severe environments.

**Registration**  
Register at [www.fiblondon09.com](http://www.fiblondon09.com) and be part of this important international event. Special rates are available for students; for more information, contact the symposium organisers at: [fiblondon09@emap.com](mailto:fiblondon09@emap.com).

With over 200 papers submitted to the review process, the symposium organisers are confident of a highly successful event. The topics addressed will fall within the symposium's main themes: sustainability, durability materials, structures & construction, design & analysis. The complete programme can be downloaded from [www.fiblondon09.com](http://www.fiblondon09.com).

### IN THIS ISSUE

London 2009 symposium	45
The new <i>fib</i> Model Code	45
New Task Group 8.8	47
Formwork and falsework	48
New bulletins	49
Obituaries	50
Conferences and events	52
Correction	52

doi: 10.1680/stco.2009.10.1.45

fib-news, March 2009

*It's been a long process to finally reach this stage.*

*Is this a significant difference between this edition and the 1990 edition?*

JW: I remember in the early days of *fib*, we said we should look to a new Model Code, and at first people were speaking about the Model Code 2000, because that's what the number, but very quickly it became 2005. So we started to work in 2002, deliberating on the table of contents, the strategy, identifying the new things. Now there's a bit of panic that we might not meet 2010 ... but I do think we will make it, I have a good feeling.

**For those who may not be familiar with the Model Code, could you explain what it is and what it's intended to do?**

JW: The Model Code is a future-oriented code, with no legal obligations; it is free to be used by people. It can be used as an orientation code for future developments. When we were writing the Eurocode, we often consulted the 1990 Model Code, because there people had made ideas about how things should happen in the future, improvements, and we could just take over big parts. So the Model Code contributed to the Eurocode quite substantially; that was a great help. The Model Code was well-prepared, with background documents; it made life much easier. It contains mature knowledge, but it is also future-oriented. Now for instance we contribute to all codes, we have a concept which is life-cycle oriented, so you not only build a structure, but you think about what will be. You have to follow the structure, and predict when to do repair, and even when to demolish it. Maintenance is now a very important subject, it costs a lot of money. So if you deliver an important building, you have to make a plan for maintenance, a cost estimation, you have to develop a monitoring system, you have to check if you're on schedule, and if you have repairs you have to decide what to do. The most important thing is the introduction of time.

**Today we have internet, document sharing, conference calling, which didn't exist 20 years ago. Has this changed the way the group works?**

JW: I think the setup is about the same; of course it helps quite a lot that you can communicate better, but the basis is the same I think, because you have experts from everywhere, they give free information to each other, they discuss, and that was the same in the past. The basis of the success, we hope, is the experts

Structural Concrete • 2009 • 10 • No. 1

## Task Group 8.8: Structural design With flowable concrete

New Task Group (TG) in fib Commission 8

coming together. You could say, we have so many computers now, why not make extended use of computers [in the new edition], but we think that the most important is to have calculation code that is understandable. It can be a little bit more simple, and maybe less accurate, but the designer should understand what he is doing. With many calculation programmes you just put something in and something comes out, and you don't know anymore what you are doing. And this is so important. It should be transparent.

*How long do you think it will be until the next edition of the Model Code?*

JW: When I see how much work it is, I think it will take another 20 years for the next Model Code to come. It's more difficult than in the past, because all of these people, they are committed to many tasks and they have projects. If you work for a university, you have to register what you are doing. If your activities are not financed, people raise questions; you're wasting our time, wasting our money, so the pressure on people is larger and larger. In the past, Prof. Pasios had an employee who was available full-time for one year to work for the Model Code – this is a luxury that we do not have anymore. We're very happy that we have a paid secretary for the group.

*So the main difference compared to the 1990 edition is not the available new technologies, but the time pressure on the people involved.*

JW: Of course the best people have the most work. What you see very often is that there is no time to write the paper or the draft; it just doesn't fit into the daily schedule. But now we see that everyone believes in it, so they will produce it in their evenings and weekends. And this is the special thing of it: that it is for a large part voluntary work, which is very unusual nowadays. It's very unique that you have such a group of people.

### Working programme

The Task Group consists of two Working Parties: WP 1 (plain concrete) and WP 2 (fibre reinforced concrete); both groups commonly applied building material. Despite significant experience with flowable concrete, problems still occur during casting and the service life of concrete structures. The flow (initiated by vibration and/or the weight of concrete) can affect the structural behaviour of hardening or hardened concrete. In order to obtain a high flowability, the mixture composition has to be adjusted and optimised. The effect of fibres on the characteristics of flowable concrete will be considered in a subgroup of fib TG 8.8.

The main objectives of TG 8.8 are to produce a state-of-the-art report and a recommendation on the structural design with flowable concretes. The performance of a structure with flowable concrete depends not only on material characteristics, but also on the production method and the structure itself. Areas of structural design where flowable concretes differ from traditional vibrated concrete have to be identified. Four aspects will be considered in order to describe structural behaviour:

1) orientation, 2) compilation and comparison (output: State-of-art report); and 3) translation (output: Recommendation).

*Participation in the work*

Task Group 8.8 is looking for interested contributors. Further information can be obtained from either of the Task Group Convenors, Dr. Steffen Grünewald ([s.gruenwald@tudelft.nl](mailto:s.gruenwald@tudelft.nl)) or Dr. Liberto Ferrara ([liberto.ferrara@polimi.it](mailto:liberto.ferrara@polimi.it)); or from the Chairman of Commission 8, Prof. Frank Dehn ([dehn@mmpa-leipzig.de](mailto:dehn@mmpa-leipzig.de)).

An important feature of fib-news is the regular reporting on the work of the Commissions and Task Groups: new groups formed, new publications, and any issues or questions connected with the Commission's and Task Group's terms of reference. Contributions from Commission chairmen or Task Group Convenors are therefore particularly appreciated, and all involved are invited to contact the secretariat whenever they wish to use fib-news to disseminate information.

## Formwork and falsework: A new fib Guide to Good Practice

The new fib Guide to Good Practice, fib Bulletin 348, intends to effectively feed back

state of the art knowledge and experience with regard to formwork and falsework. As such its aim is to bridge the gap that is often experienced in practice and to make a larger group of engineers familiar with the important issues related to design and application of formwork and falsework, with the objective of achieving better interaction between engineering disciplines involved, resulting in safe, effective and efficient temporary structures.

### Introduction

Formwork and falsework are among the most important elements of temporary structures for civil engineering projects, and so is the interaction with the many disciplines mentioned before. Knowledge management with respect to formwork and falsework requires engineers to share knowledge and experience in the broadest sense, as actual performance of formwork and falsework can only be noted at a late stage in the realization process, when some disciplines (although in strong interaction with formwork and falsework) are no longer present: the learning circle can only be closed by feeding back.

And that is where the gap in practice often appears.

Temporary structures for civil engineering projects are an example of this phenomenon: they are right in the middle of a complex system of interactions between structural engineering, site engineering, work preparation, procurement, and execution. They have a significant impact on cost, construction time, construction methodology and through-life performance of the actual, permanent structure.

- The bulletin addresses some fundamental issues related to formwork and falsework:
  - The appearance of the finished concrete which is closely related with the quality of the formwork. Owners/clients tend to be more demanding in this respect.
  - The performance of the finished concrete in relation to durability and as part of Life Cycle Management. A stronger focus on reliability of (life cycle) performance is noticeable.
- The need to support the concrete while it acquires enough strength and stiffness to support itself. In this context the most important issue is structural safety. Around the world, serious accidents of important civil structures and buildings under construction happened with catastrophic consequences caused by temporary work failure. Accidents during construction are too frequent and society does not accept that exposure anymore. Unfortunately there is a lack of documentation about these events.



## New bulletins

The bulletin gives guidance for the design and use of formwork and falsework on construction sites. The guidelines are based on the experience of site and design engineers; and most of the advises have been given as a consequence of real problems in the past. Any warnings based on sole theoretical judgement have been avoided; only recommendations based on experience have been included.

The document focuses on principles only, and therefore does not address detailed design issues as local design codes should be applied. As construction habits and details sometimes differ from country to country, some advises or recommendations included in this document may be affected by local circumstances.

### Scope

The new Guide presents an overview of formwork and falsework techniques and addresses issues related to the design and application thereof. As such it is the objective to provide both structural engineers as well as site engineers with information to design and apply formwork and falsework in a safe, reliable, and economic way.

Chapter 2 presents definitions. It is appreciated that different definitions may be in use around the globe; it was felt necessary to start with definitions as used to draft this report and to present the contents thereof. As a basis for definitions British Standards were used. In addition a list of definitions as used by the authors is included.

Chapter 3 addresses General Requirements with due attention to Safety, Durability and Quality of the finished surface. Specific requirements for formwork, falsework, centring, and scaffolding are presented in separate sections of chapter 3.

Chapter 4 covers design considerations in a broader context. Management and

Structural Analysis, at the Politecnico di Torino but after a few months he was obliged to leave Italy due to racial persecution laws. After several visitsutes in Italy and France, he reached Lausanne, Switzerland, at the end of 1943, where taught structural analysis until 1945. Finally in 1947 he restarted his career at the Politecnico di Torino as substitute for Prof. Colonnetti, at that time president of National Council of Research. In 1961 Franco Levi won a national competition for full professorship in structural analysis and taught for 7 years (1962 - 1968) at the Istituto Universitario di Architettura di Venezia (IUAV). From 1968 to 1989 he was full professor of the Politecnico di Torino; after his retirement, he was named Emeritus Professor and continued to participate to the scientific activity of the Department of Structural Engineering and Geotechnics up to his death. Since 1974 he was Corresponding Member, and later, since 1986, Resident Member of the Accademia delle Scienze di Torino, participating actively its scientific work.

Bulletin 49 also provides some information on the relative costs of the materials and products which it covers.

It does not deal with structure design or the process of construction or with the post-construction phase of structure management including repair. It is hoped that it will nevertheless increase the understanding of readers in the process of corrosion of reinforcing steels and the ability of key materials and processes to reduce its harmful effects.

### Corrosion protection of reinforcing steels



- fib Bulletin 49,  
Format approx. A4  
(210 x 297 mm),  
122 pages, ISBN  
978-88394-88-5
- Non-member  
price 90 CHF surface  
mail included.

It has long been recognised that corrosion of steel is extremely costly and affects many industry sectors, including concrete construction. The cost of corrosion of steel reinforcement within concrete is estimated at many billions of dollars worldwide.

The corrosion of steel reinforcement represents a deterioration of the steel which in turn detrimentally affects its performance and therefore that of the concrete element within which it has been cast. There has been a great amount of work undertaken over the years in relation to the prevention of corrosion of steel, including the application of coatings, which has included the study of the process of corrosion itself, the properties of reinforcing steels and their resistance to corrosion as well as the design of structures and the construction process.

### Publication

The Guide to Good Practice was published in January 2009 as fib Bulletin 48.

Aad van der Horst  
Chair of fib Commission 10

- fib Bulletin 48, "Formwork and falsework for heavy construction" Format approx. A4 (210 x 297 mm), 96 pages, ISBN 978-2-88394-88-8
- Non-member price 130 CHF; surface mail included.

reinforced and prestressed concrete structures, in which field he can be considered a leading figure of the last 50 years. After his return to Italy in 1947, he started work on the structural effects of imposed deformations and very soon proposed the first three theories of linear viscoelasticity, which showed a very large application field. Later his scientific activity focused on the main aspects of behaviour and design of structural concrete, namely:

- probabilistic approach to structural safety and consideration of model uncertainties;
- effect of imposed deformation with respect to plastic structural behaviour;
- structural effects of shrinkage and creep;
- non-linear analysis of concrete structures, both for geometrical and mechanical reasons;
- prestrengthening effect, both at serviceability and ultimate limit state;
- non linear behaviour of flat slabs due to cracking.

Franco Levi made a very fundamental contribution to the preparation of codes on concrete structures, such as the "Recommendations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton" CEB, 1963 and CEB-FIP, 1970 and the "Model Code for Concrete Structures" (CEB-FIP, 1978 and 1990); such codes exerted a large influence on the national codes of more and more countries, also outside the Europe, and strongly inspired the final version of Eurocode 2, EN 1992, both international organizations, at that time independent, but future parents of fib. After his presidency, both CEB and FIP conferred on him the title of Honorary President. From the end of 70's up to the end of 80's, for about ten years, he chaired the editorial group of the European Pre-standard for the Design of Concrete Structures, Eurocode 2, ENV 1992-1-1.

The scientific activity of Franco Levi, who published more than 250 scientific and technical papers, was focused mainly on

## Congresses and symposia

The calendar lists *fib* congresses and symposia, co-sponsored events and, if space permits, events supported by *fib* or organised by one of its National Groups. It reflects the state of information available to the Secretariat at the time of printing; the information given may be subject to change.

Date and location	Event	Main organiser	Contact
22-24 June 2009 London, UK	<i>fib</i> Symposium: Concrete: 21st Century Superhero	<i>fib</i> group UK	<a href="mailto:fiblondon09@emap.com">fiblondon09@emap.com</a> <a href="http://www.fiblondon09.com">www.fiblondon09.com</a>
13-15 July 2009 Sydney, Australia	9th International Symposium on Fiber Reinforcement Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)	ICF Australia	<a href="mailto:fiprcs9@ciceaustralia.com">fiprcs9@ciceaustralia.com</a> <a href="http://www.ciceaustralia.com/frprcs9">www.ciceaustralia.com/frprcs9</a>
15-17 October 2009 Shanghai, China	2nd International Conference on Technology of Architecture and Structure (ICTAS 2009)	China Civil Engineering Society, China Academy of Engineering	<a href="mailto:cces.china@263.net">cces.china@263.net</a>
17-18 November 2009 Marseille, France	Designing and building with UHPPRC - State of the art and developments	Association Française de Génie Civil	<a href="http://www.afgc.asso.fr">www.afgc.asso.fr</a> <a href="mailto:afgc@enpc.fr">afgc@enpc.fr</a>
3-5 May 2010 Cavtat, Croatia	COPRA - Codes of Practice in Structural Engineering	Croatian group in IABSE and <i>fib</i>	<a href="mailto:dubrovnik2010@grad.hr">dubrovnik2010@grad.hr</a> <a href="http://www.iabse.org/dubrovnik2010">www.iabse.org/dubrovnik2010</a>
29 May - 1 June 2010 Washington D.C., USA	Third <i>fib</i> Congress and Exhibition	<i>fib</i> group USA PCI	Prestressed Concrete Institute <a href="mailto:info@fib2010washington.com">info@fib2010washington.com</a> <a href="http://www.fib2010washington.com">www.fib2010washington.com</a>
20-23 June 2010 Copenhagen, Denmark	8th <i>fib</i> International PhD Symposium in Civil Engineering	Technical University of Denmark - DTU Byg	Judith Selk Abelsen, Symposium secretary <a href="mailto:fib_symposium_2010@byg.dtu.dk">fib_symposium_2010@byg.dtu.dk</a> <a href="http://conferences.dtu.dk/conferenceDisplay?py=confid=21">http://conferences.dtu.dk/conferenceDisplay?py=confid=21</a>

*fib*-news is compiled, drafted by and produced under the sole responsibility of the Secretary General as an integral part of the *fib* journal Structural Concrete. Members of *fib* or participants in its work (for ex. members of one of its Commissions, Task Groups or Working Parties) are invited to submit to the secretariat any information they would want to disseminate through *fib*-news. Although the secretariat does its best to ensure that the published information is accurate, no liability or responsibility of any kind (including liability for negligence) is accepted in this respect by *fib* or its Secretary General. Contributions signed by an author were invited by the secretariat at proposed by the authors. They are published under the sole responsibility of the authors and, contrary to papers in the journal itself, they are not submitted to a peer review process. Recent issues of *fib*-news are available free of charge as pdf files on the *fib* website, [www.fib-international.org/](http://www.fib-international.org/).

©fib 2009. *fib*, Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland. Tel: +41 21 693 2747; Fax: +41 21 693 6245; Email: [fib@epfl.ch](mailto:fib@epfl.ch)

### Correction

The secretariat regrets that *fib* Bulletin 47, *Environmental design of concrete structures - general principles*, was published with erroneous information on the copyright page regarding the name of the Task Group that authored the bulletin, as well as the number and name of the Commission. The text should read: "This report was drafted by Task Group 3.6, *Guidelines for environmental design*, in Commission 3, *Environmental aspects of design and construction*". A corrected version of this page can be downloaded from the *fib* website at [www.fib-international.org/publications/fib47](http://www.fib-international.org/publications/fib47)

The scientific and technical achievements of Franco Levi have been recognised with many honours, including the Freyssinet medal (1978). Simultaneously, CEB, the European Committee for Concrete, with its secretariat in Paris, began work on its future 'International Recommendations'. In subsequent versions these were published as 'Model Codes', a name still in use today. The role C&A and more precisely Roy had in these international efforts cannot be better described than was recently done by George Somerville, a former colleague of Roy, who wrote: "... there is no doubt that the C&A had a major influence in raising standards in concrete design and construction. Pioneering research in the 1950s was followed by a major expansion in R&D in the 1960s, the creation of a major training centre at Fulmer Grange etc. Roy was a central figure in this and all was in line with his basic philosophy: good research followed by effective communication with practice. ..."

Roy's research output was prolific, and he will be particularly remembered for his work on bridge decks, prestressed concrete and limit state design. He held as a guiding principle that research results should be followed through into practice, while working closely with all sectors of industry.

Against this background Roy's involvement in CEB work started in the 1960s when he co-chaired the Inter-Commissional Committee on General Security Concepts. In 1972 he joined the CEB Commission VI Structural Safety—Practical Recommendations, and later co-ordinated the Editorial Group for 'Volume I—Common Unified Rules' of the 1978 CEB-FIP Model Code.

Elected in 1977 as a member of the CEB Administrative Council and appointed Vice-President in 1981, Roy took early retirement in 1987 when C&A activities came to an end. He was elected President in the same year, and – a rare

Giuseppe Mancini  
The leadership of Franco Levi in both academic and scientific work, as well as in the engineering profession, together with his great wisdom and moral integrity rendered his students, collaborators, and successors, proud to have worked with him. He was a protagonist in the development of structural concrete, lighting the way for the engineers and researchers continuing in this field.

Photo: courtesy Staff

## Obituary



Roy E. Rowe  
1929 - 2008

Born and brought up in Southampton, United Kingdom, Roy did his national service in the Royal Navy, and subsequently studied Mechanical Sciences at Pembroke College, Cambridge. In 1952 he joined the Cement & Concrete Association where he eventually spent his entire career. Starting in its Structures Research Department in Wexham Springs, he became its head in 1958. In 1966 he was appointed Director of Research, and in the end was its last Director-General, from 1977 to 1987 when this prestigious association ended its activities. The secretariat of FIP, the International Federation for Prestressing, was hosted by the C&A since 1954 and it is without

Rudiger Tewes  
We thank the Institution of Structural Engineers and George Somerville for their contributions to this text.

## Droits d'Inscription *(Prix par personne)*

**Forfait A :**  
Au départ de Paris = 120 euros

**Forfait B :**  
Au départ de Metz = 50 euros

Une fois de plus, à 75 ans, Eugène Freyssinet exigea et endossa l'entièvre responsabilité du sauvetage. Il sauva le bâtiment du désastre par une réparation menée tambour battant. Il sauva aussi la réputation de la précontrainte qui n'était pas la cause du sinistre mais avait eu le tort de révéler un défaut de conception.

La suite mérite au moins de venir apprêhender l'échelle du problème sur le site et de découvrir la solution mise en œuvre qui doit faire partie de la culture de « l'honnête ingénieur constructeur » du 21<sup>e</sup> siècle.

Nous les attendons donc nombreux le 17/10/2009.

- Le forfait A comprend le transport Paris-Metz- Paris en TGV, les déplacements en car, le déjeuner et les visites.

- Le forfait B comprend les déplacements en car, le déjeuner et les visites.

\*\*\*

Bulletin de pré-inscription, accompagné d'un compte de 50 % par chèque à l'ordre de *Association Eugène Freyssinet* est à retourner avant le 28 Mai 2009 à :

Anna Poloni  
C/O Gelexco  
9 Avenue Réaumur  
92350 Le Plessis Robinson  
tel 01 46 01 24 61

[Association.freyssinet@wanadoo.fr](mailto:Association.freyssinet@wanadoo.fr)

Il s'agit d'une structure complètement différente de celle du bâtiment de l'émetteur d'Europe 1. C'est un élément de la Ligne Maginot, structure massive de béton armé, conçue pour résister à tous les moyens de destruction dont disposait l'armée dans les années 30. Outre la structure elle-même de l'ouvrage, pris en charge par une association de sauvegarde, le fort mérite une visite à caractère historique car il est complètement équipé avec du matériel et des mannequins qui donnent une très bonne idée de ce qui aurait dû se passer, si l'ennemi de l'époque n'était pas passé à côté de cette fortification réputée imprenable !

Mais cela est une autre histoire, qui pourra cependant être largement évoquée au cours de la visite qui dure environ 1 H 1/2.

Pierre Jartoux

**Association Eugène Freyssinet**



## Inscription préliminaire

**FELSBERG**

*(Près de Sarrelouis)*

**Samedi 17 Octobre 2009**



Journée parrainée par

## PROGRAMME

### Émetteur d'Europe 1

Samedi 17 Octobre 2009

7 H 09 :  
DÉPART TGV GARE PARIS EST  
Arrivée à METZ à 8 H 32

8 H 45 :  
Rassemblement Gare de Metz, pour  
Départ en car pour Felsberg

10 H 30 / 12 H 30  
Visite du bâtiment de l'Emetteur Europe N°1  
(classé bâtiment historique depuis 1999)

13 H 00  
Déjeuner à Bouzonville

Vers 15 H 30  
Visite du Fort du Hackenberg - Ligne Maginot

19 H 48 :  
DÉPART TGV GARE DE METZ  
Arrivée à Paris Gare de l'Est à 21 H 19

### BULLETIN DE PRÉ-INSCRIPTION

(1 bulletin par personne)  
A retourner avant le 28 Mai 2009

FELSBERG

17 Octobre 2009

Conçu au début des années 50, à une époque où la RTF (Radio Télévision Française) jouissait du monopole des émissions à partir du territoire français, cet émetteur a été construit en Sarre, tout près de la frontière française, afin de pouvoir émettre sur la moitié nord de la France.

Le bâtiment de couverture est un voile mince dont la vue en plan est un cœur dont les dimensions extérieures sont encadrées par un rectangle de 86,5 x 46 m couvrant, sans poteaux, une surface de près de 3000 m<sup>2</sup>.

Initialement prévu en béton armé, l'importance des flèches prévues pour le décintrement interdisant le décoffrage, le bureau d'études décide d'en faire un ouvrage en béton précontraint en substituant des armatures de précontrainte aux armatures de béton armé ! Nous sommes en 1954... époque où le béton précontraint est encore l'affaire d'une poignée d'experts, formés par E. Freyssinet.

Lors de la mise en précontrainte, le voile se déchire sur toute la longueur ! Tous les experts appelés au chevet du malade renoncent à tenter le sauvetage. La situation est d'autant plus grave que des pénalités énormes pèsent sur le retard de mise en service ; les recettes de publicité en dépendent !

On décide alors d'aller chercher Eugène Freyssinet dans sa retraite niçoise ! Et c'est le miracle, un de plus au crédit du génial constructeur du 20<sup>e</sup> siècle ! Au dire des témoins de l'époque, l'étoicelle jaillit instantanément à la vue du bâtiment et du désordre apparu lors de la mise en précontrainte.

Titre : M., Mme.

Nom : .....

Prénom : .....

Société : .....

Adresse : .....

Ville : .....

Code Postal : .....

Je participerai aux visites du 17 octobre 2009  
 Avec départ de Paris Est

Je participerai aux visites du 17 octobre 2009  
 Avec départ de la gare de Metz

J'utiliserai le car pour l'ensemble des  
déplacements (retour Gare de Metz)