

INNOVATION POUR LES OUVRAGES FERROVIAIRES EN FRANCE : UNE POUTRE MIXTE PREFLECHIE EN BTHP

INNOVATION FOR THE RAILWAY BRIDGE DECKS IN FRANCE : A PRECAMBERED COMPOSITE BEAM USING VHPC

Stéphanie STAQUET

Université Libre de Bruxelles

François TOUTLEMONDE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

1. INTRODUCTION

1.1 La poutre Preflex

La technique de la poutre préfléchée, initialement brevetée sous l'appellation appelée poutre Preflex, qui consiste à enrober de béton le talon inférieur d'une poutrelle métallique préalablement fléchie, puis à relâcher la poutre une fois le béton durci de façon à le mettre en précontrainte, a été inventée par l'ingénieur belge A. Lipski en collaboration avec le professeur L. Baes de l'Université Libre de Bruxelles [1]. Les 1^{ers} projets datent des années 50. Parmi ces projets, on retient notamment la Tour du Midi et le Berlaymont situés à Bruxelles. La séquence typique de construction d'une poutre préfléchée est la suivante (Figure 1) :

- a. Pose en usine d'un profilé métallique préfléchi sur deux appuis situés à ses extrémités.
- b. Application de deux efforts concentrés au quart et aux trois-quarts de la portée de manière à annuler la contre flèche initiale.
- c. Coulage du béton de 1^{ère} phase (C50/60) autour de la semelle inférieure du profilé avec maintien des efforts appliqués à l'étape b.
- d. Deux jours après l'étape c, relâchement des deux efforts. Alors, la poutre remonte et la contre flèche résultante est plus petite que celle initiale ; le talon de béton est comprimé.
- e. Coulage sur site du béton de 2^{ème} phase.

1. INTRODUCTION

1.1 The Preflex beam

The Belgian engineer, A.Lipski, with assistance from Professor L. Baes from the Université Libre de Bruxelles [1] invented the system of the precambered composite steel-concrete beam, initially known by the patent name Preflex beam. The first project using this type of beams dates back to 1951. The two best-known structures are the Southern Tower (Tour du Midi) and the Berlaymont Building, both in Brussels (Belgium). The typical construction sequence of a precambered beam is as follows (see Figure 1):

- a. In the plant, setup a steel I-girder, with a precamber, supported at each end.
- b. Prebend the steel girder by applying two concentrated loads at one-quarter and three-quarters of the span.
- c. Cast the first phase of concrete (C50/60) at the level of the bottom flange of the steel girder while keeping in place the loads of the prebending phase of the girder.
- d. Two days after casting the concrete, remove the prebending loads. As a result, the beam goes up, the precamber becomes smaller than the original precamber and the concrete is now subjected to compression.
- e. Cast the second phase concrete on site.

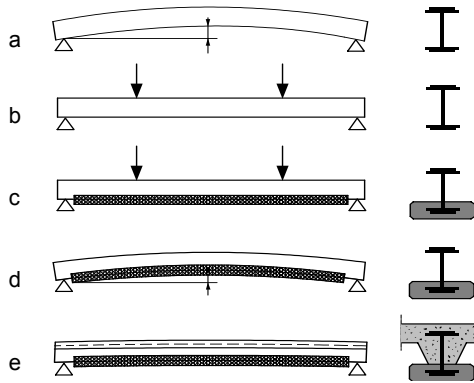


Figure 1: Construction d'une poutre préfléchie.
Schema showing construction of prebended beam

Le béton de 1^{ère} et 2^{ème} phase augmente significativement la rigidité de la poutre mixte par comparaison avec celle du profilé métallique seul. Si le béton reste suffisamment comprimé lors de l'application des charges de service, la condition de non-fissuration est satisfaite. Ce système a connu un vif succès en Belgique car il permet de franchir de grandes portées avec une hauteur totale minimale de section et offre une excellente résistance au feu [2]. Elle est actuellement utilisée en Belgique principalement dans le cadre de la construction d'ouvrages ferroviaires compte tenu de leur très grande résistance à la fatigue.

1.2 Objectifs du programme de recherche

La recherche entreprise sur la plate-forme d'essai des structures du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), dans le cadre du projet national MIKTI, étend la technique de la poutre Preflex aux bétons à très hautes performances (BTHP). Un des objectifs du projet MIKTI est l'innovation dans le domaine des poutres mixtes. Cette recherche bénéficie de la collaboration des partenaires suivants: la SNCF, Arcelor, l'Université Libre de Bruxelles et le préfabriquant belge Ronveaux. Ainsi, la classe de béton qui a été utilisée jusqu'à présent dans la pratique est inférieure ou égale à C60/70 alors que la résistance moyenne à 28 jours du béton mis en œuvre pour cette recherche est de 110 MPa. Par comparaison avec les actuelles réalisations en Belgique, un des avantages qu'apporte l'utilisation d'un BTHP avec fumée de silice en remplacement d'un béton C50/60 est la diminution des pertes de précontrainte du système grâce à une diminution significative des déformations de fluage, comme le prédit le code-modèle AFREM [3], avec la possibilité d'optimiser le poids de la poutre et son domaine de fonctionnement. Des applications possibles pourraient être des ponts-rails dans des situations où la rigidité doit être maintenue ou augmentée suite à des critères spécifiques aux TGV, ou quand l'encombrement de la structure doit être minimisé pour s'intégrer dans des contraintes de gabarit. On a donc recherché à optimiser au mieux la poutre préfléchie en utilisant au maximum les capacités des matériaux disponibles.



Figure 2: Prebending of the steel girder au LCPC.
Préflexion du profilé métallique au LCPC.

The concrete first and second phases significantly increase the stiffness of the composite beam as compared to the stiffness of the steel girder alone. Provided the concrete of the bottom flange remains subjected to compression even during the application of service loads, the requirement of no cracking in the concrete is satisfied. This system has been particularly successful in Belgium because it allows long spans with a minimal construction depth and offers excellent fire resistance [2]. It is presently mainly used in Belgium for railway bridges due to its high fatigue performance.

1.2 Aims of the research program

The aim of the research program that has been carried out at LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) in the framework of the French National Project MIKTI was to extend the system of the Preflex beam to Very High Performance Concrete (VHPC). One of the aims of the MIKTI Project is to bring innovative ideas in the field of the composite steel-concrete structures. This research carried out at LCPC takes benefit of the collaboration with several industrial or scientific partners: SNCF, the French National Company for Railways; Arcelor, the precast steel girder producer; Ronveaux, the Belgian precaster and the University of Brussels. Actually, the concrete grade which has been used until now is lower or equal to C60/70 whereas the average compressive strength at 28 days of the concrete in this research is 110 MPa. In the comparison to the present realizations coming from the Belgian precast industry, the main advantage of using VHPC with silica fume instead of C50/60 is to reduce the prestressing losses of the system thanks to a significant decrease of the creep deformations, as predicted by AFREM design code-model [3] together with the possibility to optimize the beam weight and its serviceability domain. Possible applications might concern French Railways Bridges, where stiffness have to be maintained or increased, due to high speed train requirements, with maintained clearance and reduced beam inertia (accounting for ballast between the rails and the bridge structure).

Une 1^{ère} étape théorique a consisté à optimiser le dimensionnement de ces structures avec une prise en compte du comportement différé du béton et en actualisant leur justification en fonction de l'état actuel des connaissances [4]. Ce développement a été confirmé par une recherche doctorale parallèle menée en Belgique pour des tabliers préfléchis et précontraints en forme de U [5]. Sur base de cette étude, l'intérêt d'utiliser un BTHP pour optimiser le poids propre du talon de béton et la rigidité globale a été confirmé. En conséquence, il a été décidé de réaliser une campagne expérimentale d'analyse du comportement à long terme (charges permanentes et cycliques) d'une poutre préfléchie en BTHP, en bénéficiant des équipements de la dalle d'essais du LCPC. Les objectifs visés par cette recherche consistent donc à valider l'approche scientifique de prise en compte des effets différés du béton dans ce type de structure et à proposer une méthode de calcul simplifiée basée sur des coefficients d'équivalence pour des poutres mixtes préfléchies en BTHP.

It was thus searched to optimize the Preflex system, taking into account the maximum material capabilities available (high quality steel and VHPC). A first theoretical step developed the updated background of these beams design, relatively to delayed strains of concrete and their effects [4]. This development was confirmed by parallel research conducted in Belgium for precast U-shaped Bridges [5]. Based on this study, the interest of VHPC in optimizing the first phase concrete deadweight and the global stiffness was confirmed. Consequently, it was decided to carry out an experimental investigation of long-term performance (dead loads and fatigue) of a VHPC-precast beam taking benefit of the facilities of the LCPC Structures Laboratory. In sum, the final purposes of this research consists in validating the scientific method for taking concrete creep into account, while proposing a simplified design method based on equivalence ratios for VHPC-precast beams.

2. DESCRIPTION DES ESSAIS

2.1 Les étapes du programme expérimental

Les étapes a à d (Figure 1) ont été réalisées sur deux profilés métalliques fabriqués en usine puis préfléchis de 13m de portée, en utilisant un BTHP autoplaçant [6] spécialement formulé pour cette recherche (Figure 3).

2. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

2.1 The steps of the experimental program

The construction stages a to d (Figure 1) were carried out on two factory-made steel girders, 13m-long, prebended at LCPC, using a specially designed self levelling [6] VHPC (Figure 3).

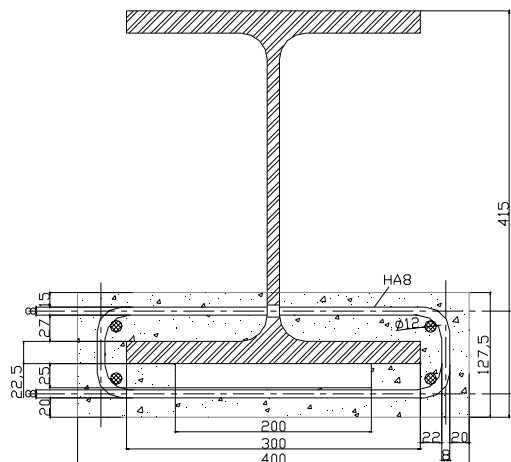


Figure 2 : Coupe des poutres préfléchies testées au LCPC (dimensions en mm) / Cross section of the prebended beams tested at LCPC (in mm).

La section des poutres (Figure 2) montre que l'épaisseur de béton située sous la semelle du profilé n'est que de 55 mm. En plus des armatures passives longitudinales (diam. 12 mm), des étriers (diam. 8 mm) traversent l'âme du profilé tous les 15 cm et des butées (25X25X200 mm) sont soudées à la semelle inférieure du profilé tous les 45 cm.



Figure 3 : Casting of the beam at LCPC
Coulage de la poutre au LCPC

The cross section of the beams illustrated on Fig. 2 shows that the thickness of the concrete situated below the bottom flange of the steel girder was only 55 mm. Moreover, in addition to the longitudinal passive reinforcements (diameter 12 mm), ribbed stirrups (diameter 8 mm) were disposed every 15 cm along the beam and steel square ribs (25 x 25 x 200 mm) were welded to the bottom flange of the steel girder every 45 cm. 48 hours after concrete casting, the prestressing was transferred by releasing the prebending loads initially applied by two jacks (Figure 4).

A 48 heures d'âge du béton, a eu lieu la mise en précontrainte par relâchement des efforts appliqués initialement par deux vérins (Figure 4).



Figure 4 : Mise en précontrainte à 48 heures d'âge du béton de la poutre mixte
Transfer of prestressing at 48 hours of concrete age of the composite beam.

Les poutres ont ensuite été soumises à 2 mois d'âge à des charges permanentes (4 t de plomb par poutre pour représenter la charge du hourdis supérieur, des superstructures et du ballast) (Figure 5). Puis, à partir de 4 mois d'âge à des charges variables représentatives du trafic ferroviaire (1000 cycles correspondant à l'effet de convois susceptibles de passer une fois l'an (soit environ $\frac{1}{2}$ UIC), puis 1 ou 2 millions de cycles correspondant aux convois lourds plus courants).



Figure 6 : Mesures des déformations du béton au moyen de jauges / *Strain gauges bonded on concrete surface to monitor the evolution of the deformations.*

Pendant plus de 8 mois, on a suivi l'évolution de la flèche mais aussi réalisé de nombreuses autres mesures de déformation (Fig. 6 et 7) et des essais de caractérisation mécanique, module, fluage et de retrait (Fig. 8 et 9) afin de justifier le comportement de ces poutres en tenant correctement compte du fonctionnement mixte de l'acier et du béton à très hautes performances. Les poutres ont été chargées jusqu'à rupture pour vérifier la marge de sécurité du domaine de fonctionnement et la qualité de la prévision par calcul.



Figure 5: Permanent loads (4 tons) applied on the composite beam at 2 months of concrete age.
Charges permanentes (4t) appliquées sur la poutre à 2 mois d'âge du béton

Two months after, the beams have been submitted to permanent loads (4t made of lead masses, representing the load of the upper concrete deck, superstructures and ballast) (Figure 5). After 4 months, live loads representative of railway traffic were applied: 1000 cycles representing the effect of trains possibly transiting once a year (half UIC conveys), then one or two million cycles corresponding to more frequent heavy trains.



Figure 7: Strain gauges bonded on steel girder surface to monitor the evolution of the deformations.
Mesures des déformations du profilé en acier au moyen de jauges.

The deflection was monitored for more than 8 months as well as numerous complementary strain measurements (Fig. 6 and 7), the mechanical characterization, Young's modulus, creep and shrinkage tests (Fig. 8 and 9) were performed, so that a correct analysis of the structural behaviour of the pre-cambered beams can be done, focusing on the steel-concrete behaviour, and taking advantage of low delayed deformations of VHP. Finally the beams were tested up to failure for quantifying their safety margin under service loads, and checking the accuracy of the design predictions.



Figure 8 : Essais de fluage en environnement variable à proximité des poutres / Creep tests in variable environment near the beams.

2.2 La formulation du BTHP

Dans le contexte d'un coulage de béton dans des zones très confinées, il est en général nécessaire d'appliquer de fortes vibrations au moule au moyen de vibreurs externes attachés au coffrage. Cependant, il s'est vite avéré exclu d'appliquer ce système ici du fait de la présence d'un réseau très dense de câbles et de capteurs dans le coffrage. Il a donc été décidé que le béton devait être auto-plaçant (BAP) avec un diamètre maximal acceptable des granulats. Par ailleurs, l'utilisation d'un BAP pourrait être une source possible d'économie pour l'industrie de la préfabrication, en particulier dans le cas d'un béton déjà fortement adjuvanté. En complément à ces critères rhéologiques, le BTHP devait développer une résistance importante au jeune âge pour pouvoir relâcher les efforts de préflexion 48 heures après le coulage du béton. Au total, la formulation du BAP devait satisfaire les exigences suivantes:

- La résistance moyenne à la compression à 2 jours f_{c2} devait être au moins égale à 55 MPa et inférieure à 65 MPa pour garantir un rapport d'environ 40 % (ce qui correspond à la valeur pratique des actuels tabliers préfabriqués) entre la contrainte maximale de compression appliquée au béton à 2 jours et sa résistance moyenne à la compression à 2 jours.
- La résistance moyenne à la compression à 28 jours f_{c28} devait être de 95 MPa (soit une résistance caractéristique de 80 MPa, c'est-à-dire la résistance maximale admissible en compression dans les actuelles normes françaises).
- Les propriétés rhéologiques devaient rester constantes pendant au moins une heure et demi. En fait, le volume total de béton nécessaire pour couler la poutre de 13 m était d'environ 500 litres alors que la capacité maximale du malaxeur au LCPC était de 160 litres, ce qui a impliqué quatre gâchées. Comme chaque malaxage durait 5 minutes et le coulage de chaque gâchée 15 à 20 minutes, la durée totale de coulage de la poutre était estimée à environ une heure et demi.



Figure 9 : Shrinkage tests in variable environment near the beams / Essais de retrait en environnement variable à proximité des poutres.

2.2 VHPC mixture proportions

In this context of confined concrete flows, strong vibrations of the mould during concrete casting are normally necessary and achieved by external vibrators fixed to the form. However, due to the very dense network of wires and sensors, which were intended to be embedded in the concrete, it was not applicable. In consequence, it was decided that the concrete had to be a self compacting one (SCC) with a suitable maximum diameter of the aggregates. Moreover, the use of SCC could be a possible source of economy for the precast industry, particularly in case of concrete with a high percentage of admixtures. In addition to the rheological requirements for the casting of the concrete, the VHPC had to develop a very high compressive strength at early age in order to remove the prebending loads applied on the steel girders only 48 hours after the casting of the VHPC. In summary, the mixture proportions of the VHPC had to satisfy the following requirements:

- The average compressive strength at 2 days f_{c2} had to be at least equal to 55 MPa and lower than 65 MPa in order to obtain a ratio of about 40 % between the maximal compressive stress that was applied to concrete at 2 days and the average compressive strength of VHPC at 2 days. This percentage corresponds to the practical value of the ratio in the actual pre-cast beams.
- The average compressive strength at 28 days f_{c28} had to be about 95 MPa (which corresponds to a characteristic strength of 80 MPa, the maximum admissible compression strength in present French Standards).
- The rheological properties had to stay constant during at least one hour and 30 minutes (no workability loss). Actually, the total concrete volume, which was needed to cast the 13 m span beam, was about 500 litres and the maximal capacity of the mixer at LCPC is 160 litres, which implied four batches. Since the mixing of each batch requires 5 minutes and the casting of each batch 15 to 20 minutes, the total duration of the casting phase was about one hour and 30 minutes.

d) Le diamètre maximal des granulats était limité à 12,5 mm pour éviter des blocages de l'écoulement dans les zones les plus confinées.

Les points a, b et d ont impliqué certains choix préliminaires: un calcaire dur avec un diamètre maximal de 12,5 mm pour les graviers; un pourcentage élevé en C3A dans le ciment; un rapport entre la fumée de silice et le ciment de 10 %; une quantité de ciment d'environ 500 kg/m³ et un rapport eau/liant de 0,3. Sur base de simulations réalisées avec BetonLabPro® développé au LCPC, les proportions des constituants ont été déterminées et sont données ci-après : gros granulats 4/12.5 (Calcaire du Boulonnais, 920 kg/m³); sable 0/4 (Calcaire du Boulonnais, 379 kg/m³); sable 0/4 (Silico-calcaire, 369 kg/m³); ciment CEMI52.5 N CE CP2 NF (Bussac, 500 kg/m³); fumée de silice (SEPR, 50 kg/m³); eau de gâchage (165 l/m³). Le point c ainsi que les critères de remplissage complet du coffrage ont impliqué le choix et la quantité de l'adjuvant (Optima 175, 10 l/m³) [6].

La faisabilité d'un talon BTHP de dimension réduite pour constituer une poutre préfléchée optimisée a été démontrée, tout en restant susceptible d'améliorations dans un contexte industriel (taille maximale des granulats, rhéologie). La nécessité d'un meilleur contrôle des pertes de contreflèche par élastification, pour valoriser le BTHP de façon plus sûre, a également été mise en évidence.

2.3 Le comportement à long terme sous chargement permanent

En vue d'illustrer l'avantage qu'apporte l'utilisation d'un BTHP en remplacement d'un BHP, les figures 10 à 12 montrent les résultats expérimentaux obtenus pour le BHP actuellement utilisé [5] et pour le BTHP de ce projet.

d) The maximal diameter of the aggregates was limited to 12.5 mm in order to avoid blockages in the most confined zones.

The points a, b and d implied the following preliminary choices before the determination of the mixture proportions: a hard limestone with a maximal diameter of 12.5 mm for the aggregates; a high percentage of C3A in the cement (high strength at early age); a ratio between silica fume and cement of 10 %; an amount of cement of about 500 kg/m³ and a water/binder ratio of about 0.3. On basis of simulations made with the BetonLabPro® software developed by LCPC, the constituents proportions were determined and are given hereafter: Coarse aggregates 4/12.5 (Limestone from Boulonnais, 920 kg/m³); Sand 0/4 (Limestone from Boulonnais, 379 kg/m³); Sand 0/4 (Silico-calcareous rounded sand, 369 kg/m³); Cement CEMI52.5 N CE CP2 NF (Bussac, 500 kg/m³); Silica fume (SEPR, 50 kg/m³); Batch water (165 l/m³). The point c as well as the rheological criteria implied the choice and the quantity of Admixture (Optima 175, 10 l/m³) [6].

The feasibility of a reduced VHPC cross section to optimize a prebenbed beam has been demonstrated, with possible improvements in an industrial context (aggregate maximal size, rheology). The need to improve the control of the precamber losses by elastification, in order to use the VHPC more efficiently, has also been pointed.

2.3 Long-term behaviour under permanent loads

In order to prevent the potential advantage to use a VHPC instead of a HPC, the Figures 10 to 12 show the experimental results obtained for the HPC currently used [5] and for the VHPC of this project.

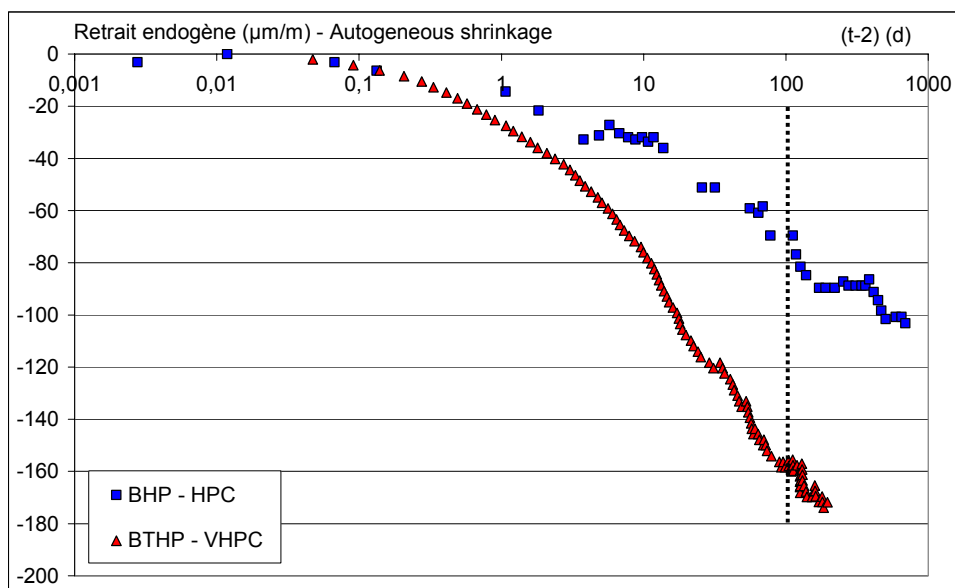


Figure 10 : Evolution du retrait endogène du BTHP et du BHP
Evolution of the autogeneous shrinkage of the VHPC and the HPC

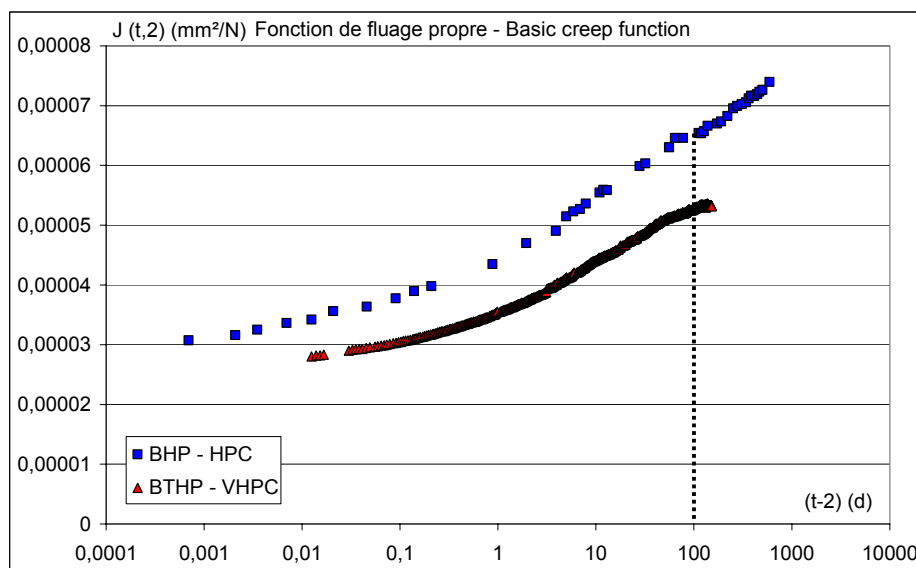


Figure 11: Evolution de la fonction de fluage propre du BHP et du BTHP chargé à 2 jours
Evolution of the basic creep function of HPC and VHPC samples loaded at 2 days

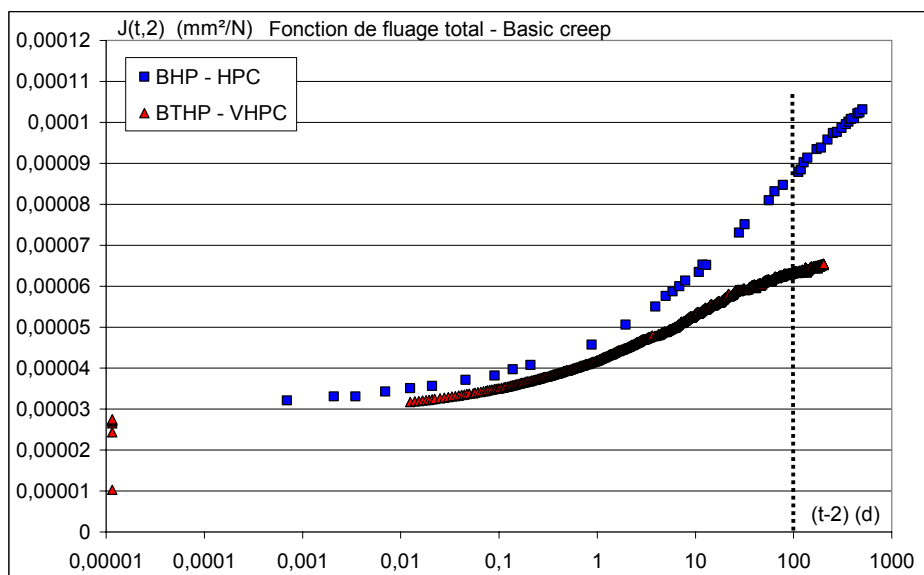


Figure 12: Fonction de fluage total (20°C, 50% HR) du BHP et du BTHP chargé à 2 jours
Total creep function (20°C, 50% RH) of HPC and VHPC samples loaded at 2 days

L'amplitude du retrait endogène (Figure 10) à 100 jours d'âge du BTHP est deux fois plus importante que celle du BHP. Par contre, les figures 11 et 12 montrent qu'aussi bien l'amplitude de la fonction de fluage propre que celle de fluage total (20°C, 50% HR) après 100 jours de chargement est significativement plus petite pour le BTHP que le BHP. La figure 13 montre que les données expérimentales de la fonction de fluage total d'une éprouvette chargée à 2 jours sont en bonne concordance avec les valeurs prédites par le modèle CEB90-MC (version 99) jusqu'à environ 60 jours après le chargement et sont surestimées au-delà par ce modèle. Le modèle AFREM sous-estime nettement ces données expérimentales correspondant à un chargement au jeune âge.

The autogeneous shrinkage magnitude (Figure 10) at 100 days of VHPC age is twice more important than the one of HPC. However, the figures 11 and 12 show that the magnitude of the basic creep function as well as the total creep function (20°C, 50% RH) 100 days after loading for the VHPC is significantly lower than the values corresponding to the HPC. The figure 13 shows that the experimental data of the total creep function of a sample loaded at 2 days are in good agreement with the values predicted by the CEB90-MC (version 99) until 60 days after the loading and are overestimated by this model over 60 days. The AFREM model underestimated significantly these experimental data for loading applied at early age.

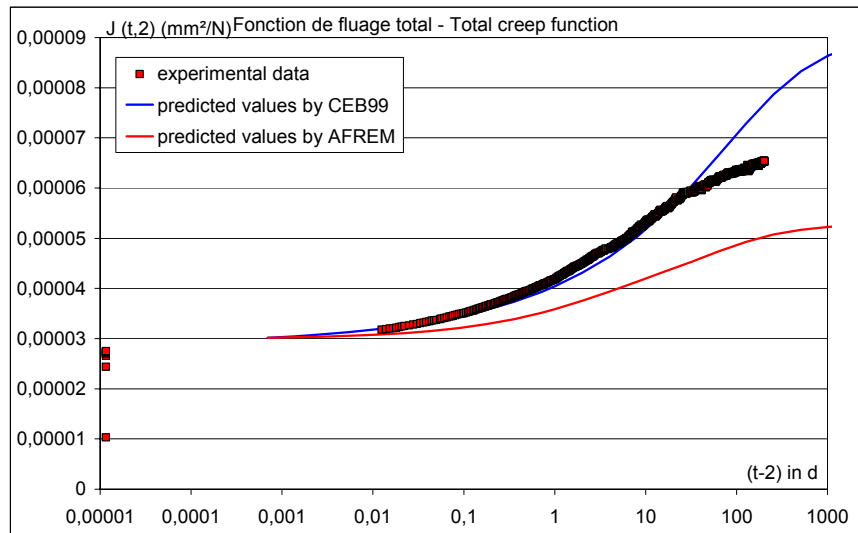


Figure 13 : Valeurs prédites de la fonction de fluage total et expérimentales d'une éprouvette en BTHP chargée à 2 jours (20°C, 50% HR) / Predicted values of the total creep function and experimental data of a VHPC sample loaded at 2 days (20°C, 50% HR).

L'évolution de la contrainte au niveau de la fibre inférieure du talon de béton de la poutre (Fig. 2) a été simulée suivant une approche type pas-à-pas en utilisant le modèle CEB90-MC dans sa version 99 pour calculer la déformation de retrait et le coefficient de fluage (Fig. 14). Les caractéristiques mécaniques du BHP utilisé correspondent à un C60 (proche des bétons utilisés), [2] tandis que celles relatives au BTHP correspondent aux valeurs expérimentales obtenues pour le BTHP de cette recherche, soit une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 110 MPa. 180 jours après la mise en précontrainte de la poutre 2 et sous les charges permanentes (Fig. 5), il ne subsiste pratiquement plus de compression pour la variante BHP alors qu'il subsiste près de 3 MPa en compression pour la variante BTHP (Fig. 14).

The evolution of the stress at the level of the concrete bottom fiber of the beam (Fig. 2) has been modelled with a step-by-step computation by using the CEB90-MC model (version 99) to compute the shrinkage and the creep coefficient (Fig. 14). The mechanical properties of the HPC correspond to those of a C60 concrete (close to the used concrete) [2] whereas for the VHPC, to the experimental data of this research, an average compressive strength at 28 days of 110 MPa. 180 days after the transfer of prestressing of Beam 2 and under the permanent loads (Fig. 5), only 0.1 MPa in compression is remained for the beam with HPC whereas no less than 3 MPa in compression is still remained with VHPC (Fig. 14).

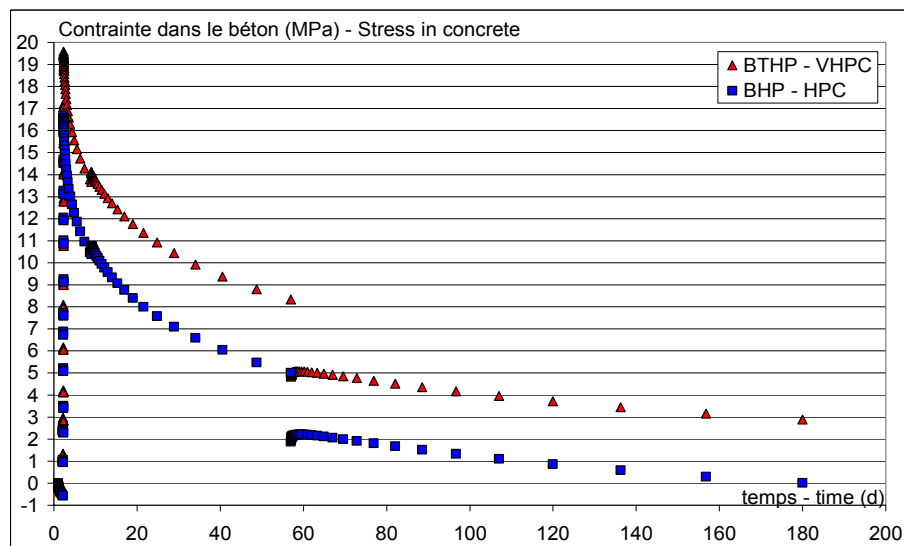


Figure 14 : Evolution de la contrainte prédite par le code modèle CEB90-MC (version 99) au niveau de la fibre inférieure du talon de béton pour un BHP (C60) et le BTHP de ce projet (fcm : 110 MPa).
Stress predicted by the CEB90-MC (version 99) at the level of the concrete bottom fiber of the beam for HPC (C60) and VHPC used in this project (fcm: 110 MPa).

2.4. Le comportement en fatigue sous chargement cyclique

Les figures 15 et 16 illustrent les montages qui ont été utilisés pour réaliser les cycles rares et de fatigue sur chacune des poutres préfléchies. La figure 17 résume les amplitudes des efforts appliqués à 1,8 m de part et d'autre de la mi-portée de la poutre 2 au moyen d'un vérin par l'intermédiaire d'une poutre de transmission, ainsi que le nombre de cycles correspondants effectués.



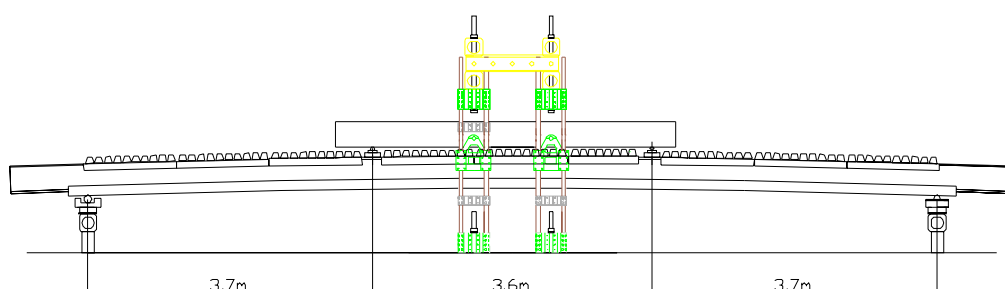
Figure 15 : Montage réalisé pour l'essai de fatigue sur la poutre 1
Schematic showing the fatigue test on Beam 1

2.4. Fatigue behaviour under cyclic loads

The figures 15 and 16 show the frame which was used to carry out the fatigue tests on each prebended beam. The figure 17 summarizes the magnitudes of the load applied at 1.8m on both sides of the mid-span of Beam 2 by a jack by means of a transmission beam as well as the number of cycles which were realized.



Figure 16: Schematic showing the fatigue test on Beam 2 / Montage réalisé pour l'essai de fatigue sur la poutre 2



Cycles de fatigue à partir du 09/08/05 :	Min 2 KN Max 22 KN	701651 cycles	Fatigue cycles since Aug.9,05
Cycles de fatigue à partir du 14/09/05 :	Min 5 KN Max 25 KN	298349 cycles	Fatigue cycles since Sept.14,05
Cycles rares le 19/09/05 :	Min 5KN Max 63 KN Min 5KN Max 66 KN	500 cycles 500 cycles	Rare cycles on Sept.19,05
Cycles de fatigue à partir du 19/09/05 :	Min 5KN Max 32 KN	1000000 cycles	Fatigue cycles since Sept.19,05
Cycles rares le 05/10/05 :	Min 5KN Max 63 KN Min 5KN Max 66 KN	500 cycles 500 cycles	Rare cycles on Oct.05,05

Figure 17 : Bilan des charges appliquées sur la poutre P2 durant les essais de fatigue
Summary of the cyclic loads applied on Beam 2 during fatigue tests.

A l'issue de 2000 cycles "rares" et 2 millions de cycles de "fatigue", les essais ont mis en évidence une très faible évolution de la rigidité sous des chargements n'atteignant pas la limite de fissuration du béton (dimensionnement de type classe II du BPEL), le béton participant à hauteur d'environ 20% à la rigidité globale.

After 2000 rare cycles and 2 millions of fatigue cycles, a very few evolution of the stiffness has been observed under loads lower than the concrete cracking limit (design of class II type BPEL), the concrete corresponding to 20% of the global stiffness.

2.5. Le comportement jusqu'à rupture

L'essai à rupture des poutres préfléchies visait à conforter une méthode de calcul identifiant un état-limite de service, lié à la fissuration du talon en béton, et un état-limite ultime, correspondant soit à une instabilité (déversement), soit à la plastification de l'une ou l'autre semelle des profilés. L'estimation de la charge de fissuration stabilisée (contrainte de l'ordre de 1,5 ft en moyenne dans le talon), de la charge de déversement pour une longueur libre de 6 m (entre points d'application des efforts par les vérins), et de la charge de plastification de la semelle supérieure du profilé (en négligeant la participation du béton) a donné pour valeurs théoriques de charge au niveau de chaque vérin 110 kN, 336 kN et 410 kN respectivement.

Les essais ont été réalisés en trois phases, pilotées en effort, avec atteinte de 115 kN puis décharge, atteinte de 250 kN soit environ $\frac{3}{4}$ de la charge théorique de déversement, ou 60 % de la charge théorique de plastification, puis décharge, et enfin chargement jusqu'à rupture.

2.5. Behaviour up to failure

The aims of the test up to failure of the prebended beams was to validate a design method for the limit serviceability state (LSS) linked to the cracking of the concrete and for the ultimate limit state corresponding to a instability (warping) or to a plastification of a steel girder flange. The estimation of the cracking load (average stress of about 1.5ft in the concrete), the warping load for a free span of 6m (between application points of the loads by the jacks) and the plastification load of the upper flange of the steel girder (by neglecting the concrete participation) provided the theoretical values of the load at each jack: 110kN, 336kn and 410kN respectively.

The tests were carried out in 3 phases: up to 115kN then unloading; up to 250kN ($\frac{3}{4}$ of the warping theoretical load or 60% of the theoretical plastification load) then unloading (Fig.18) and finally loading up to failure (Fig.19).

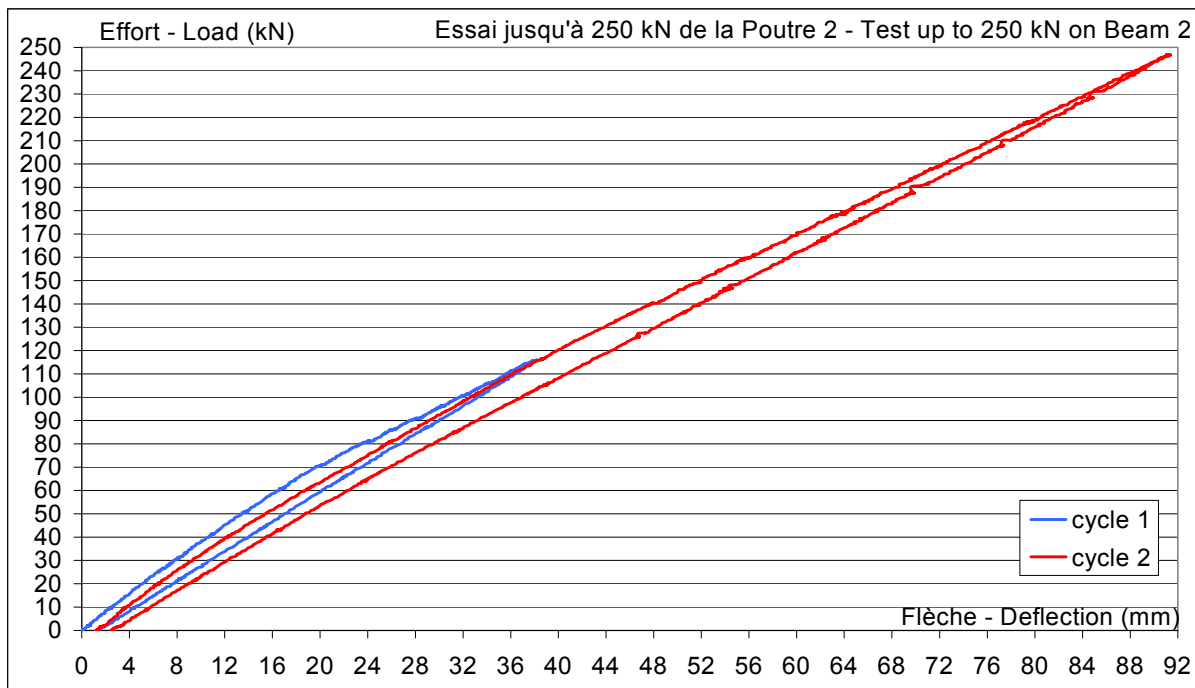


Figure 18: Chargement de la poutre 2 jusqu'à 250 kN appliqués au quart et aux trois-quarts de la portée.
Loading of Beam 2 up to 250 kN applied at a quarter and at three quarters of the span.

L'observation des premières fissures a eu lieu pour une charge de 40 kN (poutre 1) à 80 kN (poutre 2), la non-linéarité de la réponse effort-flèche étant sensible pour les deux poutres dès 40 kN et la « stabilisation » d'un réseau de fissures dans le talon étant effective pour les deux poutres vers 100 kN. La position et l'espacement des fissures sont gouvernés par les butées (face inférieure) ou les cadres (faces latérales et supérieure), et leur ouverture maximale atteint 0,15 mm environ sous 115 kN, ce qui confirme la prévision théorique de l'ELS. Le comportement global de la poutre, relativement linéaire jusqu'à 250 kN (rigidité principalement liée au seul profilé) est apparu fortement non-linéaire à partir de 310 kN environ mais le déversement n'a eu lieu que pour 385 kN, la flèche au centre avait alors atteint 24 cm, le talon se trouvant marqué par une fissuration diagonale caractéristique. La présence du BTHP, sans modifier le mode de ruine lié au profilé et caractérisant l'ELU, conduit à en retarder l'apparition et à en atténuer la brutalité.

The observation of the first cracking appeared at a load of 40 kN (Beam1) to 80 kN (Beam 2). The non-linearity of the load-deflection curve was observed since 40kN for the two beams and the stabilization of the cracks network in the concrete was effective for the two beams around 100 kN. The location and the distance between cracks are led by the steel square ribs (bottom surface) or by the ribbed stirrups (lateral and upper surfaces) and the maximal crack opening reaches 0.15mm under 115 kN, what confirms the theoretical prediction of LSS. The global behaviour of the beam, relatively linear until 250 kN (stiffness mainly due to steel girder) became very non linear since 310 kN but the warping appeared at 385 kN with a deflection at mid-span equalled to 24 cm at this stage and a typical diagonal cracking in concrete. The presence of VHPC does not modify the failure mode linked to the steel girder but allows delaying the appearance and reducing the suddenness.

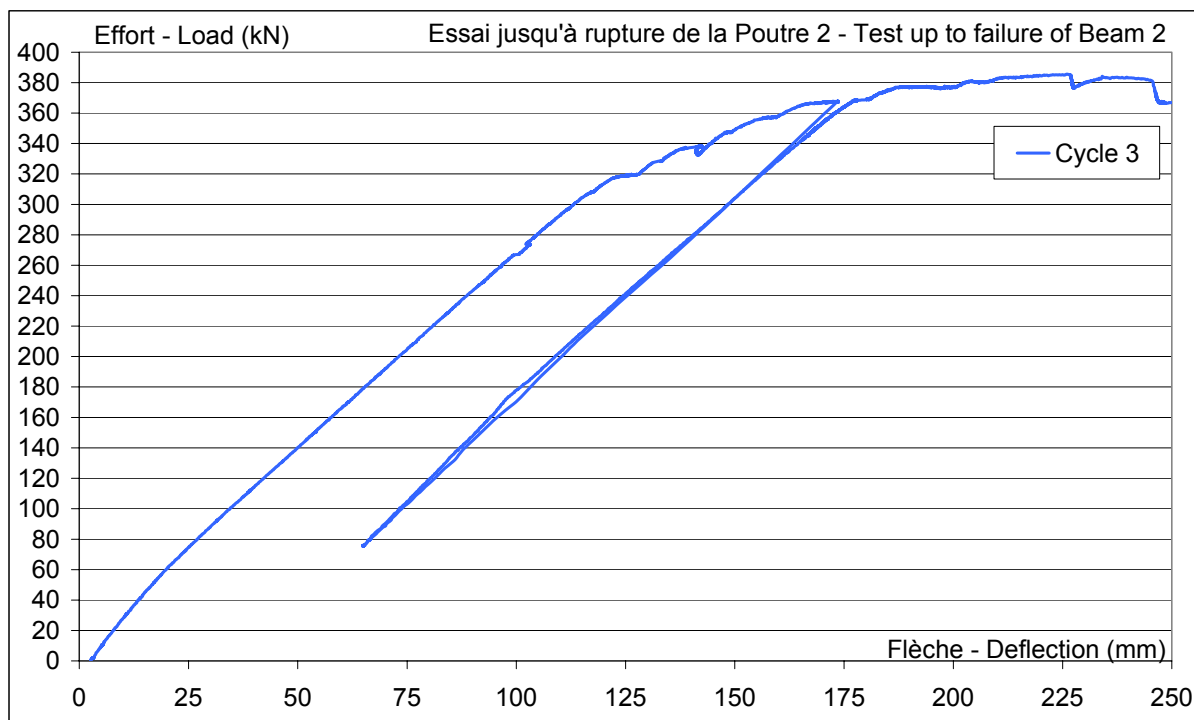


Figure 19: Chargement de la poutre 2 jusqu'à rupture appliqué au quart et aux trois-quarts de la portée.
Loading of Beam 2 up to failure applied at a quarter and at three quarter of the span.

3. CONCLUSIONS

Sans anticiper sur le dépouillement complet du suivi des deux poutres testées, on peut indiquer comme retombée claire de ce programme les résultats suivants :

- faible évolutivité de la flèche une fois le jeune âge du talon béton écoulé, soit après 6 à 8 semaines, confirmant l'intérêt d'un BTHP ;

3. CONCLUSIONS

Even if the extensive processing of measurements is still to be completed, the experiments realised allow concluding to the following points:

- *the evolution of the deflection is low after 6 to 8 weeks corresponding to the early age of the VHPC what confirms its interest;*

- faisabilité de l'optimisation d'une structure préfléchie en utilisant un BTHP;
- faibles évolutions de la rigidité sous des chargements rares ou de fatigue n'atteignant pas la limite de fissuration du béton (dimensionnement de type classe II du BPEL) ;
- réserve importante fournie par le talon béton vis-à-vis d'un état-limite ultime de type instabilité de déversement.

La répétitivité remarquable du fonctionnement des deux poutres donne une grande crédibilité aux résultats obtenus, et le calcul de l'état-limite ultime en considérant la résistance et la stabilité du profilé seul apparaît raisonnablement sécuritaire. En pratique, il semble que l'état-limite de service sera presque toujours dimensionnant pour ce type de structures, compte tenu des contraintes suivantes :

- maîtrise de la déformation différée du béton en limitant la contrainte lors du relâchement de la préflexion, ce qui nécessite de disposer de quantifications précises du fluage et des caractéristiques mécaniques des matériaux employés, notamment au jeune âge ;
- maîtrise de la fissuration, conduisant à imposer l'absence de décompression sous charges permanentes voire sous charges fréquentes, et à limiter les tractions sous charges de service rares.

4. REMERCIEMENTS

Les auteurs ont le plaisir de remercier les nombreux collègues du LCPC qui ont participé à cette étude à savoir les équipes des divisions BCC, MI et SFIOA. Le support du Projet National 'MIKTI' (Ministère de l'Équipement – Réseau Génie Civil et Urbain) est aussi vivement remercié.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Baes L. and Lipski A. (1957), "La poutre Preflex, la décompression du béton enrobant l'aile tendue, le problème du retrait et du fluage", Revue C (Gent), n°1-4, pp.29-49 (in French).
- [2] Staquet S., Rigot G., Detandt H., Espion B., (2004), "Innovative Composite Precast Precambered U-shaped Concrete Deck for Belgium's High Speed Railway Trains", PCI Journal, 49 n°6, pp.94-113.
- [3] Le Roy R. (1996) 'Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances', Etudes et Recherches des LPC, OA 22, LCPC, Paris, 378 pp.
- [4] Mannini C. (2001), 'Etudes des effets différés dans les poutres Preflex', mémoire de projet de fin d'études, ENPC, Paris, 157 pp.
- [5] Staquet S. and Espion B. (2005), 'Deviations from the principle of superposition and their consequences on structural behaviour', Shrinkage and Creep of Concrete" ACI SP-227, pp.67-83.
- [6] Roussel N., Staquet S., D'Aloia L., Le Roy R., Toutlemonde F. (2005), 'SCC casting prediction for the realization of prototype VHPC-precambered composite beams', submitted for publication in Materials and Structures.
- [7] Müller H.S., Küttner C.H., Kvitsel V., « Creep and shrinkage models of normal and high performance concrete-concept for a unified code-type approach », Revue française de génie civil (Paris), vol. 3, n°3-4,1999, pp.113-132.

The remarkable repeatability of the behaviour of the two beams brings a great credibility to the results. The ultimate limit state computation based on the strength and the stability of the single girder seems to be security. Practically, the design is namely always controlled by the serviceability limit state for this kind of structures, due to the following criteria:

- *control of the delayed effects of concrete by limiting the stress during the prestressing, what implies to have accurate data on creep and mechanical properties of the concrete, particularly at early age;*
- *control of cracking implying to keep compression under permanent and even frequent loads and to limit the tension under rare service loads.*

4. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are pleased to thank number of colleagues at LCPC who participated to this study from BCC, MI and SFIOA. The support of the National Project 'MIKTI' (sponsored by the Ministry for Public Works – Civil Engineering R&D funds) is also gratefully acknowledged.

[8] EN 1992-2 : 2005 Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 2 : Ponts en béton – calcul et dispositions constructives, CEN, octobre 2005.

[9] fib-CEB-FIP (1999), Structural Concrete Volume 1, Bulletin fib n°1.

[10] Verwilt Y. (1953) Essais pulsatoires et essai statique à la rupture d'une importante poutre de 14,50m sur l'installation G.I.M.E.D. de l'Association des Industriels de Belgique (A.I.B.), revue « l'Ossature Métallique » (O.M.), n°3, pp. 165-169.