

CONSTRUCTION D'UN PASSAGE SUPERIEUR SUR L'AUTOROUTE A 51 EN CAISSON PRECONTRAIT EN BFUP

Jacques RESPLENDINO, Sébastien BOUTEILLE – CETE de Lyon

Olivier DELAUZUN, Emmanuel MALECO, Céline DUMONT – CBR

Pierre CANTRELLE, Gérard CHANLIAUD, Christian CLERGUE, Yann LINGARD – VICAT

Alain CAPRA, Lionel LINGER – VINCI

Jacques MARTIN – Scetauroute / Groupe EGIS

Marc GUILLOUD - AREA

RÉSUMÉ

L'ouvrage objet du présent article est un pont routier qui franchit l'autoroutier A51, au sud de Grenoble, au droit d'un tronçon mis en service en 2007. Il est réalisé en BCV®, le béton fibré ultra performant (BFUP) développé par le cimentier Vicat et le groupe Vinci. Il a été construit par l'entreprise Campenon Bernard Régions (groupe Vinci) pour le compte de la société AREA maître d'ouvrage.

L'ouvrage est une poutre caisson précontrainte isostatique de 47m40 de portée, réalisée au moyen de 22 voussoirs préfabriqués en BFUP.

Après une description détaillée de la conception de l'ouvrage, l'article présente les essais réalisés dans le cadre des épreuves d'études et de convenance du BFUP.

L'article aborde les principales justifications conduites conformément aux recommandations AFGC-SETRA sur les BFUP, puis présente dans le détail l'ensemble des opérations de préfabrication des voussoirs en BFUP, leur mise en œuvre et assemblage sur le site, jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage.

L'article se termine par une analyse des intérêts de cette solution d'ouvrage, et expose les perspectives d'applications ultérieures.

1. INTRODUCTION

L'ouvrage, objet du présent article, est le passage supérieur n° 34 dit 'Cr de la Chabotte' du projet autoroutier A51, Section Coynelle/Col du Fau. Il est réalisé en BCV®, le BFUP développé par le cimentier Vicat et le groupe Vinci. Il a été construit en 2005 par l'entreprise Campenon Bernard Régions (groupe Vinci) pour le compte de la société AREA maître d'ouvrage, assistée par le bureau d'ingénierie Scetauroute maître d'œuvre et qui assure l'assistance au maître d'ouvrage pour cet ouvrage [7], [8].

La conception du tablier a été réalisé par la Direction Ingénierie et Moyens Techniques de Vinci Construction Grands Projets. Les études d'exécution ont été réalisées par le bureau d'étude COGECI.

L'ensemble du projet et de l'exécution fait l'objet d'un contrôle externe par le CETE de Lyon.

2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est un pont routier isostatique de 47m40 de portée, de type caisson en béton précontraint (fig 1). Il supporte une chaussée de troisième classe de trois mètres de largeur utile.

Le caisson a une hauteur constante égale à 1m60. Le hourdis supérieur a une largeur totale de 4m40 et une épaisseur constante égale à 14 cm. Les âmes et le hourdis inférieur ont une épaisseur constante égale à 12 cm (Fig 2).

Aucun ferrailage passif général n'est mis en œuvre dans les voussoirs courants en BFUP qui sont précontraints longitudinalement par une précontrainte extérieure filante réalisée au moyen de 6 câbles de type 19 T15S.



Fig 1 – Vue générale du PS34 sur l'autoroute A51

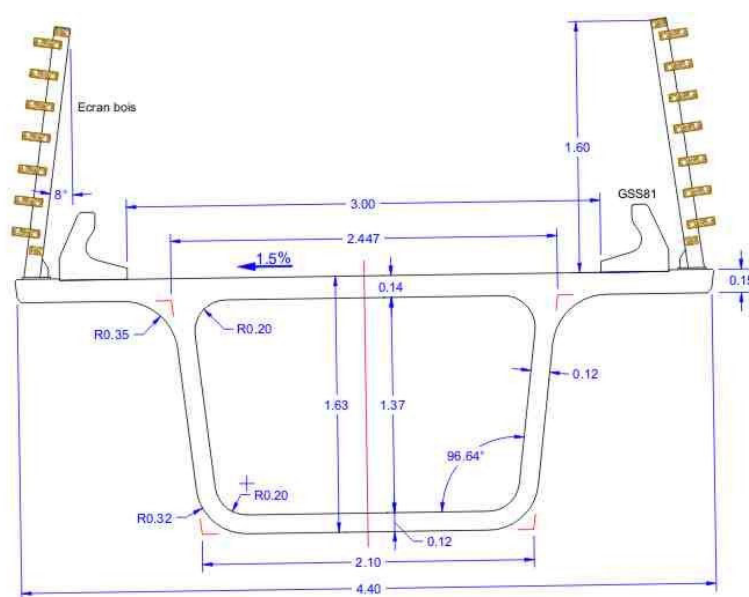


Fig 2 – Section transversale de l'ouvrage

Le tablier est réalisé au moyen de 22 voussoirs préfabriqués réalisés à joints conjugués collés (Fig 3) :

- 18 voussoirs courants ont une longueur de 2m44,
- les déviateurs de la précontrainte extérieure sont réalisés au moyen de deux voussoirs spéciaux de 0m50 de longueur,
- les voussoirs d'about sur culée de 2m04 de longueur ont une géométrie spécifique permettant d'assurer l'ancrage des câbles de précontrainte extérieure.

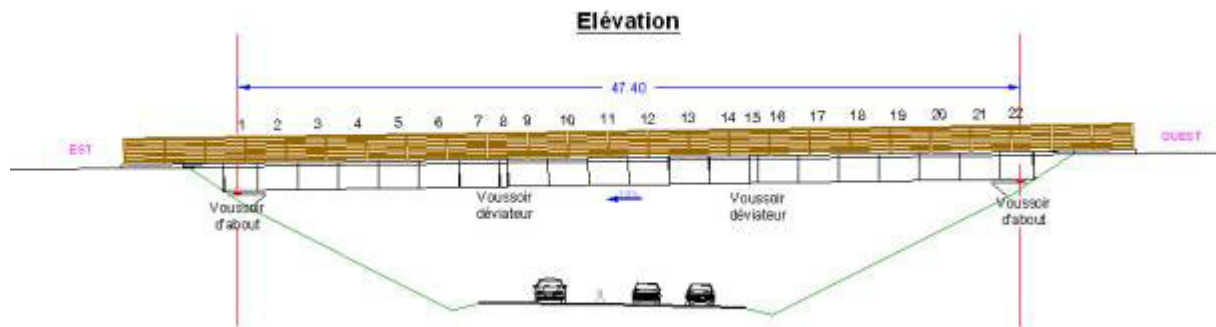


Fig 3 - Coupe longitudinale de l'ouvrage

L'ouvrage est bordé par deux séries de bordures GSS81 complétées par des écrans en bois assurant la protection visuelle nécessaire au passage des cavaliers et du bétail qui empruntent le chemin rural.

Profitant des performances remarquables du BCV® en terme de durabilité, et du fait que les joints conjugués collés entre les éléments sont fortement comprimés, aucune étanchéité ni couche de roulement n'a été mise en œuvre sur l'ouvrage, ce qui est une première pour un pont routier en France.

L'extrados de l'ouvrage est, pour cela, coffré avec une matrice spéciale procurant une grande rugosité nécessaire pour assurer l'adhérence des véhicules.

De faux voussoirs prolongent la forme du caisson jusqu'à rencontrer le talus. Ceux-ci restent démontables pour permettre une intervention ultérieure sur la précontrainte. Un regard permet l'accès à l'intérieur du caisson et l'inspection de la précontrainte.

3. CARACTERISTIQUES DU BCV®

3.1. Caractéristiques générales du BCV®

Les BFUP sont caractérisés par une résistance à la compression comprise entre 150 et 250 MPa. Le Béton Composite Vicat (BCV®), résultant d'une collaboration entre le Groupe Vicat, VINCI Construction Grands Projets et Campenon Bernard Régions, offre une résistance caractéristique à 28 jours comprise entre 130 et 150 MPa.

Les principaux intérêts de ces bétons sont une grande ductilité et une résistance en traction directe moyenne de l'ordre de 12 MPa obtenue grâce à un taux élevé de fibres métalliques très résistantes.

Ces fibres, différentes de celles d'un béton fibré traditionnel (Fig 4), peuvent permettre de se passer d'armatures passives étant donné qu'elles reprennent des contraintes de traction après fissuration de la matrice cimentaire. Elles peuvent être complétées par des fibres polymères (pour l'obtention d'autres propriétés).

La formule de BCV® utilisée pour le PS34 comporte un taux de fibres d'environ 2 % en volume, constitué de deux tailles de fibres différentes : 2/3 de fibres de 20 mm de longueur, 1/3 de fibres de 12 mm de longueur. Aucune fibre polymère n'a été mise en œuvre.



Fig 4 : Vue générale sac de fibres

Les BFUP offrent des performances au jeune âge élevées, de très bonnes caractéristiques physiques, et une excellente durabilité, possible grâce à la grande compacité de la matrice cimentaire (rapport E/C très faible). Pour le BCV®, on peut noter :

- résistance aux chocs - indice CNR - de 75 cm³,
- une grande tenue à l'écaillage et au gel air/dégel eau ou gel eau/dégel eau,
- une faible perméabilité au gaz (inférieure à 10^{-19} m²),
- une diffusion des ions chlorures faible ($3,5 \cdot 10^{-14}$ m²/s).

Cette durabilité est très intéressante en milieu agressif.

Le choix a été fait de ne mettre en œuvre aucun traitement thermique pour le BCV®. Un traitement thermique permet notamment d'accélérer la maturation du béton et de concentrer le fluage et le retrait essentiellement pendant la phase de traitement thermique.

3.2. Résistance en traction du BCV®

Différents essais sont proposés par les recommandations AFGC/SETRA [2] [3] pour caractériser la résistance en traction des BFUP. En effet, les caractéristiques de ces matériaux dépendent de l'orientation des fibres donc du type de structure et de la mise en œuvre : les fibres tendent à s'orienter dans le sens de l'écoulement ou à être parallèles à la paroi au niveau des bords. On distingue les éléments minces et les éléments épais en fonction de leur portée, du rapport entre leur épaisseur et la longueur des fibres.

Les essais s'effectuent sur éprouvettes dont la taille dépend de la longueur des fibres. On peut mesurer la résistance en traction (F_{tj}) de la matrice par un essai en traction directe ou par un essai en traction par flexion (4 points). Ces deux essais se font sur barreau non entaillé. Pour éléments épais, la mesure de la résistance en traction après fissuration, se fait par un essai de flexion 3 points sur un barreau entaillé.

Ces essais permettent d'obtenir les lois de comportement en traction $\sigma - w$ après l'utilisation de la méthode inverse.

Pour le BCV®, dans le cas du PS34 qui ne comporte pas d'éléments minces, la caractérisation du matériau a été réalisée au moyen de :

- trois éprouvettes cylindriques Ø11x22 pour la résistance en compression,
- six éprouvettes 10x10x40 pour essais de traction par flexion 4 points sur éprouvettes non entaillées pour la résistance de la matrice cimentaire F_{tj} ,
- six éprouvettes 10x10x40 pour essais de traction par flexion 3 points sur éprouvettes entaillées pour la résistance post fissuration.

Les principaux résultats obtenus montrent que le BCV® a une résistance caractéristique en traction directe de l'ordre de 8 MPa pour la résistance de la matrice cimentaire F_{tj} , et 8 MPa pour la résistance post fissuration (8 MPa correspondant à la résistance en traction pour une ouverture des fissures de l'ordre de 0,3 mm).

Ces valeurs sont corrigées pour prendre en compte les effets de dispersion liés à la mise en œuvre du béton. Les recommandations AFGC– SETRA définissent pour cela le coefficient K, déterminé par épreuves de convenance. K est le rapport des résultats de traction obtenus à partir de prélèvements issus d'un élément témoin de grandeur réelle, sur les valeurs de traction obtenues avec les éprouvettes de laboratoire.

3.3. Mise en œuvre du BCV®

Le prémix, livré en big-bags, est mélangé à l'eau, aux fibres et aux adjuvants dans un malaxeur classique de centrale à béton ou de préfabrication en adaptant la charge à la puissance de l'appareil. La capacité de malaxage est améliorée par l'utilisation d'un malaxeur possédant un train-vaseur (Fig. 5).

Un contrôle qualité rigoureux, avec des essais plus nombreux que pour un béton traditionnel, est réalisé sur chaque voussoir préfabriqué. Des essais sur BCV® frais servent à contrôler la température à l'intérieur et en surface du béton frais, le pourcentage d'air occlus (inférieur à 5%), la densité (inférieure à 2500 kg/m³). Un test d'étalement est effectué (690 à 750 mm au cône DIN sans chocs, Fig. 6).

Un suivi maturométrique, permet de déterminer la fin de la période dormante du BCV® et donc d'estimer en temps réel le début du desserrage. Des essais sur BCV® durci sont également réalisés pour contrôler la résistance en compression et en traction (voir paragraphe 3.2 précédent), mesurer le module d'élasticité (44GPa) et le retrait.



Fig. 5 : Malaxeur du site de préfabrication de Romagnieu



Fig. 6 : Test d'étalement (sans chocs)

4. ÉTUDES D'EXECUTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage comporte une seule voie de 3 mètres de large. Il a été dimensionné avec des charges routières normales d'un ouvrage de 3^{ème} classe du règlement français de charges des ponts routiers (Fascicule 61 titre II du CPC).

Le dimensionnement du tablier a été réalisé conformément aux Recommandations de l'AFGC Sétra [1][2]. Il intègre les justifications suivantes :

- calcul en flexion longitudinale,
- effort tranchant,
- ancrage de la barrière,
- justifications locales (déviateur, voussoirs sur culée).

Le dimensionnement dans le cadre des études d'exécution est réalisé par le bureau d'étude COGECI (Lyon). L'ouvrage a fait l'objet d'une modélisation spatiale complète aux éléments finis à l'aide du logiciel Effel. Un modèle local aux éléments finis avec le logiciel Hercule a permis de calculer les voussoirs d'about.

L'ouvrage comporte une seule voie de 3 mètres de large. Il a été dimensionné avec des charges routières normales d'un ouvrage de 3^{ème} catégorie.

Vis-à-vis du comportement en flexion longitudinale, la présence de joints conjugués collés oblige à dimensionner l'ouvrage en compression totale, de façon à éviter toute décompression aux Etats Limites de Service. La compression moyenne à vide est de l'ordre de 25 MPa, la compression maximale à la mise en tension atteint 55 MPa. La compression minimale au droit du hourdis supérieur est supérieure à 10 MPa.

A l'Etat Limite Ultime, l'ouvrage est très légèrement décomprimé de telle sorte que la capacité en cisaillement sous la section comprimée résiduelle reste suffisante.

En flexion transversale, les efforts engendrés par les essieux des convois réglementaires de 30 tonnes, et la roue de 10 tonnes provoquent des tractions qui ne sont reprises que par la capacité de résistance en traction du BFUP.

Lors de la conception, il est ainsi nécessaire de choisir une valeur du coefficient K en amont puisque, à ce stade, aucun élément de taille réelle n'existe. Les recommandations AFGC donnent une idée des valeurs qu'il est possible d'adopter en première hypothèse compte tenu des résultats obtenus notamment sur les ouvrages de Bourg-Lès-Valence [4][5][6]. De ce coefficient dépend le prédimensionnement de la structure à partir duquel il est possible de fabriquer un élément témoin pour réaliser les épreuves de convenance.

Les épreuves de convenance réalisées a posteriori permettent alors de valider les méthodes de mise en œuvre, et de confirmer que les valeurs des résistances réellement obtenues sont bien supérieures aux valeurs requises dans les calculs initiaux.

Les voussoirs d'about présentaient de fortes concentrations de contraintes de traction (liées à l'introduction de la précontrainte) sur un modèle éléments finis alors qu'un calcul manuel ne nécessitait pas de ferrailage supplémentaire. Ces voussoirs sont, par ailleurs, l'objet de gradients thermiques élevés en cours de prise. Il aurait fallu réaliser un élément test pour valider un des deux modèles mais il a été choisi de mettre directement en place un ferrailage passif spécifique pour reprendre les efforts donnés par le modèle éléments finis, en supposant par sécurité une résistance en traction très réduite du BCVR®.

La méthode de coulage nécessite également réflexion. Une méthode traditionnelle aurait consisté à mettre en œuvre le béton à la goulotte en déplaçant la goulotte pour éviter tout écoulement du BFUP, et favoriser une orientation anisotrope des fibres. Cette méthode présente l'inconvénient d'être très liée à l'opérateur et nécessite des procédures de suivi et de contrôle très poussées.

Dans le souci de mettre au point une méthode plus systématique et reproductible, l'entreprise a souhaité pour les voussoirs courants, injecter le béton en un point donné (milieu du hourdis supérieur), en testant diverses méthodes d'injection (à la pompe, à la goulotte, ...). Ces méthodes présentent l'inconvénient d'orienter les fibres suivant les écoulements et de provoquer un front de flux à l'opposé du point d'injection (milieu du hourdis intermédiaire).

Au niveau du front de flux, des techniques de mélange en place ont été testées mais écartées, ne donnant pas des résultats positifs et étant difficiles à mettre en œuvre, au profit d'un ferrailage de couture.

5. RÉALISATION DES ÉPREUVES DE CONVENANCE

Au niveau des épreuves de convenance, l'entreprise a engagé une campagne importante pour valider les diverses formulations possibles, valider les matrices de coffrage envisageables pour les divers parements, examiner les méthodes de mise en œuvre du béton (à la goulotte fixe ou mobile, à la pompe), et ainsi pouvoir déterminer le coefficient d'orientation K des fibres.

Dans l'attente de la confection des coffrages définitifs, plusieurs panneaux et mini voussoirs d'essais ont été réalisés (Fig 7).



Fig. 7 : Panneaux et mini voussoir d'essais

Les parements des voussoirs du PS34 sont innovants en texture. Une matrice imitation bois a été choisie pour les faces extérieures des âmes et du hourdis inférieur et un aspect granuleux pour le hourdis supérieur qui fait directement office de chaussée sans étanchéité ni revêtement supplémentaire (Fig. 8). La matrice polypropylène est recouverte de cire pour permettre un décoffrage aisé. Les BFUP donnent des états de surface remarquables si le coffrage est sans défaut. Par contre, la moindre imperfection au niveau de la matrice se retrouve sur le parement du béton, les BFUP reproduisant fidèlement les plus petits détails.



Fig. 8 : Matrice bois et matrice rugueuse d'extrados

Deux voussoirs d'essai de grandeur réelle ont ensuite été confectionnés pour valider la valeur du coefficient K à prise en compte dans les calculs (Fig 9).

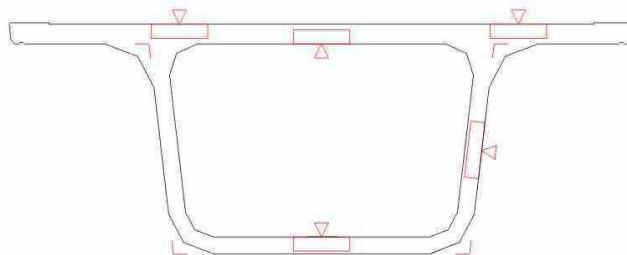


Fig. 9 : Voussoir d'essais en vraie grandeur et position des prélèvements (les flèches indiquent les faces testées lors des essais de flexion)

6. FABRICATION DE L'OUVRAGE

6.1. Préfabrication des voussoirs

Les 22 voussoirs, parmi lesquels deux voussoirs déviateurs, deux voussoirs sur culées et deux voussoirs garde-grève sont réalisés dans l'usine de préfabrication de l'entreprise Campenon Bernard Régions à Romagnieu (Isère) qui est équipée d'une unité de malaxage de grande puissance spécialement adaptée aux BFUP.

Chaque voussoir est coulé verticalement sur le voussoir adjacent (fig 10).

La fabrication commence par le voussoir situé au centre de l'ouvrage, ce qui permet de progresser vers les voussoirs d'extrémité avec deux postes de bétonnage distincts.

Toutes les faces sont coffrées. Un système spécial de vérins et de bielles a été conçu pour permettre un décoffrage aisé du coffrage central.

Le rythme moyen est de 48 heures pour réaliser un voussoir. Même si le coulage est très rapide (40 minutes), la période latente du BCV® ne permet pas un rythme beaucoup plus élevé, d'autant plus qu'il faut préparer les coffrages suivants avec les joints pour le voussoir conjugué.



Fig 10 : Fabrication des voussoirs

6.2. Mise en œuvre sur le site

Après l'étape de la préfabrication, les voussoirs sont transportés sur le site sur une plateforme d'assemblage préparée le long de la plateforme autoroutière. Ils sont collés et assemblés entre eux, par une précontrainte provisoire. Une fois l'ensemble des voussoirs assemblé, la précontrainte définitive (six câbles 19T15) est mise en œuvre et permet le décollage du tablier de son banc d'assemblage (Fig 11).

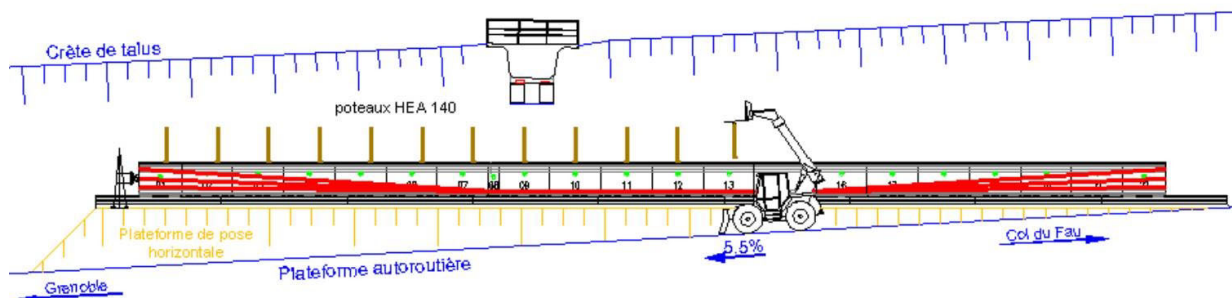


Fig. 11 : Mise en œuvre de la précontrainte extérieure

L'ouvrage est ensuite mis en place à la grue directement sur ces appuis définitifs. Ce système évite l'utilisation d'étais et le travail en hauteur mais n'est envisageable que parce que l'ouvrage est suffisamment léger (195 tonnes).

La mise en place à la grue a été réalisée le 15 décembre 2005 (Fig 12).

Les seules opérations restant alors sont, le calage supérieur des appareils d'appuis par injection, la pose des voussoirs d'extrémité, la réalisation des joints de chaussée et l'achèvement de la pose des équipements dont la majeure partie a été mise directement avant le levage à la grue.



Fig. 12 : Mise en place à la grue

7. CONCLUSION – INTÉRÊT DE LA SOLUTION EN BFUP

Par rapport à un passage supérieur classique, les solutions en BFUP procurent un gain important sur les quantités de matériaux (division par 2 à 3 des quantités de béton du tablier).

Ces solutions peuvent permettre de supprimer certains appuis intermédiaires ce qui peut présenter un intérêt sur l'aspect esthétique (cas du PS34) et supprimer les risques de chocs de véhicule sur pile. De même l'allègement du tablier peut être intéressant en cas de conditions géotechniques difficiles, ou dans des zones de forte sismicité.

Le recours à la préfabrication permet de limiter l'utilisation des étalements ce qui diminue les problèmes classiques de sécurisation au montage/ démontage.

Au niveau économique, ces solutions deviennent intéressantes si on amortit les outils et processus de préfabrication sur deux ou trois ouvrages du même type, ce qui permet de baisser le coût du matériau employé dans une logique de production industrielle.

Le dernier intérêt et pas un des moindres est bien sûr la durabilité de l'ouvrage qui est largement accrue grâce aux performances du matériau BFUP, sous réserve bien sûr d'apporter tout le soin nécessaire à la conception et à la réalisation des zones de clavage entre les éléments préfabriqués.

RÉFÉRENCES

- [1] AFREM – BFM (1995) Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenance et de contrôle. Eléments de structures fonctionnant comme des poutres, décembre 1995
- [2] 'Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances', Recommandations provisoires, Association Française de Genie Civil, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Janvier, 2002.
- [3] CHANVILLARD G., Characterisation of fibre reinforced concrete mechanical properties : a review, conférence plénière, Fifth International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concretes, BEFIB'2000, Ed. P. Rossi and G. Chanvillard, Lyon, pp. 29-50
- [4] Resplendino J., Roy J.M., Petitjean J., Blondeau P., Hajar Z., Simon A., Thibaux T., "Ouvrages innovants de Bourg-lès-Valence", *Revue Travaux*, No.783, pp. 42-47
- [5] Thibaux T., Tanner J.A., "Construction des premiers ponts français en béton fibré à ultra hautes performances/construction of the first french road bridges in ultra high performance concrete", in *La technique française du Béton*, AFGC, The first fib congress 2002, Osaka 2002
- [6] Hajar Z., Simon A., Lecointre D., Petitjean J., "Construction of the first road bridges made of UHPC", 3rd International Symposium on HPC, Orlando 2003
- [7] J.Resplendino, S. Bouteille « Les derniers développements dans l'utilisation des Bétons Fibrés Ultra Performants en France », congrès AFGC GC2005, Paris (2005).
- [8] Jacques Resplendino, Sébastien Bouteille, Olivier Delauzun, Emmanuel Maleco, Céline Dumont, Pierre Cantrelle, Gérard Chanliaud, Christian Clergue, Yann Lingard, Alain Capra, Lionel Linger, Jacques Martin, Marc Guilloud « Construction of an overpass on the A51 Motorway, made of a prestressed box beam built with UHPFRC », in the French technologie of concrete, AFGC, The second fib congress, Naples (2006).