

TABLIERS DE PONTS RÉALISÉS EN BÉTON FIBRÉ ULTRA PERFORMANT (BFUP) ET EN MATÉRIAU COMPOSITE (FIBRE DE VERRE)

Jacques RESPLENDINO, Sébastien BOUTEILLE

Centre Technique de l'Équipement de Lyon (CETE Lyon)

RÉSUMÉ

Le présent article présente des résultats d'études réalisées dans le cadre du projet européen NR2C (New Road Conception Concept). L'objectif des travaux effectués dans le cadre du projet est la recherche de solutions futuristes d'ouvrages utilisant au mieux les matériaux nouveaux, dans une logique de durabilité et développement durable.

Les études d'objets du présent article concernent la recherche de solutions de tabliers de pont réalisés en Béton Fibré Ultra Performant, en matériaux composites (fibre de verre) et en acier.

Après une présentation des hypothèses retenues pour les caractéristiques des matériaux et les données géométriques et fonctionnelles des ouvrages étudiés, l'article présente les principaux modèles de calculs élaborés pour la reprise des efforts généraux, et le fonctionnement transversal et local des structures étudiées.

Pour chaque solution étudiée (10 et 25 mètres de portée), l'article présente la démarche retenue pour obtenir les caractéristiques optimisées des solutions innovantes, les modes de réalisation et d'assemblage envisagés, ainsi que le coûts de réalisation des ouvrages dans la logique économique d'aujourd'hui.

Pour conclure, il expose des pistes de recherches qu'il conviendrait de poursuivre dans la logique des travaux réalisés.

1. CADRE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet européen NR2C (New Road Conception Concept). L'objectif des travaux effectués dans le cadre du projet est la recherche de solutions futuristes d'ouvrages utilisant au mieux les matériaux nouveaux, dans une logique de durabilité et développement durable.

Les études d'objets du présent article concernent la recherche de solutions de tabliers de pont réalisés en Béton Fibré Ultra Performant, en matériaux composites (fibre de verre) et en aciers actifs et/ou passif.

L'étude porte sur deux types de structures : soit des ouvrages de 10 mètres de portée permettant la réalisation de petits franchissements, soit des tabliers de 25 mètres de portée correspondant à une demi longueur de passage supérieur sur infrastructure autoroutière.

Les ouvrages étudiés supportent une chaussée à deux voies de circulation et sont soumises aux charges routières de l'Eurocode (EN 1991-2).

2. HYPOTHÈSES GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE

2.1. Profil en travers et équipements des ouvrages

Les structures étudiées portent une chaussée de 7,5m de largeur bordée par deux trottoirs de 1m de largeur utile. Le profil en travers est à pente unique (Fig 1).

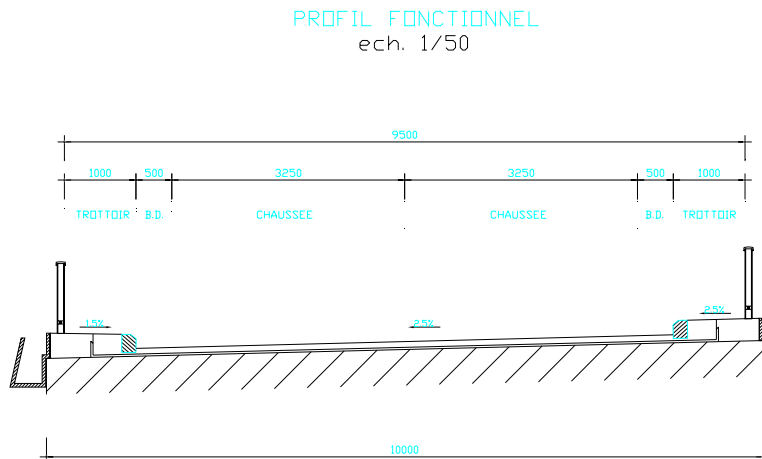


Fig 1 – Profil fonctionnel des ouvrages étudiés

Pour calculer le poids des charges permanentes, la dalle de roulement est supposée revêtue d'un complexe chape d'étanchéité, couche de roulement de 11 centimètres d'épaisseur.

Les trottoirs ont une épaisseur d'environ 30cm. L'ouvrage est équipé de garde corps et d'une corniche caniveau supposée remplie d'eau chargées en boues.

2.2. Hypothèses sur les charges

2.2.1. Charges permanentes

Le poids nominal des superstructures ressort à environ 4,53 t/m, pour des valeurs maximales et minimales respectives de 5,69 t/m et 3,98 t/m.

2.2.2. Charges d'exploitation

L'ouvrage est supposé soumis à la classe de trafic 2 de l'EN 1991-2.

On applique sur l'ouvrage les systèmes de charge LM1 et LM2.

2.2.3. Charges thermiques :

Dans les solutions entièrement en BFUP, on prend un gradient thermique de 15°C. Dans les solutions mixtes dalle BFUP-matériau composite ou acier, on prend une dilatation différentielle entre les deux matériaux de +/-10°C.

2.3. Combinaisons d'actions

Elles sont prises conformes aux prescriptions de l'Eurocode.

Si on note les actions permanentes favorable et défavorable par G_{min} et G_{max} , les charges d'exploitation regroupant le tandem TS et la charge répartie UDL par $gr1$, l'action de la température par T , on prend comme combinaisons de charges les combinaisons définies ci-dessous :

ELU : $1,35 G_{max} + G_{min} + \text{MAX}\{(1,35gr1) \text{ et } (1,5T + 1,35(0,75TS + 0,4UDL))\}$

ELS Caractéristique : $G_{max} + G_{min} + \text{MAX}\{(gr1 + 0,6T) \text{ et } (T + 0,75TS + 0,4UDL)\}$

ELS Fréquent : $G_{max} + G_{min} + \text{MAX}\{(0,6T) \text{ et } (0,5T+0,75TS+0,4UDL)\}$

ELS Quasi-permanent : $G_{max} + G_{min} + 0,5T$

2.4. Hypothèses sur les matériaux

2.4.1. BFUP

Les caractéristiques mécaniques prises en compte pour les BFUP, conformément aux prescriptions des recommandations AFGC SETRA [1] sont données ci-dessous.

Résistance caractéristique à la compression à 28j	150MPa
Résistance caractéristique à la traction directe de la matrice cimentaire à 28j : F_{t28}	8MPa
Résistance caractéristique à la traction directe post fissuration à 28j : σ_{bt}	8MPa
Module d'élasticité E	50 000MPa
Coefficient de poisson	0.2
Coefficient de dilatation thermique	$1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/m/}^{\circ}\text{C}$
Retrait endogène Non pris en compte dans le cas de solutions préfabriquées post tendues	3 à $4 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$
Retrait de dessiccation	$1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$ sans TT 0m/m si TT
Fluage	$\Phi=0.8$ sans TT $\Phi=0.2$ si TT

TT : Traitement thermique

2.4.2. Matériau composite

Les caractéristiques prises en compte pour les matériaux composites multicouches de type fibre de verre+résine sont rappelées ci-dessous.

Masse volumique	1.15 t/m^3
Module	25 000MPa
Contrainte à la rupture	500MPa
Allongement à la rupture	2.1%

2.4.3. Précontrainte

Pour la précontrainte de type extérieure, on utilise des câbles composés de torons T15S de classe 1860.

2.5. Principaux modèles de calculs réalisés

Tous les calculs de structure ont été conduit à l'aide du logiciel ST1 du SETRA. La vérification des efforts dans les sections en BFUP a été réalisée conformément aux dispositions des recommandations AFGC-SETRA à l'aide du logiciel INCA.

Pour les structures entièrement précontraintes, les calculs de conception ont fait l'objet de deux modèles successifs permettant d'affiner la conception :

- Un premier modèle 2D permet de dimensionner l'inertie principale de la dalle et le câblage à mettre en œuvre. Dans ce modèle, on prend en compte le comportement transversal sur la base des coefficients de majoration transversale issus de la méthode de Guyon Massonnet,

- Un modèle 3D permet ensuite de vérifier le comportement transversal, de dimensionner les nervures transversales, et de vérifier les coefficients de majoration transversale utilisés en première approche.

Pour les solutions de types poutres échelles et poutres treillis, les calculs ont fait l'objet de trois modèles successifs :

- un modèle ST1 2D en section homogénéisée. Ce modèle permet de valider les caractéristiques globales de la section et les flèches sous charges variables,
- un modèle ST1 2D en poutre échelle ou poutre treillis permet de dimensionner les montants et valider la conception des zones échancrées de la dalle,
- un modèle 3D permet de dimensionner les éléments transversaux et valider la conception générale proposée.

3. SOLUTIONS DE TABLIER POUR UNE PORTÉE DE 10 MÈTRES

3.1. Solution de dalle BFUP précontrainte

3.1.1. Caractéristiques géométriques

La structure étudiée est une dalle gaufree en Béton Fibré à Ultra-hautes Performances (BFUP) précontrainte, réalisée au moyen de nervures longitudinales et transversales dans un maillage de 60cm x 60cm.

La dalle de roulement a une épaisseur de 5cm. Les nervures longitudinales ont une épaisseur moyenne de 8cm, et une hauteur totale de 47,5cm. Les nervures transversales ont une épaisseur de 8,5cm et une hauteur totale de 38cm.

La section transversale de l'ouvrage a été dimensionnée afin d'obtenir des flèches en flexion principale de l'ordre de $1/350^{\text{ème}}$ de la portée à l'ELS caractéristique.

Le tablier est précontraint longitudinalement au moyen de câbles extérieurs composés d'unités 12T15S filant entre les nervures longitudinales.

L'ouvrage étant soumis à des charges permanentes peu importantes, le câblage est positionné sensiblement à la limite inférieure du noyau central de la section, ce qui permet de limiter l'effort de précontrainte nécessaire pour reprendre les efforts à l'Etat Limite Ultime, tout en évitant un excès de précontrainte dans l'ouvrage à vide.

Les câbles sont rectilignes, ou légèrement déviés pour faciliter leur ancrage aux extrémités, et améliorer la reprise de l'effort tranchant.

3.1.2. Modes d'assemblage de la structure

Deux modes d'assemblage ont été étudiés.

3.1.2.1. Réalisation de joints transversaux

Le tablier est réalisé au moyen de quatre éléments préfabriqués réalisés en pleine largeur (fig 2). Le BFUP ne reprenant aucune traction au droit des joints transversaux, la précontrainte longitudinale garantit une compression totale entre les éléments.

Avec cette conception, le nombre de câbles de précontrainte est de 12 câbles 12T15S.

Par contre, les éléments préfabriqués en pleine largeur permettent de reprendre les efforts de flexion transversale avec les fibres du BFUP de telle sorte qu'aucune armature transversale passive ou active n'est nécessaire dans les nervures transversales.

Au niveau constructif l'inconvénient de cette solution est de nécessiter :

- soit la mise en oeuvre d'un cintre permettant de soutenir les éléments préfabriqués avant leur assemblage par précontrainte extérieure,
- soit l'assemblage du tablier sur une aire extérieure à l'ouvrage et sa pose en un seul tenant à la grue, solution possible car l'ouvrage pèse moins de 50 tonnes.

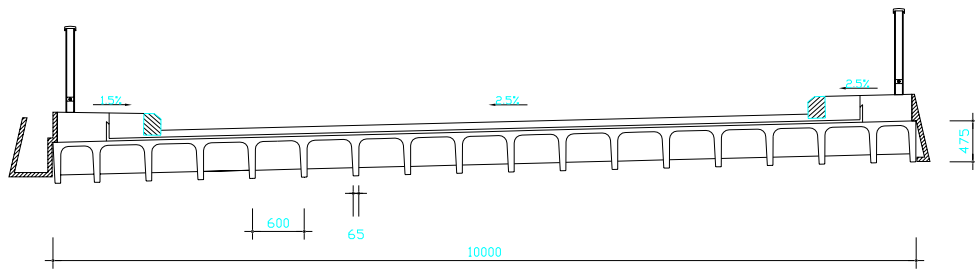
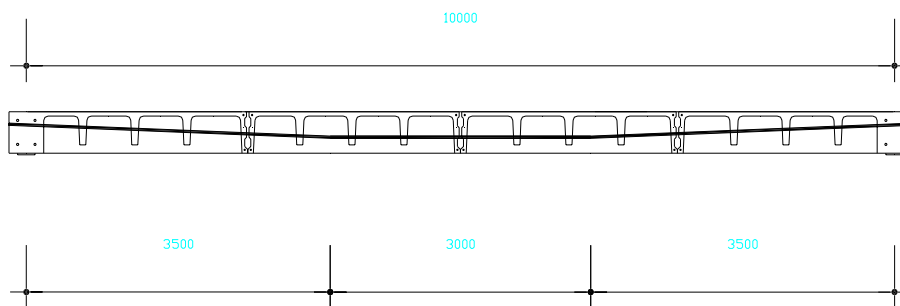


Fig 2 – Coupe transversale - solution 10m - BFUP précontraint avec joints transversaux



*Fig 3 – Solution 10m - BFUP précontraint avec joints transversaux
Coupe longitudinale et élévation du câblage*

3.1.2.2. Réalisation de joints longitudinaux

Dans cette solution, on préfabrique des poutres de 10m de longueur et de 1m80 ou 2m30 de largeur. Le clavage longitudinal entre les poutres est réalisé au droit de nervures longitudinales spécifiques munies des clés (fig 4). Cette solution permet de mobiliser la résistance du BFUP en traction pour la reprise des efforts de flexion longitudinale ce qui permet de réduire le nombre de câbles longitudinaux à 8 unités 12T15S.

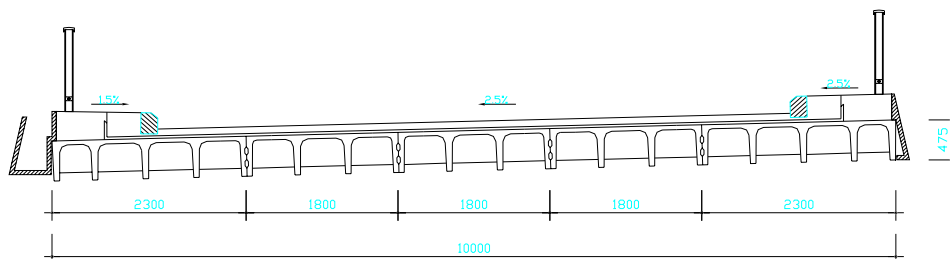


Fig 4 – Coupe transversale - solution 10m - BFUP précontraint avec joints longitudinaux

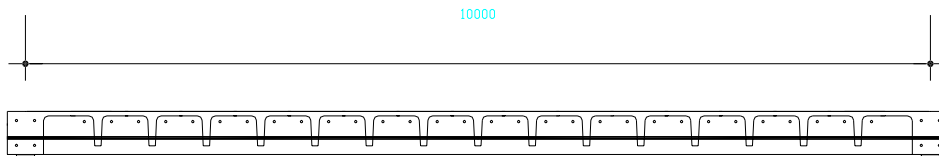


Fig 5 – Solution 10m - BFUP précontraint avec joints longitudinaux - Coupe longitudinale avec élévation du câblage et vue de la précontrainte transversale.

Par contre, cette solution impose le recours à une précontrainte ou à des armatures transversales aptes à reprendre les efforts de flexion dans les nervures transversales au droit des joints longitudinaux.

Pour la reprise des efforts de flexion transversale, il est ainsi nécessaire :

- soit de disposer une précontrainte transversale extérieure constituée d'environ 2*3T15S par nervure (précontrainte totale centrée – fig 5),
- soit de réaliser des clavages en acier passifs constitués pour chaque nervures transversale de 4 Φ 8 dans la surdalle et 2 Φ 16 dans l'âme (fig 6).

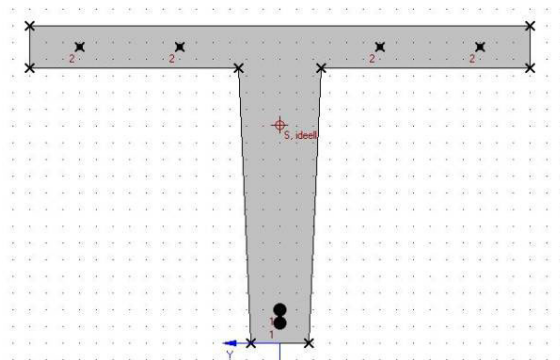


fig 6 : Coupe transversale au droit d'un clavage passif de nervure transversale.

Au niveau constructif, l'avantage de cette solution est de permettre la mise en place des poutres directement sur leurs appuis définitifs, avant la réalisation des clavages transversaux.

Elle évite ainsi toute sujétions de cintre, et permet la réalisation de l'ouvrage in situ dans des délais très réduits.

Pour la solution entièrement précontrainte (précontrainte longitudinale et transversale) le gain sur la précontrainte longitudinale réalisé grâce à la participation du BFUP en flexion longitudinale, est largement compensé par la précontrainte transversale qui conduit au final à un taux de précontrainte supérieur.

3.1.3. Économie globale de ces solutions

Ces solutions s'avèrent extrêmement performantes sur le plan de l'économie des matériaux. L'épaisseur équivalente de dalle est d'environ 16,4cm, ce qui conduit à un volume de BFUP de 17m³, pour une quantité de précontrainte d'environ 1700 kg.

Avec les conditions économique d'aujourd'hui, le tablier ressort à environ 510€TTC/m² hors équipements.

3.2. Dalle BFUP gaufree-échancree et matériau composite

3.2.1. Caractéristiques géométriques

La structure étudiée est une dalle gaufree en BFUP associée à de la fibre de verre (sous forme de plaques de 0.03m d'épaisseur) qui reprend les efforts de traction en fibre inférieure.

La dalle de roulement a une épaisseur de 5cm. Les nervures longitudinales et transversales sont disposées dans un maillage de 60cm x 60cm. Les nervures longitudinales sont échancrées. Elles ont une épaisseur moyenne de 15cm, et une hauteur totale de 53,5cm. Les nervures transversales ont une épaisseur de 8,5cm et une hauteur totale de 38cm.

La dalle n'étant pas précontrainte, on échancre les nervures longitudinales pour limiter la traction dans les BFUP des nervures, et on lie la fibre de verre aux nervures longitudinales par des montants qui permettent un fonctionnement en poutre échelle de la structure.

Le module d'élasticité de la fibre de verre étant relativement faible, on est obligé d'augmenter la hauteur des nervures longitudinales pour respecter les conditions de flèches à l'ELS. Par ailleurs, si on veut limiter la hauteur des sections à des valeurs raisonnables compte tenu des sujétions liées à la hauteur des montants, on ne peut pas faire travailler le matériau composite de façon satisfaisante. Ce dernier est dimensionné essentiellement pour des conditions de raideur. La traction dans la fibre de verre reste faible (40 MPa à l'ELS, 54 MPa à l'ELU).

En première approche la conception des échancrures est telle qu'au droit de la zone échancrée le béton des nervures est disposé au-dessus du centre de gravité de la section mixte. Mais le fonctionnement réel de la structure est complexe et il faut tenir compte de plusieurs paramètres pour obtenir un dimensionnement satisfaisant.

En effet, dans les 'montants', l'effort tranchant est important et provoque de la flexion ainsi que des efforts parasites dans les nervures longitudinales. Compte tenu de ces efforts parasites, on constate que la dimension des nervures longitudinales passe par un optimum :

- en dessous d'une certaine hauteur de nervure, la flexion locale entre les montants associée aux efforts parasites provenant des montants engendre des efforts inadmissibles dans les nervures,
- au dessus d'une certaine hauteur c'est la présence de béton en dessous du centre de gravité de la section mixte qui provoque des efforts inadmissibles sous les efforts de flexion générale de la dalle.

De plus, si on choisit une connexion par collage entre les deux matériaux, il faut avoir une surface suffisante pour limiter la contrainte de cisaillement à 2 MPa environ.

Après optimisation de tous ces paramètres, on obtient une géométrie des montants de 0.40m pour la longueur, ces derniers ayant la largeur des nervures soit 0.150m. La hauteur totale des nervures longitudinales varie de 0.535 à 0.20m dans les zones échancrées.

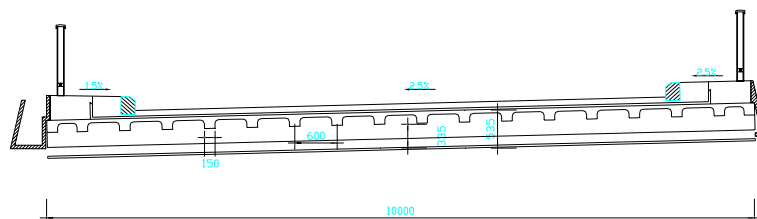


Fig 7 – Coupe transversale - solution 10m - Dalle BFUP gaufree-échancree et matériau composite

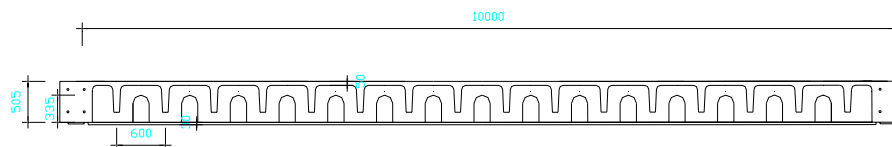


Fig 8 – Coupe longitudinale - solution 10m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et matériau composite

3.2.2. Mode d'assemblage de la structure

La présence de tractions dans toutes les sections des nervures longitudinales en BFUP, rendent difficile avec cette solution la réalisation de clavages transversaux, donc la réalisation du tablier par l'assemblage de plusieurs éléments préfabriqués en pleine largeur.

La solution proposée est la préfabrication de quatre à cinq poutres de 10m de longueur, assemblées au droit de joints longitudinaux, constitués entre les nervures longitudinales (fig 9).

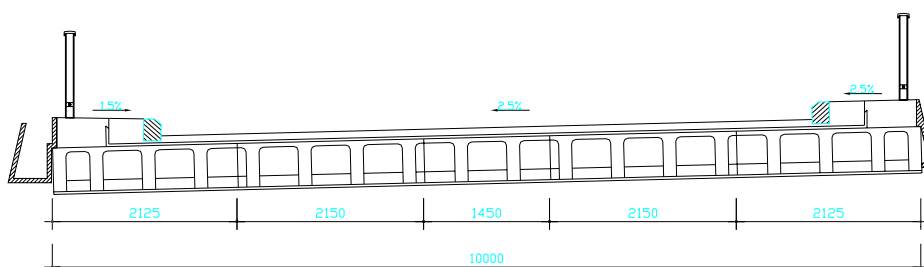


Fig 9 –Solution 10m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et matériau composite
Positions possibles des joints longitudinaux

Cette solution impose le recours à une précontrainte ou à des armatures transversales aptes à reprendre les efforts de flexion dans les nervures transversales au droit des joints longitudinaux. Les dispositions requises sont analogues à celles décrites pour les assemblages longitudinaux des solutions précontraintes, à savoir :

- soit mise en œuvre d'une précontrainte transversale extérieure constituée d'environ 2*3T15S par nervure (précontrainte totale centrée),
- soit réalisation de clavages en acier passifs constitués pour chaque nervures transversale de 4 Φ 8 dans la surdalle et 2 Φ 16 dans l'âme (fig 6).

3.2.3. Économie globale de ces solutions

Ces solutions sont beaucoup moins performantes que les précédentes vis-à-vis de l'économie des matériaux.

En effet, l'augmentation de la hauteur des sections associée aux renforcements des nervures longitudinales liés au fonctionnement en poutre échelle conduit à augmenter sensiblement les quantités de BFUP. L'épaisseur équivalente passe ainsi de 14,6cm à 19,3cm.

La quantité de fibre de verre mise en œuvre est également importante (3450kg) et conduit dans les conditions économique d'aujourd'hui à un coût de tablier hors équipements égal à environ 750€TTc/m², soit un surcoût de 50% par rapport à la solution BFUP entièrement précontraint.

3.3. Dalle BFUP gaufree-échancrée et semelles en acier

3.3.1. Caractéristiques géométriques

La structure étudiée est du même type que la solution précédente mais des plaques d'acier, en semelle inférieure des poutres longitudinales, se substituent au matériau composite. L'acier a un module d'élasticité beaucoup plus important qu'un matériau composite à base de fibre de verre (210 GPa contre 25GPa), ce qui permet de modifier sensiblement la géométrie de la dalle en BFUP et de gagner de la matière.

De plus, par rapport à la solution précédente, la connexion entre les deux matériaux est différente.

Elle est assurée par des goujons et une pénétration du béton dans l'acier, ce qui permet d'optimiser la géométrie des montants en vue d'obtenir une contrainte de traction par flexion constante sur leur hauteur égale à environ 15 MPa (fig 11).

Après optimisation de ces solutions, on obtient les caractéristiques suivantes : les plaques d'acier ont une épaisseur de 0,03m et une largeur de 0,30m. La hauteur totale de la structure est de 0,41m (fig 11). Les nervures longitudinales ont une hauteur totale de 38cm, et une épaisseur de 0,10m. Les montants ont une hauteur de 0,135m et une longueur qui varie de 0,12m à 0,33m (fig 12).

Pour des raisons architecturales et mais aussi de protection contre les agressions extérieures, on peut fermer la structure par une plaque disposée sous les semelles en acier.

De même que pour les solutions avec fibre de verre, la section des semelles en acier est dimensionnée par les conditions de rigidité, et l'acier ne travaille pas complètement de façon optimale. La contrainte dans l'acier atteint 115 MPa à l'ELU, 85 MPa à l'ELS.

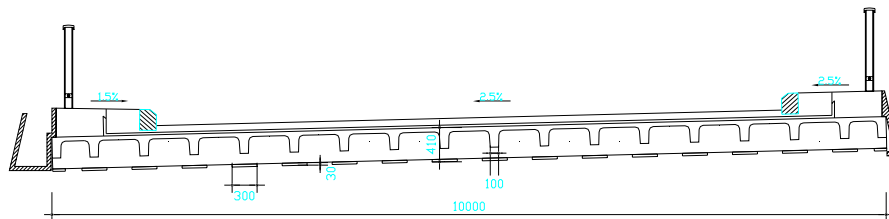


Fig 10 – Coupe transversale - solution 10m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et semelles en acier

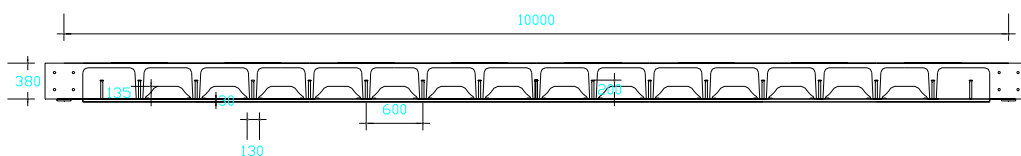


Fig 11 – Coupe longitudinale - solution 10m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et semelles en acier

3.3.2. Mode d'assemblage de la structure

Le mode d'assemblage de ces solutions est analogue à celui des dalle gauffrée-échancrée et matériaux composite.

Le tablier est réalisé au moyen de quatre à cinq poutres préfabriquées de 10m de longueur, assemblées au droit de joints longitudinaux, constitués entre les nervures longitudinales (fig 9).

3.3.3. Économie globale de ces solutions

Ces solutions sont intermédiaires entre les solutions entièrement précontraintes et les solutions avec matériau composite. L'épaisseur équivalente de BFUP est d'environ 15,7 cm. La quantité d'acier de charpente nécessaire est d'environ 12000kg.

Dans les conditions économiques d'aujourd'hui ces solutions conduisent à un coût de tablier hors équipements d'environ 670 € TTC/m².

4. SOLUTIONS DE TABLIER POUR UNE PORTÉE DE 25 MÈTRES

4.1. Solution de dalle BFUP précontrainte

4.1.1. Caractéristiques géométriques

La structure étudiée est une dalle nervurée en Béton Fibré à Ultra Haute Performance (BFUP).

Elle comporte une surdalle de 0.08m d'épaisseur qui repose sur des nervures longitudinales d'entraxe 1m, d'épaisseur d'âme 0.1m et de hauteur d'âme 0.97m, et sur des nervures transversales d'entraxe 1m, d'épaisseur d'âme 0.1m et de hauteur d'âme 0.5m.

Cette géométrie a été obtenue en veillant à ne pas descendre en dessous de $1/350^{\text{ème}}$ de la portée pour la flèche sous charges variables, mais aussi pour limiter la quantité de précontrainte longitudinale à mettre en œuvre.

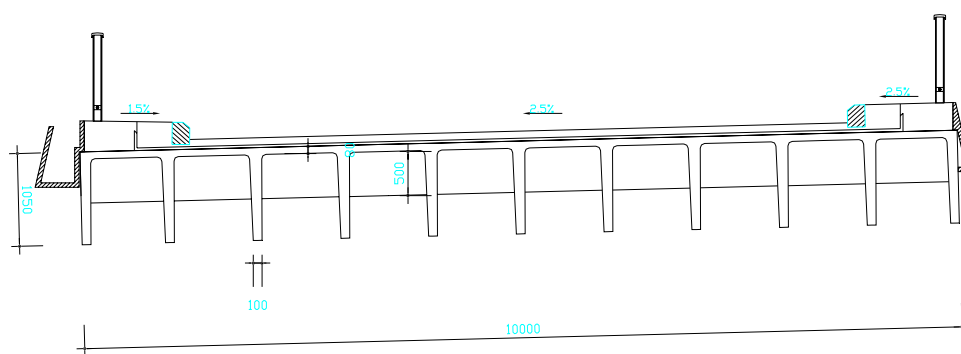


Fig 12 – Coupe transversale théorique - solution 25m - Dalle BFUP précontrainte

Le câblage extérieur mis en œuvre comporte 18 câbles 12T15S excentrés par rapport au centre de gravité de la section de 0.38m en travée (fig 13).

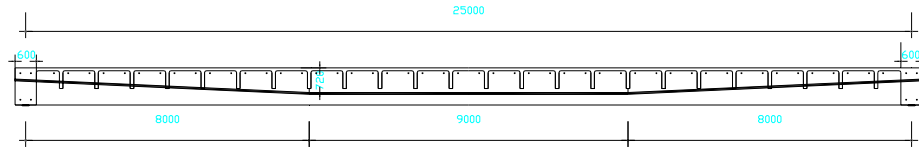


Fig 13 – Solution 25m - BFUP précontraint avec joints longitudinaux - Coupe longitudinale avec élévation du câblage et vue de la précontrainte transversale.

4.1.2. Mode d'assemblage de la structure

Au niveau des modes d'assemblage de la structure, on réalise des poutres pleine portée de 2m de largeur avec des joints réalisés au droit des nervures longitudinales (fig 14) et comprimés par une précontrainte centrée composée de 2*4T15S par nervure transversale.

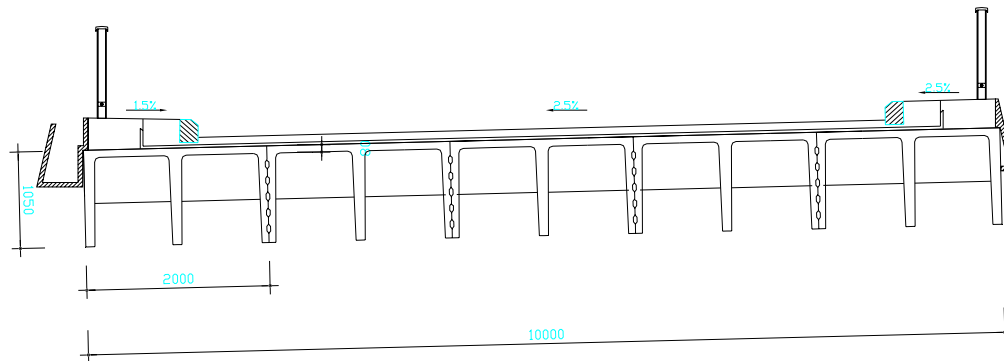


Fig 14 – Solution 25m - Dalle BFUP précontrainte – Solution d'assemblages transversaux

4.1.3. Économie globale de ces solutions

Ces solutions s'avèrent relativement intéressantes sur le plan de l'économie de matériaux. L'épaisseur équivalente de dalle est d'environ 23,3cm pour une quantité de précontrainte d'environ 6400 kg. Ces quantités sont cohérentes par rapport aux résultats obtenus sur les ouvrages de Bourg Lès Valence [2][3][4][5].

Avec les conditions économique d'aujourd'hui, le tablier ressort à environ 670€TTC/m² hors équipements.

4.2. Dalle BFUP gaufree-échancrée et matériau composite

4.2.1. Caractéristiques géométriques

La structure étudiée est une dalle gaufree en BFUP associée à de la fibre de verre. La démarche pour concevoir cette structure est la même que celle présentée pour la portée de 10m.

On obtient une hauteur totale de section de 1.30m, soit un élancement de l'ordre du 20^{ème} de la portée. La dalle en BFUP comporte une surdalle de 0.08m d'épaisseur, des poutres longitudinales de 0.25m d'épaisseur et des montants (liens entre la dalle et le matériau composite) de 0.91m de hauteur et de 0.70m de longueur. L'épaisseur des nervures transversale est de 0.1m et leur hauteur de 0.50m. Cette dalle est couplée à un matériau composite multicouches à base de fibre de verre, d'épaisseur totale 0.05m.

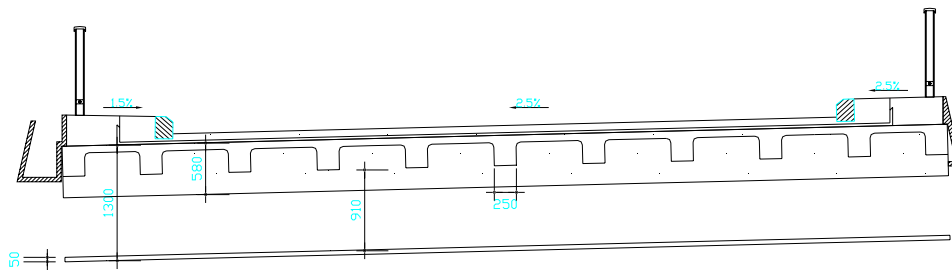


Fig 15 – Coupe transversale - solution 25 m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et matériau composite

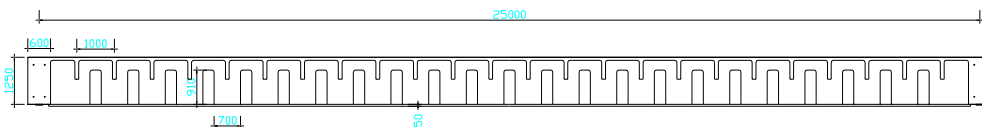


Fig 16 – Coupe longitudinale - solution 25 m - Dalle BFUP gaufree-échancrée et matériau composite

4.2.2. Mode d'assemblage de la structure

Comme pour les ouvrages de 10m de portée, on préconise un clavage longitudinal. On réalise des joints entre les nervures longitudinales, à cause des échancrures, et on assure le lien entre les éléments soit en ayant recours à des aciers (4 Φ 10 dans la surdalle et 2 Φ 20 dans l'âme), soit à une précontrainte transversale extérieure composée de 2*5T15S.

4.2.3. Économie globale de ces solutions

De même que pour les ouvrages de 10m de portées, ces solutions sont beaucoup moins performantes que les solutions précontraintes vis-à-vis de l'économie des matériaux.

L'épaisseur équivalente de BFUP passe de 23,3cm à 36,4cm.

La quantité de fibre de verre mise en œuvre est également importante (14375kg) et conduit dans les conditions économique d'aujourd'hui à un coût de tablier hors équipements important égal à 1190€TTC/m².

4.3. Dalle BFUP gaufree-échancrée, matériau composite et précontrainte longitudinale

4.3.1. Caractéristiques géométrique

Pour cette solution, on conserve la même géométrie que la solution précédente mais on cherche à économiser de la matière en ajoutant une précontrainte longitudinale déviée.

Cette précontrainte reprend les efforts liés au poids propre. Elle est mise en œuvre avant la fibre de verre qui reprend les efforts générés par les superstructures et les charges d'exploitation.

Cette chronologie permet d'éviter une mise en compression du matériau composite en phase provisoire, et augmente l'efficacité de la précontrainte pour diminuer les efforts dans le BFUP.

Cette conception permet de réduire la longueur de chaque montant de 0.150m. On économise environ 9.40m³ de BFUP. On réduit par ailleurs l'épaisseur de matériau composite à trois centimètres.

La précontrainte mise en œuvre comporte 8 câbles 12T15S. Ces câbles sont excentrés par rapport à l'extrados de 0.20m au niveau de leurs ancrages et de 0.50m à mi-travée.

Le principe d'assemblage transversal entre poutres est identique à celui décrit pour la solution sans précontrainte.

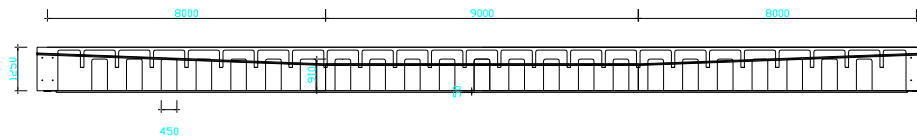


Fig 17 – Coupe longitudinale - solution 25 m - Dalle BFUP gaufree-échancrée précontrainte et matériau composite

4.3.2. Économie globale de cette solution

La mise en œuvre de la précontrainte améliore l'économie de la solution qui reste néanmoins peu performante.

L'épaisseur équivalente de BFUP passe ainsi de 36,4cm à 32,7cm.

La quantité de fibre de verre diminue de 14375kg à 8620 kg au détriment de la mise en œuvre de 2830kg de précontrainte.

L'ensemble de ces éléments conduit dans les conditions économique d'aujourd'hui à un coût de tablier hors équipements qui diminue sensiblement mais reste important 984€TTC/m².

4.4. Dalle BFUP treillis et matériau composite

4.4.1. Caractéristiques géométriques

Face aux difficultés rencontrées pour « économiser » de la matière dans les structures avec nervures longitudinales échancrées qui fonctionnent en poutres échelles et sont ainsi le lieu d'efforts parasites pénalisants pour le BFUP, ces solutions consistent à améliorer la conception des liaisons entre la dalle et le matériau composite.

Le BFUP offre des possibilités en terme de forme plus grandes que le béton armé classique pénalisé par les contraintes liées au façonnage des aciers passifs.

Le BFUP permet de réaliser sans problèmes une structure en treillis constituée de diagonales de 0.325*0.25m (fig 18). Les poutres principales ont une hauteur totale de 1,30m, 0,519m dans les zones échancrées. Elles sont reliées par des nervures transversales disposées tous les 1.30m.

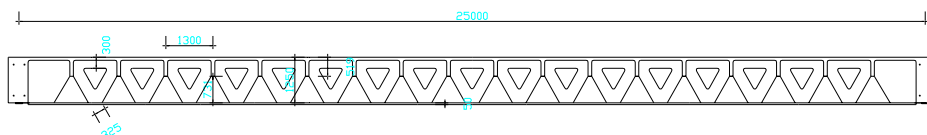


Fig 18 – Coupe longitudinale - solution 25 m - Dalle BFUP treillis et matériau composite

4.4.2. Économie globale de cette solution

Le fonctionnement en treillis des âmes des poutres permet un gain de matière significatif par rapport au fonctionnement en poutre échelle.

L'épaisseur équivalente de BFUP passe de 36,4cm à 29,8cm.

La quantité de fibre de verre mis en oeuvre est identique à celle utilisée pour la solution à nervure échancrée.

Par contre la réalisation de poutres treillis est légèrement moins efficace que la mise en oeuvre de précontrainte. Dans les conditions économique d'aujourd'hui le coût de tablier hors équipements reste relativement élevé égal à 1073€TTC/m².

4.5. Dalle BFUP treillis et semelles en acier

4.5.1. Caractéristiques géométriques

Afin de rechercher des économies de matériau par rapport à la solution précédente, on examine une solution visant à remplacer le tirant inférieur en fibre de verre par des semelles en acier.

L'épaisseur des nervures longitudinales passe de 0.25m à 0.20m et l'épaisseur des montants longitudinalement reste égal à 0.325m car ils sont soumis à un effort normal et il faut veiller à limiter la traction qui en résulte. L'éclatement, la longueur des montants ainsi que les dimensions des nervures transversales sont conservés.

Les semelles en acier présentes sous les nervures longitudinales ont une épaisseur de 0.03m et une largeur de 0.50m.

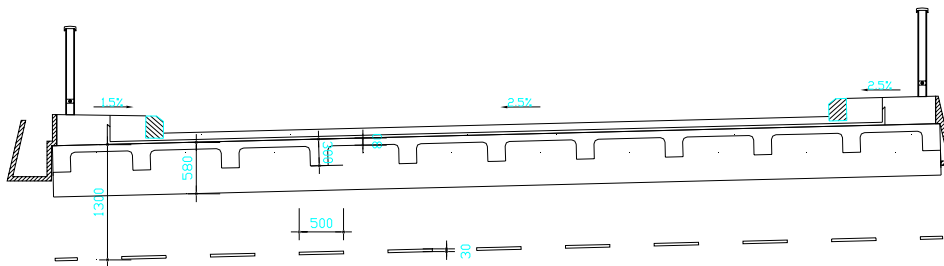


Fig 19 – Coupe transversale - solution 25m - Dalle BFUP treillis et semelles en acier

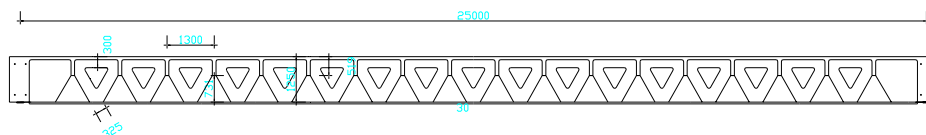


Fig 20 – Coupe longitudinale - solution 25m - Dalle BFUP treillis et semelles en acier

4.5.2. Économie générale de ces solutions

La présence d'âme en treillis et de tirants en acier confère à ces solutions un certain intérêt économique.

L'épaisseur équivalente de BFUP devient intéressante égale à 0,262m.

La quantité d'acier de charpente est égale à 32,4 tonnes.

Le coût global de cette solution de tablier ressort dans les conditions économiques d'aujourd'hui à environ 814 €TTC/m², et s'approche du coût des solutions entièrement précontrainte.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'explorer les solutions de tablier de 10m et 25m de portée constitué de poutres en BFUP précontraint, ou de poutres mixtes en BFUP – matériau composite, BFUP – acier.

Il ressort de cette étude que les solutions les plus performantes en terme d'économie des matériaux sont les solutions en BFUP entièrement précontraintes. Pour des ouvrages de 10 mètres de portée ces solutions conduisent à des structures performantes sur le plan financier dans les conditions économiques d'aujourd'hui.

Les solutions mixtes BFUP – fibre de verre sont pénalisées par le mauvais rapport module / résistance du couplage des deux matériaux qui conduit à sur dimensionner la matière pour respecter les conditions de flèche des structures. Si on voulait réaliser des structures qui respectent les conditions de déformation tout en faisant travailler suffisamment les deux matériaux, il faudrait réaliser des structures très peu élancées, de hauteur de section peu esthétique et problématique vis-à-vis de la conception des âmes et zones de reprise de l'effort tranchant.

Pour les ouvrages de 10m de portée, la réalisation de poutres à âme échancrée et semelle en acier constitue une alternative intéressante aux solutions entièrement précontraintes.

De même, pour des ouvrages de 25 m de portée, l'association BFUP - matériau composite peut devenir intéressante dans le cas de poutres préfabriquées à âme en treillis BFUP partiellement précontraintes.

Dans le prolongement de cette étude, des réflexions doivent être poursuivies sur la conception des assemblages permettant d'optimiser la conception générale et la mise en œuvre des structures.

Ces réflexions pourraient porter :

- sur la conception des assemblages entre éléments de dalle en BFUP permettant de garantir la reprise des efforts locaux et l'étanchéité de la dalle,
- la conception des assemblages BFUP – matériau composite permettant de développer le collage associé à des dispositifs assurant la diffusion d'efforts concentrés.

6. RÉFÉRENCES

- [1] 'Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances', Recommandations provisoires, Association Française de Genie Civil, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Janvier, 2002.
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Hajar Z., Simon A., Lecointre D., Petitjean J., "Construction of the first road bridges made of UHPC", 3rd International Symposium on HPC, Orlando 2003
- [5] J.Resplendino, S. Bouteille « Les derniers développements dans l'utilisation des Bétons Fibrés Ultra Performants en France », congrès AFGC GC2005, Paris (2005).