

Innovations et ouvrages d'art

Pour des ponts de haute qualité
vis-à-vis du développement durable



Resources, territoires et habitats
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et énergie

Présent pour l'avenir

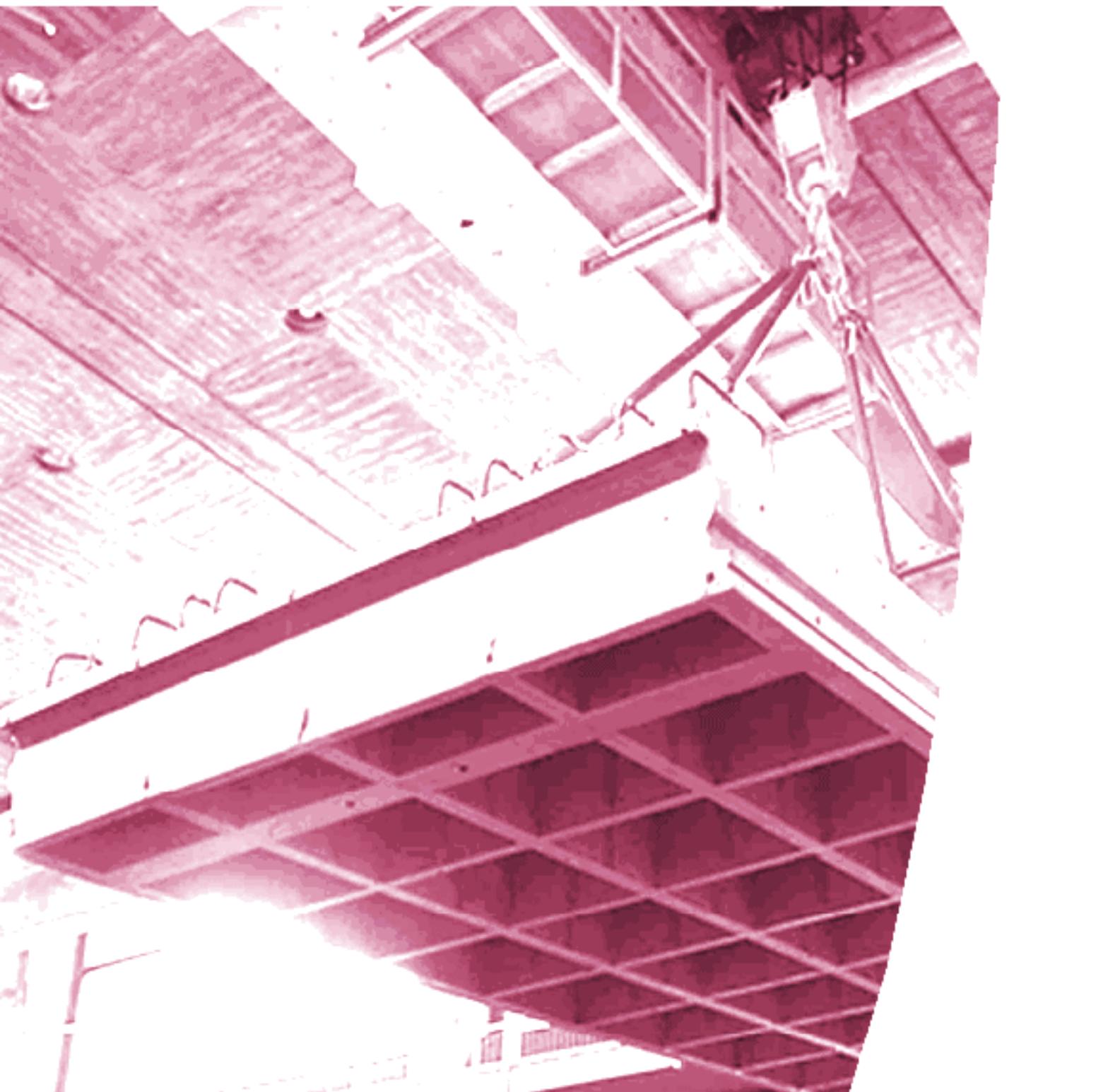


Page laissée blanche intentionnellement

Rapport d'études

Innovations et ouvrages d'art

Pour des ponts de haute qualité
vis-à-vis du développement durable



Ce rapport a été rédigé, sous la direction de Thierry KRETZ,
Chef du Centre des Ouvrages d'Art du Sétra, par :

- Jacques BERTHELLEMY, Sétra
- Emmanuel BOUCHON, Sétra
- Didier BRAZILLIER, DIR Centre Est
- Pierre CORFDIR, CETE de l'Est
- Fernando DIAS, Sétra
- Emilie LUANGKHOT, Sétra
- Daniel de MATTEIS, Sétra
- Aude PETEL , Sétra
- Joël RAOUL, Sétra
- Jacques RESPLENDINO, DIR Méditerranée
- Ferry TAVAKOLI, CETE de Lyon
- François TOUTLEMONDE, LCPC

Il a été relu attentivement par les membres du groupe de travail
et par Bruno GODART, LCPC.

Sommaire

Chapitre 1 Innovation et développement durable	6
1 - Les attentes des maîtres d'ouvrage publics	6
2 - Les orientations majeures pour l'innovation	7
2.1 - Ouvrages neufs	7
2.2 - Ouvrages existants	7
3 - Innovation, durabilité et garanties.....	8
Chapitre 2 Exemples récents et recherches abouties	9
1 - Allègement des grands ouvrages en béton précontraint	9
1.1 - Viaduc de Compiègne	9
1.2 - Viaducs de Dôle et de Meaux.....	10
2 - Allègement des grands ouvrages en ossature mixte.....	10
3 - Développement des ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances	11
3.1 - Le Pont Pinel	11
3.2 - Les dalles nervurées en BFUP	11
3.3 - Renforcement des ouvrages par des dalles en BFUP.....	12
4 - Amélioration des ouvrages en ossature mixte acier/béton	13
4.1 - Simplification des ouvrages de petite ou moyenne portée.....	13
4.2 - Allègement de dalle en béton et connexion par collage	13
4.3 - Optimisation de la conception des ouvrages de type bipoutre.....	14
5 - Développement des ouvrages en ossature mixte bois/béton	14
Chapitre 3 La commande publique.....	15
1 - Appel d'offres avec variantes larges.....	15
2 - Procédure de dialogue compétitif	16
3 - Appel d'offres avec solutions innovantes et variantes mineures	16
4 - Concours d'ingénierie.....	16
5 - Marché de conception-réalisation.....	17
6 - Participation au programme national d'innovation dans le domaine des VRD	17
Annexes Fiches innovations.....	19
Allègement des grands ouvrages en béton précontraint	20
Caisson allégé en béton précontraint – le viaduc de Compiègne	20
Allègement des grands ouvrages en béton précontraint	24
Caisson en béton précontraint avec âmes métalliques planes	24
Allègement des grands ouvrages en ossature mixte	26
Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances.....	28
Petits ouvrages : le triplement du pont Pinel à Rouen	28
Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances.....	30
Dalles de pont mixte en BFUP.....	30
Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances.....	33
Réparation et renforcement de dalles.....	33
Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée	35
Les poutres préfléchies	35
Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée	37
Les poutres à semelle supérieure en béton.....	37
Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée	40
Les ouvrages intégrés en ossature mixte	40
Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée	42

La suppression des soudures sur chantier	42
Connexion des dalles des structures mixtes acier/béton par collage	44
Amélioration de la conception des ouvrages bipoutre en ossature mixte	45
Ouvrages en ossature mixte bois /béton	47
Bibliographie.....	50

Introduction

La période actuelle est spécialement propice à l'innovation : les maîtres d'ouvrage expriment des attentes nouvelles, les défis du développement durable demandent de repenser nos techniques traditionnelles et la concurrence internationale nous impose d'innover pour garder une longueur d'avance.

Face à ces enjeux, les entreprises, les organismes de recherche, l'ingénierie publique et privée proposent des innovations variées et potentiellement majeures, basées sur de nouveaux matériaux ou sur les progrès considérables des matériaux traditionnels.

Les ouvrages d'art sont des ouvrages de génie civil emblématiques. Ils sont le lieu d'expression privilégié de l'innovation dans les domaines des matériaux et structures de génie civil, en raison du haut niveau de performances qu'ils exigent.

Ce rapport illustre les opportunités d'innovations qu'apportent aujourd'hui les ouvrages d'art. Celles-ci sont nombreuses et prometteuses.

Ce rapport souhaite inciter les maîtres d'ouvrages à s'engager dans l'innovation. Les organismes scientifiques et techniques du Ministère de l'Ecologie, de l'Environnement, du Développement Durable et de la Mer sont prêts à leur apporter leur assistance technique pour réaliser des ouvrages sûrs, robustes, durables et toujours plus performants vis-à-vis des enjeux du développement durable.

Ce rapport comporte une partie principale et une annexe. La partie principale analyse les besoins à satisfaire, les grandes orientations pour l'innovation et leur expression dans la conception des ouvrages d'art. Un chapitre spécifique est consacré à la commande publique, en explicitant les différentes solutions possibles pour favoriser l'innovation dans les marchés publics dans les meilleures conditions possibles. Il est à noter que cette partie sera également publiée dans un numéro spécial de la revue Travaux qui paraîtra début 2011.

L'annexe est constituée d'une série de fiches. Chaque fiche traite d'une innovation "mature". Elle décrit l'innovation, explique son intérêt et son domaine d'emploi, en se plaçant du point de vue du maître d'ouvrage. L'objectif est de démontrer sur des exemples précis les opportunités d'innovation dans le domaine des ouvrages d'art.

Il faut s'engager résolument dans l'innovation : chaque acteur doit prendre sa place pour relever collectivement ce défi.

Chapitre 1

Innovation et développement durable

La France est fière de ses grands ouvrages, de sa tradition de grand bâtisseur, de l'excellence de ses entreprises de Génie civil.

Cette force de créativité et d'innovation est aujourd'hui interpellée par les enjeux du développement durable. Ceux-ci conduisent à repenser la démarche d'ingénierie pour mieux prendre en compte :

- l'impact socio-économique d'un ouvrage, c'est-à-dire l'ensemble des aspects sociaux, économiques, et d'utilité publique qui concourent au "bonheur" de la société ;
- le coût global sur le cycle de vie, en particulier lorsque des actions d'entretien lourdes sont à intégrer pendant la durée de service ;
- la capacité d'adaptation à des aléas imprévus ou à des besoins futurs par une analyse de risques très ouverte ;
- les impacts environnementaux larges sur le cycle de vie, y compris la déconstruction, par la réalisation d'écobilans dont le bilan CO₂ ;
- les impacts environnementaux proches, sur la faune, la flore et l'ensemble des pollutions possibles (bruit, eau, air,...).

Cet élargissement de la démarche d'ingénierie était déjà pratiqué lors des études de conception des projets majeurs, en particulier dans le cadre des concessions : le viaduc de Millau en est un exemple emblématique. Mais sa généralisation et son explicitation conduisent à repenser l'ingénierie des ouvrages de Génie civil et à faire émerger des innovations qui apporteront des performances supplémentaires sur tous les champs du développement durable.

1 - Les attentes des maîtres d'ouvrage publics

L'ensemble des enjeux du développement durable se traduit pour les maîtres d'ouvrage par des attentes et besoins forts, pour lesquels des réponses innovantes sont attendues. On notera en particulier des attentes sur les aspects suivants :

- la justification de l'utilité publique des projets neufs sur tous les volets du développement durable ;
- une meilleure prise en compte de contraintes environnementales croissantes tant en phase de construction qu'en service ;
- l'optimisation des opérations de gestion, entretien, réparation du patrimoine existant ;
- la prise en compte de coûts et contraintes d'exploitation croissants qui impactent fortement toutes les interventions sur les réseaux en service ;

- une vision multi-modale des infrastructures qui conduit à modifier les conceptions traditionnelles des ouvrages et à adapter le patrimoine existant pour répondre à de nouveaux besoins. Un exemple est la prise en compte de plusieurs modes de transport sur une même infrastructure : véhicules routiers, tramways, modes doux (vélos, piétons) ;
- et bien sûr des contraintes financières très fortes.

2 - Les orientations majeures pour l'innovation

2.1 - Ouvrages neufs

Quatre orientations se dégagent, qui peuvent être combinées dans la conception de l'ouvrage.

La première orientation est d'aller vers l'allégement des structures par l'emploi de matériaux plus performants : les bétons à très hautes performances auto-plaçants, les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP), les aciers à très haute limite d'élasticité permettent des gains de quantités très significatifs par rapport à des solutions classiques, tout en améliorant encore la durabilité des structures.

La deuxième orientation est l'emploi de matériaux renouvelables ou à faible impact environnemental : il peut s'agir de béton formulé avec des quantités réduites de liants - les performances étant atteintes par l'optimisation du squelette granulaire et la réduction de la teneur en eau - ou avec des granulats recyclés ; il peut aussi s'agir de matériaux organiques comme le bois structurel et les polymères renforcés par des fibres, dont l'emploi mérite d'être élargi.

La troisième orientation est de concevoir des ouvrages ne nécessitant pas d'entretien ou dont l'entretien peut être programmé par l'intégration "d'intelligence" à la construction :

- dans le domaine des ponts, il s'agit par exemple de solutions innovantes de ponts intégrés, c'est à dire sans joints de chaussée, ni appareils d'appui, ces équipements constituant les sources essentielles des coûts d'entretien directs et indirects (à cause de la gêne à l'usager) ;
- il s'agit aussi d'éviter la mise en peinture des structures métalliques par l'utilisation d'acier autopatinable ou d'acier inoxydable, ou bien de concevoir des structures mixtes innovantes dans lesquelles l'acier est entièrement enrobé de béton. Les poutres préfléchies combinées à des entretoises en béton sur appui ou encastrées dans les culées, objets de recherche dans le cadre du Projet National "MIKTI" sont de bonnes candidates car le béton d'enrobage reste comprimé ou peu tendu en service ;
- l'intégration "d'intelligence" dans les ouvrages consiste à les équiper dès la construction de capteurs et de dispositifs facilitant leur inspection et leur entretien, à l'instar des véhicules automobiles (par exemple des capteurs de corrosion ou de pénétration de chlorures combinés à des contacts de protection cathodique ou des témoins de vieillissement par fatigue).

La quatrième orientation est de permettre l'adaptation des structures à l'évolution des besoins, par exemple l'augmentation des capacités, la modification des usages, la prolongation de la durée de vie, le renforcement parasismique, etc. La conception des structures neuves doit intégrer cette possibilité de flexibilité d'usage, d'accroissement des performances et de robustesse vis-à-vis d'actions accidentelles difficilement prévisibles.

2.2 - Ouvrages existants

Les ouvrages d'art construits entre 1951 et 1976 représentent plus du tiers du patrimoine ; ce parc relativement homogène atteint un âge moyen de 50 ans, âge auquel des travaux de réhabilitation lourds peuvent devenir nécessaire. Il est donc attendu des solutions innovantes pour réhabiliter ces ouvrages au moindre coût, en limitant la gêne aux usagers. Une deuxième attente est relative à l'adaptation des

ouvrages à de nouveaux usages, par exemple afin de cumuler plusieurs modes (modes doux, mais aussi transports collectifs lourds), ce qui peut demander leur élargissement ou leur renforcement.

Des techniques innovantes sont disponibles pour réhabiliter les matériaux comme les traitements électrochimiques du béton (réalcalinisation, déchloruration), le parachèvement des soudures (grenaillage par US). De même, les nouveaux matériaux, comme les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) ou les composites à base de fibres de carbone permettent le renforcement structurel des ouvrages.

3 - Innovation, durabilité et garanties

Les maîtres d'ouvrage sont légitimement inquiets de la durabilité et du coût d'entretien des ouvrages innovants et se posent la question des garanties supplémentaires qu'"ils doivent exiger.

La solution n'est pas de demander des garanties supplémentaires au-delà des garanties légales existantes, lesquelles restent dues en totalité. En effet, la garantie décennale est suffisamment longue pour couvrir des défauts structurels majeurs. Le principal risque est celui d'un manque de durabilité à des échéances de plusieurs dizaines d'années, lequel ne serait être couvert par une garantie complémentaire. Il faut par contre approfondir l'analyse en coût global de l'innovation (investissement + exploitation+maintenance) avant de se décider.

Le risque étant la conjonction d'un aléa, de la vulnérabilité de la structure à cet aléa et des conséquences de cet aléa, il convient de réfléchir sur les trois facteurs. Le Sétra publiera guide courant 2011 un guide sur l'analyse de risques appliquée aux ouvrages d'art : nous recommandons au maître d'ouvrage de procéder à cette analyse avant d'engager une innovation majeure.

Revenant rapidement sur les trois composantes du risque, il apparaît que :

- l'aléa est fonction de la situation de l'ouvrage : l'exposition à un environnement sévère ou un trafic très élevé sont des aléas susceptibles de provoquer le vieillissement précoce des matériaux ou la fatigue de la structure ;
- la vulnérabilité dépend du choix des matériaux, de la conception de l'ouvrage et de la qualité d'exécution. Il est à noter que les innovations proposées dans ce rapport sont en général moins vulnérables que les solutions classiques comparables, en raison de la qualité des matériaux et de la robustesse des structures préconisées :
 - un béton à très hautes performances est très peu vulnérable à un environnement agressif, à condition d'être bien mis en œuvre : le contrôle de la qualité de l'exécution est un paramètre majeur pour réduire la vulnérabilité ;
 - une conception présentant une plus grande hyperstaticité longitudinale ou transversale sera plus résiliente, donc moins vulnérable à un aléa externe ou interne (défaillance localisée) ;
- les conséquences d'une défaillance dépendent de la nature de l'innovation, du coût de la structure et des conséquences socio-économiques de la défaillance ; il n'est pas conseillé de réaliser un grand ouvrage très innovant sur une artère majeure, sauf à maîtriser totalement les deux autres facteurs de risques (aléa et vulnérabilité).

Le guide sus-mentionné donnera tous les éléments pour approfondir cette réflexion, sachant qu'il vaut bien sûr mieux prévenir que guérir, c'est-à-dire se faire assister d'une ingénierie très compétente pour développer et contrôler les études et les travaux.

Chapitre 2

Exemples récents et recherches abouties

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'ouvrages innovants réalisés récemment ou de recherches abouties pouvant donner lieu à des innovations répondant aux attentes des maîtres d'ouvrages et aux enjeux du développement durable. Chacun de ces exemples fait l'objet d'une fiche en annexe à ce rapport.

1 - Allègement des grands ouvrages en béton précontraint

1.1 - Viaduc de Compiègne

Le viaduc de Compiègne est situé sur la RN 31, au niveau du contournement de Compiègne. Sa longueur est de 2 143 m, divisée en 36 travées d'une portée courante de 58,70 m, et sa largeur de 12,70 m. Le tablier est un caisson en béton précontraint, d'une hauteur constante égale à 3,20 m, constitué de voussoirs préfabriqués posés à l'avancement à l'aide d'un haubanage provisoire. L'ouvrage fut réalisé par le groupement Campenon Bernard TP / Chantiers Modernes / GTM GCS et les travaux s'achevèrent fin 2009. Il est à noter que la technique de construction à l'avancement avec mâts de haubanage provisoire est rarement employée en France. Le dernier ouvrage réalisé selon cette technique avant le viaduc de Compiègne était le viaduc des Barraills sur l'A89, construit en 2000. Cette méthode proposée par l'entreprise s'est avérée très performante.



Le viaduc de Compiègne

La préfabrication des voussoirs permit une construction rapide et de très bonne qualité, malgré un taux de ferraillage passif du tablier de 220 kg/m³. Ce taux très élevé résulte d'une épaisseur des âmes de 30 cm seulement, soit un gain d'environ 20 % par rapport à une conception traditionnelle. Ce gain fut rendu possible par l'application de l'Eurocode 2 au lieu du BPEL.

Le béton utilisé était un C40/50 CEMI 52.5 N CE CP2 dosé à 385 kg, avec superplastifiant.

Ce viaduc préfigure ainsi l'orientation vers des structures allégées et préfabriquées, réalisées avec des matériaux très performants. Le développement des bétons auto plaçants à très hautes performances permet

d'aller encore plus loin dans la réduction des épaisseurs et l'augmentation (relative) des taux de ferraillage passif, tout en garantissant une bonne mise en œuvre.

Pour ces ouvrages, l'utilisation de bétons de plus hautes performances mécaniques peut également être valorisée sous l'angle de la durabilité, tout en permettant de réduire les épaisseurs d'enrobages des aciers, en s'appuyant sur une approche performante de la durabilité du béton [1].

1.2 - Viaducs de Dôle et de Meaux

Les viaducs de Dôle et de Meaux sont deux exemples remarquables de caissons en béton précontraint à âme métallique. Le viaduc de Dôle est le plus ancien et fait appel à la technique des âmes plissées.

Plus récent, car achevé en 2005, le viaduc de Meaux est un deuxième exemple de l'allégement des grands ouvrages par l'emploi d'âmes métalliques. Situé sur la déviation sud-ouest de Meaux, cet ouvrage de 1200 m de longueur et 31 m de largeur, permet le franchissement de la vallée de la Marne et notamment du canal de l'Ourcq, de la voie ferrée Paris-Strasbourg, de la Marne et du canal de Chalifert. Il comporte 22 travées de portées comprises entre 49 et 55 m à l'exception de la travée sous-bandée sur la Marne, dont la portée est de 93 m. Il a été réalisé par tronçons successifs de 25 m et mis en place par poussage.

Son tablier est constitué de deux hourdis en béton précontraint reliés par deux âmes métalliques planotubulaires. Cette conception un peu complexe de l'âme lui permet d'échapper à l'effort normal, par une légère ovalisation des tubes intermédiaires.



Le viaduc de Meaux

Il est à noter que sa réalisation résulte d'un appel d'offres sur performances s'inscrivant dans une démarche de promotion de l'innovation en génie civil.

Il serait possible aujourd'hui d'utiliser des âmes planes peu raidies, car les Eurocodes autorisent une justification "post-critique", c'est à dire avec voilement des plaques métalliques comprimées. Ainsi conçu, ce type de structure devrait retrouver son intérêt économique, sa qualité esthétique étant démontrée par les deux exemples mentionnés et sa qualité en termes d'impact environnemental résultant de l'allégement obtenu.

2 - Allègement des grands ouvrages en ossature mixte

Les Eurocodes autorisent l'utilisation d'acier à Haute Limite d'Elasticité (HLE) jusqu'à S700 et de poutres métalliques hybrides, c'est-à-dire constituées de semelles et d'âmes de nuance d'acier différentes. Les

recherches menées dans le cadre du projet européen Combri [2] ont permis de démontrer l'intérêt de cette conception, sur un exemple de grand viaduc en ossature mixte.

L'ouvrage imaginé a une largeur totale de 21,50 m et comporte deux travées de rive de 90 m de portée et 3 travées courantes de 120 m de portée. Le tablier est un caisson en ossature mixte. La solution de référence est dimensionnée en acier S355 ; la solution "hybride" est dimensionnée en acier S460 sauf sur appui où de l'acier S655 est utilisé pour les semelles supérieures, évitant ainsi la superposition de deux tôles. Le gain d'acier est de 30 % et l'écobilan sur l'acier (gaz à effet de serre, énergie, ressources naturelles) sera amélioré dans des proportions voisines ; par ailleurs les études de prix aboutissent à une économie de 20 % sur la charpente métallique.

3 - Développement des ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances

3.1 - Le Pont Pinel

Le pont Pinel [3] est le cinquième pont français en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP). Il s'agit d'un ouvrage isostatique de 27 m de portée situé au Petit-Quevilly au Sud de Rouen, venant tripler un franchissement existant, au-dessus de voies ferrées électrifiées. En variante large à la solution en poutrelles enrobées figurant à l'appel d'offres, l'entreprise Eiffage-TP a proposé une solution basée sur des poutres en BFUP en T inversé jointives (poutres ITE®), complétées par un hourdis en béton classique coulé en place.

Cette solution a également fait l'objet d'une autre application à Sarcelles, démontrant ses performances pour franchir rapidement et sans gêne des voies très circulées.



Les poutres ITE® constituent une alternative économique et très durable aux poutrelles enrobées, offrant un excellent écobilan grâce à un gain en poids d'environ 40 %, et ne nécessitant aucun entretien sur le cycle de vie.

Cette solution a reçu le prix de l'innovation de la FNTP en 2009.

3.2 - Les dalles nervurées en BFUP

Les dalles nervurées en BFUP ont été développées dans le cadre du projet national de recherche "MIKTI" [4], sur les ponts en ossature mixte, de 2004 à 2007. L'objectif était de trouver une solution alternative aux dalles orthotropes métalliques pour les ponts en acier de grande portée. La solution, objet d'une fiche en annexe du présent rapport, est une dalle nervurée dans les deux directions selon un espacement de 0,60 m, portant sur les deux poutres principales d'un tablier de type bi-poutre en ossature mixte.

Le gain en poids est d'environ 50 % par rapport à une solution classique (dalle en béton armé). Là encore cette innovation combine un excellent écobilan, une durabilité exceptionnelle et une grande

rapidité de mise en œuvre sur chantier grâce à la préfabrication. Nous espérons qu'elle pourra prochainement être mise en œuvre sur un premier ouvrage dans la région Rhône-Alpes.



Cette solution pourrait également préfigurer une évolution plus générale de la conception des hourdis de pont, lorsque les gains en poids, en durabilité et en rapidité de mise en œuvre sont des critères majeurs de conception. Nous pensons en particulier à des ouvrages comportant **des poutres en bois** (des recherches sont en cours), en composite carbone ou fibres de verre ou en BFUP.

3.3 - Renforcement des ouvrages par des dalles en BFUP

Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances, de par les hautes résistances mécaniques qu'ils peuvent atteindre, ainsi que par leur durabilité démontrée sur les premières structures BFUP, suscitent de nombreuses applications. Dans le domaine de la réparation et le renforcement d'ouvrages existants, ce matériau semble bien indiqué car il peut être employé en éléments très minces et relativement légers, qui présentent toutefois des propriétés mécaniques remarquables. Ainsi, le Sétra a commencé à mettre en œuvre des projets expérimentaux de réparation et renforcement d'ouvrages : l'un sur un ouvrage à dalle orthotrope, l'autre sur une passerelle dans un site très contraint.



Essai d'une dalle orthotrope renforcée par une dalle en BFUP sur la plateforme d'essai des structures du LCPC (photo LCPC)

4 - Amélioration des ouvrages en ossature mixte acier/béton

Le projet national MIKTI [4] et les recherches menés dans les projets européens "Precobeam" [5] et "INTAB" [6] ont permis de développer des solutions nouvelles pour les ouvrages en ossature mixte acier/béton. Ces solutions peuvent être classées en trois catégories.

- simplification des ouvrages de petite et moyenne portée,
- allègement de dalle en béton et connexion par collage,
- optimisation de la conception des ouvrages de type bipoutre.

4.1 - Simplification des ouvrages de petite ou moyenne portée

Sur les ouvrages bipoutre ou multipoutre de petite et moyenne portée, il est intéressant de remplacer une partie de l'acier des semelles par du béton à hautes performances :

- en enrobant les semelles inférieures dans un talon en béton à très hautes performances (BTHP) pré-comprimé,
- en remplaçant les semelles supérieures en acier par des semelles élargies en béton.

Pour ce même type d'ouvrage, il est possible de simplifier les dispositions constructives et d'éviter toutes les soudures, grâce à la réalisation d'entretoises en béton sur chantier.

Par ailleurs, le projet de recherche INTAB a permis la mise au point d'une structure mixte "intégrale", c'est-à-dire sans joints de chaussée ni appareils d'appuis.



Réalisation d'une poutre préflechie à talon BTHP au LCPC

4.2 - Allègement de dalle en béton et connexion par collage

La deuxième famille d'innovations concerne la réalisation de dalles de ponts mixtes préfabriquées, éventuellement en BFUP, connectées par collage, évitant ainsi les réservations pour la connexion et le coulage d'un béton de deuxième phase.

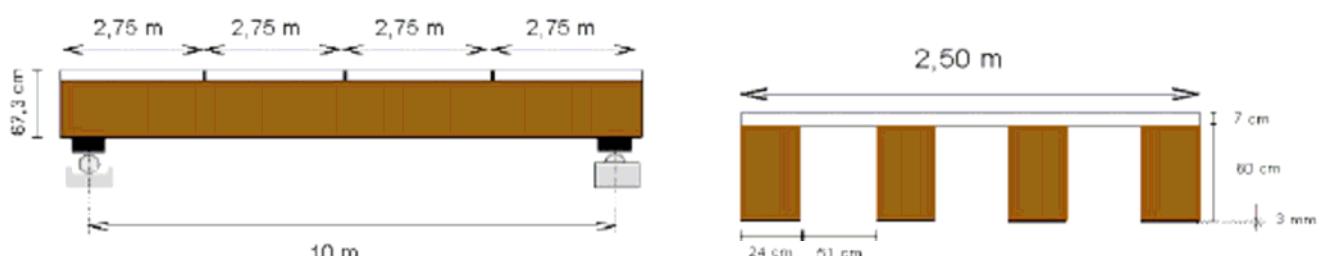
Les recherches ont été menées à l'INSA de Lyon et à l'université de Reims [7] dans le cadre du projet national MIKTI [4]. Elles ont permis d'établir le cahier des charges de la colle, de proposer des règles de dimensionnement spécifiques de l'assemblage et de vérifier le respect des critères d'une connexion parfaite selon l'Eurocode 4.

4.3 - Optimisation de la conception des ouvrages de type bipoutre

La troisième famille d'innovations concerne la conception générale des ouvrages bipoutre. Ces recherches ont également été menées dans le cadre du projet national MIKTI et sont présentées dans [4]. L'adjonction d'un hourdis inférieur en béton dans les zones sur appui et d'un contreventement entre semelles inférieures en travée apporte un gain appréciable en termes de robustesse, car la section sur appui devient ductile, de fatigue, car les deux poutres participent à la reprise des charges excentrées, mais aussi en termes d'écobilan par une diminution appréciable de la consommation d'acier. De plus, les études de prix menées concluent à une légère diminution du coût global de l'ouvrage. Cette solution devrait donc se développer dans l'avenir.

5 - Développement des ouvrages en ossature mixte bois/béton

Le projet de recherche européen NR2C [8] piloté par le LCPC a permis de démontrer l'intérêt de nouvelles solutions composites comportant des poutres en bois lamellé collé connectées rigidement à une dalle en BFUP. Les études se poursuivent au Cete de l'Est, à l'ENPC et au Sétra pour mettre au point une solution de référence.



Maquette d'un pont composite bois/béton au LCPC

Chapitre 3

La commande publique

La commande publique représente une part essentielle du marché du génie civil. La puissance publique, nationale ou territoriale, a donc une responsabilité majeure pour faciliter l'innovation. Six solutions sont possibles, mais l'une d'entre elles, le marché de conception-réalisation, reste cependant assez théorique. Nous les détaillons ci-après en explicitant les possibilités qu'elles offrent pour favoriser l'innovation.

1 - Appel d'offres avec variantes larges

Dans cette configuration, les solutions proposées à l'appel d'offres sont de conception classique et le maître d'ouvrage autorise explicitement les variantes (article 50 du CMP) pour permettre la remise d'une solution innovante dans le cadre d'une procédure formalisée.

Le niveau de prestations attendu des solutions variantes sera défini par référence à des normes ou d'autres documents techniques équivalents mais également en termes de performances ou d'exigences fonctionnelles, selon l'article 6 du code des marchés publics qui autorise la combinaison des deux approches.

Le maître d'ouvrage doit prévoir d'accepter les variantes d'entreprises s'appuyant sur des recommandations pré-réglementaires émanant d'associations savantes reconnues comme l'Association Française de Génie Civil (AFGC). L'une des missions premières de l'AFGC est en effet de favoriser l'innovation en publant des documents techniques qui feront référence pour l'emploi de nouveaux matériaux. A titre d'exemple, on citera ici les recommandations publiées en 2002 par l'AFGC pour l'utilisation des bétons fibrés à ultra-hautes performances ou celles publiées en 2003 pour le renforcement des structures par des matériaux composites, et régulièrement actualisées depuis.

Le règlement de la consultation doit être particulièrement précis sur les critères de jugement des offres. En effet, l'article 53-I du Code des Marchés Publics stipule que pour attribuer le marché au candidat qui a présenté l'offre économiquement la plus avantageuse, le pouvoir adjudicateur se fonde : "*1° sur une pluralité de critères non discriminatoires et liés à l'objet du marché, notamment la qualité, le prix, la valeur technique, le caractère esthétique et fonctionnel, les performances en matière de protection de l'environnement, ..., le coût global d'utilisation, la rentabilité, le caractère innovant, ...*". La rédaction du règlement d'appel d'offres est ici prépondérante, car le maître d'ouvrage doit préciser la pondération des différents critères de jugement des offres.

Les innovations proposées en variantes larges peuvent être plus performantes sur nombre des critères précités liés aux enjeux du développement durable. Mais le jugement des offres demande une analyse particulièrement approfondie, pour éviter des déboires lors de la mise au point du projet d'exécution puis des travaux. Le maître d'ouvrage a tout intérêt à demander une assistance à une ingénierie spécialisée ou au Réseau Scientifique et Technique du MEEDDM dès la phase de rédaction de l'appel d'offres.

2 - Procédure de dialogue compétitif

En alternative à la procédure d'appel d'offres avec variante large, le maître d'ouvrage peut envisager une solution de dialogue compétitif (article 36 du CMP). Le programme fonctionnel établi pour la consultation définit les spécifications essentiellement en terme performances et d'exigences fonctionnelles.

La procédure nécessite des délais suffisants pour conduire le dialogue et les analyses successives approfondies permettant d'aboutir à une solution fiabilisée. Le maître d'ouvrage a tout intérêt à demander une assistance à une ingénierie spécialisée ou au Réseau Scientifique et Technique du MEEDDM dès la phase de rédaction du programme.

3 - Appel d'offres avec solutions innovantes et variantes mineures

Une autre solution consiste à proposer à l'appel d'offres une ou plusieurs solutions innovantes, développées avec le maître d'œuvre dans le cadre des études de projet. Les variantes autorisées peuvent alors être relativement mineures.

Cette solution est particulièrement adaptée lorsque le maître d'ouvrage est porteur d'une innovation particulière, par exemple l'application des résultats d'un projet de recherche partenarial, tel un Projet National organisé par l'IREX.

L'avantage de cette procédure est de permettre des études très détaillées de la solution innovante, comprenant si nécessaire des essais complémentaires en laboratoire, avant de lancer l'appel d'offres ; il convient de prévoir des durées d'études plus longues et un suivi renforcé du chantier pour contrôler et valider l'obtention des performances escomptées.

4 - Concours d'ingénierie

Le concours d'ingénierie est une solution bien adaptée lorsque le maître d'ouvrage veut favoriser la créativité des concepteurs (architectes, bureaux d'études). Le maître d'ouvrage doit veiller à spécifier les performances attendues dans un programme très détaillé dont l'établissement demandera des études spécifiques approfondies (géotechniques, hydrologiques, environnementales, ...). La préparation de ce programme et des documents de consultation fera en général l'objet d'une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage.

Le règlement de la consultation doit être précis sur les critères de jugement des offres. Le maître d'ouvrage a tout intérêt à prévoir des délais suffisants pour le jugement des offres et à s'entourer d'experts pour étudier de manière approfondie les offres reçues. La constitution d'un jury est obligatoire et les candidats non retenus sont indemnisés.

5 - Marché de conception-réalisation

Le marché de conception-réalisation, passé conformément à l'article 37 du Code des Marchés Publics, permet au pouvoir adjudicateur de conclure un marché portant à la fois sur l'établissement des études et l'exécution des travaux.

Cette procédure combine en quelque sorte le concours d'ingénierie et l'appel d'offres sur performances, favorisant l'expression conjointe de la créativité des maîtres d'œuvres et des entreprises, tout en apportant une bonne visibilité au maître d'ouvrage sur le coût final de son ouvrage.

Mais il est à noter que cette procédure n'est autorisée que pour des opérations dont les caractéristiques exceptionnelles exigent de faire appel aux moyens et à la technicité propres des opérateurs économiques. Cette situation n'est qu'exceptionnellement rencontrée.

L'article 69 du code des marchés publics impose la constitution d'un jury pour sélectionner les candidats, puis pour apprécier leurs offres.

Dans ce type de procédure, il est souhaitable que le maître d'ouvrage impose dans le cahier des charges la présence au sein du groupement d'entreprises d'une entité indépendante et compétente assurant le rôle de maître d'œuvre en phase étude et travaux. Le cahier des charges doit bien préciser les missions et identifier la rémunération de la maîtrise d'œuvre du groupement.

Selon la complexité de l'ouvrage, le maître d'ouvrage pourra valablement imposer dans le marché la présence d'une ou plusieurs entités spécialisées assurant des missions de contrôle externe pour certains points délicats en phase de conception et de réalisation.

Avec ce type de procédure, il est également important que le maître d'ouvrage s'entoure d'experts compétents dans les domaines concernés (missions d'AMO) dans les phases de rédaction de l'appel d'offres, d'analyse des offres, puis en phase d'études et de travaux.

6 - Participation au programme national d'innovation dans le domaine des VRD

Les pouvoirs adjudicateurs peuvent, dans des cas particuliers, se référer à l'article 75 du Code des Marchés Publics qui spécifie :

"Les pouvoirs adjudicateurs qui réalisent des ouvrages qui ont pour objet de vérifier la pertinence sur un nombre limité de réalisations des projets retenus par l'Etat dans le cadre d'un programme public national de recherche, d'essai et d'expérimentation, peuvent passer pour leur réalisation, des marchés de maîtrise d'œuvre ou de travaux au terme d'une procédure de mise en concurrence conforme au présent code, limitée aux opérateurs économiques choisis parmi ceux dont les projets auront été sélectionnés par le jury du programme public national, après publication d'un avis d'appel public à la concurrence."

Cette procédure s'applique aux innovations lauréates de l'appel à propositions du programme public national de recherche, essai et expérimentation dans le domaine de la voirie et des réseaux divers, institué par arrêté ministériel du 7 mars 2007.

Dans le cadre de ce programme national de soutien à l'innovation dans le domaine routier, le directeur des infrastructures de transport lance chaque année un appel à propositions pour des innovations répondant à des thèmes prioritaires, exprimés par le comité de l'innovation routes et rues, réunissant des représentants

de l'ensemble des maîtres d'ouvrage. Les innovations proposées sont évaluées par un groupe d'expert routier puis sélectionnées par un jury. Le secrétariat du programme est assuré par le Sétra.

Les lauréats se voient proposer un cadre d'expérimentation de leur innovation en situation réelle sur des chantiers de l'Etat, des collectivités territoriales ou des sociétés d'autoroute. Ils bénéficient également d'un suivi et d'une évaluation de ces expérimentations, par le réseau scientifique et technique du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement Durable et de la Mer.

L'article 75 du CMP autorise à limiter la concurrence aux opérateurs économiques choisis parmi ceux dont les projets auront été sélectionnés par le jury, après accord du responsable du programme public national. Les pouvoirs adjudicateurs peuvent donc lancer un appel d'offres retreint aux lauréats d'un thème du programme national.

Annexes

Fiches innovations

Allégement des grands ouvrages en béton précontraint

Caisson allégé en béton précontraint – le viaduc de Compiègne

Description

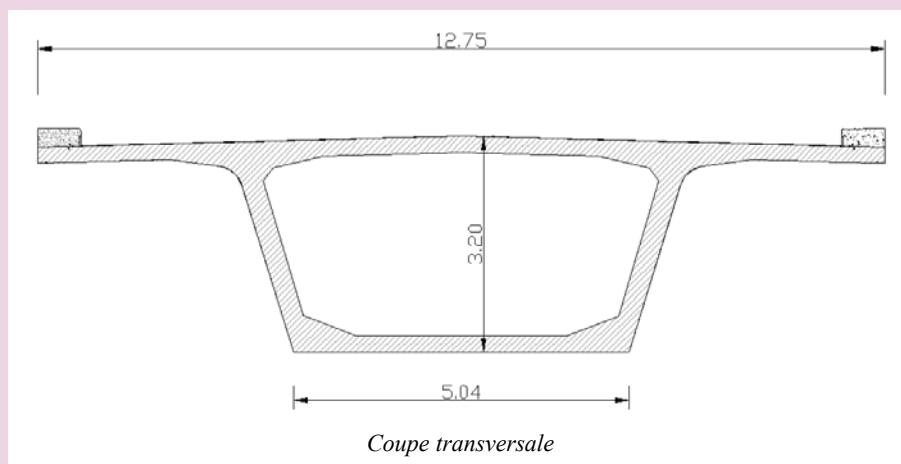
Le tablier du viaduc de Compiègne est un caisson en béton précontraint à deux âmes inclinées. Il est précontraint longitudinalement par des câbles post-tendus intérieurs et extérieurs (précontrainte mixte).

La section transversale du tablier présente les caractéristiques suivantes :

- largeur de 12,70 m et hauteur constante de 3,20 m,
- âmes d'épaisseur constante 0,30 m, inclinées à 32 %,
- hourdis inférieur de 5,04 m de largeur, d'épaisseur constante égale à 0,25 m sauf sur les appuis où elle passe à 0,50 m,
- hourdis supérieur d'épaisseur variable de 0,24 m en extrémité à 0,27 m à l'axe,
- goussets inférieurs de 0,65 x 0,20 m et supérieurs de 1,00 x 0,20 m environ.

Le viaduc de Compiègne est construit à l'avancement, avec l'aide d'un mât de haubanage provisoire. Le tablier est composé de 810 voussoirs préfabriqués d'une longueur variant de 2,66 m à 2,86 m.

La dimension des voussoirs résulte d'une part du calepinage adopté en fonction des portées des travées et d'autre part des limites de capacité de l'engin de pose. Les voussoirs ont quasiment tous le même poids, soit environ 50 tonnes. Le béton utilisé est un C40/50.



Aspect innovant

La principale innovation sur cet ouvrage est liée à l'application des Eurocodes. Par rapport à un dimensionnement classique au BPEL, l'application des Eurocodes a permis d'affiner significativement les âmes du caisson. Leur épaisseur, habituellement prise égale à 36 cm, a ainsi pu être réduite à 30 cm, ce qui engendre un gain non négligeable sur le poids propre de la structure.

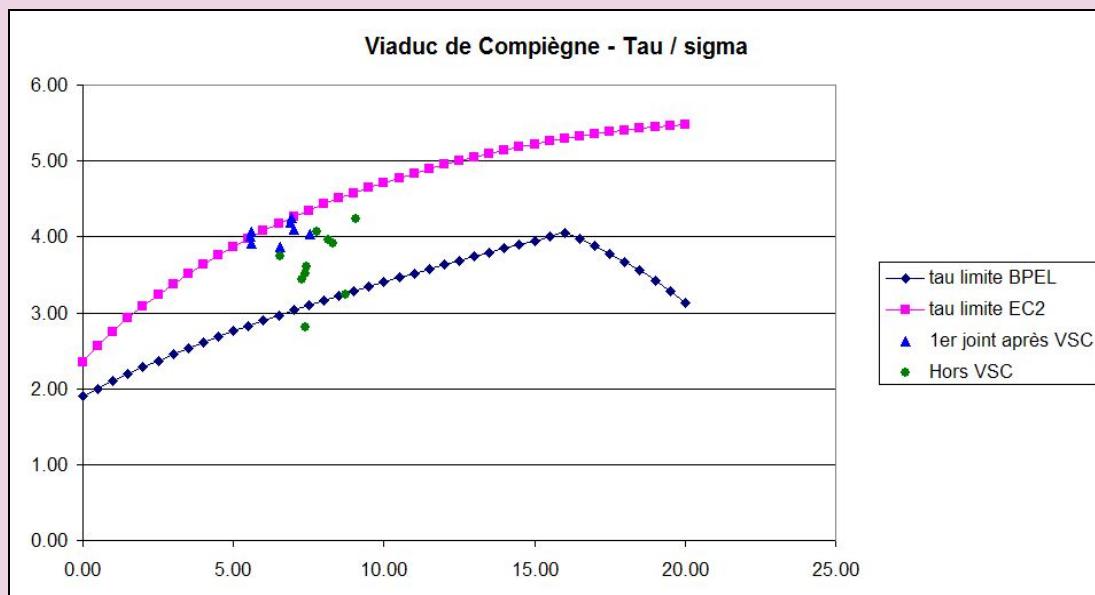
Dans les deux règlements, l'épaisseur minimale des âmes est avant tout conditionnée par leur justification vis-à-vis des sollicitations tangentiales à l'état limite de service. Dans les 2 cas, la justification se résume à une limitation de la contrainte tangentielle (τ).

	Article	Condition à vérifier
BPEL99	§7.2.2	$\tau^2 \leq 2f_{tj} \cdot \min\left(\frac{0,6 \cdot f_{cj} - \sigma_c}{f_{cj}}; 0,2\right) \cdot \left(f_{tj} + \frac{2}{3}\sigma_c\right)$
EN1992-2	§7.3.1(110) annexe QQ	$\tau^2 \leq \frac{5f_{ck} \cdot f_{ctk;0,05} (f_{ctk;0,05} + \sigma_c) (5f_{ck} - 4\sigma_c)}{(5f_{ck} + 4f_{ctk;0,05})^2}$

La comparaison des deux conditions a un sens dans la mesure où, pour ce type d'ouvrage, l'application des charges Eurocodes et celle des anciens règlements de charges donnent des effets très proches.

Le graphique suivant permet de visualiser la comparaison des deux conditions. Y sont représentés :

- les contraintes de cisaillement limites en fonction de la contrainte normale calculées à partir des conditions ci-dessus,
- les états de contraintes les plus défavorables, calculés en différents points de l'âme (centre de gravité, nœud supérieur et inférieur) et sur plusieurs sections du tablier.

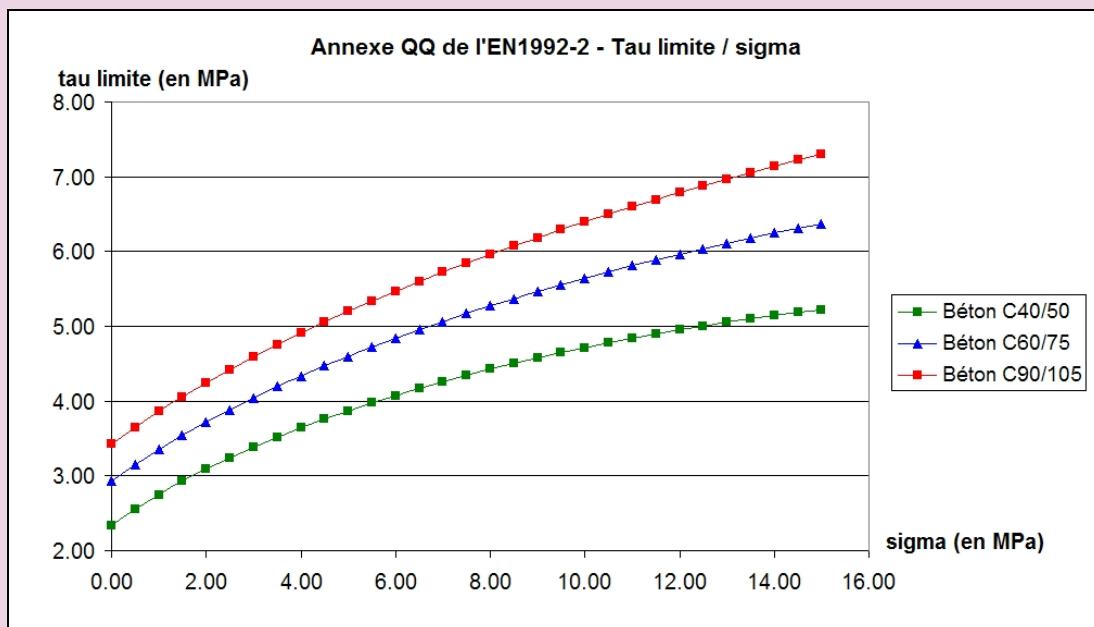


On observe que la vérification est satisfait aux Eurocodes. En revanche, avec une épaisseur de 30cm, la justification des âmes au BPEL99 n'est pas satisfaisante.

Piste de progrès

Le béton utilisé sur cet ouvrage est un C40/50. L'utilisation d'un béton plus performant permet d'augmenter la résistance en traction $f_{ctk;0,05}$ et la contrainte limite de traction calculée à partir de l'expression ci-dessous.

Le graphique suivant montre les courbes (σ_c ; τ_{adm}) pour différents types de béton.

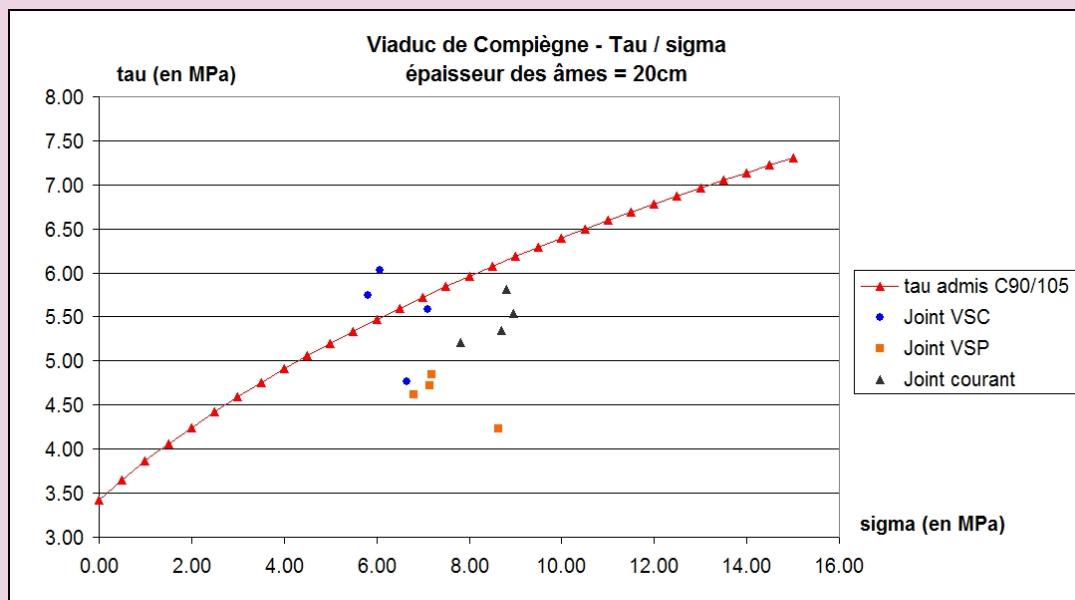


Dans le cas du viaduc de Compiègne, la contrainte normale moyenne est de l'ordre de 8 MPa. Le passage d'un béton C40/50 à un béton C90/105 permet d'augmenter la contrainte de cisaillement admissible à l'ELS de 4,40 MPa à 6,00 MPa, soit une augmentation de 35 %.

Vis-à-vis de la vérification du cisaillement à l'ELS, l'Eurocode permettrait donc de réduire encore l'épaisseur des âmes.

Par ailleurs cette réduction entraînerait une diminution du poids propre du tablier (allègement d'environ 7 % du poids du caisson pour une réduction de 10 cm de l'épaisseur des âmes), et donc de l'effort tranchant sollicitant.

A titre d'exemple "extrême", le graphique suivant a été établi à partir d'une modélisation du viaduc de Compiègne, avec une épaisseur des âmes du tablier de 20 cm. (calcul fait avec le modèle utilisé par le Sétra lors du contrôle des études d'exécution du tablier). Quelques états de contraintes parmi les plus défavorables y sont représentés. La courbe (tau admissible, sigma) est celle d'un béton C90/105. On voit que, mis à part certains points très particuliers proches des culées, les contraintes de cisaillement restent admissibles à l'ELS.



Pour la solution construite, on a constaté une nette augmentation du taux de ferraillage, par rapport à un ouvrage similaire, la viaduc des Barrails sur l'A89, avec une épaisseur de 36 cm et calculé avec les anciens règlements français. Cette augmentation s'explique par :

- une augmentation "mécanique" du taux dû à la diminution de l'épaisseur des âmes, sans augmentation de la quantité d'armatures passives,
- une augmentation du ferraillage de flexion transversale des âmes en raison de la diminution du bras de levier des barres verticales,
- l'application des dispositions constructives des Eurocodes.

Le passage à des âmes de 20 cm d'épaisseur entraînerait une augmentation importante du taux de ferraillage. Avec un béton classique, il deviendrait difficile de couler correctement de tels éléments.

L'utilisation d'un béton auto-plaçant à haute performance apparaît comme indispensable pour assurer la bonne mise en œuvre d'une solution avec des âmes de 20 cm d'épaisseur.

Cette réduction des âmes doit également être justifiée vis-à-vis de la flexion transversale. Sur ce point, il est intéressant d'utiliser les méthodes de calcul plus précises données par l'Eurocode. Elles permettent d'exploiter aux mieux les performances de chaque matériau.

On pourra ainsi vérifier la flexion transversale du caisson en prenant en compte la fissuration des âmes (vérification de la limitation de l'ouverture des fissures) qui a pour effet d'augmenter leur souplesse, et de diminuer les moments d'encastrement des hourdis supérieur et inférieur sur les âmes. On devrait ainsi se rapprocher du fonctionnement d'une structure mixe avec hourdis béton et âmes métalliques :

- reprise de la flexion transversale par le hourdis, en condition d'encastrement élastique sur les âmes,
- reprise du cisaillement par les âmes.

Intérêt

La diminution des épaisseurs permet une réduction de la consommation des matériaux de construction.

Le gain de poids permet de faciliter la construction et réduire les consommations de chantier (voussoirs préfabriqués plus légers ou plus longs ; dans ce cas diminution de nombre de voussoirs à mettre en œuvre).

Par ailleurs, avec l'utilisation d'un béton auto-plaçant à hautes performances, on améliore la durabilité de l'ouvrage.

Domaine d'emploi

Le gain de poids permettra d'élargir le domaine d'utilisation et de faciliter l'exécution de pont avec tablier à caisson en béton précontraint :

- les ponts poussés qui requièrent une grande quantité de précontrainte,
- voussoirs préfabriqués plus légers ou plus longs,
- ouvrages de grandes portées.

Contacts : E. Bouchon (Sétra), F. Dias (Sétra)

Allègement des grands ouvrages en béton précontraint

Caisson en béton précontraint avec âmes métalliques planes

Description

Un caisson en béton précontraint avec âmes métalliques planes est composé de deux hourdis en béton précontraint, un supérieur et un inférieur, d'épaisseur généralement comprise entre 20 et 50 cm, et de deux âmes métalliques planes. Ces dernières, d'une épaisseur unitaire comprise entre 14 et 30 mm selon les ouvrages, sont terminées par deux semelles en acier qui les rigidifient fortement et qui accueillent les goujons assurant la connexion entre les hourdis en béton et les âmes en acier.

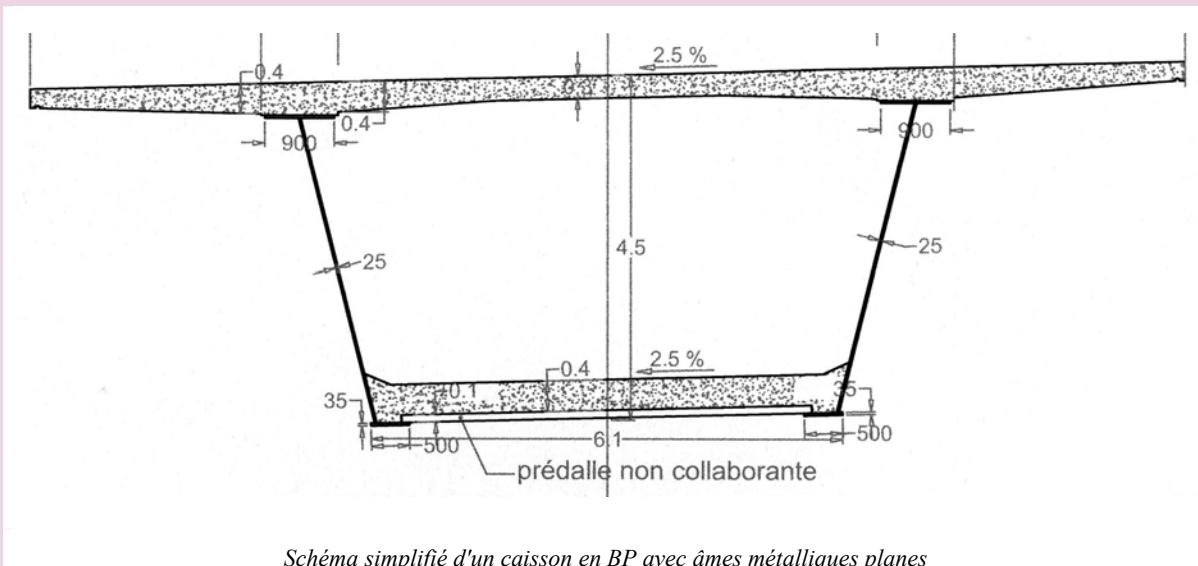


Schéma simplifié d'un caisson en BP avec âmes métalliques planes

Aspect innovant

L'innovation introduite par ces solutions est l'utilisation d'âmes métalliques. En effet, la majorité des caissons précontraints construits dans le monde aujourd'hui sont des caissons comportant des âmes en béton d'épaisseur unitaire comprise entre 30 et 70 cm selon la largeur du tablier.

Intérêt

L'utilisation d'âmes métalliques permet un gain de poids considérable sur le tablier et ouvre la porte à des économies sensibles sur celui-ci mais aussi sur ses appuis, notamment ses fondations.

En construction par encorbellements successifs, l'utilisation des âmes métalliques permet aussi de réduire sensiblement le coût des coffrages (équipages mobiles) nécessaires à la construction du tablier.

L'utilisation d'âmes métalliques peut également présenter des avantages esthétiques : introduction d'une couleur autre que celle du béton, structure apparaissant plus mince, etc.

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi des caissons à âmes métalliques est sensiblement le même que celui des caissons en béton classiques. Toutefois, le gain de poids procuré par ces âmes légères est particulièrement appréciable pour certains ouvrages :

- les ponts poussés qui requièrent une grande quantité de précontrainte,
- les ouvrages situés en zone sismique et comportant des portées supérieures à 70/80 m,
- les ouvrages comportant des portées supérieures à 90 m.

Illustrations



Un exemple récent de caisson à âmes métalliques planes, le viaduc de Roccaprebalza, en Italie

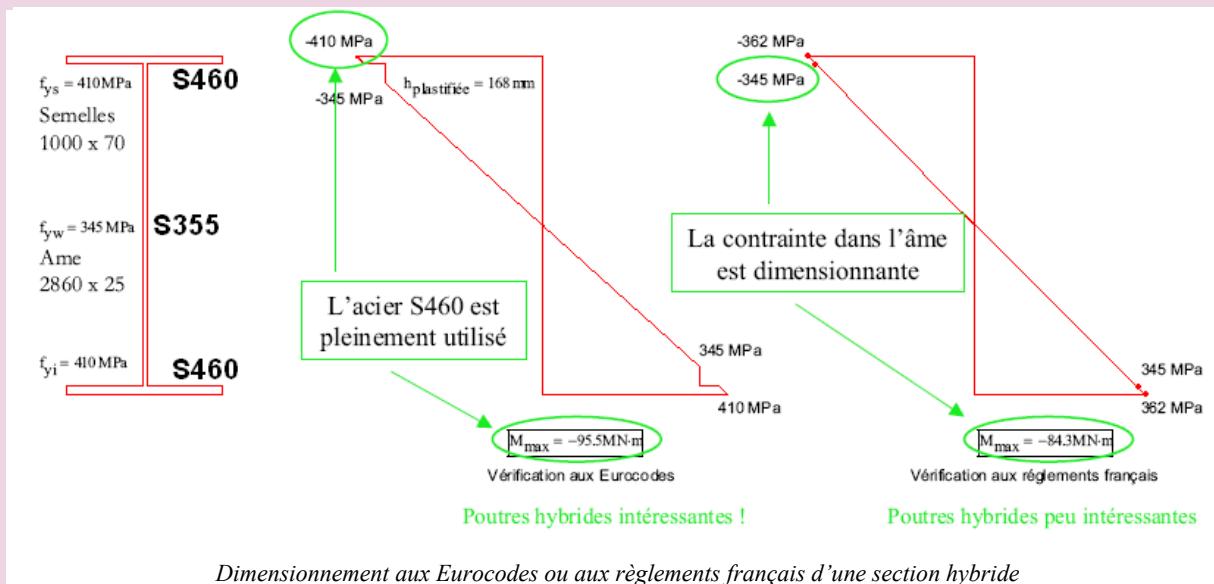
Contacts : E. Bouchon (Sétra), D. de Matteis (Sétra)

Allégement des grands ouvrages en ossature mixte

Description

Deux pistes sont présentées ici pour l'allègement des grands - ou moins grands - ouvrages à ossature mixte :

- l'utilisation d'acier à haute limite d'élasticité (HLE) de type S460 thermomécanique ou S690 trempé et revenu, couplée à des poutres métalliques dites « hybrides », c'est-à-dire comprenant des aciers de nuances d'élasticité différentes dans les semelles et dans l'âme. Il est à noter que l'utilisation des poutres hybrides est rendue intéressante avec les Eurocodes, qui autorisent la plastification de l'âme sous moment négatif à l'ELU, ce qui n'était pas le cas avec les règlements français précédents.



- l'ajout d'une membrure inférieure en béton entre les deux poutres principales des bipoutres mixtes, dans les zones situées autour des appuis intermédiaires. La présence de ce deuxième hourdis en béton est appelée « double action mixte ».

Caractère innovant

Piste « aciers HLE » : l'utilisation de l'acier S690 est rendue possible par la norme européenne EN 1993-1-12. Les aspects technologiques (soudage, formage, ...) ont fait l'objet d'études approfondies (publication prochaine d'un guide AFGC [9]).

Piste « double action mixte » : cette solution a été mise en œuvre avec succès à l'étranger, notamment en Espagne sur le réseau de train à grande vitesse. Elle est écrite dans un article la revue Structural Engineering International de l'IABSE [10].

Intérêt des innovations

Piste « aciers HLE » : l'utilisation d'acier à haute limite d'élasticité S460 ou S690, couplée à des poutres hybrides, permet de réduire la quantité d'acier nécessaire dans un ouvrage. Le prix de la charpente métallique est également réduit, mais dans une moindre mesure puisque ces aciers sont un peu plus chers que l'acier de nuance S355. A titre d'exemple, une comparaison a été effectuée lors d'un projet de recherche Européen nommé « ComBri+ » en 2009 [2], sur un caisson mixte de 21,5 m de large et de portées principales 120 m. Il montrait une économie d'acier de 30% pour la charpente principale, hors éléments transversaux, et de 20 % sur le prix de cette même charpente métallique.

L'allègement de la charpente a également des répercussions positives, bien que moins significatives, sur le dimensionnement des piles et des fondations, ainsi que sur le transport. L'intérêt de l'innovation est donc à la fois environnemental et économique.

Piste « double action mixte » : cette solution permet d'une part de réduire sensiblement la membrure inférieure près des piles, d'un facteur deux environ, et d'autre part d'avoir une grande rigidité transversale dans ces zones, ce qui réduit grandement les problèmes de déversement de la membrure inférieure et augmente la robustesse de la solution bipoutre.

La rigidité de torsion sur appui permet une très bonne répartition des charges excentrées transversalement. L'expansion du hourdis inférieur peut être modulée entre l'appui et la mi-travée. A mi-travée le hourdis béton peut soit être remplacé par un treillis métallique pour ne pas surcharger l'ouvrage, soit être supprimé.

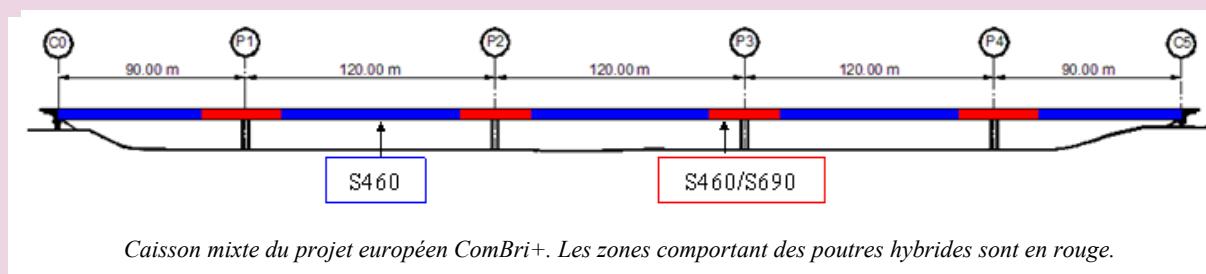
Domaine d'emploi

Piste « aciers HLE » : ouvrages de portée supérieure à 60 m environ - poutres hybrides S355/S460, ou S460/S690 pour des portées plus importantes.

Piste « double action mixte » : ouvrages de portée supérieure à 60 m environ.

Illustrations

Piste « aciers HLE » :



Piste « double action mixte » :



Pont à double action mixte en Espagne

Contacts : J. Raoul, A. Petel (Sétra)

Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances

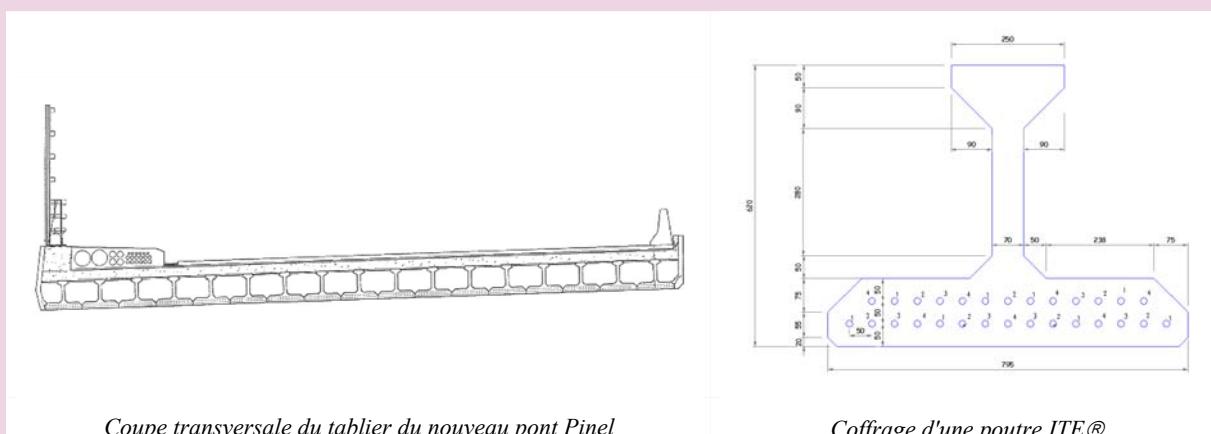
Petits ouvrages : le triplement du pont Pinel à Rouen

Description

Le nouveau pont Pinel [3] est un pont de 27 m de longueur et 14 m de largeur qui a été construit en 2007 dans la banlieue Ouest de Rouen. Il franchit la voie de desserte de la gare de triage Ouest et triple un ouvrage existant.

Conçu par Eiffage TP en variante à un tablier de type dalle à poutrelles enrobées, son tablier est constitué par une dalle en béton armé classique d'épaisseur variable comprise entre 21 et 32 cm et par 17 poutrelles en T inversé, exécutées en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) selon les Recommandations de l'AFGC [4] et placées à "touche-touche".

Les poutrelles en BFUP, dont le nom industriel est poutres ITE® (poutres en I à Talon Elargi), constituent la principale innovation de l'ouvrage. Elles sont chacune constituées d'un gros talon de 0,80 m x 0,15 m et d'une âme de 47 cm de hauteur et d'épaisseur comprise entre 7 et 15 cm. Elles sont exécutées avec un BFUP de 165 MPa nommé BSI®, déjà utilisé par Eiffage notamment sur la couverture de la barrière de péage du viaduc de Millau. Elles sont précontraintes par 28 torons T15S tous placés dans le talon.



Coupe transversale du tablier du nouveau pont Pinel

Coffrage d'une poutre ITE®

Caractère innovant

La principale innovation mise en œuvre sur le nouveau pont Pinel est l'utilisation de poutrelles précontraintes exécutées avec un béton fibré à ultra hautes performances dit BFUP.

Intérêt de l'innovation

Comme précisé ci-dessus, les poutres ITE® sont exécutées en BFUP, un matériau présentant une très grande résistance. Il en résulte que des poutres exécutées en BFUP sont plus minces et plus légères que des poutres équivalentes en béton classique, ce qui peut permettre une économie sur les appuis mais aussi sur les moyens de levage de ces poutres. Le BFUP présente également une porosité beaucoup plus faible qu'un béton classique, une qualité qui devrait conférer aux pièces exécutées avec ce matériau une très grande durabilité.

Les poutres ITE® sont également conçues pour être posées de manière jointive, ce qui permet de réaliser le hourdis supérieur sans avoir à interrompre la circulation sous l'ouvrage.

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi des ouvrages à poutres ITE® est celui des tabliers ou des couvertures présentant des portées inférieures à 30 m et à construire au-dessus de voies (routières ou ferroviaires) circulées. A ce titre, ces structures présentent clairement le même domaine d'emploi que les dalles à poutrelles enrobées.

Illustrations



Sous-face du tablier de l'ouvrage



Poutres ITE

Contacts : E. Bouchon (Sétra), A. Petel (Sétra , D. de Matteis (Sétra)

Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances

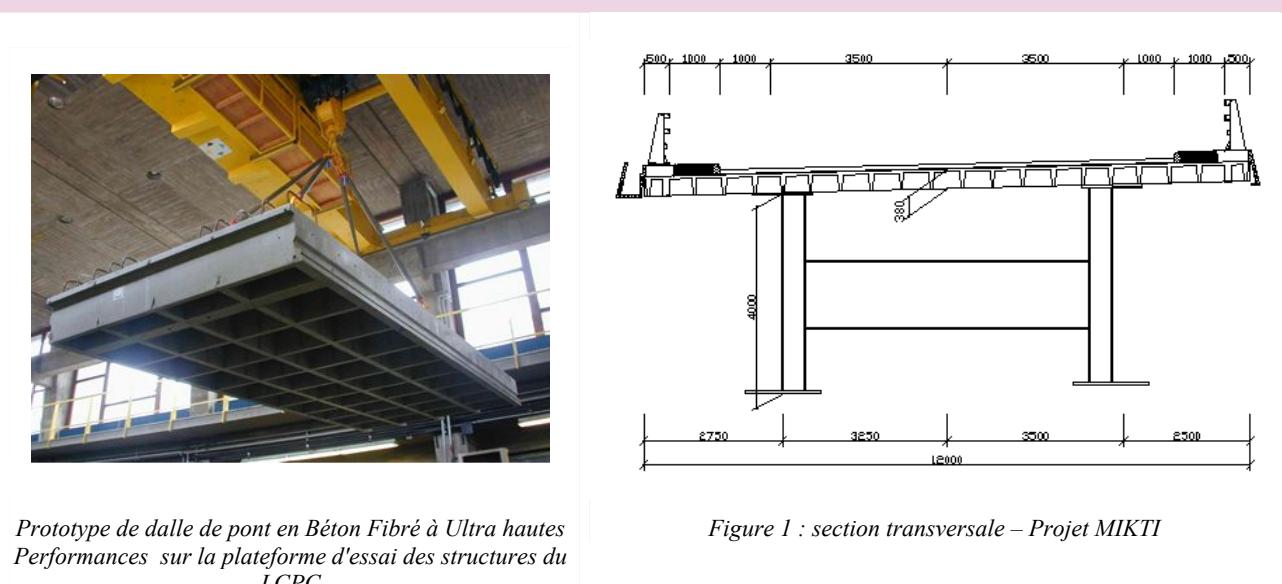
Dalles de pont mixte en BFUP

Description

La structure est une dalle de pont mixte acier/béton réalisée en BFUP.

La solution a été mise au point et validée expérimentalement dans le cadre du projet national MIKTI [5] [12][13]. Elle a fait l'objet d'une première application sur un projet réel qui n'a pas encore été construit (RN7 – déviation de Livron Loriol) [14].

Il s'agit d'une dalle gaufrée constituée d'une dalle de roulement de seulement 5 cm d'épaisseur, renforcée dans les directions transversale et longitudinale par des nervures espacées d'environ 60 cm. (photo de couverture et ci-dessous et figure 1). La hauteur totale de la dalle nervures comprises est de 38 cm pour une épaisseur équivalente moyenne inférieure à 15 cm.



Prototype de dalle de pont en Béton Fibré à Ultra hautes Performances sur la plateforme d'essai des structures du LCPC

Figure 1 : section transversale – Projet MIKTI

La dalle est réalisée au moyen d'éléments préfabriqués précontraints par des torons prétendus mis en œuvre dans les nervures transversales (figure 2). Une fois les éléments préfabriqués posés sur la charpente, le clavage entre les éléments est réalisé au moyen de joints coulés en place puis comprimés par une précontrainte longitudinale extérieure filante régnant entre les nervures longitudinales.

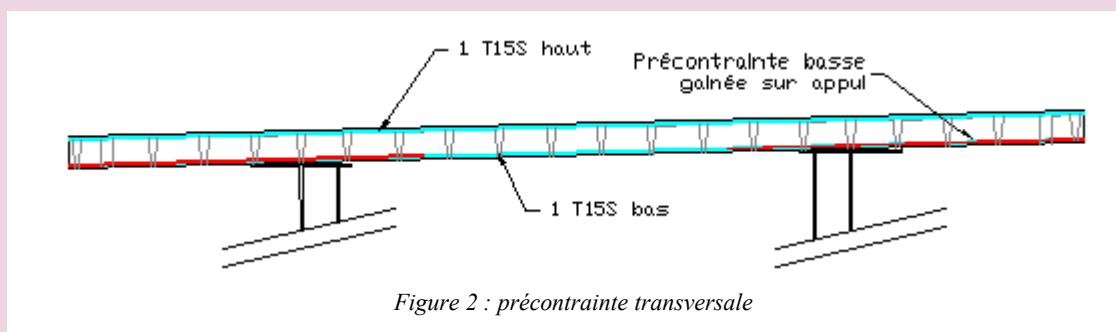


Figure 2 : précontrainte transversale

Une fois l'ensemble des éléments clavés, la dalle est connectée à la charpente métallique par injection de mortier haute performance au sein des alvéoles situées à l'aplomb des semelles supérieures des poutres métalliques (figure 3).

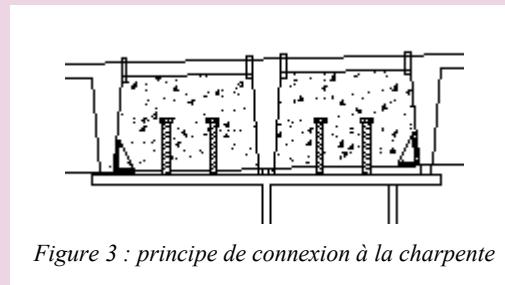
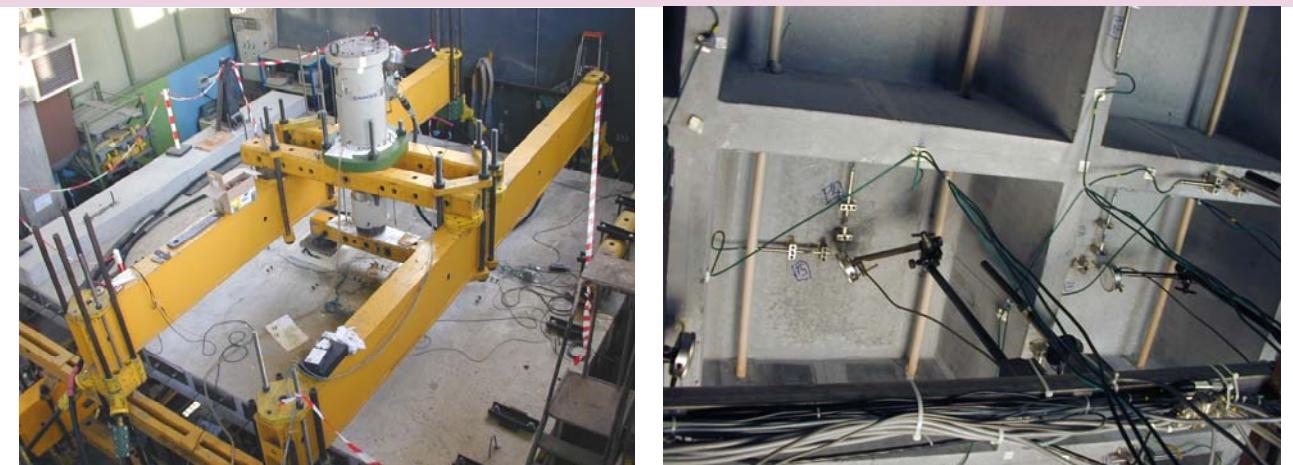


Figure 3 : principe de connexion à la charpente

Validation de la solution

Un programme exhaustif d'expérimentation réalisée par le LCPC [2][15][16] a permis de vérifier :

- l'absence de risque de fatigue de la dalle sous les charges d'exploitation des Eurocodes,
- la résistance au poinçonnement de la dalle, y compris en l'absence éventuelle de revêtement de chaussée,
- l'absence d'endommagement de la dalle en BFUP sous les effets des chocs sur les dispositifs de retenue (essais à rupture de montants de BN4) (figure 4),
- la résistance de la connexion dalle/charpente dont la rupture n'a pu être obtenue pour des efforts bien supérieurs à la résistance requise (essai push-out).



Prototype en cours d'essai sur la plateforme d'essai des structures du LCPC

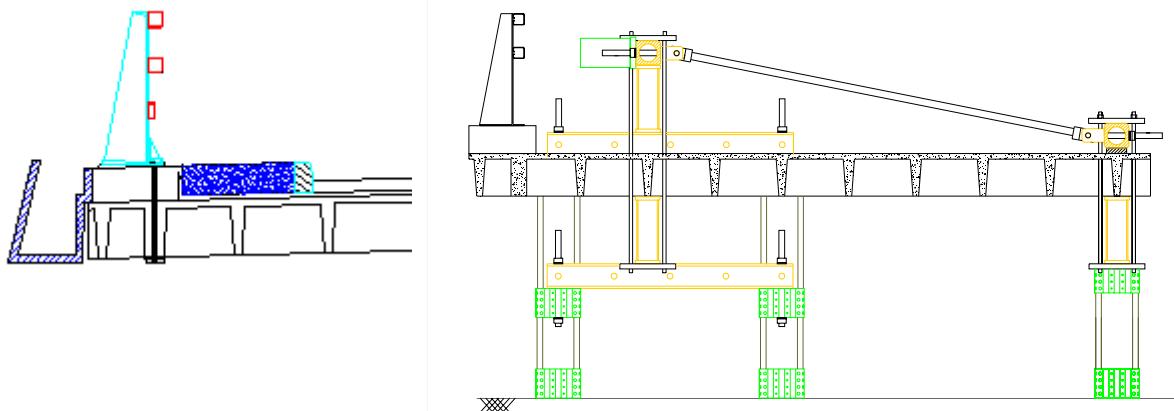


Figure 4 : principe d'ancrage des dispositifs de retenue (ancrage type P) et montage d'essai au LCPC

Intérêt de la solution – Domaine d'emploi

L'intérêt de la solution est lié essentiellement à l'amélioration de la durabilité et au gain de poids par rapport à une solution traditionnelle.

Contrairement à ce que l'on constate pour les bétons ordinaires, le très faible fluage et le retrait de dessiccation quasiment nul des BFUP rendent extrêmement intéressante la mise en précontrainte longitudinale des éléments préfabriqués avant clavage. La compression reste dans la dalle et ne perturbe pas le fonctionnement de la charpente métallique. Il en est de même pour toute opération de dénivellation d'appuis après clavage (ou décintrement d'une structure isostatique après clavage) qui est très efficace pour comprimer la dalle sous l'effet combiné d'un module de béton élevé et de la quasi absence de fluage. La solution garantit ainsi une structure mixte sans fissuration de la dalle, cette dernière étant constituée par ailleurs d'un matériau extrêmement fermé donc pérenne.

Ce type de solution permet de diviser pratiquement par deux le poids de la dalle par rapport à une solution traditionnelle et conduit à une réduction du poids de la charpente métallique de l'ordre de 15 à 20 %.

Elle est économiquement pertinente pour toutes les solutions pour lesquelles une réduction du poids propre est intéressante :

- pont de grande portée (MIKTI : 130 m de portée principale) ;
- lançage de la charpente avec la dalle ; solution intéressante dans le cas d'exécution sous forte contrainte d'exploitation (Livoron Loriol : PS sur une voie ferroviaire) ;
- PS sur une autoroute en service : structure isostatique permettant de supprimer les appuis intermédiaires et la précontrainte longitudinale dans la dalle, mise en œuvre en une seule phase de l'ensemble de la structure (charpente + dalle) ;
- ouvrage en zone sismique : réduction sensible des efforts sur les appuis ;
- ouvrage fortement comprimé : tablier mixte de pont à haubans.

Par ailleurs les études conduites dans le cadre du projet européen NR2C [9] ont montré qu'une dalle gaufrée en BFUP directement inspirée du projet MIKTI pouvait constituer une solution économiquement extrêmement performante dans le cas des ouvrages de très petite portée (pont dalle de portée inférieure à 10 m, suppression de la charpente).

Contacts : E. Bouchon (Sétra), A. Petel (Sétra), F. Toutlemonde (LCPC), J. Resplendino (Dir Méditerranée)
F. Tavakoli (Cete de Lyon)

Ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances

Réparation et renforcement de dalles

Description et domaine d'emploi

Les BFUP, de par les hautes résistances mécaniques qu'ils peuvent atteindre, ainsi que par leur durabilité démontrée sur les premières structures BFUP, suscitent de nombreuses applications. Dans le domaine de la réparation et le renforcement d'ouvrages existants, ce matériau semble bien indiqué car il peut être employé en éléments très minces et relativement légers, qui présentent toutefois des propriétés mécaniques remarquables. Ainsi, le Sétra a commencé à mettre en œuvre des projets expérimentaux de réparation et renforcement d'ouvrages : l'un sur un ouvrage à dalle orthotrope, l'autre sur une passerelle dans un site très contraint.

Description des projets

Au travers de la charte innovation, le Sétra a encouragé une opération de réparation et de renforcement d'un ouvrage à dalle orthotrope de 100 m de portée, dont la structure porteuse encore en bon état pourra ainsi être conservée. La dalle avait été conçue avec des augets discontinus (conception déconseillée à présent) et de nombreuses fissures dans les soudures sont visibles. Plusieurs options avaient été envisagées par les gestionnaires de l'ouvrage : la réfection de toutes les soudures endommagées étant très coûteuse, impactant la circulation et ne permettant pas d'être assurés que le problème ne réapparaisse pas par la suite, la démolition puis reconstruction de l'ouvrage était la solution privilégiée.



Figure 1 : dalle orthotrope, avec augets discontinus

Figure 2 : fissures dans les soudures auget/pièces de pont

Un autre projet où une solution BFUP semblait particulièrement pertinente concerne la réfection d'une dalle de passerelle de maintenance, sur un poste pétrolier. La structure porteuse étant considérée saine, seule la dalle en béton doit être renforcée, en tenant compte de l'environnement marin, du fait que des canalisations au dessus de la dalle doivent être supportées au droit des appuis et encombrent l'espace disponible pour le chantier et du fait que l'exploitation de ce poste pétrolier ne pourra en aucun cas être interrompue par les travaux.

Aspects innovants

Pour ces deux ouvrages, les solutions de réparation proposées par le Sétra font intervenir des éléments préfabriqués en BFUP :

- pour l'ouvrage à dalle orthotrope, il est prévu de remplacer la couche de bitume par un revêtement BFUP de 5 cm d'épaisseur, constitué d'éléments de dalles préfabriqués en atelier ;
- pour la passerelle du poste pétrolier, il est prévu de créer une structure de poutres préfabriquées en BFUP, reposant sur les appuis existants et sur laquelle viennent se poser des éléments de dalles préfabriqués de 2,5 cm d'épaisseur.



Figure 3 : le poste pétrolier



Figure 4 : encombrement des canalisations au dessus de la dalle

Intérêt

Dans le cas de l'ouvrage à dalle orthotrope, le nouveau revêtement permettra de soulager les efforts dans le platelage et ainsi de s'assurer que les fissures observées en sous-face de l'ouvrage ne se propagent pas. Les quantités de matière de BFUP mises en œuvre n'apportant aucun poids supplémentaire, cette solution permet de conserver la structure porteuse de l'ouvrage qui est en bon état.

Par ailleurs, le projet de recherche Orthoplus (avril 2007 - avril 2011), piloté par le Sétra et financé par l'Agence Nationale de Recherche d'avril 2007 à avril 2011 a largement contribué à l'étude de l'interaction entre le platelage et le revêtement. Il montre notamment que l'utilisation d'un revêtement BFUP, par rapport à un revêtement en bitume, permet d'allonger la durée de vie de l'ouvrage, notamment vis-à-vis des phénomènes de fatigue.

Dans le cas de la passerelle du poste pétrolier, La hauteur maximale autorisée de la structure de renforcement étant de 17 cm, seul le BFUP pouvait permettre de tenir compte de cette contrainte, tout en assurant une bonne durabilité en milieu maritime.

Dans ces deux projets, la préfabrication en atelier pour ces projets de réparation constitue également un élément très avantageux pour les maîtres d'ouvrages car il permet de mieux maîtriser la qualité des structures mises en œuvre. En outre, cette méthode permet de limiter la gêne due au chantier, en temps comme en pénibilité puisque les éléments peuvent être dimensionnés de façon à pouvoir être facilement manutentionnés.

Enfin, la durabilité du BFUP a été un facteur déterminant dans le choix de la solution car, que ce soit en revêtement ou en tant que structure en milieu maritime, le BFUP devrait permettre d'assurer une durée de vie supplémentaire aux ouvrages renforcés. Contrairement au bitume, le revêtement en BFUP ne devrait pas nécessiter de remplacements fréquents.

Contacts : E. Bouchon (Sétra), E. Luangkhot (Sétra)

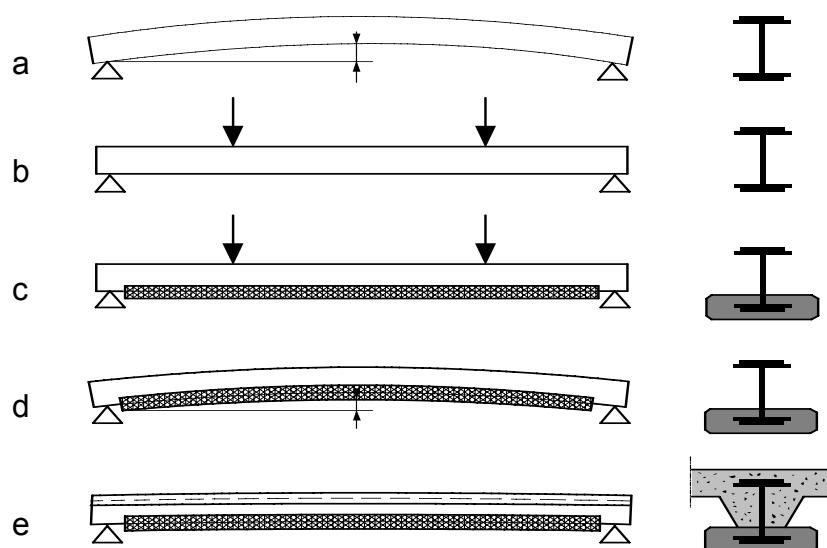
Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée

Les poutres préfléchies

Description

Les poutres préfléchies sont des poutres mixtes dont la semelle inférieure métallique est enrobée dans un talon en béton comprimé au jeune âge par "préflexion", c'est à dire par la mise en flexion de la poutre avant bétonnage du talon puis son relâchement une fois le béton durci. Cette compression peut être complétée par de la précontrainte. Elle est dimensionnée pour que le talon reste comprimé à long terme sous charge fréquente et ne fissure pas à l'état limite de service. L'âme et la semelle supérieure de la poutre peuvent également être enrobées dans un béton de seconde phase.

- a) contreflèche (aciériste)
- b) flexion de la poutre métallique (usine)
- c) bétonnage du talon inférieur (usine)
- d) relâchement de la flexion (usine)
- e) bétonnage complémentaire (usine ou sur site)



Aspect innovant



Essai d'une poutre préfléchie à talon BTHP au LCPC

Cette technique a été développée en Belgique dans les années 1950. Elle est très utilisée pour les ponts rails en Belgique.

Les développements réalisés au LCPC dans le cadre du projet national MIKTI [4] ont permis de l'étendre aux bétons à très hautes performances auto-plaçants (C80), de préciser les méthodes de calcul des effets du fluage et du retrait du béton, pour mieux contrôler l'état de l'ouvrage à long terme.

Intérêt et domaine d'emploi

Les poutres préfléchies ont, à élancement égal, une rigidité très supérieure à celle des poutres mixtes classiques et consomment moins d'acier. Elles permettent de constituer une structure de type VIPM (viaduc isostatique à poutres mixtes), comparables sur de nombreux aspects aux anciens VIPP, à commencer par le domaine de portée économique. Le retour d'expérience concernant leur durabilité est par contre excellent.

Dans le domaine des ponts routiers, elles permettent de franchir des portées jusqu'à 40 m, voire davantage en ajoutant de la précontrainte dans le talon. Le gain en rigidité peut être remplacé par un gain en élancement, permettant de concevoir des structures plus tendues que les structures mixtes classiques.

Dans le domaine des ponts rails, la rigidité de la structure permet de respecter économiquement les critères de flèches sévères des ponts rails. Les portées seront de l'ordre de trente mètres.

Dans les deux cas, la non fissuration du talon sous charge de service est très bénéfique pour la résistance à la fatigue de la semelle inférieure, car les variations de contrainte sous charge d'exploitation sont très réduites.

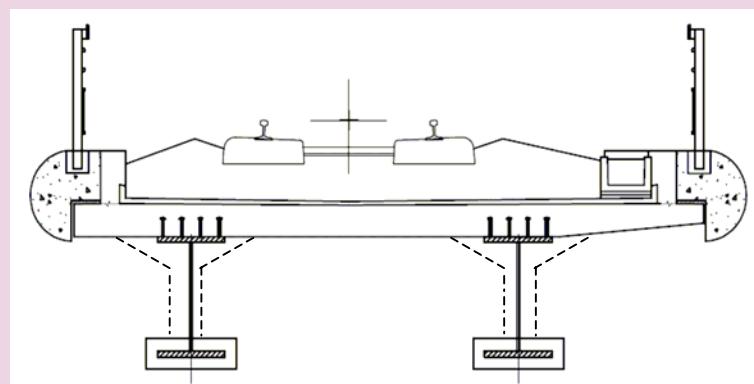
L'enrobage de la semelle inférieure par du béton peut être complété par celui de l'âme et de la semelle supérieure, réalisé en usine, permettant ainsi d'avoir un pont mixte ne nécessitant aucune remise en peinture, dont l'apparence est celle d'un pont à poutres en béton précontraint.

Exemple de pont mixte bipoutre

Rapport des sections du talon béton sur la semelle inférieure en acier : 10

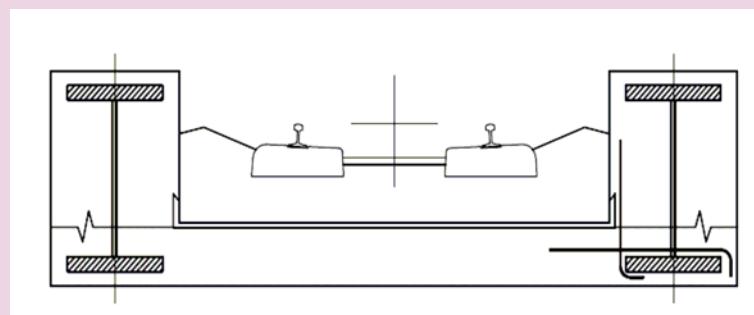
Portées courantes :

- 30 m (ferroviaire)
- 40 m (route)



Tablier en U à 2 poutres préfléchies

- Gabarit très réduit
- Portée : 15 m (ferroviaire)



Contacts : T Kretz (Sétra), F. Toutlemonde (LCPC)

Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée

Les poutres à semelle supérieure en béton

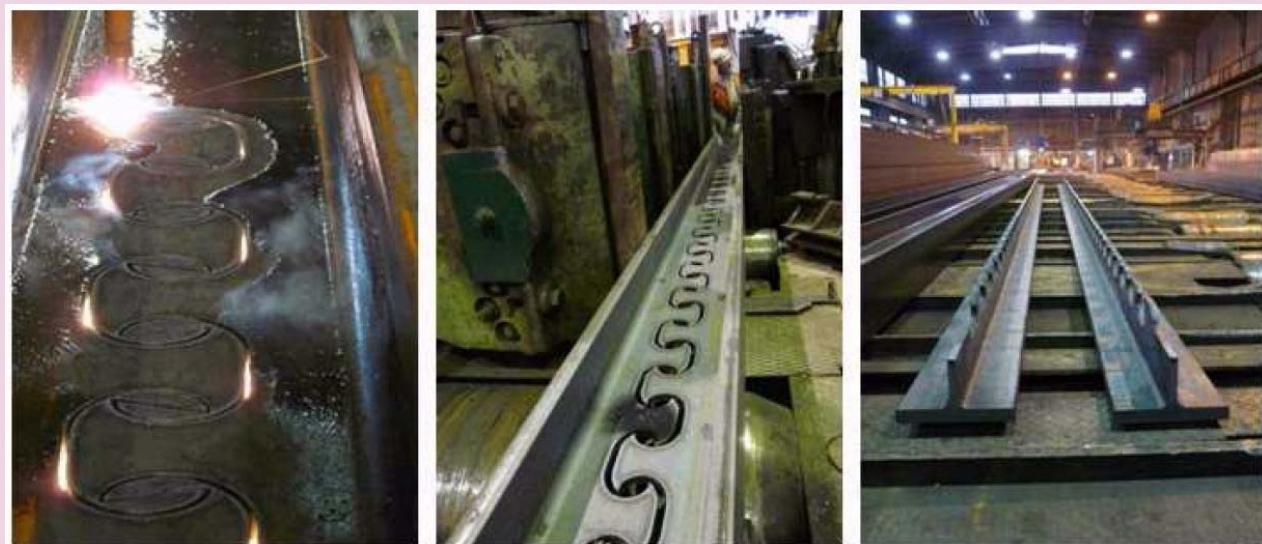
Description

Dans une poutre à semelle supérieure en béton, l'âme est directement connectée à la semelle supérieure en béton réalisée en usine ou à la dalle coulée en place.

Aspect innovant

Pour assurer la connexion au béton, la partie supérieure de l'âme est découpée selon une forme spécifique. Le Sétra a mis au point dans le cadre du projet européen Précobeam [6][17] une forme en cloître appelée découpe CL qui permet :

- de transmettre les efforts sans nécessiter de coûteux perçages complémentaires de l'âme, ni aucune soudure de connecteurs de renforts,
- de résister par le choix de lignes arrondies à la fatigue de l'acier.



Des essais approfondis en résistance et en fatigue ont été menés pour aboutir à des règles de dimensionnement pour la découpe en cloître.

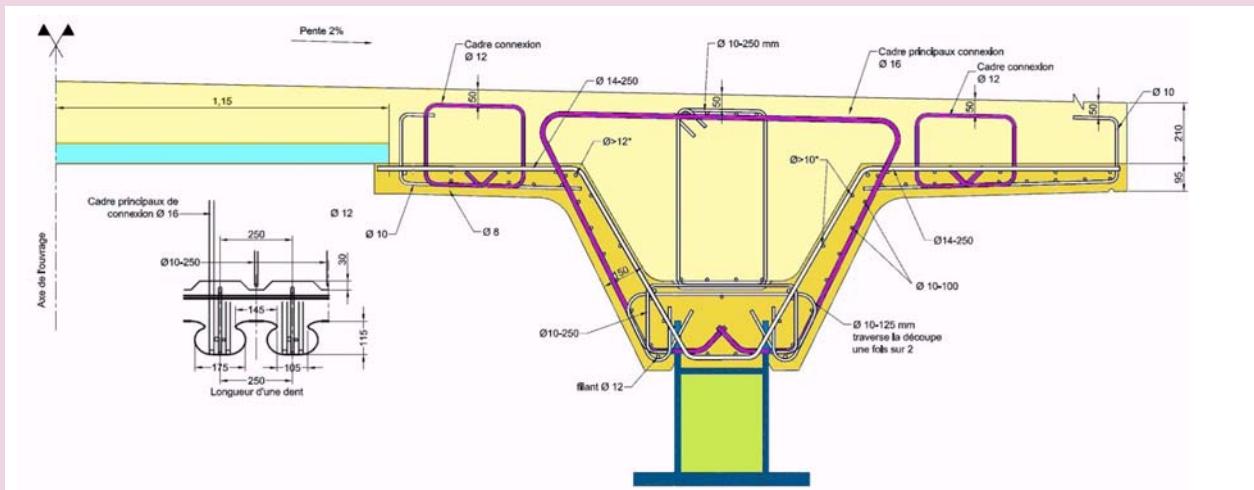
Intérêt

Diverses nouvelles formes d'association de l'acier et du béton sont rendues possibles. La réalisation d'une simple découpe unique et continue est peu coûteuse et permet de réduire à l'extrême les pertes de matière, ce qui est très avantageux tant pour le bilan économique que pour l'écobilan.

Domaine d'emploi

Les membrures supérieures des ponts mixtes en travée isostatique sont faibles et il n'est généralement pas possible de les monter une par une à la grue en raison du risque de déversement que présente une telle poutre isolée.

Une membrure supérieure en béton peut être plus large tout en restant bon marché. Il est alors possible de monter les poutres mixtes une par une à la grue. Les membrures supérieures en béton une fois montées font office de prédalles qui servent de coffrage pour couler en place la dalle de solidarisation.



Avant-projet d'un pont cadre pour le franchissement d'un torrent (voir fiche ouvrages intégrés en ossature mixte)
Coupe transversale de la poutre "Précobeam" avec membrure supérieure en béton de hauteur variable

Différents types de morphologies sont envisageables pour s'adapter aux besoins et pour privilégier ou non l'utilisation de poutrelles laminées. L'absence de recoins risquant de piéger l'eau est favorable pour envisager l'emploi d'acier autopatinable, d'une nuance adaptée à l'exposition, afin de réduire à la fois les coûts d'entretien et l'impact de l'ouvrage sur la santé et l'environnement. On rappelle que l'emploi d'acier autopatinable n'est envisageable que dans les expositions peu agressives.

La gêne que le chantier occasionne est très réduite ce qui est particulièrement apprécié en milieu urbain lors de la réalisation de nouveaux franchissements : l'impact socio-économique de l'ouvrage est réduit.

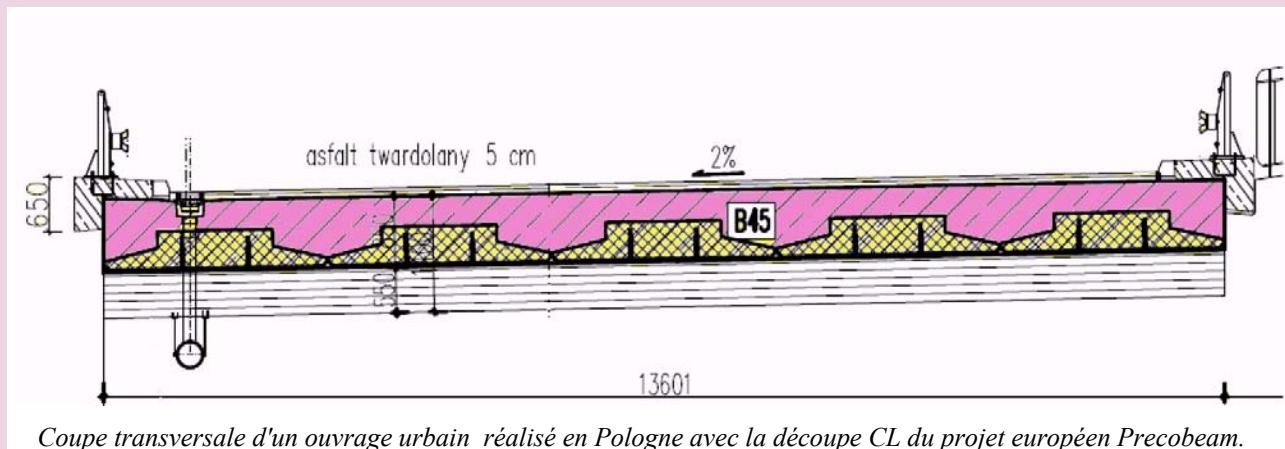


Poutre de pont en construction en Pologne à semelle supérieure béton avec connexion par découpe CL (acier autopatinable)

Autres applications

Simplification des ponts à poutrelles enrobées

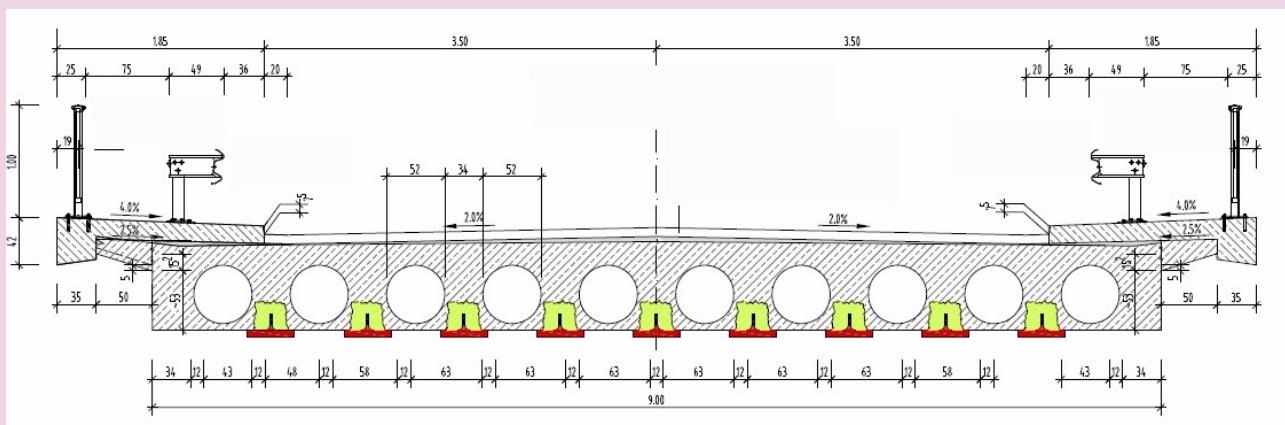
Dans le cas des ponts à poutrelles enrobés, les membrures supérieures n'ont d'utilité qu'en phase provisoire. De ce fait la découpe qui permet la connexion directe de l'âme d'une poutrelle laminée au béton armé de première phase de construction offre la possibilité d'une économie d'acier sensible.



Coupe transversale d'un ouvrage urbain réalisé en Pologne avec la découpe CL du projet européen Precobeam.

Réparation pour renforcer des structures existantes

Dans les zones fissurées de structures anciennes en béton armé ou en béton précontraint, la connexion directe d'une âme au béton armé rend par exemple possible des renforcements par éléments métalliques additionnels. La connexion par découpe concerne les zones d'ancre en extrémité pour lesquelles le collage de plats métallique sur du béton de mauvaise qualité n'est pas possible. La découpe de l'âme du profilé doit dans ce cas être faite sur mesure pour s'adapter à la répartition réelle des armatures constatée après entaille dans le béton armé par hydro-démolition pour faire apparaître le ferraillage transversal. L'entaille est ensuite comblée par un coulis neuf adapté. Ce concept de renforcement nécessite encore des essais de validation.



Contacts : T. Kretz (Sétra), J. Berthelemy (Sétra)

Simplification des ouvrages mixtes acier/béton de petite ou moyenne portée

Les ouvrages intégrés en ossature mixte

Description

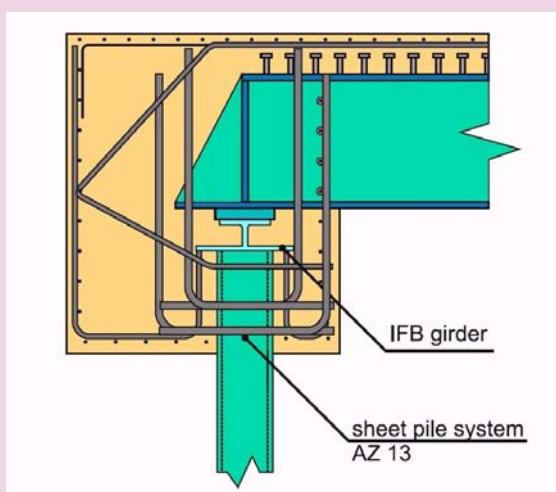
L'immense majorité des ponts reposent sur des appareils d'appuis et sont libres de se dilater. Des joints de chaussée qui doivent supporter directement le poids des essieux du trafic sont de ce fait disposés aux abouts du pont pour composer les allongements causés par les effets thermiques.

Joints de dilatations et appareils d'appui sont des éléments coûteux et vulnérables. Leur remplacement est généralement conduit lors d'une coupure gênante de la circulation. Les ouvrages "intégrés" ont des tabliers intégrés à la culée sur laquelle ils s'encastrent, ce qui permet d'éviter ces deux types équipements.

On appelle aussi "semi-intégrés" les ponts qui permettent d'éviter un seul de ces deux équipements. Dans ce cas, c'est l'appareil d'appui qui est le plus souvent conservé.

Nous présentons ci-dessous des développements récents des ponts en ossature mixte intégrés. Des solutions aussi intéressantes sont envisageables pour des ouvrages en béton armé ou précontraint.

Aspect innovant



Les ponts intégrés en ossature mixte acier-béton ont fait l'objet d'un programme de recherche européen INTAB [7] au cours duquel les dispositions constructives des abouts ont été testées expérimentalement en laboratoire (Université de Liège).

Les dimensions de la dalle de transition jouent un rôle important pour maîtriser les risques de fissuration de la chaussée en arrière de la culée.

Les choix à retenir concernant les dalles de transition sont décrits dans le rapport final [7].

Intérêt

Les ponts intégrés présentent de nombreux avantages potentiels. Leur compétitivité économique est due à plusieurs sources de gains :

- les fondations ne doivent pas être trop rigides pour limiter la raideur de l'encastrement du tablier intégré. On recommande donc de ne mettre en œuvre qu'une seule file de pieux par appui au lieu de deux,
- économie des appareils d'appui,
- économie des joints de chaussée.

L'absence de joints de chaussée et d'appareils d'appui permet d'économiser l'entretien ou le changement de ces éléments vulnérables durant la vie de l'ouvrage, ce qui présente une économie supplémentaire au regard du coût total du pont compté sur son cycle de fonctionnement.

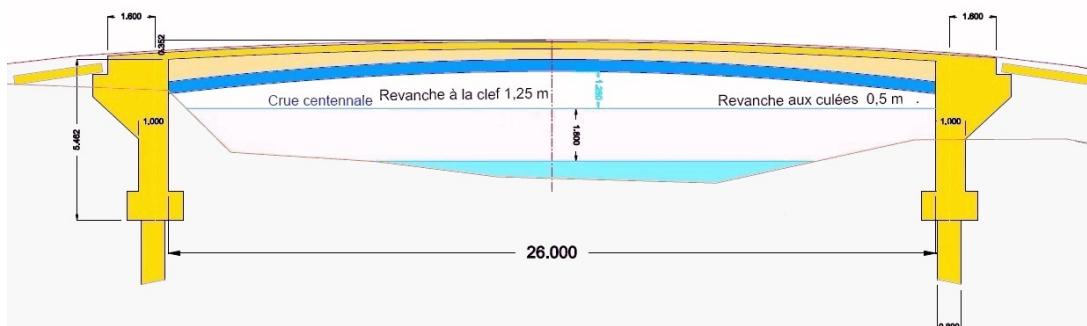
Il peut être intéressant de combiner le choix d'un tablier intégré en ossature mixte acier-béton avec celui d'une connexion directe de l'âme dans la dalle en béton, obtenue par découpe CL de l'âme. Ainsi, les éléments préfabriqués mixtes "préco" qui sont faciles à mettre en place à la grue sont adaptés à la réalisation du tablier intégré et leur emploi est avantageux dans tous les cas où la gêne subie par les infrastructures franchies doit être réduite, ce qui est souvent le cas en milieu urbain. La réalisation de ponts de hauteur variable s'obtient facilement en faisant varier la hauteur de la nervure en béton (*cf.* fiche sur les poutres à semelle supérieure en béton)

Les recoins aux extrémités du pont sont souvent très dégradés sur les extrémités des ponts classiques par les infiltrations d'eau. Ces recoins sont supprimés dans le cas des ponts intégrés.

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi des ponts intégrés est celui des ouvrages de petite et moyenne longueur totale (jusqu'à environ 60 m). La solution en ossature mixte décrite dans cette fiche est particulièrement adaptée aux ouvrages à une travée. Le gain en rigidité obtenu par les encastrements dans les culées permet d'envisager des portées plus importantes que celle d'un tablier isostatique ou un élancement plus important à mi-travée (gain d'environ 25 %).

Les incertitudes qui concernent habituellement seulement les fondations des ponts conventionnels, viennent frapper toute la structure des ponts intégrés. La décision de construire un pont intégré est donc assujettie à l'analyse fine des conditions géotechniques. Assez souvent, le pont "semi-intégré" représente aussi un excellent compromis.



*Avant-projet d'un pont cadre pour le franchissement d'un torrent avec poutres "Précobeam"
(coupe transversale : voir la fiche sur les poutres à semelle supérieure en béton)*

Notons que dans le cas de franchissement des cours d'eau, la répartition des épaisseurs qui convient à un pont intégré de hauteur variable permet d'obtenir un meilleur profil hydraulique. De plus, l'encastrement des abords réduit le risque de voir le pont emporté en cas de crue.

Contacts : T. Kretz (Sétra), J. Berthelemy (Sétra)

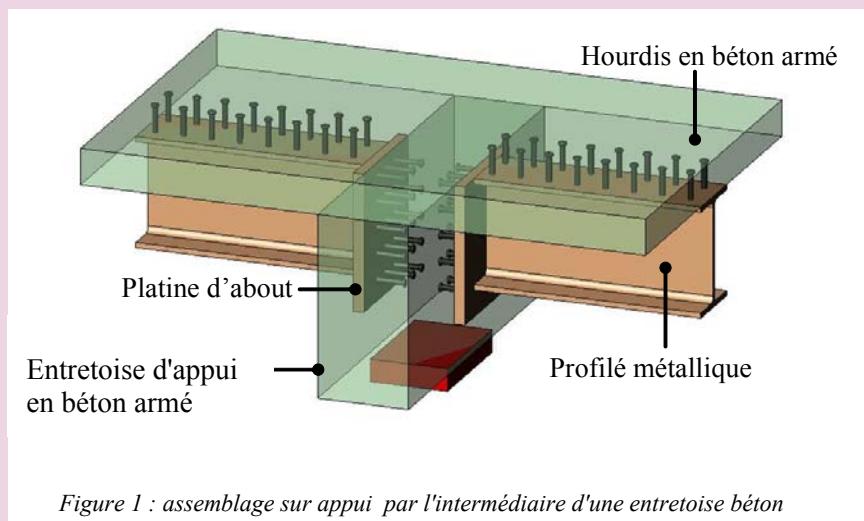
Simplification des ouvrages mixte acier/béton de petite ou moyenne portée

La suppression des soudures sur chantier

Description

Pour les ouvrages mixtes de petite et moyenne portée, il est possible d'éviter toutes les soudures sur chantier, en recourant à des assemblages boulonnés ou à des platines noyées dans une entretoise intermédiaire en béton (figure 1).

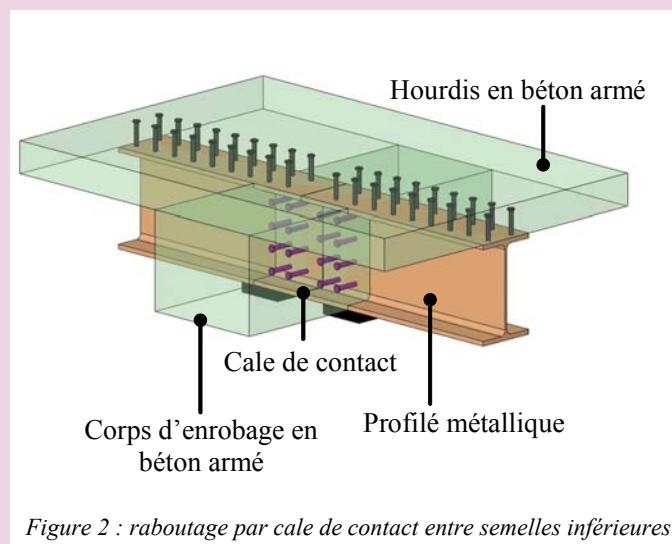
Dans le cadre du Projet National MIKTI [5] sur les ponts mixtes, plusieurs solutions innovantes ont été étudiées, avec l'objectif de retenir des dispositions constructives simples, durables avec un bon contrôle des résistance, déformations, capacité de rotation et risques de fatigue. Ces recherches ont été menées à l'Insa de Rennes.



Aspect innovant

L'innovation réside dans la conception des détails de certains assemblages, comme des cales de contact entre semelles comprimées, et dans la mise au point de méthodes de calcul "pour l'ingénieur", validées par des modélisations numériques très approfondies et des essais sur la dalle d'essai de l'INSA de Rennes.

Ainsi, pour le contact direct entre semelles inférieures comprimées (figure 2), le laboratoire de l'INSA de Rennes a expérimenté une nouvelle technique utilisant un alliage d'aluminium AG5 dans l'intervalle laissé libre entre les semelles des deux profilés mis bout à bout. Cette solution intéressante devra toutefois être encore validée sous l'aspect de la durabilité (risque de corrosion par couplage galvanique).



Expérimentation sur site :
Pont Wilson – (Choisy, Val de Marne)

Intérêt

La réalisation des soudures sur chantier est une étape particulièrement délicate et longue dans la réalisation d'un pont en ossature mixte. De plus, les assemblages soudés sur chantier sont souvent d'un type sensible à la fatigue. La suppression de ces assemblages est donc très intéressante ; elle permet d'avoir un chantier uniquement "béton".

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi est celui des ponts de petite et moyenne portée, plus spécialement celui des ouvrages multi-poutres conçus sans aucune entretoise intermédiaire.

Contact : T. Kretz (Sétra), A. Lachal (Insa Rennes)

Connexion des dalles des structures mixtes acier/béton par collage

Description

La dalle du pont en ossature mixte acier béton est préfabriquée par voussoirs conjugués de 2,50 m de longueur et de pleine largeur du tablier. Les voussoirs sont posés sur cale sur la charpente, réglés puis assemblés entre eux par précontrainte longitudinale ou collés bout à bout.

L'ensemble de la dalle ainsi rendu monolithique est connecté à la charpente par injection d'une colle époxy ou/ et d'une colle polyuréthane.

Les recherches, résumées dans [5] ont été menées à l'INSA de Lyon et à l'université de Reims [8] dans le cadre du projet national MIKTI. Elles ont permis d'établir le cahier des charges de la colle, de proposer des règles de dimensionnement spécifiques de l'assemblage et de vérifier le respect des critères d'une connexion parfaite selon l'Eurocode 4.

Aspect innovant

Le collage structurel est répandu dans de nombreux secteurs industriels, par exemple la construction automobile, mais il reste limité à quelques applications spécifiques dans le domaine du génie civil et plus particulièrement au renforcement par plats en acier ou matériaux composites.

Le développement des renforcements par matériaux composite à base de fibres de carbone a permis de faire progresser la connaissance des performances (et des limites) des assemblages collés. Bénéficiant des connaissances acquises, l'application aux collages des dalles de pont mixte apparaît comme un deuxième champ d'application prometteur.

Les recherches menées dans le cadre du projet national MIKTI ont permis de démontrer la faisabilité de cette application, mais tous les aspects n'ont pas pu être traités. Dans la cadre d'une première application en grandeur réelle, nous recommanderions de conserver une connexion mécanique dans les zones de transfert des efforts (extrémité des dalles, et éventuellement sur appui intermédiaire) et le contrôle du bon comportement en flexion transversale (comportement biaxial).

Intérêt

La connexion par collage des dalles de pont mixte préfabriquées permet d'éviter la réalisation d'un béton de deuxième phase sur chantier, qui est sinon indispensable pour enrober les connecteurs mécaniques en attente. Ce bétonnage de deuxième phase est délicat à réaliser et représente potentiellement le point faible de la dalle, en raison de la fissuration induite par son retrait gêné.

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi est celui des ponts mixtes avec dalles préfabriquées assemblées par précontrainte longitudinale.

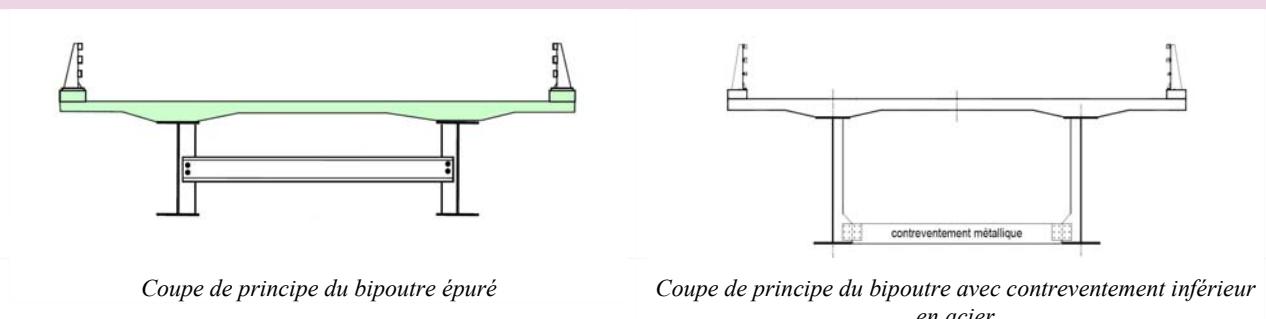
Contact : T. Kretz (Sétra) ; C. Aubagnac (LR d'Autun)

Amélioration de la conception des ouvrages bipoutre en ossature mixte

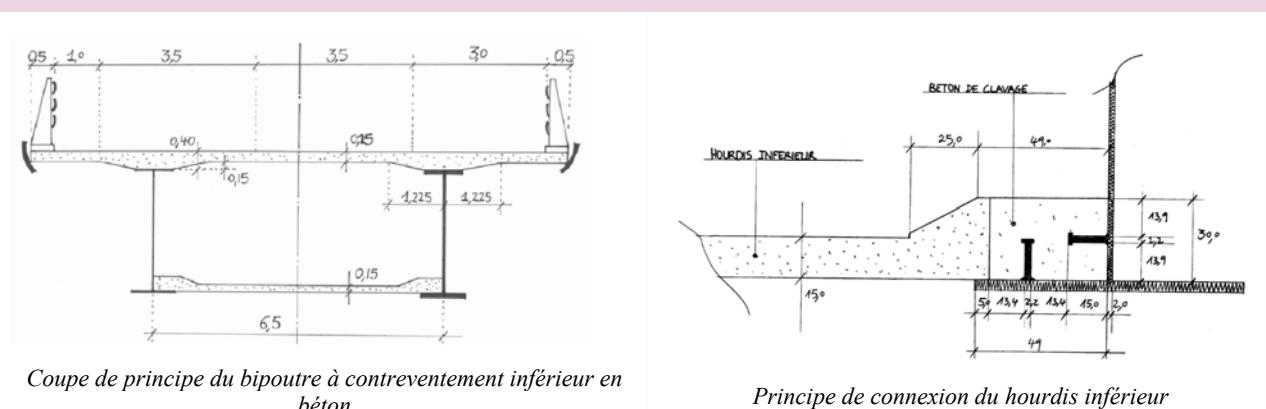
Description

Deux axes d'amélioration sont envisagés pour ces ouvrages :

Une première solution appelée « bipoutre épuré » dans laquelle on simplifie au maximum la conception de la charpente et on réduit le coût des assemblages. L'âme des poutres principales ne comporte pas de raidisseurs longitudinaux. La liaison entretoises-raidisseurs verticaux est réalisée par boulons précontraints dans le cas où il n'y a pas de problème de déversement de la membrure inférieure (zones de moment positif).



La seconde solution est le « bipoutre contreventé ». Les membrures inférieures des poutres principales sont reliées par un contreventement en acier ou en béton. Le contreventement en acier est boulonné aux poutres. Dans le cas d'un contreventement en béton, le hourdis inférieur est continu, et il est connecté aux poutres. Il pourra être constitué d'éléments préfabriqués posés sur les bords des semelles inférieures des poutres, avec une connexion en deuxième phase des poutres et du hourdis.



Aspect innovant

- Bipoutre épuré : absence de raidisseurs longitudinaux d'âme et assemblage par boulons des éléments transversaux.
- Bipoutre contreventé : utilisation d'un contrevevtement inférieur en béton ou en acier dans un pont routier.

Intérêt

Le principal intérêt du bipoutre épuré est la simplification de la conception et de la réalisation de la charpente. Cette simplification permet de réduire le coût de la fabrication et de l'assemblage. Il est possible de réduire également le nombre des entretoises dans les zones de moment positif.

Le bipoutre contreventé est une structure plus redondante que le bipoutre classique. Le contreventement inférieur en acier permet de diminuer notablement la rotation de torsion en travée grâce à l'augmentation de la rigidité de torsion. Il permet également une meilleure répartition des charges entre poutres.

Il en résulte un gain très significatif sur la résistance en fatigue car les deux poutres participent à la résistance sous l'action d'un camion circulant seul sur une voie de droite de l'ouvrage.

Une photo d'un ouvrage de ce type est également présentée dans la fiche "allégement des grands ouvrages en ossature mixte" de ce rapport.



Contreventement inférieur en acier

Le hourdis inférieur continu permet de transformer le bipoutre en « caisson » en ce qui concerne le fonctionnement mécanique. Il participe également à la résistance dans les zones de moment négatif (effet double action mixte). On peut également le précontraindre, en travée, permettant sa participation à la flexion longitudinale. Il est également possible d'envisager une structure hybride avec un hourdis inférieur partiel situé dans les zones de moments négatifs et au droit des culées. Le hourdis inférieur participe ainsi à la résistance et empêche le déversement des membrures comprimées.

Bien conçu, le hourdis inférieur permet d'accroître la robustesse des bipoutres : il permet de combiner le fonctionnement en torsion pure et en torsion générée, il permet de constituer une rotule plastique sur appui à l'Etat Limite Ultime et d'éviter la rupture brutale par déversement de cette zone.

Enfin, cette conception permet un gain significatif sur la quantité d'acier, donc un gain en terme d'impact carbone. Les études comparatives menées dans le cadre du projet national MIKTI ont permis d'établir les bilans comparatifs suivants :

Solutions	Consommation d'acier	Coût global (acier + béton)
Bipoutre de base	100	100
Bipoutre avec contreventement métallique	97	103
Bipoutre avec hourdis inférieur béton	81	106
Bipoutre avec hourdis béton en zone d'appui et contreventement métallique en travée	87	97

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi est celui des tabliers bipoutres.

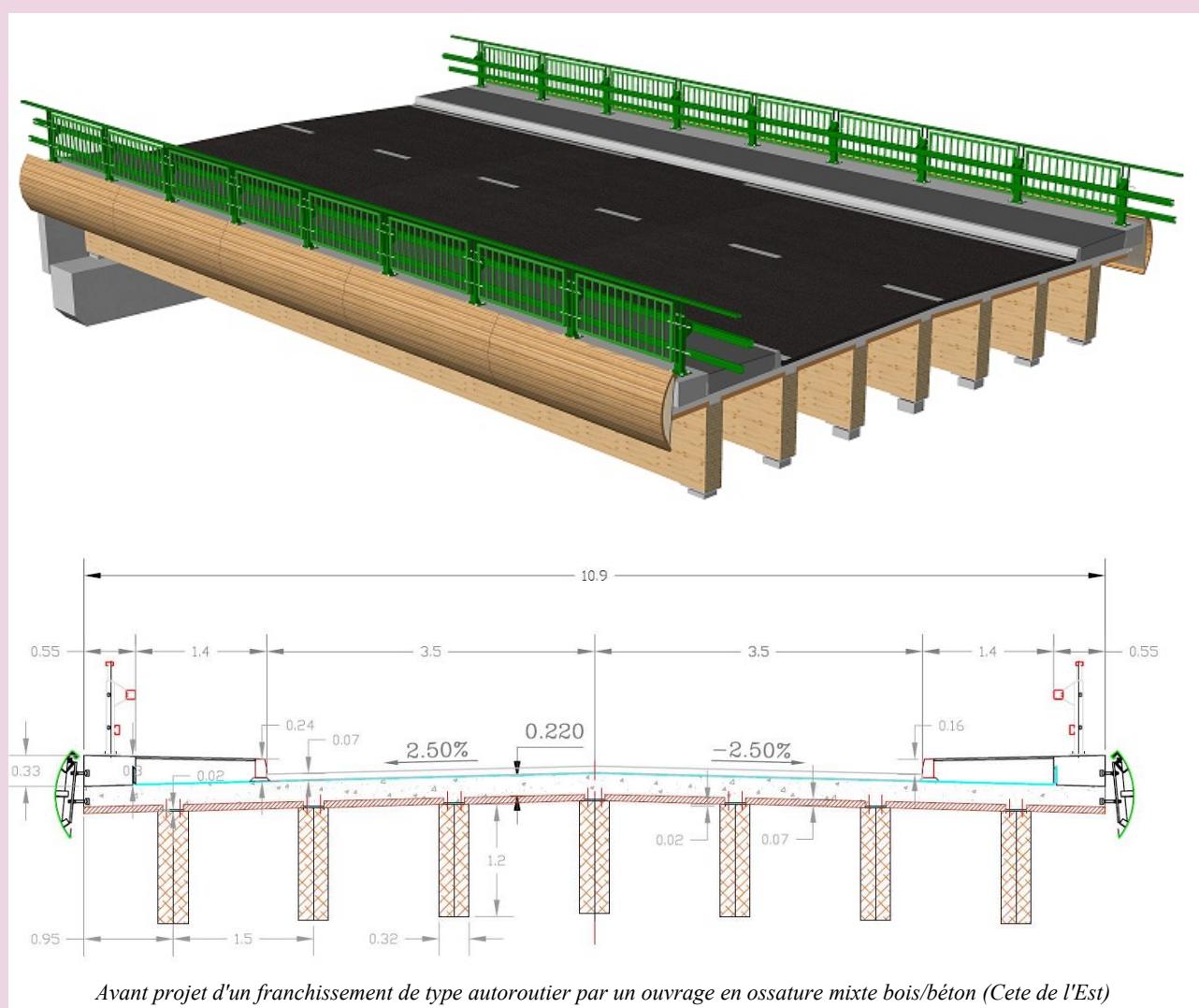
Contacts : J. Raoul (Sétra), F. Tavakoli (CETE de Lyon)

Ouvrages en ossature mixte bois /béton

Description

Le succès des matériaux industriels comme l'acier et le béton a éclipsé quelque temps l'intérêt de ce matériau naturel aux caractéristiques mécaniques pourtant bien intéressantes. Il convient aujourd'hui de remettre en évidence les qualités de ce matériau, et surtout les bonnes dispositions constructives qui gouvernent un ouvrage durable. Le matériau bois doit retrouver dans le domaine de la construction toute sa place, et notamment dans le domaine des ponts routiers.

Ces ponts à ossature mixte bois-béton bénéficient d'une association qui paraît heureuse: le béton, qui a une excellente aptitude à travailler en plaque, sert de couche de roulement aux charges de chaussée mais aussi de protection contre l'eau aux poutres en bois. Le bois est utilisé de manière efficace avec des poutres porteuses en lamellé-collé, technique industrielle qui permet d'adapter facilement les caractéristiques des poutres aux besoins du franchissement.



Aspect innovant

Les innovations reposent sur plusieurs points :

- une conception en phase avec les principes du développement durable par l'utilisation de matériaux naturels, par l'absence d'utilisation de traitement chimique du bois (à confirmer), le bois bénéficiant de conditions climatiques favorables du fait de la dalle de roulement qui sert de parapluie. L'entretien ultérieur de l'ouvrage est également réduit par le choix de dispositions constructives adaptées, comme la suppression des joints de chaussée ;
- une conception économique et fiable comme les ouvrages classiques en béton ou en métal. L'ouvrage peut être mis en oeuvre par une entreprise générale de travaux publics, les parties en bois étant fabriquées en usine. Les interfaces entre les différents corps de métier ont été étudiées pour les limiter et leur assurer une parfaite durabilité. La connexion bois/béton fait tout particulièrement l'objet d'études de manière à fiabiliser l'analyse du comportement à long terme de l'ouvrage ;
- l'utilisation d'une dalle de roulement constituée d'éléments préfabriqués en BFUP permet d'une part d'alléger le poids mort que supportent les poutres en bois et d'autre part de faciliter la mise en œuvre ; elle offre un nouveau débouché à cette conception prometteuse de dalle pour ouvrages d'art.

Intérêt

Le développement des ouvrages en ossature mixte bois/béton contribue à redonner au bois ses lettres de noblesse comme matériau de construction. Nous souhaitons proposer une structure type d'ouvrage courant, de conception et d'exécution simple, de manière à apporter la confiance nécessaire aux différents acteurs de l'acte de construire. Cette codification permet en effet de fiabiliser la commande du maître d'ouvrage, la conception et le calcul du concepteur et la réalisation de l'ouvrage. Cette action vise aussi à permettre l'amélioration de la durée de vie des ouvrages en bois, le retour d'expérience montrant que de nombreuses passerelles, mal conçues, ont eu une durée de vie malheureusement assez limitée.

Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi est celui des ponts des petite et moyenne portée, routiers ou piétonniers, d'une longueur continue maximale de l'ordre de 35 m (longueur maximale de poutres transportables par convois exceptionnels). La portée classique de franchissement envisageable est de l'ordre de 15 à 25 m.

La durabilité des ponts en bois est encore source de nombreuses inquiétudes. Ces ouvrages sont pourtant réalisés en grand nombre dans différents pays nordiques. La bonne durabilité de ces ponts a pu être assuré par des traitements de préservation, comme la créosote, un puissant biocide malheureusement toxique. Aujourd'hui, le choix de bonnes dispositions constructives couplé éventuellement à des traitements de préservation écologiquement acceptables permettent d'atteindre cet objectif. Le Sétra a publié un guide [18] sur la maîtrise de la durabilité des ponts en bois. Il est indispensable de s'y référer.

Contacts : J. Raoul (Sétra), P. Corfdir (Cete Est)

Bibliographie

- [1] Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle, Recommandations provisoires LCPC, Mars 2010
- [2] L. DAVAIN, A. PETEL, J. RAOUL, "Une synthèse du projet européen COMBRI", Bulletin Ouvrages d'Art n°62, Sétra, Décembre 2009
- [3] S. CHANUT et al. "Un cinquième pont français en BFUP", Bulletin Ouvrages d'Art n°56, Sétra, Novembre 2007
- [4] Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires, SETRA AFGC Janvier 2002
- [5] Sous la direction de B. CHABROLIN, T.KRETZ, J. LARAVOIRE : Ponts mixtes acier-béton : un guide pour des ouvrages innovants – Projet National MIKTI : Presses des Ponts, 2010
- [6] J. BERTHELLEMY, G SEIDL, "Les poutres Préco", Bulletin Ouvrages d'Art n°54, Sétra, Mars 2007
- [7] Economic and Durable design of composite bridges with integral abutments, Intab Final Report, European Commission, Research Fund for Coal and Steel, report EUR 24224, (<http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2005/INTAB/download.php>)
- [8] L. BOUAZAOUI , Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures acier-béton assemblées par collage. Thèse de doctorat soutenue à l'université de Reims, Champagne Ardenne, 21/10/2005
- [9] New Road Construction Concept (NR2C) : la route en 2040 – projet du 6^{ème} PCRD piloté par le LCPC et organisé sous l'égide du FEHRL : voir <http://nr2c.fehrl.org/>
- [10] Recommandations pour l'emploi des aciers à Haute Limite d'Elasticité (HLE), guide AFGC, publication prévue en 2011
- [11] F.M MATO, J.P. SANTOS, M.O. CORNEJO, "Arroyo Las Piedras Viaduct : the first composite steel concrete High Speed Railway Bridge in Spain, Structural Engineering International, 04/2007
- [12] J. RESPLENDINO, S. BOUTEILLE : Derniers développements dans l'utilisation des bétons fibrés ultra performants en France. In : Proc. GC'2005, AFGC, Paris ,2005.
- [13] J. RESPLENDINO, S. BOUTEILLE : Étude de solutions de tabliers de ponts réalisés en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) et en Matériau Composite (Fibre de verre). La Technique Française du Béton", AFGC 2010.
- [14] F. TAVAKOLI, S. BOUTEILLE, F. TOUTLEMONDE : Application du projet de dalle gaufrée du PN MIKTI sur un ouvrage à Livron-Loriol, Colloque international BFUP 2009, concevoir et construire en BFUP : Etat de l'art et perspectives, AFGC, Marseille (novembre 2009)
- [15] F. TOUTLEMONDE, J. RESPLENDINO, SORELLI, S. BOUTEILLE, S. BRISARD : Innovative design of Ultra-high Performance Fiber-reinforced concrete ribbed slab : experimental validation and preliminary detailed analyses, 7th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Washington D.C. (USA), june 20-22, 2005.
- [16] F. TOUTLEMONDE al. : Experimental validation of a ribbed UHPFRC bridge deck, Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel (Germany), March 05-07, 2008
- [17] J. BERTHELLEMY, W. LORENC, G. SEIDL et al. : Présentation du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle. Revue CONSTRUCTION MÉTALLIQUE du CTICM septembre 2009
- [18] Ponts en bois – Comment assurer leur durabilité, guide technique. Sétra, novembre 2006, réf. 0647.

La période actuelle est spécialement propice à l'innovation : les maîtres d'ouvrage expriment des attentes nouvelles, les défis du développement durable demandent de repenser nos techniques traditionnelles et la concurrence internationale nous impose d'innover pour garder une longueur d'avance.

Les ouvrages d'art sont des ouvrages de génie civil emblématiques. Ils sont le lieu d'expression privilégié de l'innovation dans les domaines des matériaux et structures de génie civil, en raison du haut niveau de performances qu'ils exigent.

Ce rapport illustre les opportunités d'innovations qu'apportent aujourd'hui les ouvrages d'art. Celles-ci sont nombreuses et prometteuses.

Rédigé sous la direction de Thierry KRETZ – Sétra/CTOA
mél : thierry.kretz@developement-durable.gouv.fr

