



Phase de construction du tablier en Poutre Préco [8], [6]

SOLUTION INNOVANTE POUR PONTS DE PETITES ET MOYENNES PORTÉES : POUTRE PRÉCO AVEC CONNEXION PAR DÉCOUPE

Riccardo ZANON*, **Jacques BERTHELLEMY****, **Pierre-Olivier MARTIN*****, **Günter SEIDL******

* ArcelorMittal Long Carbon Europe – Technical Advisory Department

** SÉTRA – Division des Grands Ouvrages et de l'Innovation

*** CTICM – Direction de la Recherche et de la Valorisation

**** SSF Ingenieure – Department for Research & Development

Riccardo.Zanon@arcelormittal.com

Jacques.Berthelley@developpement-durable.gouv.fr

pomartin@cticm.com

gseidl@ssf-ing.de

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte actuel pour les ponts de petites et moyennes portées

En considérant la répartition des typologies de ponts réalisés entre 1998 et 2005 en France [L. Davaine, 6] (cf. Figure 1), on s'aperçoit immédiatement qu'il existe une forte corrélation entre la portée principale et le type struc-

turel. Pour les ouvrages dont la portée principale ne dépasse pas 20 m (qu'on pourrait définir comme ouvrages à petites portées), les solutions en béton (armé ou précontraint) constituent l'essentiel des constructions, avec une part de marché supérieure à 80%. Dans ce domaine, les seuls ouvrages mixtes réalisés en nombre significatif sont les ponts à poutrelles enrobées, que leurs avantages techniques (élancement maximal, ouvrages courbes) rendent souvent compétitifs. Mais au-delà de 40 m de portée principale, la situation est complètement renversée et les ossatures mixtes acier béton s'imposent dans la plupart des cas.

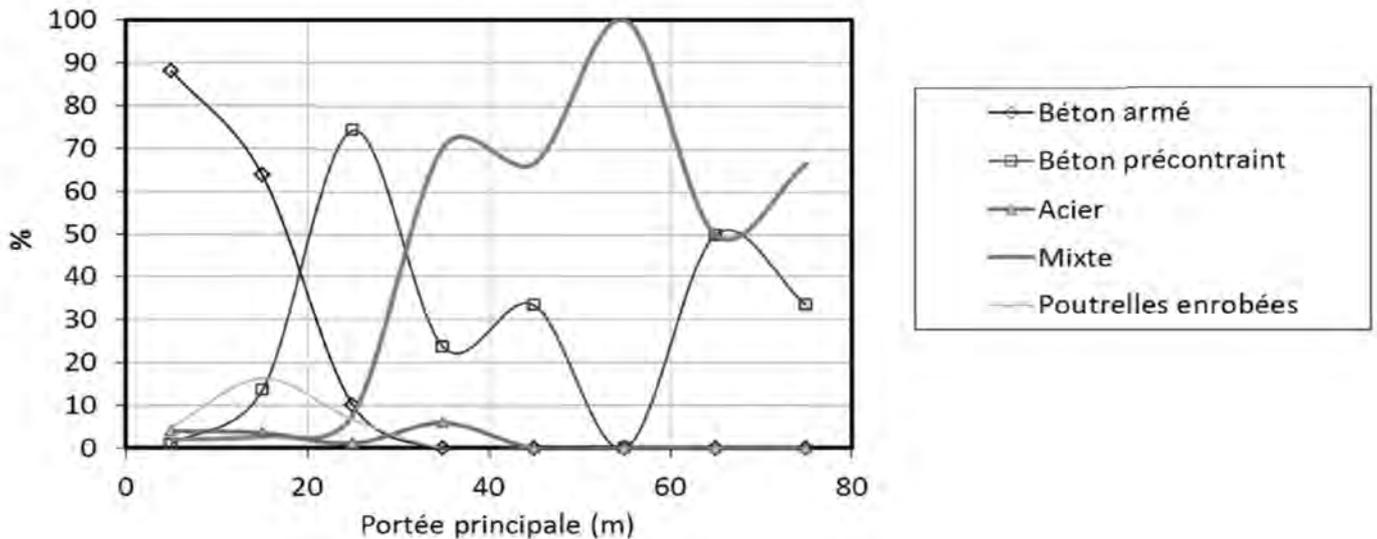


Figure 1 : Répartition du marché des ouvrages d'arts construits entre 1998 et 2005 [L. Davaine, 6]

Le domaine entre 20 m et 40 m, pour ainsi dire à moyenne portée, constitue donc une zone de transition. Il s'agit en fait d'une part très représentative des réalisations, car on y trouve la quasi-totalité des ouvrages de franchissement de voies (route ou rail), ainsi que certains viaducs avec hauteur limitée de piles (donc souvent dans un contexte urbain ou péri-urbain). À 25 m, le béton précontraint représente 70% du marché, à 30 m le béton précontraint et l'ossature mixte se divisent le marché, tandis qu'à 35m cette dernière s'approprie 70% des parts.

Dans cette zone intermédiaire, il semble donc que les deux solutions en compétition sont adaptées mais pas nécessairement optimales. Par exemple, les poutres préfabriquées en béton précontraint par adhérence (PRAD) commencent à perdre leur intérêt quand la portée s'accroît, car l'influence du poids propre devient prépondérante (environ 30% du total à 30 m) ce qui réduit d'autant la charge utile : un grand nombre d'éléments faiblement espacés devient en effet nécessaire. Quant aux ponts mixtes classiques de type bi-poutres, solution très courante pour les grandes portées, leur compétitivité est souvent réduite pour les franchissements avec une exigence sur la hauteur de l'ouvrage (faible tirant d'air) ou quand la portée reste inférieure à trois ou quatre fois la largeur du tablier.

C'est pourquoi a été développée une solution innovante, la poutre Préco, permettant d'optimiser d'un point de vue technique et économique la conception des ouvrages d'art dans ce domaine de portées [7].

1.2. Projets de recherche européens et nationaux

Plusieurs projets de recherche ont été lancés ces dix dernières années pour la mise au point du concept de poutre Préco. Il faut citer en premier lieu les projets RFCS, car Precobeam a posé les bases du concept, et Preco+ en a organisé la dissémination dans plusieurs pays [1], [10],

[11], [6]. En France, on rappelle le Projet national MIKTI, dont le chapitre 1.3 est dédié aux « Poutres avec âme encastree dans la dalle » [2]. En Allemagne, plusieurs projets FOSTA ont mis au point certains aspects complémentaires (FOSTA P804 ; FOSTA P 941). Enfin, en Autriche et en Pologne, plusieurs thèses de doctorat [3], [4], [5], [9], [13] furent consacrées à ce sujet. A l'heure actuelle, le concept de poutre Préco a récemment acquis en Allemagne une « Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung », ce qui équivaut à un statut normatif et qui sera peut-être étendu à moyen terme à tous les pays de l'Union Européenne [3].

Il est important de rappeler la contribution des autres partenaires des différents projets au développement de cette technologie, avec par ordre alphabétique *Acciona Infrastructures SA, Forschungsverein Stahlanwendung e.V., Ramböll Schweden AB, RWTH Aachen - Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Technische Universität Breslau - Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität München - Lehrstuhl für Metallbau, Universität der Bundeswehr München - Lehrstuhl für Stahlbau, Universität Lüttich - Argenco.*

2. LE CONCEPT

2.1. Développement du concept

Une poutre Préco peut être constituée d'une semelle supérieure préfabriquée en béton armé et d'une semelle inférieure en acier à haute limite d'élasticité, et la connexion des deux matériaux se fait par exemple dans l'âme. Cette poutre est PRÉ-fabriquée et sert de CO-ffrage pour un hourdis supérieur de solidarisation. [7]

Pour les petits ponts, la section acier en T_e en partie inférieure est obtenue par oxycoupage au milieu de l'âme d'un profilé laminé. La semelle est dimensionnée pour reprendre le couple de forces dû au moment fléchissant, tandis que l'âme est conçue pour reprendre l'effort tran-

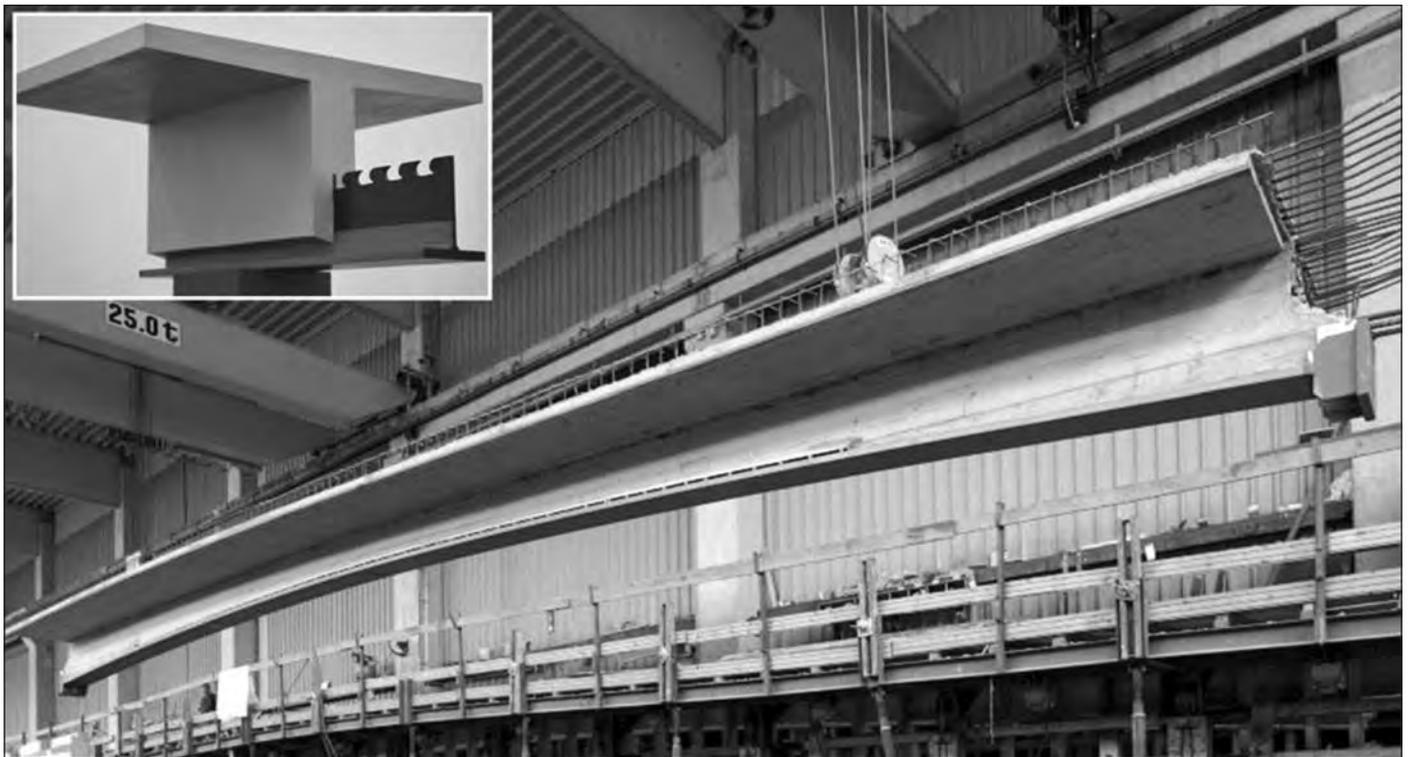


Figure 2 : Poutre Préco préfabriquée en atelier pour le pont de Kuchl (Autriche)

chant et assurer la liaison avec la membrure supérieure. Cette dernière, préfabriquée en béton, est conçue pour reprendre la compression en phase provisoire. En fonction principalement des contraintes de transport et des disponibilités de grues, les éléments Préco servent de coffrage, ou bien sont associés à des coffrages traditionnels. La liaison entre l'acier et le béton se fait par un moyen simple et innovant : la forme de la découpe.

2.2. Optimisation de la forme : Découpe CL

La première idée de poutre Préco prévoyait une découpe longitudinale rectiligne du profilé en deux T et l'ajout de connecteurs horizontaux pour assurer la liaison mécanique. Mais bientôt une autre idée, plus simple et plus ingénieuse, s'est affirmée : en découpant les profilés avec une forme spéciale, on peut assurer directement la connexion mécanique, sans recours aux connecteurs additionnels [1], [7].

Différentes formes ont alors été proposées et étudiées, analytiquement et expérimentalement : la découpe

Nageoire (Marc Hever, Arcelor), la découpe Puzzle (Günter Seidl, SSF Ingenieure) et la découpe Clothoïdale (Jacques Berthelley, SÉtra). Les deux premières donnent de meilleurs résultats du point de vue de la résistance statique du connecteur et ont donc été utilisées dans les premiers ouvrages d'art en Allemagne et en Autriche (entre autres, les ponts montrés dans le chapitre suivant).

La troisième forme clothoïdale a été développée par le SÉTRA afin d'améliorer la résistance à la fatigue de la découpe. Des expériences précédentes dans plusieurs ponts autoroutiers des années 70 (avec des tôles sinusoïdales soudées sur la semelle supérieure des poutres, puis enrobées dans la dalle, faisant office de connecteurs par frottement via une précontrainte transversale) ont montré la très bonne tenue dans le temps de ce type de découpe [6]. La première forme clothoïdale à avoir été testée est la forme c) de la figure 3. Avec une forme clothoïdale de la base du connecteur, la résistance à la fatigue a pu être optimisée et après une adaptation de la découpe puzzle en partie supérieure de la forme, pour améliorer la phase de fabrication, la forme clothoïdale modifiée a été mise au point. Elle représente actuellement le meilleur compromis et est utilisée dans les projets en cours de réalisation [10], [11].

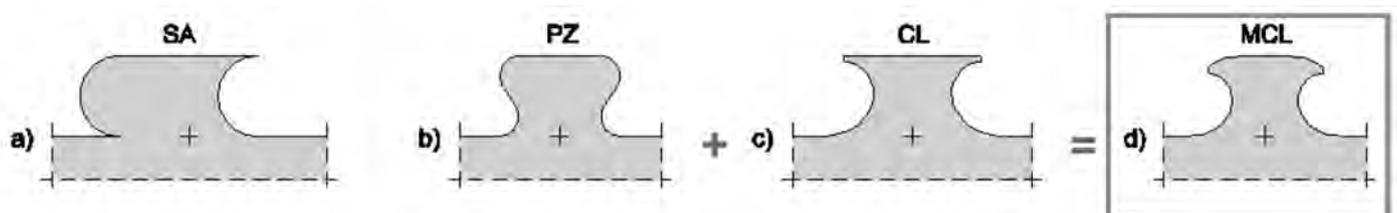


Figure 3 : Types de découpe proposés: a) nageoire b) puzzle c) Clothoïdale d) Clothoïdale modifiée

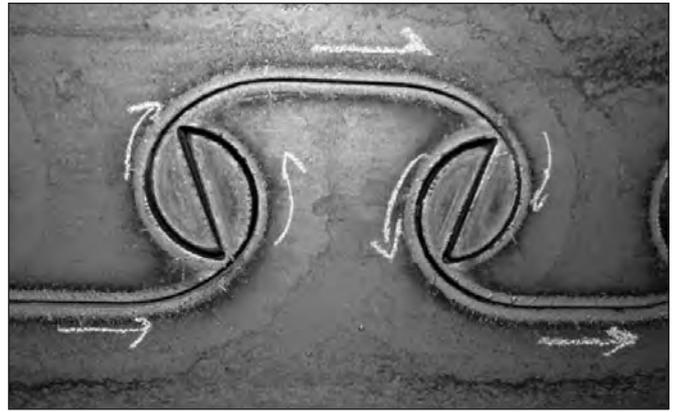
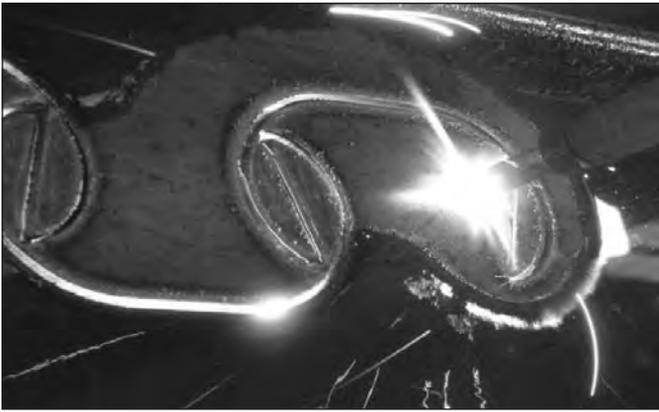


Figure 4 : Fabrication de la découpe CL par oxycoupage d'un profilé

2.3. Vérification de la connexion acier-béton

Sur la base d'une importante campagne expérimentale (65 essais push-out et 27 essais sur poutre), la formulation complexe de la résistance de ce nouveau moyen de connexion a été établie. De la même manière que pour les goujons type Nelson classiques, la ruine peut avoir lieu soit dans la partie métallique soit dans le béton. La vérification doit se faire à l'état limite ultime sur la base de la résistance ultime des connecteurs, à l'état limite de service sur la base de la limitation de taux d'utilisation pour éviter l'endommagement cyclique, et à l'état limite de fatigue sur la base de la limitation des variations maximales des contraintes pour éviter la formation de fissures de fatigue dans la partie métallique.

Par manque de place dans cet article, les formules de vérifications pour la découpe CL sont simplement résumées dans le tableau suivant. Pour la justification de ces formules, sur la base en particulier de la campagne expérimentale, ainsi que pour une explication plus approfondie des phénomènes physiques, les lecteurs intéressés sont invités à se référer à la bibliographie indiquée, qui est disponible librement [6], [11].

Il faut aussi mentionner que dans le cadre d'un projet de recherche financé par la commission européenne, un outil de pré-dimensionnement pour les poutres de type Préco avec découpe CL a été développé. En effet, dans le logiciel

Acobri pour l'étude de ponts mixtes à base de profilés laminés du commerce (logiciel existant depuis une dizaine d'années et disponible librement sur le web, voir [6]), les vérifications propres à cette technologie ont été implémentées. Cet outil permet donc à tout utilisateur de réaliser des études assez poussées pour la phase d'avant projet (en particulier faisabilité et quantités estimées) sans se lancer dans le dimensionnement détaillé de la structure.

3. EXEMPLES DE RÉALISATION

3.1. Passages supérieurs sur ligne ferroviaire

Sur la voie ferrée ÖBB Salzburg-Wörgl, la construction de deux passages supérieurs s'imposait dans le cadre de la suppression des passages à niveau. Pour le premier, à proximité de Vigaun, il s'agit d'un pont cadre avec 3 travées de portées identiques (26,15m), avec une liaison monolithique entre le tablier, les piles et les culées [8].

Ce pont de faible largeur est classé en Autriche dans une catégorie de pont agricole supportant un faible trafic, équivalente à la troisième classe du fascicule 61 titre II français. Mais il s'agit là d'une infrastructure très courante correspondant à une part de marché où l'on ne fait pas à l'heure actuelle appel à des structures mixtes acier-béton.

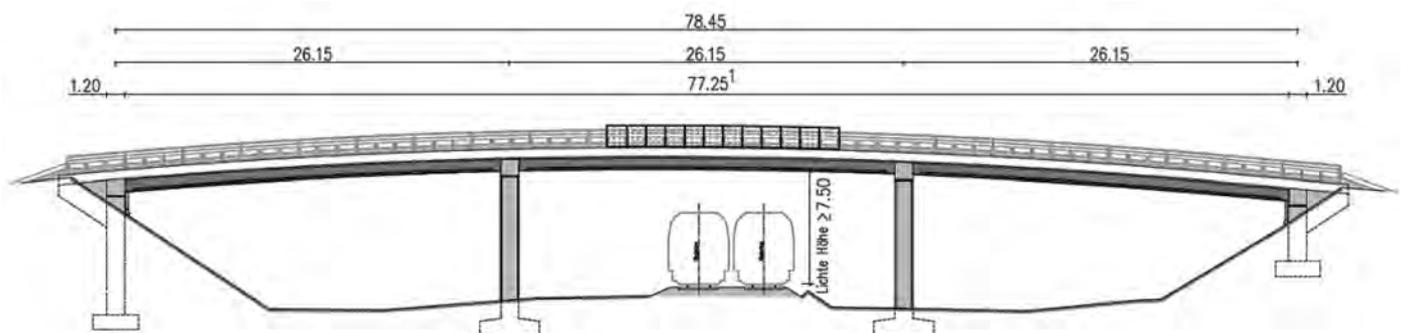
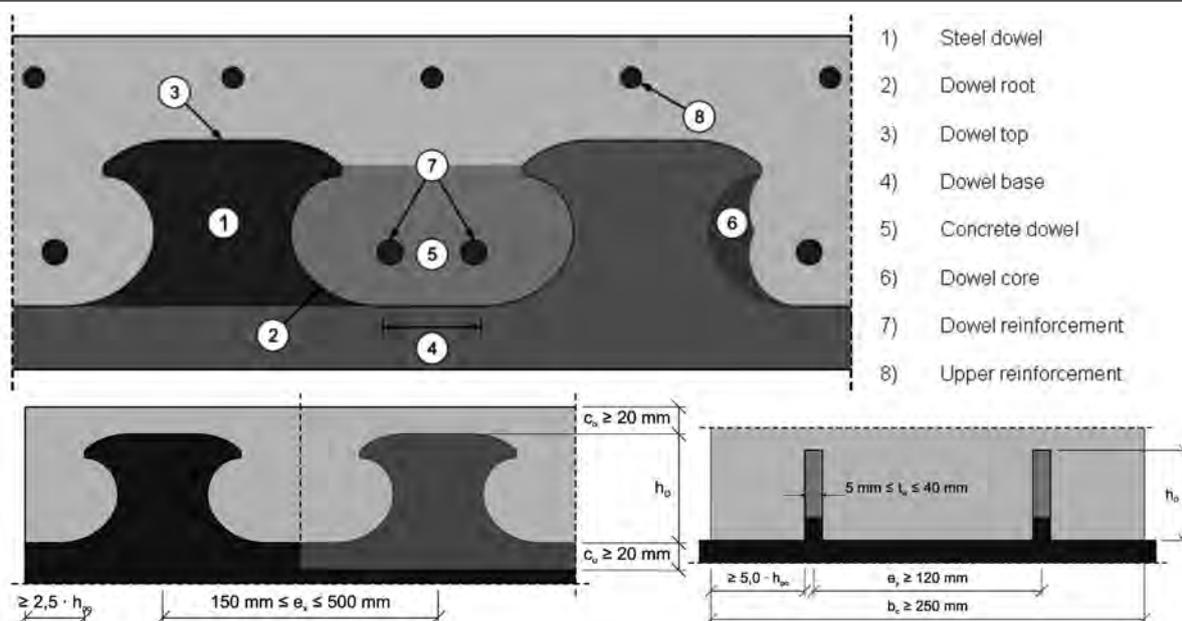


Figure 5 : Pont de Vigaun - vue longitudinale et coupe transversale [8]

Notations :



Vérification à l'état limite ultime :

Résistance au cisaillement du béton compris entre les dents de la découpe	$P_{sh,k} = \eta_D \cdot e_x^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_D)$ $\rho_D = \frac{E_s \cdot A_{sq,1}}{E_{cm} \cdot A_D} \quad \eta_{D,CL} = \left(3 - \frac{e_x}{180}\right) \quad \eta_{D,PZ} = \left(2 - \frac{e_x}{400}\right)$
Résistance à l'éclatement du béton aux alentours de la dent (à ne pas considérer en présence d'une armature minimale de confinement)	$P_{po,k} = \chi_x \cdot \chi_y \cdot 90 \cdot h_{po}^{1,5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_{D,i})$ $\rho_{D,i} = \frac{E_s \cdot A_{sq}}{E_{cm} \cdot A_{D,i}} \quad \chi_x = \frac{e_x}{4,5 \cdot h_{po}} \quad \chi_y = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{e_y}{9 \cdot h_{po}} + 1\right)$
Résistance d'une dent en acier	$P_{pl,k} = 0,25 \cdot e_x \cdot t_w \cdot f_y$
Aire minimale d'armature de confinement	$A_{s,conf} = 0,3 \cdot \frac{P}{f_{sd}}$

Vérification à l'état limite de service :

Vérification de la contrainte maximale dans la dent de la découpe	$\sigma_s = k_{f,L} \cdot \frac{V \cdot x \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} + k_{f,G} \cdot \left(\frac{N}{A} + \frac{M}{I_y} \cdot z_D\right) \leq 1,3 f_y$ $f_{Global} = 1,5 \quad f_{Local} = 7,95$
Limitation du taux d'utilisation	$P_{LD,ser} \leq 0,7 \min(P_{sh,k}; P_{po,k}; P_{co,k})$
Vérification de la force maximale	$P_{LD,ser} \leq P_{cyc} = 3,1 \cdot t_w \cdot h_d \cdot f_{ck}$

Vérification à l'état limite de fatigue :

Vérification de la variation maximale de contrainte dans la dent de la découpe	$\Delta \sigma = k_{f,L} \cdot \frac{\Delta V \cdot x \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} + k_{f,G} \cdot \left(\frac{\Delta N}{A} + \frac{\Delta M}{I_y} \cdot z_D\right) \leq \frac{\Delta \sigma_S}{\gamma_{Mf}}$ $f_{Global} = 1,5 \quad f_{Local} = 6,45$
Catégorie de détail d'après EN1993-1-9 : 2005 Tableau 8.1	$\sigma_s = 125$ pour bord brut après découpe $\sigma_s = 140$ pour bord meulé après découpe

Tableau 1 : Vérification de la connexion acier-béton pour une découpe CL [11]

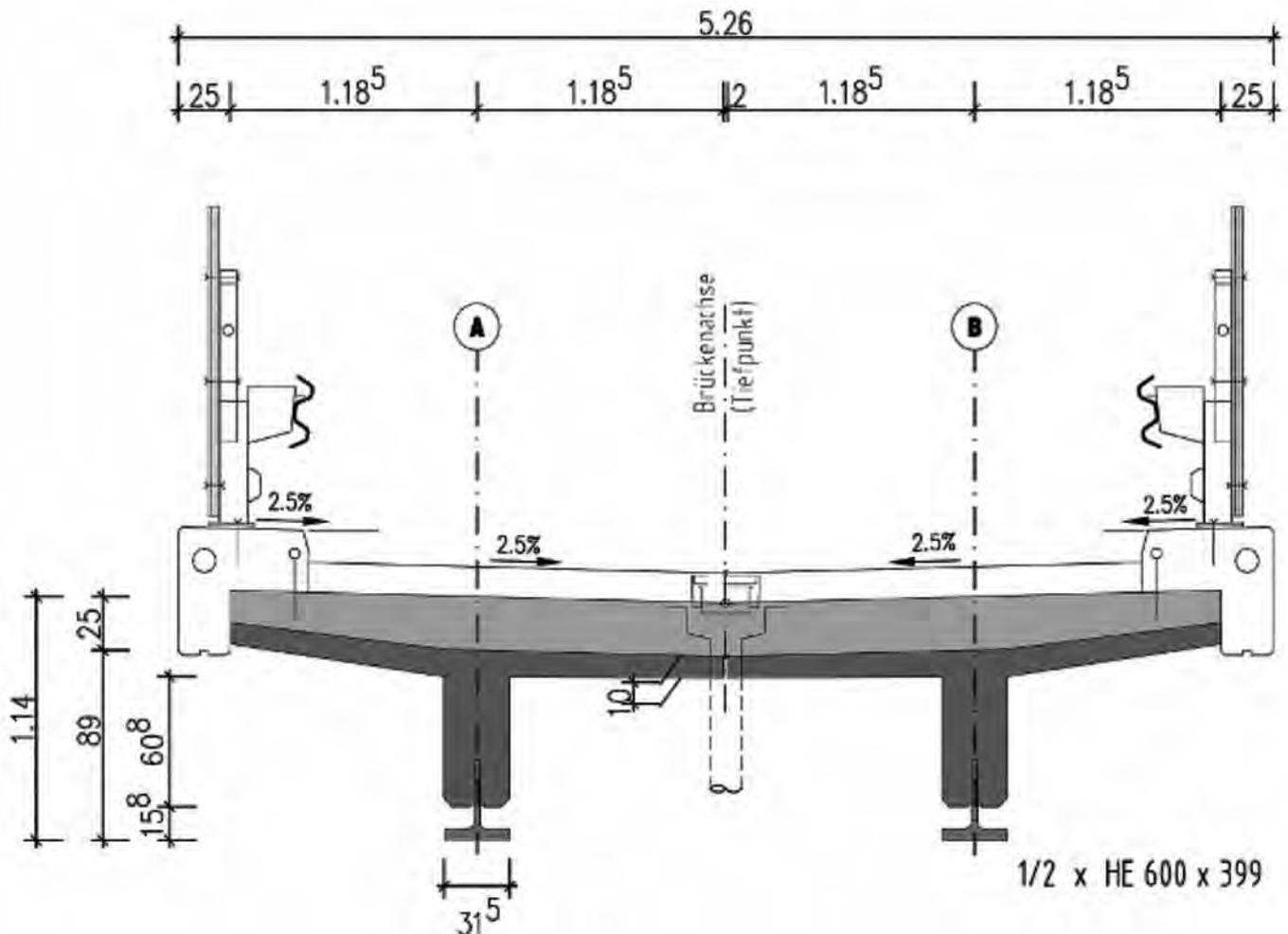
Le tablier est formé à partir de deux poutres principales préfabriquées de type Préco. Ces éléments ont une hauteur de 89 cm (dont environ 10 cm de prédalle), une largeur de semelle inférieure de 31,5 cm et une largeur de dalle supérieure de 2,27 m. Ils sont posés côte-à-côte, de façon à reconstituer la largeur totale du tablier sans recours à un coffrage perdu. Une dalle coulée sur site de 25 cm complète le tablier, pour une hauteur finale de 1,15 m (élancement $h / L = 1 / 23$).

3.2. Phase de construction

Les travaux de terrassement et de fondations ont été exécutés de façon habituelle. En ce qui concerne le tablier, la charpente métallique a été complètement assemblée en

usine, au Luxembourg, avec les phases suivantes : laminage et coupe à longueur, découpe des deux tés, cintrage des membrures, protection à la corrosion. Les poutrelles ont ensuite été envoyées à l'atelier de bétonnage (Ingolstadt, Allemagne) pour créer les poutres mixtes préfabriquées.

Ceci peut se faire dans les installations habituelles prévues pour les poutres en béton précontraint et ne présente pas de difficultés supplémentaires. Les éléments ont enfin pris le chemin de l'Autriche et ont été posés en une nuit seulement, pendant la première coupure de la circulation. Le coulage du tablier et des entretoises s'est fait pendant la deuxième interruption, d'une journée, adoptée à titre de précaution, puisqu'il n'y avait aucun coffrage étayé à terre pour l'imposer.



Maître d'œuvre: ÖBB DL Büro Linz
 Bureau d'étude: SSF Ingenieure
 Entrepreneur: Angerlehner, Hoch- und Tiefbau GmbH
 Charpente: ArcelorMittal Commercial Sections

Béton préfabriqué: Röss Bau GmbH Fertigteilterwerk
 Essais: Technische Universität Wien
 Contrôle: SBVZiviltechniker GmbH



Figure 6 : Phase de construction du tablier en Poutre Préco [8], [6]

3.3. Pourquoi les poutres Préco ?

Pour comprendre l'intérêt que présente l'utilisation de ce nouveau concept, il est instructif de comparer les différentes typologies possibles pour cet ouvrage :

1 – Béton armé : pour la hauteur du tablier donnée, il aurait fallu utiliser environ 100 barres de $\Phi 25\text{mm}$, donc une dalle pleine d'environ 1,15 m de hauteur coulée sur cintre. Compte tenu des contraintes de chantier et du sévère gabarit à respecter, cette option aurait été sûrement problématique pour la partie sur la voie ferrée.

2 – Béton précontraint par post-tension : solution optimisée par rapport au béton armé du point de vue de l'utilisation de matériaux, le comportement des ponts cadre multiples sous l'effet de la tension de tirants, et en particulier sous l'effet de dénivellations parasites des appuis, peuvent rester problématiques. Le problème de la construction du cintre sur la voie ferrée reste le même que la solution précédente.

3 – Béton précontraint par pré-tension – éléments préfabriqués : la configuration initialement prévue recourait à cette solution. Un tablier avec 6 poutres classiques PRAD peut franchir la voie ferrée avec une perturbation réduite de la circulation. Si la constitution d'un ouvrage partiellement hyperstatique (via entretoises béton) est possible, concevoir un tablier monolithique avec les fondations reste néanmoins délicat.

4 – Ossature mixte acier-béton avec entretoises béton : en utilisant une configuration classique de poutres mixtes

avec profilés laminés et entretoises béton, éventuellement encastrée au niveau des culées, on peut réaliser des ouvrages simples, robustes et économiques. La dalle pourrait se faire avec prédalle comme coffrage perdu ou en dalle pleine. Dans le cas en question, deux poutres maîtresses (HEM700) auraient été suffisantes.

5 – Ossature mixte acier-béton avec entretoises acier : un tablier bi-poutre classique avec entretoises acier et dalle préfabriquée toute épaisseur aurait une vitesse de construction, légèreté des éléments préfabriqués et absence de tout coffrage. Les désavantages auraient cependant été : l'abandon du système à cadre, la nécessité d'opérations délicates sur site (soudures), l'entretien plus important (peinture) et le coût potentiellement élevé pour des ouvrages de petit envergure comme celui en question.

La poutre Préco peut être définie comme étant un élément hybride entre la poutre en béton préfabriqué (3) et la poutre mixte (4). Ses avantages sont les suivants :

- **Résistance** équivalente à celle d'une poutre mixte, donc par rapport à la solution PRAD forte réduction de nombre des éléments (dans le cas analysé, de 6 à 2), ce qui induit un avantage dans le **temps de pose des éléments** sur chantier pour un poids des éléments comparables (30 t au lieu de 24 t) ;
- Comme pour les poutres mixtes, la possibilité de réaliser des ouvrages à **inertie variable** est un clair avantage structurel et esthétique par rapport aux poutres PRAD ;
- Possibilité de réaliser des **ouvrages hyperstatiques avec tablier monolithique dans les fondations** de

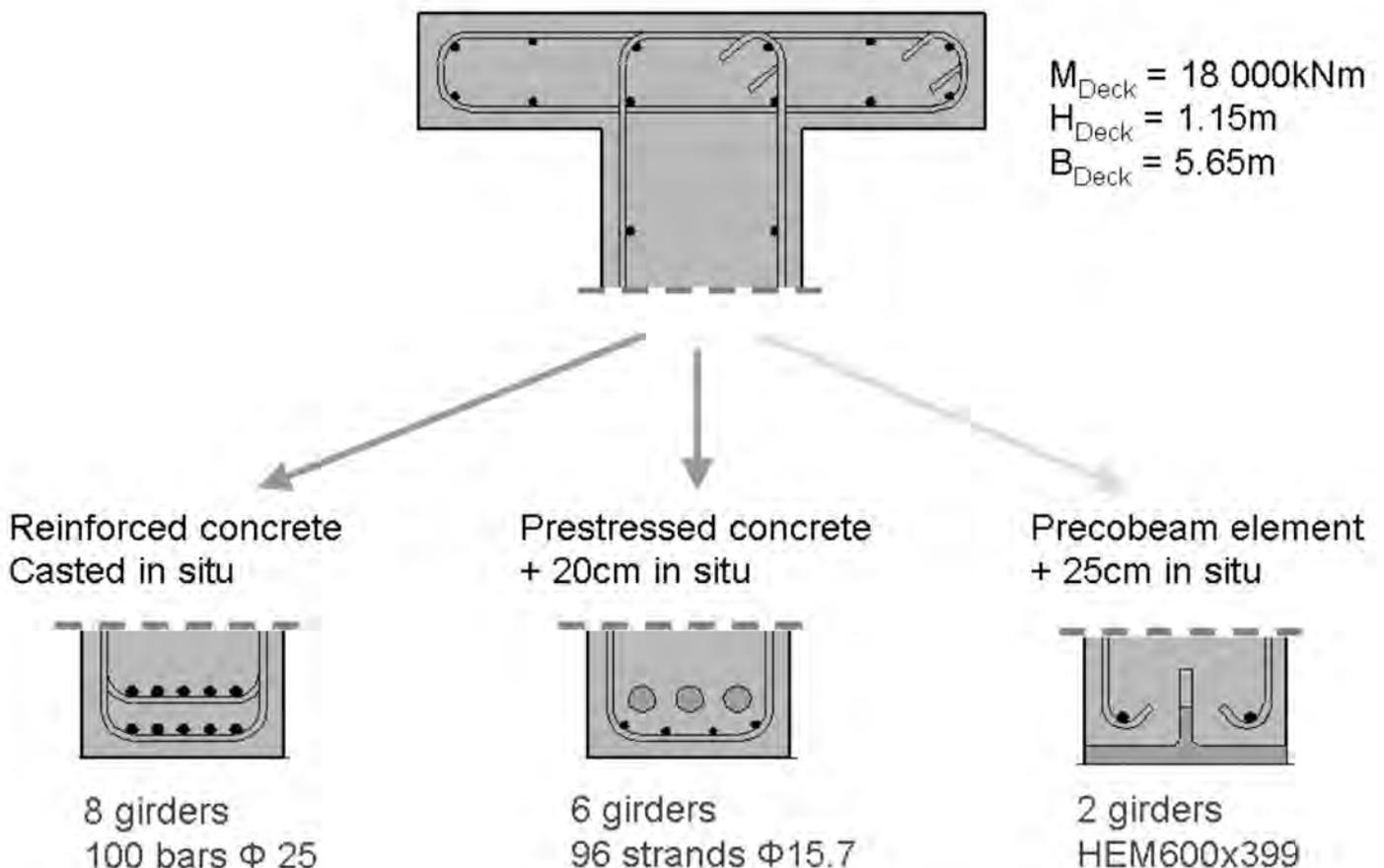


Figure 7 : Trois variantes alternatives théoriquement possibles pour le tablier du pont de Vigaun

façon simple et efficace via l'entretoisement en béton sur pile ;

- **Coûts** comparables à ceux de poutres PRAD préfabriquées ; réduction de coûts par rapport à une poutre mixte classique grâce au parachèvement minimal et la réduction du poids d'acier (de 20 à 30 % environ) ;
- **Entretien réduit** par rapport au pont mixte grâce à la minimisation de la surface exposée ; une utilisation éventuelle d'acier autopatinable ou bien galvanisé à chaud permet même d'exclure les problèmes de peinture. La suppression des appareils d'appui et des joints de chaussée réduit le coût d'entretien par rapport à la solution PRAD.

En conclusion, dans le cas du pont de Vigaun, la solution Préco a été choisie entre autres pour ses *avantages techniques et économiques*, par rapport aux autres solutions évoquées en phase d'étude [8], [6].

3.4. Second franchissement à Kuchl

À quelques kilomètres du passage supérieur de Vigaun décrit précédemment, un second franchissement sur la même voie ferrée a été réalisé à proximité de la ville de Kuchl. Cet ouvrage est très similaire au premier, c'est un pont à cadres ouverts avec quatre travées d'une portée d'environ 20 m chacune. Mais une différence significative réside dans le choix d'utiliser une section à inertie variable : ceci est possible de façon assez simple pour les poutres Préco, en donnant une courbure aux demi-profilés, eux-mêmes utilisés comme base du coffrage de la partie préfabriquée en béton. Dans le cas du passage supérieur de Kuchl, la hauteur du tablier vaut 85 cm à la clef (élanement $L / 23$) et 1,15 m sur la pile (élanement $L / 17$). Ceci

permet d'optimiser la hauteur de construction par rapport au gabarit à dégager, réduit la consommation de matériaux en permettant de s'adapter au diagramme des sollicitations, et donne un aspect esthétique de l'ouvrage sûrement très réussi [6].

4. CONCLUSION

La poutre Préco propose une voie nouvelle pour concevoir un ouvrage de franchissement à faible tirant d'air. Avec déjà une douzaine de réalisations dans plusieurs pays, le concept a montré sa pleine fiabilité dans la transposition du papier au chantier. La durabilité, la robustesse, la compétitivité, unies à grande qualité esthétique en font sûrement une solution de grand intérêt pour l'avenir.

D'autres morphologies sont en effet possibles qui permettent de supporter des trafics importants en justifiant l'ouvrage vis-à-vis de la fatigue. Dans la conception adoptée pour le projet de Chamonix, les profilés laminés cintrés – ce cintrage est facile – sont groupés par deux pour constituer des caissons fermés par une membrure supérieure. La découpe de connexion est placée en toute section soit dans la zone comprimée (à la clef ou aux naissances) soit à proximité de l'axe neutre de la poutre mixte en zone intermédiaire. Cette position de la découpe améliore la robustesse de la poutre précoc.

Les caissons sans recoins ni pièces transversales permettent aussi le plus souvent de recourir à des aciers autopatinables et résistent aux chocs de corps flottants. La forme esthétique de l'intrados répond aux exigences hydrauliques. Enfin la robustesse vis-à-vis des crues et le risque de voir le pont emporté est assurée.



Figure 8 : Passage supérieur sur la voie ferrée ÖBB Salzburg-Wörgl près de Kuchl (Autriche) [6]

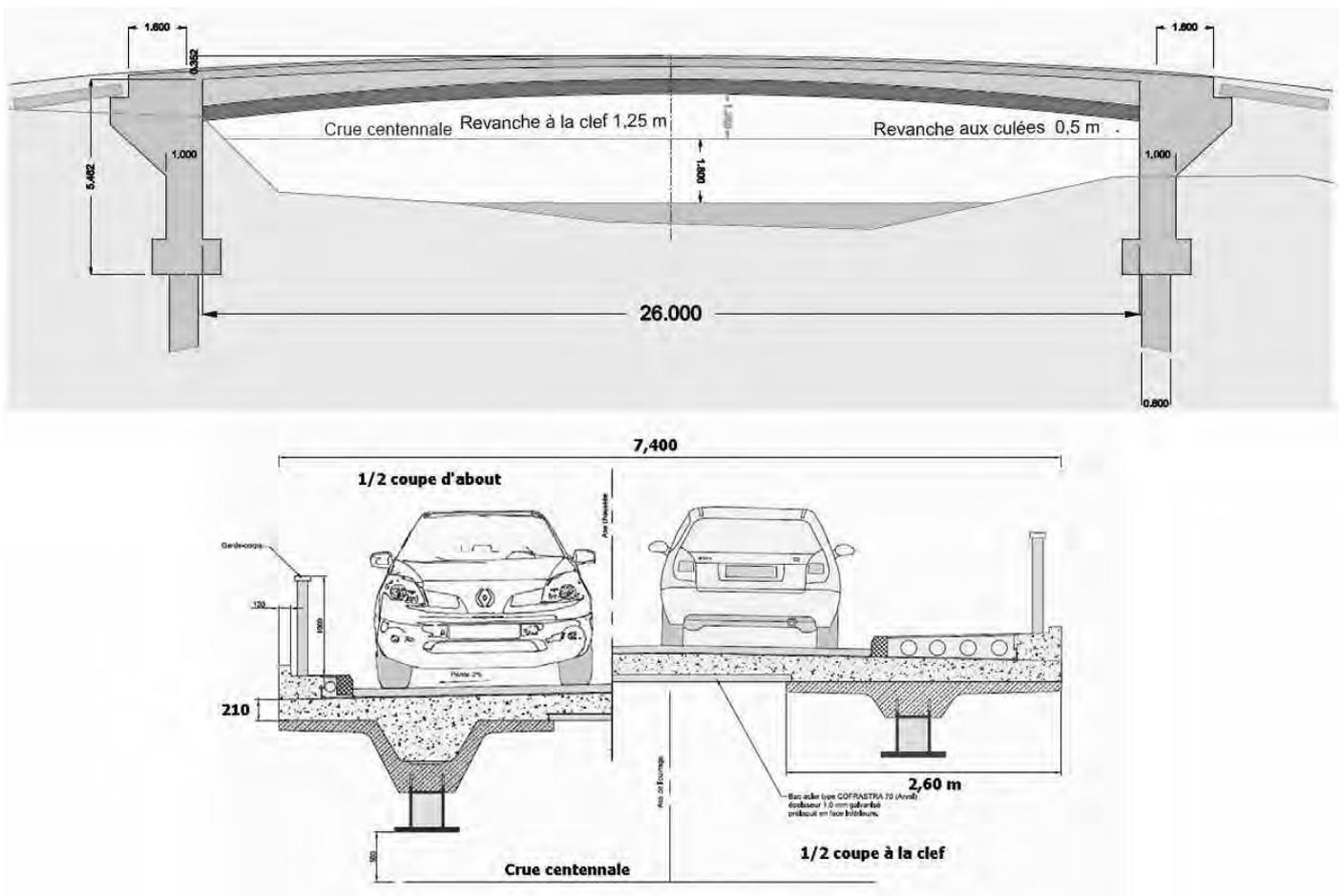


Figure 9 : Projet de franchissement de l'Arve près de Chamonix [1]

Notons enfin que tous ces ponts sont encastrés sur leurs abouts ce qui assure des économies à la construction comme à l'usage le long de la vie de l'ouvrage : pas d'appareils d'appui ni de joints de chaussées et les culées peuvent sans problème être fondées sur une file unique de pieux.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Berthelley J., Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viefhues E. (2009). *Premiers résultats du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle*. Construction métallique, Revue CTICM 3-2009 - 26.
 - [2] Chabrolin B., Kretz T., Laravoire J. (2010) *Projet national MIKTI - Ponts Mixtes Acier-béton*.
 - [3] Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viefhues E. (2008). *Continuous shear connectors in bridge construction*.
 - [4] Feldmann, M. E. (2012). *FOSTA P 804 Neue Systeme für Verbundbrücken*. Aachen.
 - [5] Lorenc W. (2010). *The design concept for the steel part of composite dowel shear connection in steel-concrete composite structures*, PhD Thesis.
 - [6] Raoul J., Davaine L., Lukic M., Davy D., Seidl G., Berthelley J., Zanon R., Martin PO (2012) *Séminaires Precobeam, Paris*: Présentations et Guide de conception sur www.cticm.fr
 - [7] Schmitt V., Seidl G., Hever M., Zapfe C. (2004). *Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT-Träger mit Betondübeln*. Stahlbau (pp. 387-393).
 - [8] Seidl G., Braun A. (2009). *VFT-WIB Brücke Vigaun – Verbundbrücke mit externer Bewehrung*. Stahlbau, 86-93.
 - [9] Seidl G. (2009). *Behavior and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders*, PhD Thesis.
 - [10] Seidl G. et al. (2011). *Precobeam - Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission*, Final Report RFSR-CT-2006-00030. (disponible sur <http://bookshop.europa.eu>)
 - [11] Seidl G. et al. (2011). *Precobeam : Poutres mixtes préfabriquées durables basées sur une transmission de cisaillement innovante - Guide de conception et de dimensionnement*, RFS2-CT-2011-00026. (disponible sur www.arcelormittal.com/sections)
 - [12] Berthelley J. et Seidl G. Les poutres PRÉCO : une solution économique pour les petites portées, objet d'un programme de recherche européen. Bulletin Ouvrages d'Art du CTOA du Sétra, numéro 54 mars 2007
 - [13] Zapfe C. (München, 2001). *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte*, PhD Thesis.
- Les Bulletins Ouvrages d'art du Sétra sont disponibles sur Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr/html/boa/>
 Au premier janvier 2014, le Sétra fusionne avec d'autres organismes techniques pour donner naissance au Céréma.