

Construction rapide de ponts mixtes

Autor(en): **Salamé, Farida / Dauner, Hans-Gerhard**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **131 (2005)**

Heft 21: **Trous noirs**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-99428>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Construction rapide de **p o n t s m i x t e s**

Construire rapidement est aujourd'hui une nécessité, d'un point de vue économique comme écologique. Par les bouchons qu'ils génèrent, les chantiers routiers engendrent de nombreuses nuisances, et on recherche constamment des méthodes de construction plus rapides. Dans le domaine des ponts mixtes, une des solutions réside dans la mise en place du tablier évitant tout bétonnage dans un coffrage fixe sur le chantier.

Les techniques de construction des ponts mixtes peuvent être recensées selon la mise en place des éléments en béton sur la structure métallique [1]¹:

- mise en place de dalles préfabriquées, bétonnage des joints entre ces dernières et remplissage des réservations pour les goujons;
- mise en place de dalles préfabriquées qui seront collées entre elles et précontraintes longitudinalement; soudage des goujons dans les réservations après la mise en précontrainte du tablier et le remplissage des espaces entourant les goujons;
- mise en place de dalles préfabriquées collées sur les poutres et entre elles; cette technique a été développée dans l'ancienne RDA à partir des années 1970; il s'agit d'un travail de pionnier du professeur Hans-J. Hänsch [2];
- mise en place du tablier par ripage hors d'un lit de coffrage situé soit à l'avant du pont, soit suspendu à ce dernier; l'action mixte est créée par des goujons soudés en atelier ou sur le chantier (selon le type de réservation) et connectés au tablier par bétonnage des réservations;
- mise en place de prédalles, confectionnées sur chantier ou en atelier, suivi d'un bétonnage sur place;
- bétonnage du tablier à l'aide d'un chariot de coffrage se déplaçant sur la structure métallique du pont.

Pont au Baregg

Situé à l'entrée du troisième tube des tunnels du Baregg, le Talbrücke Dättwil (fig. 1) - 205 mètres de longueur - a été construit en huit mois seulement.

Aucune des techniques décrites précédemment n'était applicable dans sa globalité, ceci pour des raisons de qualité, de prix ou de délais. On a ainsi dû renoncer au bétonnage de joints et de réservations (délais et qualité), à un bétonnage sur prédalles (délais et qualité) ainsi qu'à un système de dalle ripée ou bétonnée dans un chariot de coffrage (prix et délais). En revanche, la préfabrication et le collage des éléments préfabriqués pouvaient servir de base au développement d'une nouvelle méthode.

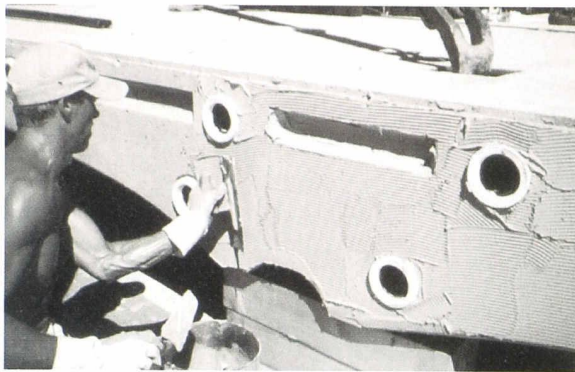
Par ailleurs, s'agissant d'un pont à poutre continue - quatre travées centrales de 38,43 m entre deux travées de rives de 25,62 m -, une précontrainte longitudinale était nécessaire pour satisfaire les exigences des normes dans les zones des moments négatifs. Afin d'obtenir une efficacité optimale de cette précontrainte sur le tablier en béton, celle-ci devait être mise en tension avant que la liaison mixte acier-béton ne devienne effective. C'est donc l'impossibilité d'un collage direct d'éléments de dalle préfabriqués sur les membrures de la poutre métallique qui fut à l'origine de nos réflexions pour le développement d'une technique de construction rapide des ponts mixtes.

La technique adoptée au Baregg comprenait certaines particularités:

- préfabrication d'éléments de tablier d'une longueur de 3,20 m et pesant 480 kN selon la méthode conjuguée (match-casting);

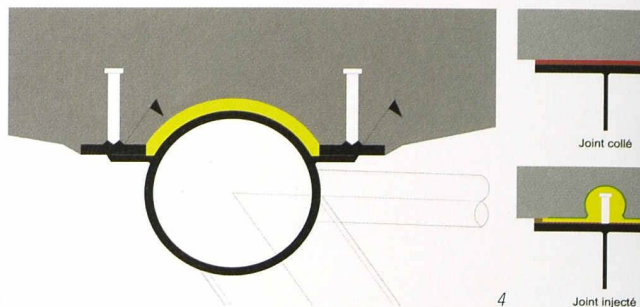
¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article





2

- application d'une couche de mortier adhésif thixotropique (double composant à base de résine époxy) sur les faces de contact des éléments préfabriqués (fig. 2), suivi de la pose des segments sur des sabots de glissement en téflon, au-dessus des membrures des poutres; les éléments préfabriqués sont ensuite serrés entre eux par un système de précontrainte auxiliaire;
- mise en place et mise en tension des câbles de précontrainte; les sabots en téflon permettent le glissement du tablier au-dessus de la poutre métallique;
- création de la liaison acier-béton (effet mixte) par le soudage de fers plats incorporés dans les éléments en béton sur les membrures de la poutre triangulée (fig. 3);
- injection (coulis de ciment pompé) des câbles de précontrainte et des joints entre le tablier en béton et les membrures métalliques.



3

4

Malgré une durée relativement importante des travaux de soudure, ce procédé a permis d'atteindre le gain de temps escompté: quatre mois de moins qu'une solution traditionnelle. Nous avons alors mis au point une nouvelle technique évitant les soudures pour la création de l'effet mixte acier-béton.

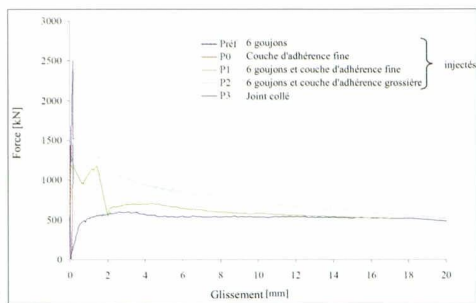
Action mixte par adhérence

L'utilisation de la technique de collage dans la construction par voussoirs préfabriqués de ponts précontraints, dans l'aéronautique ou la construction en bois, ainsi que les recherches et les développements dans l'ancienne RDA [2] nous ont amenés à étudier la capacité d'adhérence par collage entre le béton et l'acier pour la construction de ponts mixtes.

L'étude a débuté par une série d'essais *push-out*² visant à évaluer le comportement de joints collés, de joints injectés avec ou sans couche d'adhérence ainsi que de joints mixtes, comprenant des goujons et une couche d'adhérence.



Lista Motion c'est bien plus qu'une simple table. C'est tout un système, à la fois fonctionnel, flexible et polyvalent. Grâce à ses multiples options, Lista Motion



5

Fig. 1 : Pont du Baregg (Talbrücke Dättwil)

Fig. 2 : Application de la colle sur la face de contact et fixation des anneaux d'étanchéité

Fig. 3 : Liaison par soudure

Fig. 4 : Types de joints

Fig. 5 : Résultat des essais push-out préliminaires

Une deuxième étape a consisté à réaliser des essais de faisabilité, principalement sur la méthode d'injection :

- fluidité du coulis d'injection,
- pression d'injection,
- étanchéité du joint injecté.

L'étude s'est achevée par la réalisation d'une seconde série d'essais *push-out* permettant de déterminer, à partir des essais préliminaires, la meilleure connexion en termes de capacité portante, de comportement à la fatigue et de fluage.

Essais préliminaires

Les essais *push-out* ont été effectués à l'ICOM de l'EPFL avec les joints de la figure 4. Leurs résultats (fig. 5) ont abouti à quatre conclusions essentielles :

² Essais en laboratoire visant à déterminer la résistance au cisaillement de la connexion entre l'élément métallique et la dalle en béton

- avec une valeur de 594 kN, la capacité portante des seuls goujons est près de 20 % inférieure aux 720 kN obtenues selon la norme SIA 162 (béton B35/25) ; le mode de rupture a montré que la résistance du coulis d'injection était insuffisante ; conclusion : améliorer le coulis d'injection ;
- si les joints collés offrent une grande résistance (2500 kN), ils cèdent par rupture fragile ; conclusion : capacité portante intéressante, mais ductilité à améliorer ;
- la combinaison de goujons avec une couche d'adhérence ne conduit pas à un cumul des capacités portantes, car le comportement ductile des deux types de connexion est trop différent ; conclusion : écarter la combinaison goujons et couche d'adhérence ;
- l'exécution des corps d'essai a montré que le démontage du coffrage en forme de tube au droit des goujons était difficile ; conclusion : changer la forme du joint.



s'intègre dans les bureaux modernes d'aujourd'hui, une table devant pouvoir être toutes les tables à la fois. Téléphone 071 372 52 52 ou www.lista-office.com

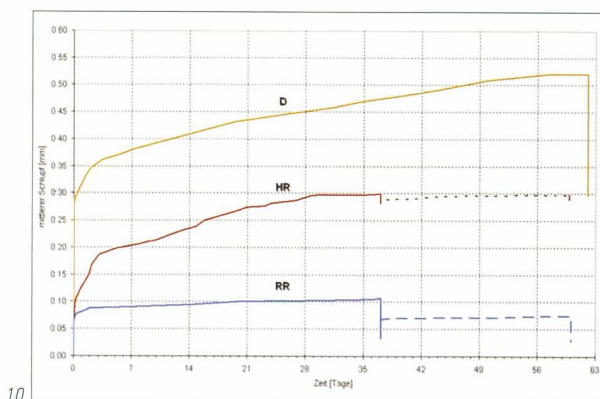
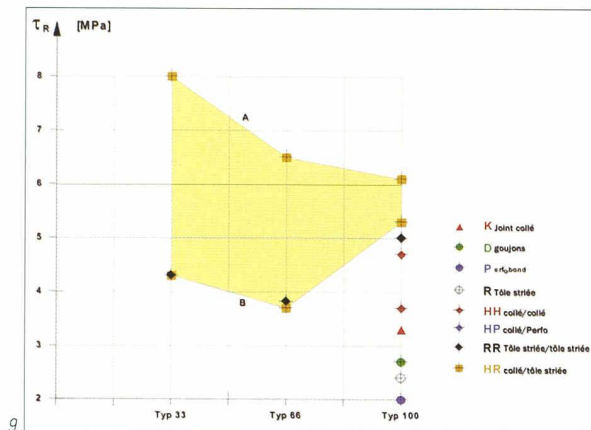
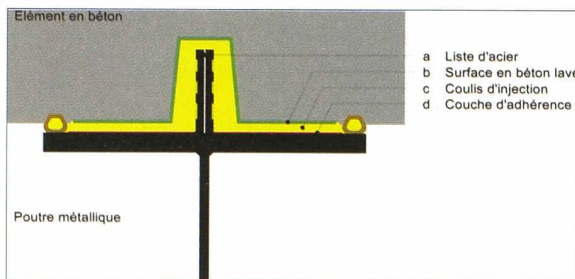
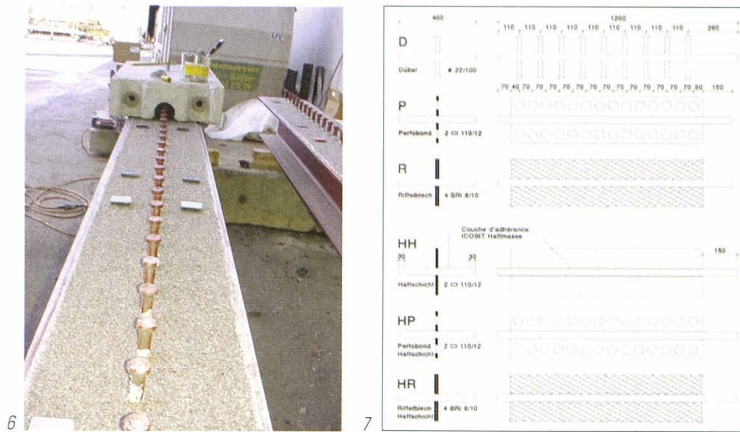
Fig. 6 : Essai d'étanchéité

Fig. 7 : Corps d'essai push-out du type 100

Fig. 8 : Joint standard pour la liaison mixte

Fig. 9 : Valeurs moyennes des contraintes de cisaillement

Fig. 10 : Courbes de fluage



Essais de faisabilité

La technique pour l'exécution et l'injection (coulis de ciment) du joint entre la poutre métallique et le tablier en béton a été étudiée à travers différents essais :

- étude de la forme et de l'étanchéité (lors de l'injection) du joint sur un corps d'essai de 3,7 m de longueur avec un joint grandeur nature sur un lit de goujons et une couche d'adhérence (fig. 6);
- contrôle de la perte de pression d'injection le long d'un tube en polyéthylène d'un diamètre de 100 mm; la longueur testée était de 150 m avec une pente de 1,0 % et six manomètres;
- fabrication d'un modèle en bois de 2 m de longueur pour contrôler la pression maximale dans les tubes d'étanchéité et dans le joint;
- essais de coffrage avec du métal déployé;
- essais finaux sur un modèle 1:1 de 50 m de longueur, concrétisant les résultats et les connaissances acquises lors des essais précédents.

Essais push-out principaux

Les essais préliminaires avaient montré que l'utilisation d'une couche d'adhérence engendrait une forte résistance du joint, mais que la combinaison avec des goujons n'avait que peu d'effet sur l'augmentation de cette résistance. La recherche s'est donc focalisée sur le remplacement des goujons par d'autres éléments de liaison, avec pour but d'optimiser la résistance du joint tout en minimisant le volume à injecter. Les essais de faisabilité nous ont amené à retenir le joint de la figure 8.

Dans un premier temps, 18 essais *push-out* type 100 - longueur de cisaillement d'un mètre - ont été effectués sur les six corps d'essais de la figure 7. Les résultats montrent la supériorité de la combinaison HR (couche d'adhérence/tôle striée) en terme de résistance (fig. 9) : avec 5600 kN, elle atteint plus du double de celle des goujons (2500 kN), qui dépasse néanmoins la valeur de 1971 kN calculée selon la norme SIA 263.

Ces résultats encourageant ont conduit à un programme de 34 essais complémentaires de la combinaison HR (couche d'adhérence/tôle striée), avec pour but de confirmer - sur des corps d'essai réduits de 33 % et de 66 % - les résultats concernant la contrainte de cisaillement moyenne et de contrôler le comportement à la fatigue et le fluage de ce type de joint (fig. 9 et 10).

(suite en page 13, après les Cahiers de l'ASPAN)

Fig. 11: Joint type

Fig. 12: Béton lavé

Fig. 13: Valeurs de dimensionnement

Fig. 14: Tôle striée et couche d'adhérence

(suite de la page 12)

Les surfaces de rupture montrent que celle-ci se produit généralement soit dans le béton, soit dans le joint entre le béton lavé et le coulis d'injection. Les résultats dépendent fortement de la surface en béton ainsi que du coulis d'injection.

La limite supérieure de la figure 9 (A) correspond à une surface uniforme de béton lavé de haute qualité alors que les valeurs inférieures (B) résultent de défauts de cette surface. Tous les essais ont été effectués avec du béton de qualité C40/50, granulométrie ≤ 16 mm.

Les courbes de la figure 11 montrent que le fluage des systèmes intégrant une couche d'adhérence se stabilise et que le joint HR est plus rigide que celui ne comportant que des goujons. La courbe RR correspond à une solution où la couche d'adhérence est remplacée par des tôles striées: si le comportement au fluage de cette solution est excellent, elle présente en revanche une capacité portante insuffisante, inférieure de près de 33 % à celle de la solution HR retenue.

Les quelques essais de fatigue effectués ont donné des résultats satisfaisants: les joints ont atteint les valeurs de rupture escomptées après avoir subi deux millions de cycles de charges réelles.

Dimensionnement et recommandation

Plusieurs conditions sont nécessaires pour que les formules de dimensionnement de la figure 13 puissent être utilisées:

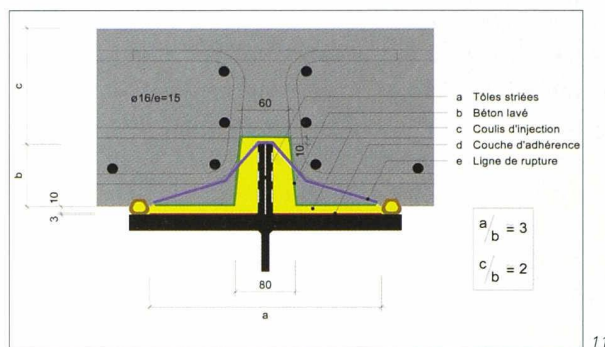
- Le joint doit être exécuté selon la figure 11. La ligne de rupture est conditionnée par la position des armatures. La qualité du béton doit être au minimum C50/40.
- Le béton lavé (fig. 12) doit avoir une profondeur de rugosité de 3 à 4 mm. Cette surface peut être obtenue par un retardateur de prise type DRC 6/130.
- Les tôles striées du type BRI 8/10 (fig. 14) doivent être positionnées dos à dos, avec les losanges en position verticale, et soudées par des cordons d'angle de 4 mm sur la membrure. Des points de soudure espacés de 50 cm les lieront entre elles. La qualité d'acier S235 suffit aux exigences.
- La couche d'adhérence (fig. 14) est composée d'une couche d'ICOSIT-Haftmasse d'environ 1 mm d'épaisseur (appliquée à l'aide d'une spatule sur une surface d'acier sèche, grenailée au degré Sa 2 1/2) et de sable de quartz (granulométrie 2 à 32 mm) répandue sur la couche d'ICOSIT fraîche.

Dosage: couche d'époxy: 1,6 - 2,0 kg/m²
sable de quartz: 5,0 - 6,0 kg/m²

- Le mortier d'injection, développé spécialement par VSL International [3] pour la technique de précontrainte, doit respecter les conditions suivantes:

- facteur E/C de 0,28 à 20°C,
- résistance cylindrique de 75 à 100 Mpa,
- temps d'écoulement inférieur à 17 secondes.

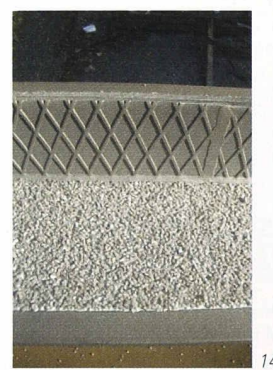
Les valeurs de la figure 13 ne sont valables qu'en respectant scrupuleusement les cinq critères ci-dessus. Elles couvrent les contraintes de cisaillement obtenues par des calculs élastiques.



Qualité du joint	Mode de dimensionnement élastique
Q1	$\tau_u = 5,0 \text{ MPa}$
Q2	$\tau_u = \frac{A_{Q1}}{A} 5,0 \text{ MPa}$

avec:

- Q1 Qualité impeccable du joint en béton lavé selon figure 18
- Q2 Qualité réduite par des défauts d'exécution
- τ_u Valeur de dimensionnement pour une contrainte de cisaillement moyenne dans la surface de rupture selon la figure 17
- A_{Q1} Surface de béton lavé impeccable
- A Surface de béton lavé totale



En plus de ces exigences, des mesures pratiques sont nécessaires pour garantir le bon remplissage du joint lors de l'injection du coulis de ciment à la pompe. Les étanchéités latérales doivent résister à une pression maximale d'injection du coulis de ciment de 1,0 bar (valeur limite à ne pas dépasser). La figure 15 propose deux solutions.

La première consiste en un ruban comprimé par le tablier en béton qui repose sur des cales jouant le rôle d'écarteurs et d'appui glissant. Cette solution n'est valable que si les éléments du tablier ne subissent pas de glissement longitudinal, par exemple lors de la mise en tension d'une précontrainte.

La seconde solution (en tube) autorise le glissement et a fait l'objet d'essais de faisabilité. A la suite de ces essais, nous conseillons d'utiliser un tube en mousse (*Moosgummi*) Ø5/13, injecté à l'eau après la mise en précontrainte et pouvant résister dans le joint à une pression d'eau d'au moins 4 bar. La valeur maximale de la pression d'eau à l'intérieur du tube ne devrait pas excéder 1,5 bar. Afin d'éviter la défaillance du joint d'étanchéité sous la pression d'injection du coulis de ciment, il est recommandé de mettre en place une retenue latérale (selon figure 15 ou à l'aide d'une liste mobile).

Nous préconisons en outre le respect des valeurs suivantes :

- longueur maximale d'injection de 50m,
- tubes de contrôle d'injection transparents tous les 10m environ,
- contrôle de la pression d'injection maximale par des soupapes de surpression réglées à 1,0 bar,
- injection dans un vide de 0,8bar,
- humidification du joint pendant 20 heures avant l'injection.

Perspectives

Les premiers résultats des recherches sont prometteurs et la méthode de la connexion acier-béton par injection permettra de construire des ponts mixtes plus rapidement que par le passé : posés directement à la suite du montage des poutres métalliques, les éléments préfabriqués du tablier sont ensuite collés entre eux et liés aux poutres métalliques par l'injection d'un coulis de ciment à haute performance. Le gain de temps provient de l'absence de bétonnage sur chantier ainsi que de ses conséquences sur les installations.

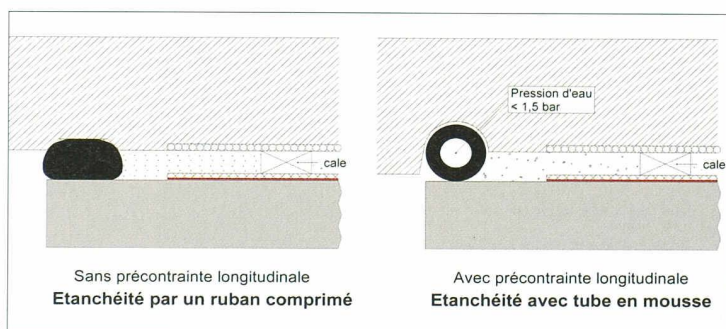
Seul quatre des soixante-et-un essais *push-out* réalisés étaient destinés au contrôle à la fatigue. Bien que leurs résultats aient été satisfaisants, le nombre de ces essais est insuffisant pour que cette méthode puisse également être envisagée pour des ponts-rails. Elle pourrait en revanche être applicable pour de nombreux ouvrages servant de passages sur voies, routes et cours d'eau.

Des recherches complémentaires en cours à l'ICOM de l'EPFL aboutiront prochainement à une thèse [4] qui devra étayer les résultats des essais en laboratoire par des réflexions et calculs scientifiques.

Farida Salamé, ing. civil dipl. EPF
 Hans-Gerhard Dauner, dr ing. civil SATW
 DIC SA - Dauner ingénieur Conseils
 Les Glariers, CH - 1860 Aigle

Bibliographie

- [1] HANS-G. DAUNER ET SACHA ANTILLE : « Ponts mixtes à construction rapide », *DETEC/OFROU*, n° 567, avril 2002
- [2] HANS-G. DAUNER : « Adhérence partielle, une nouvelle technique pour la construction de ponts mixtes », *DETEC/OFROU*, n° 583, février 2005
- [3] H. R. GANZ ET ST. VILDAER : « Grouting of post-tensioning tendons », *VSL report Series* n° 51/2002
- [4] THOMANN M. : « Connexions par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton », thèse EPFL (publication prévue fin 2005)



Participants à la recherche

Mandant Office fédéral des routes OFROU*
 Département des constructions du canton d'Argovie,
 service des ponts et chaussées*
 Mandataire DIC SA - Dauner Ingénieurs Conseils, 1860 Aigle*
 Experts Commission d'accompagnement C
 Institut ICOM - l'EPFL
 Entreprises Element AG, CH - 1712 Tafers*
 Sika Schweiz AG, CH - 8048 Zurich*
 ULO Offshore Ltd, CH - 3047 Bremgarten*
 VSL Switzerland Ltd, CH - 4553 Subingen*
 Zwahlen & Mayr SA, CH - 1860 Aigle

* Participation au financement