

Utilisation d'aciers à haute résistance dans deux ouvrages suisses

Autor(en): **Dubas, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **7 (1964)**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-7949>

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.

II a 1

Utilisation d'aciers à haute résistance dans deux ouvrages suisses

Verwendung hochfester Baustähle für zwei Brücken in der Schweiz

Use of High Strength Steels for the Construction of Two Bridges in Switzerland

PIERRE DUBAS

Ecole Polytechnique Fédérale, Zurich

Introduction

Pour la plupart des ponts métalliques construits ces dernières années en Suisse, on a mis en œuvre des aciers de la nuance 52/36. On sait les importants progrès qui ont été réalisés après guerre dans le domaine de l'élaboration de ces aciers, en particulier en ce qui concerne leur soudabilité et leur comportement à la fragilité. Comme on dispose également d'électrodes à enrobage basique et de procédés de soudage automatiques ou semi-automatiques bien adaptés aux aciers de cette nuance, leur mise en œuvre en atelier et même le soudage au montage d'épaisseurs relativement fortes ne posent guère de difficultés.

Dans le domaine des conduites forcées ou des puits blindés de forte puissance, des considérations économiques ont imposé l'emploi d'aciers à résistance encore plus élevée, soit d'aciers légèrement alliés ou même d'aciers trempés et revenus. On comprend dès lors que les entreprises de construction métallique qui s'occupent également de grosse chaudronnerie aient envisagé d'appliquer à la construction de ponts les expériences acquises dans le domaine des aciers à très haute limite élastique. Comme on l'a déjà relevé dans la Publication Préliminaire, les conditions de service des aciers à caractéristiques élevées sont toutefois nettement moins favorables dans les poutres à âme pleine fléchies que dans les enveloppes cylindriques sous pression intérieure uniforme. Le domaine d'application économique est ainsi relativement modéré et nous ne pourrions présenter ici que deux exemples d'utilisation.

Pont sur le Rhône à Chamoson

Le pont de Chamoson¹⁾ sur le Rhône relie l'usine hydro-électrique de Nendaz avec le poste d'interconnexion et de transformation placé sur l'autre

¹⁾ Les renseignements concernant cet ouvrage m'ont obligeamment été communiqués par M. COSANDEY, Directeur de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, que

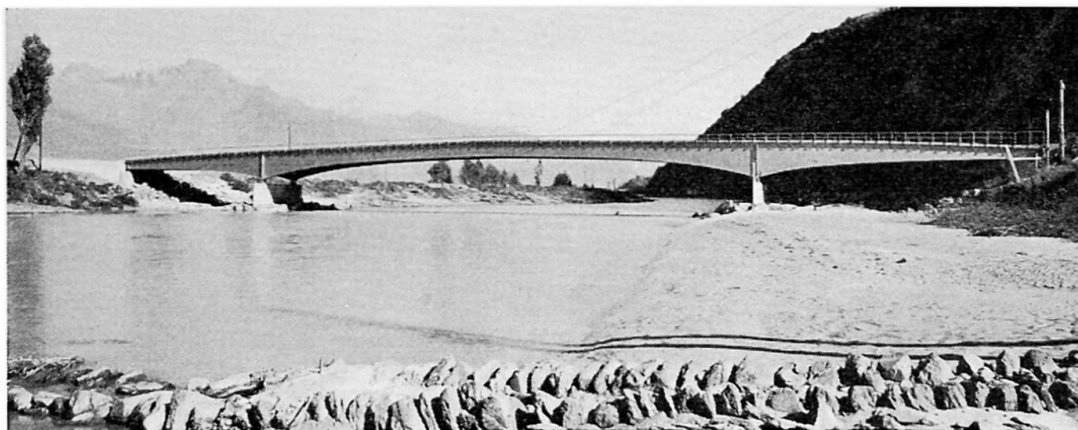


Fig. 1. Ensemble du pont de Chamoson sur le Rhône.

rive (fig. 1). Comme la salle de décuage est située sur la même rive que la centrale, l'ouvrage a été calculé pour supporter entre autres un transformateur rempli d'huile, pesant 52 t et roulant sur des rails scellés dans la dalle de chaussée en béton. Les poutres maîtresses sont disposées en garde-corps; la dalle, large de 5,10 m, repose sur des entretoises et ne participe pas à la résistance d'ensemble.

La largeur du lit mineur du Rhône a imposé une travée centrale longue de 53,30 m, encadrée de deux travées latérales l'une de 21 m, l'autre de 20 m de portée. Ce rapport de environ 5 à 2 n'est pas le plus intéressant du point de vue statique; il en résulte en particulier des sollicitations élevées depuis les culées jusqu'au delà de l'appui sur pile. Certaines considérations, relatives au tirant d'air sous l'ouvrage ainsi qu'au passage sur culées des câbles circulant sur la membrure supérieure, ont imposé d'amincir considérablement l'extrémité des travées latérales; les efforts de traction dans la membrure supérieure sont ainsi élevés et on a été naturellement amené à envisager l'emploi d'un acier à haute limite élastique.

On a utilisé l'acier 60 T de l'Alpine, Usine de Donawitz (Autriche), dont les caractéristiques sont les suivantes:

Caractéristiques mécaniques effectives

- résistance à la traction: 59—61 kg/mm²
- limite d'élasticité supérieure: 45 kg/mm² min.
- allongement de rupture: 24% sur 5 d, 17—19% sur 10 d

je tiens à remercier ici très vivement. On pourra consulter également les articles suivants: M. COSANDEY: Deux exemples récents de ponts-route, Schw. Techn. Zeitschrift, 6 juin 1957; M. COSANDEY: Le contrôle de la qualité des fabrications métalliques, 2. Schweiz. Stahlbautagung, Zürich 1956, Mitt. der TK des Schweizer Stahlbauverbandes, H. 16; M. COSANDEY: De quelques expériences récentes réalisées en Suisse romande dans la construction de ponts métalliques, Schweiz. Bauzeitung, 1964, S. 375.

- striction: 48%
- résistance à la fatigue
 - efforts alternés $\sigma_w = 30 \text{ kg/mm}^2$ (éprouvettes meulées)
 - efforts répétés $\sigma_u = 38 \text{ kg/mm}^2$ (éprouvettes meulées)
 - $\sigma_u = 34 \text{ kg/mm}^2$ (éprouvettes à l'état de livraison, avec calamine, VSM 10 921)
 - $\sigma_u = 38\text{--}40 \text{ kg/mm}^2$ (joint soudé selon VSM 14 051, éprouvette meulée)
- coefficient de pliage (VSM 10 926): 30—34%
- résilience naturelle Charpy-V à 0°: 6 kgm/cm²

Composition chimique (%)

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
Effectif (moyenne)	0,18	1,36	0,55	0,011	0,024	0,45	0,20
Analyse type	0,20	1,25	0,45	0,05	0,05	0,45	0,2

Les propriétés mécaniques sont obtenues par un double traitement thermique, normalisation et revenu à 650°.

Cet acier spécial, et par conséquent relativement cher, n'a été utilisé que pour certains éléments du pont:

- les membrures supérieures dans les régions des moments négatifs ainsi que le tiers adjacent de l'âme;
- les membrures inférieures dans la travée centrale ainsi que les tronçons d'âme correspondants (la hauteur de l'âme en acier 60 T correspond à celle de la poutre au milieu de la travée, soit 1420 mm).

Les semelles ont une section max. de 450-20 en travée et de 450-30 sur appui tandis que l'épaisseur des âmes varie de 8 à 16 mm.

On sait que les procédés automatiques ou semi-automatiques, à vitesse de soudage élevée, conduisent à des retraits et donc à des déformations sensiblement inférieures à celles du soudage manuel, ce qui est important pour l'acier 60 T qu'il n'est guère indiqué de redresser au moyen de chauffes de retrait. Pour cette raison, on a utilisé en atelier un système de soudage type MIG, semi-automatique, comportant un fil continu consommable sous protection d'argon avec 3% d'oxygène (appareillage NERTALIC). La mise au point industrielle a demandé de nombreuses recherches en laboratoire, qui ont trouvé leur expression dans des prescriptions générales pour les travaux d'atelier et de montage.

La mise en œuvre de cet acier traité et à haute résistance est bien entendu sensiblement plus délicate que celle des aciers doux habituels. Grâce à une stricte observation des prescriptions précitées, la fabrication n'a cependant

pas présenté de difficultés particulières, à part celle provoquée par une erreur des laminoirs qui avaient débité les semelles à la cisaille (à partir de tôles), ce qui a provoqué des fissurations perpendiculaires au plan de coupe. L'oxycoupage peut par contre s'opérer normalement, pourvu qu'on meule sur les bords des semelles les stries de coupe et qu'on abatte légèrement les angles.

Pour les épaisseurs supérieures à 15 mm, il a été prévu un préchauffage à 180—200° au moyen d'une flamme douce. Cette température a été maintenue pendant le soudage grâce à l'apport de chaleur fourni par les passes successives.

Les soudures des semelles ont été meulées puis polies avec une meule à grains très fins, dans le sens longitudinal. Pour ces joints bout à bout, contrôlés aux rayons X, on a pu dès lors fixer les contraintes admissibles à la fatigue suivantes, en se basant sur les études du prof. STÜSSI, les normes des Chemins de Fer Allemands ainsi que les essais dont les principaux résultats ont été donnés auparavant:

$\sigma_{min}/\sigma_{max}$	-1,0	-0,5	0	0,54	0,65	1,0	
$\sigma_{adm}(B)$	1,4	1,67	2,2	3,0	—	3,0	t/cm ²
$\sigma_{adm}(C)$	1,25	1,57	2,05	—	3,0	3,0	

Les valeurs de la seconde ligne concernent l'âme des poutres, à l'extrémité de la soudure d'un raidisseur vertical, dans la zone tendue, avec un cordon d'attache continu et usiné proprement à son extrémité (courbe C des prescriptions des Chemins de Fer Allemands ou de l'OENORM B 4600, 3e partie; pour les soudures bout à bout meulées, on aurait la ligne B).

Le montage s'est fait en porte-à-faux à partir des deux rives, avec étiayage provisoire des travées de rive. Les joints de montage sont néanmoins tous soudés. Pour les semelles, on a utilisé le procédé NERTALIC, sur passe de support déposée manuellement «au plafond», tandis que les âmes étaient soudées à la main à l'aide d'électrodes à enrobage basique.

En ce qui concerne l'économie réalisée grâce à l'utilisation d'acier traité, il est bien évident qu'elle n'a pas été importante lors de cette première utilisation, surtout si l'on compte les frais non négligeables de mise au point des procédés de fabrication et particulièrement de soudage. Il s'agissait d'ailleurs avant tout de créer les bases permettant une utilisation sûre de ces nuances d'acier.

Pont de la Madeleine sur la Sarine

Situé un peu à l'aval de Fribourg, ce pont-autoroute franchit la vallée de la Sarine, large à cet endroit de quelque 300 m et profonde d'une cinquantaine de mètres. Après l'érection des piles, la mise en eau du barrage de Schiffenen a créé un lac artificiel large de 215 m à l'emplacement du pont.

Comme l'autoroute est construite en deux étapes, il a été prévu deux ouvrages parallèles indépendants, supportant chacun une chaussée de 7,75 m de largeur et deux bandes de stationnement de 1,25 m, ce qui, avec les glissières de sécurité, conduit à une dalle de tablier large de 11,05 m. Les deux poutres sous tablier sont à âme pleine, avec une hauteur constante égale à 4,21 m; elles sont continues sur trois travées de 85,50 m + 106,50 m + 85,50 m de portée. Les efforts rasants sont transmis par des chevilles à la dalle de tablier en béton armé, préfabriquée en éléments de 2 m de longueur (fig. 2) et qui participe à la résistance du système sous l'action des surcharges tandis que les poutres métalliques reprennent seules la plus grande partie des charges permanentes (la hauteur de la vallée eût rendu fort onéreux un étayage des poutres pendant la pose des dalles).

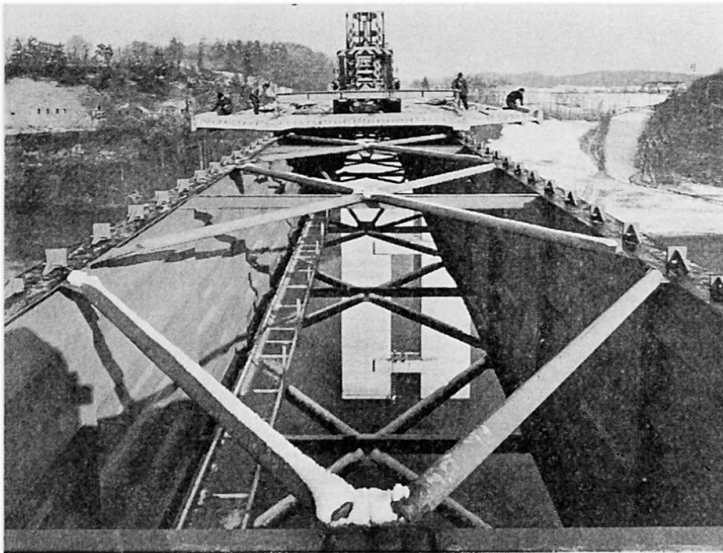


Fig. 2. Pont sur la Sarine. Pose des éléments de dalle.

Pour réduire les risques de fissuration des joints transversaux de la dalle, coulés sur place, il est prévu, dans la région des appuis sur piles, une précontrainte par des câbles mis en tension (1800 t par tablier) avant le remplissage des évidements ménagés tous les mètres, au droit des chevilles; de plus, l'ouvrage une fois achevé, il sera procédé à une précompression d'ensemble par dénivellation de 1,60 m sur piles. Ceci a permis de réaliser une dalle continue, sans les joints sur piles qui sont quelquefois prévus pour des poutres mixtes acier-béton de portée analogue.

La plus grande partie du pont est réalisée en acier 52/36. Les quatre tronçons sur piles, longs de 15 m et pesant chacun environ 21 t, sont toutefois réalisés en acier à haute limite élastique. Leur section se compose d'une semelle supérieure de 850-45, d'une semelle inférieure de 850-50 et d'une âme de 14 mm, renforcée localement à 20 mm au droit de l'appui.

L'acier utilisé, HOAG 55 FKV-5, présente les caractéristiques principales suivantes:

Compositions chimiques de l'acier HOAG 55 FKV-5
(analyses des coulées, en %)

Epaisseur mm	C	Si	Mn	P	S	Ni	V
14, 20	0,16-0,17	0,42-0,51	1,26-1,42	0,022-0,024	0,019-0,023	0,20-0,52	0,08-0,10
45	0,18	0,53	1,35	0,022	0,018	0,44	0,08
50	0,17	0,46	1,50	0,025	0,025	0,49	0,08
type	max 0,20	env. 0,40	env. 1,35	max 0,04	max 0,04	max 0,60	max 0,15

Propriétés mécaniques de l'acier HOAG 55 FKV-5
(essais de réception)

Epaisseur mm	Essai de traction			Résilience (en long)	
	Résistance à la traction kg/mm ²	Limite élastique kg/mm ²	Allonge- ment % <i>L</i> = 5 <i>d</i>	Charpy-V naturelle - 10° kgm/cm ²	DVM vieillie ± 0° kgm/cm ²
14	57,6—60,8	43,7—46,9	26—29	10—14	7—16
20	58,5—58,7	42,7—43,8	28—29	17	18—19
45	56,6—59,4	41,7—43,0	28—34	10—11	16—18
50	60,0	43,3	25	15	12
garanti	55—68	40	$\frac{1200}{55-68}$	5	5

On voit qu'il s'agit d'un acier faiblement allié; il est calmé grain fin et livré à l'état normalisé, sans autre traitement thermique, ce qui facilite grandement la mise en œuvre. En plus des essais de résilience, il a été procédé à des essais de pliage Kommerell sur les épaisseurs de 45 et 50 mm, essais qui ont donné satisfaction.

Les essais de résilience imposés sont assez sévères et, si l'on étendait la nomenclature de la norme DIN 17100, on pourrait parler d'une classe de qualité 5 (comme le nom de l'acier d'ailleurs l'indique). Pour les tronçons en acier 52 on a choisi une classe de qualité 4, ceci pour tenir compte du fait que l'acier 52, plus faiblement allié, est un peu moins sensible à la fragilité.

Le problème de la résistance à la fatigue ne s'est pas posé pour ces tronçons sur piles. Comme il s'agit d'une section mixte acier-béton à dalle admise non fissurée (précontrainte!), l'axe neutre est très haut; les contraintes dues aux

surcharges sont presque négligeables dans la semelle supérieure tendue et le rapport $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ y atteint une valeur de +0,95, conduisant de toute façon à une résistance à la fatigue supérieure à la limite élastique. Quant à la semelle inférieure, le même rapport s'y élève à plus de +0,65, ce qui n'est pas dangereux pour un élément comprimé. On a cependant pris les précautions suivantes:

- les chevilles ne sont attachées que par des cordons longitudinaux;
- les goussets de raccordement aux entretoises sur appui sont largement arrondis (fig. 3);
- les goussets du contreventement supérieur sont prévus de façon à éviter une brusque augmentation de section et les extrémités des cordons d'attache sont meulées.



Fig. 3. Tronçons sur pile en montage.

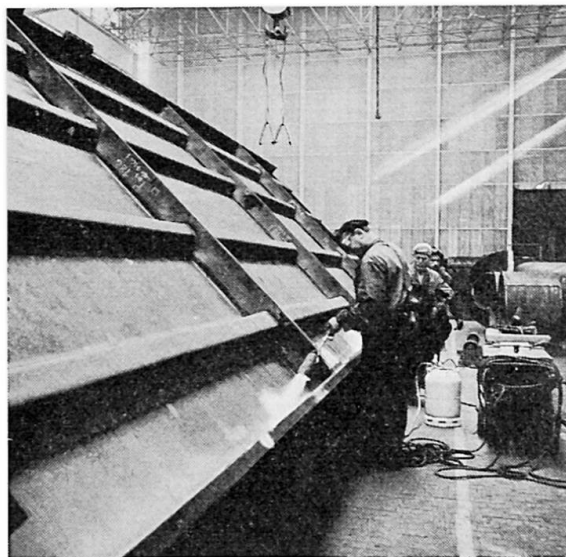


Fig. 4. Préchauffage des semelles avant soudure.

Ces dispositions sont également favorables en ce qui concerne le bon comportement vis-à-vis du danger de rupture fragile.

Les semelles ont été découpées par oxycoupage dans des tôles. Toutes les soudures d'atelier ont été exécutées à la main, avec des électrodes à enrobage basique, ce qui permettait de profiter de l'expérience acquise dans d'autres domaines avec des aciers de nuance équivalente. Avant l'exécution des cordons longitudinaux en *K* entre âmes et semelles, ces dernières ont été préchauffées à environ 120°—150°. Comme on ne disposait pas de positionneurs capables de recevoir des pièces de cette dimension, on a construit des gabarits permettant d'incliner transversalement les poutres et de faciliter par là le travail des soudeurs (fig. 4). Il a été procédé en laboratoire à des essais destructifs sur des éprouvettes de joint soudé, en plus d'un contrôle radiographique très étendu.

On remarquera dans la figure précédente les quatre files de raidisseurs longitudinaux en caisson, à haute résistance flexionnelle et torsionnelle, qui

assurent la sécurité au voilement des âmes, dont l'épaisseur n'est que de 10 mm en travée malgré la hauteur dépassant 4 m. Comme ces raidisseurs, ainsi que les raidisseurs verticaux, sont disposés d'un seul côté de l'âme, on craignait des déformations importantes lors du soudage; il n'en a heureusement rien été. On peut dire en conclusion que la mise en œuvre en atelier n'a guère demandé de précautions plus grandes que pour les tronçons normaux, réalisés en acier 52. Il faut en effet rappeler que l'acier utilisé est à résistance naturelle et non trempé et revenu comme dans l'exemple précédent.



Fig. 5. Soudure au montage de la semelle supérieure.

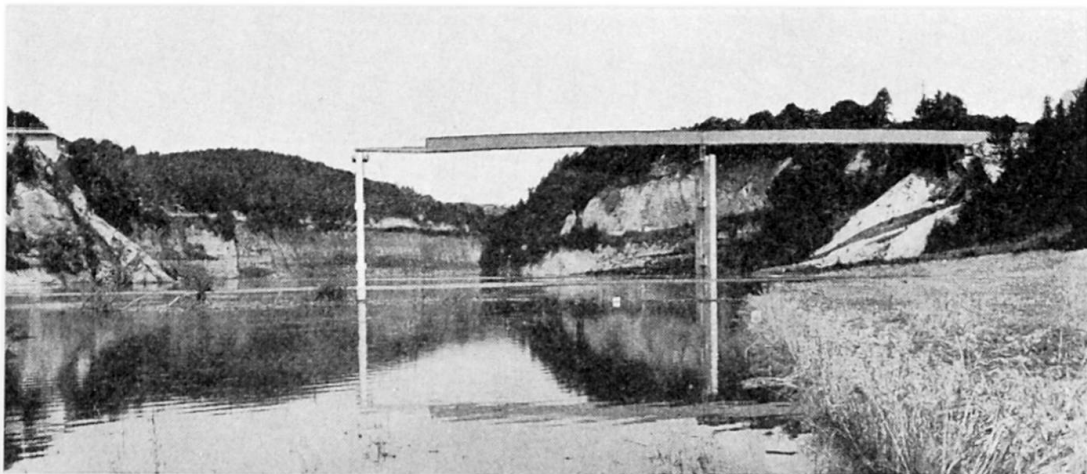


Fig. 6. Franchissement de la travée centrale de 106,50 m lors du lançage.

Au montage, tous les joints sont soudés, en particulier ceux entre les tronçons en acier 55 et en acier 52. Il s'agit chaque fois d'un joint total, avec découpures de l'âme pour faciliter la pose du cordon de semelle transversal en V (même pour les fortes épaisseurs, pour limiter le soudage «au plafond», fig. 5). La décision de souder au montage découle logiquement du procédé de montage adopté: les poutres ont été assemblées à terre (voir fig. 3) puis lancées dans l'axe de l'ouvrage. Lors du franchissement de la travée centrale (fig. 6),

la flèche de l'avant-bec atteignait 3,50 m.

Il nous reste à exposer les raisons qui ont conduit à adopter l'acier 55 pour les tronçons sur piles et à indiquer quels ont été les avantages économiques ou autres.

Comme le supplément de prix pour la nuance 55 est assez élevé, l'utilisation de cet acier à haute limite élastique n'a pas conduit à une économie sensible en ce qui concerne le prix de la matière première, surtout si l'on se rappelle que l'épaisseur de l'âme est fixée avant tout par des conditions de stabilité au voilement et ne peut guère être diminuée lorsque l'on passe à une nuance d'acier supérieure. Il en résulte par contre une réduction appréciable de la section des semelles, réduction qui présente de nombreux avantages :

- possibilité de diminuer l'épaisseur de la semelle, ce qui est favorable pour la sécurité à la rupture fragile. Dans le cas particulier, la semelle la plus forte sur pile (850-50) a ainsi exactement les mêmes dimensions que la semelle correspondante en travée.
- diminution du travail en atelier puisque les épaisseurs à souder sont plus faibles (d'autre part les précautions à prendre ne sont pas plus sévères que pour une semelle d'autant plus épaisse en acier 52).
- réduction de la section métallique, ce qui est intéressant dans le cas particulier d'un système mixte acier-béton à dalle préfabriquée. Les tractions que les phénomènes de longue durée introduisent dans la dalle, c'est-à-dire les tensions dues au retrait empêché et la réduction de précompression due au fluage, sont en effet, dans un système hyperstatique continu, environ proportionnelles à la section des poutres métalliques. Si l'on n'examine que la redistribution des contraintes dans la section sur piles (comme si le

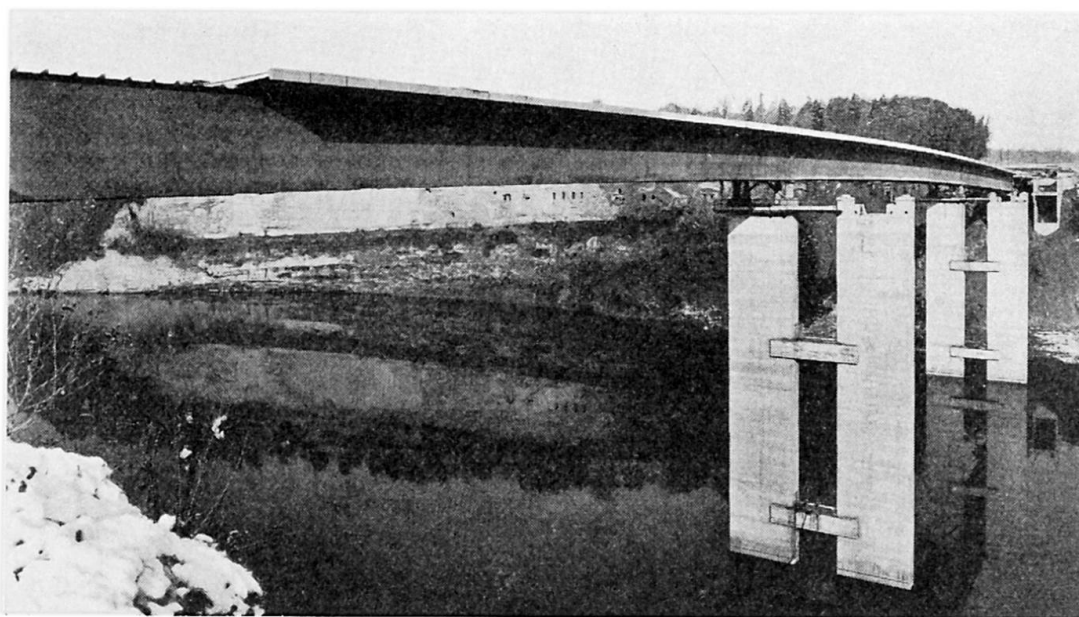


Fig. 7. Ensemble du pont sur la Sarine, surélevé de 1,60 m sur piles.

Le système était isostatique, sans l'influence des moments hyperstatiques de fluage), on voit que les compressions dans le béton, dues au moment positif correspondant à la dénivellation de 1,60 m sur piles (fig. 7), diminuent de 30% pour un coefficient de fluage spécifique φ admis à 1,5 en tenant compte que les dalles sont préfabriquées en usine près d'un an avant leur mise en contrainte. Pour une section équivalente en acier 52, il faudrait par contre compter avec une perte de 35%, ce qui demanderait un important renforcement de la précontrainte par câbles.

La diminution de la section métallique conduit naturellement à une légère augmentation des tractions dans le béton pour un moment négatif unitaire. Cette influence est toutefois pratiquement compensée par la réduction des moments négatifs provoqués par les surcharges, réduction due à la diminution du moment d'inertie sur piles.

Résumé

On présente deux exemples d'utilisation d'acier à haute résistance pour des ponts-routes. Il s'agit dans le premier cas d'un acier trempé et revenu de la nuance 60/45, dans le second d'un acier à dureté naturelle de la nuance 55/40. On expose les procédés de mise en œuvre et les avantages résultant de l'emploi de ces aciers.

Zusammenfassung

Es werden zwei Beispiele der Verwendung hochfester Baustähle für Straßenbrücken dargestellt. Im ersten Fall handelt es sich um einen thermisch vergüteten Stahl der Klasse 60/45, im zweiten Fall um einen naturharten Stahl der Klasse 55/40. Neben einer Beschreibung der Verarbeitungsverfahren werden die Vorteile erwähnt, die sich aus der Verwendung dieser Stähle ergeben.

Summary

Two examples are given of the use of high strength steel in road bridges. The first case is that of a heat-treated steel of grade 60/45, the second is that of a steel of natural hardness of grade 55/40. The methods of fabrication are described and the advantages resulting from the use of these steels are outlined.