

Poutre composite préfléchie précontrainte pour ponts et bâtiments

Autor(en): **Belfroid-Ronveaux, M.A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **55 (1987)**

PDF erstellt am: **02.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-42766>

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.

Poutre composite préfléchie précontrainte pour ponts et bâtiments

Composite Pre-Bent Prestressed Beam for Bridges and Buildings

Vorverformte, vorgespannte Verbundträger für den Brücken- und Hochbau

M.A. BELFROID-RONVEAUX

Ingénieur Civil
Ets E. RONVEAUX SPRL
Ciney, Belgique



Marie-Anne Belfroid, diplômée ingénieur civil des constructions à l'Université de Liège en 1958, a développé dans l'usine familiale de grands éléments en béton précontraint. Elle a constitué une équipe de recherches qui a étudié et mis au point la réalisation d'ouvrages exceptionnels en éléments préfabriqués.

RÉSUMÉ

Il s'agit d'une poutre mixte capable de supporter de très fortes charges pour de très grandes portées avec une hauteur de construction minimum et pour un coût acceptable. Le principe en est l'utilisation d'une poutrelle en acier préfléchie et précontrainte qui est ensuite enrobée de béton lui-même précontraint par adhérence et éventuellement par câbles. La performance s'explique par l'exploitation optimale en tout point de chaque section des caractéristiques des composants – tous à haute résistance – et n'est possible que par la maîtrise du calcul, et facile que grâce à l'informatique.

SUMMARY

This composite beam can carry heavy loads over large spans at a minimum building height and at a very reasonable cost. The composite beam is based on the following principle : it is composed of a pre-bent prestressed beam coated with concrete that is itself either prestressed through bonding or post-tensioned, whilst in all section points properties of the high strength components are put to an optimal use. Mastering of the calculation procedure and the use of a computer are indispensable elements for the realisation of this performance.

ZUSAMMENFASSUNG

Es handelt sich um Verbundträger für die Aufnahme sehr grosser Lasten bei grossen Spannweiten und minimaler Bauhöhe. Der Träger setzt sich aus einem vorverformten und vorgespannten Stahlträger, welcher mit Beton umhüllt wird, zusammen. Der Beton wird dabei durch Haftspannungen oder auch nachträglich durch Kabel vorgespannt. Die hohe Tragfähigkeit ergibt sich durch die optimale Ausnutzung der hochfesten Baustoffe in jedem Querschnitt des Trägers. Dies ist nur möglich dank der Beherrschung der Festigkeitsberechnung. Rechnerunterstützte Berechnungsmethoden sind dabei unentbehrlich.



1. CONCEPTION

Les idées de base du nouveau procédé sont les suivantes :

- Utiliser une poutrelle métallique précambrée et précontrainte posée sur 2 appuis d'extrémité.
- Ramener la fibre inférieure en situation horizontale par préflexion, enrober la poutrelle de béton armé, la semelle inférieure étant pourvue de torons de précontrainte par adhérence.
- Relâcher la préflexion mettant la semelle inférieure en compression, à laquelle s'ajoute encore la précontrainte par adhérence.
- Pour garder des contraintes admissibles dans la semelle supérieure, prévoir une précontrainte provisoire agissant sur cette semelle.

2. DESCRIPTION DU PROCÉDE

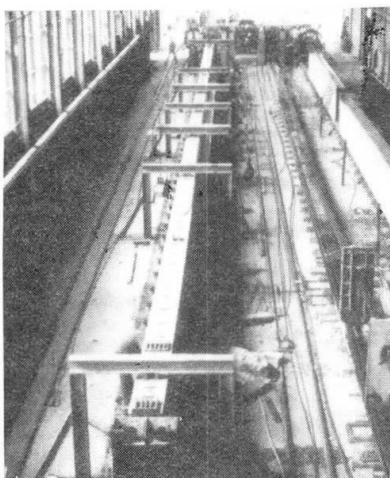


Fig.1 Poutrelle installée

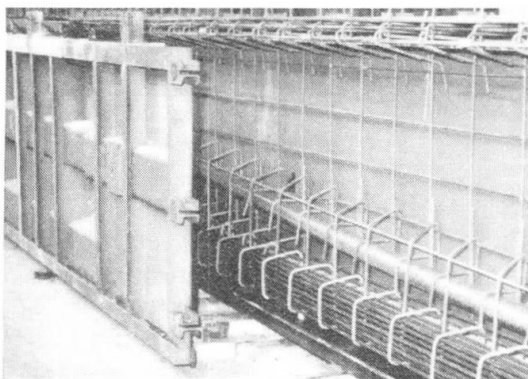


Fig.2 Poutre prête au bétonnage



Fig.3 Poutre terminée à l'usine

2.1. Une poutrelle métallique est précambrée lors de sa fabrication par laminage ou par assemblage de plats soudés. Elle est sollicitée par préflexion et compression longitudinale excentrée de manière à éliminer les contraintes résiduelles de construction et à leur rendre un comportement élastique. La poutrelle est alors mise en place sur le fond de coffrage d'un banc de précontrainte à l'usine de préfabrication.

Des portiques métalliques la maintiennent dans la position voulue et empêchent tout déversement de la semelle supérieure. (fig.1)

2.2. Une précontrainte excentrée est appliquée à la semelle inférieure de la poutrelle sur tout ou partie de la longueur et vient augmenter la précambrure initiale en même temps que précompresser la semelle inférieure.

2.3. Deux efforts verticaux sont appliqués à la poutrelle métallique et la mettent en préflexion, la ramenant dans une position horizontale.

2.4. Des armatures de précontrainte par adhérence du béton sont disposées autour de la semelle inférieure de la poutrelle et tendues entre les ancrages du banc. Des câbles de précontrainte à tendre sur chantier sont mis en place de même que les armatures complémentaires passives ou actives (armatures technologiques, étriers, armatures de renfort,...) (fig.2). Les coffrages latéraux sont fixés sur le fond et remplis de béton serré par vibration agissant sur les coffrages eux-mêmes. Le bétonnage est arrêté au niveau de la semelle supérieure de la poutrelle.

2.5. Des armatures de précontrainte sont mises en place et tendues sur la semelle supérieure de la poutrelle restée apparente ("antiprécontrainte" à caractère provisoire).

2.6. Les efforts de préflexion sont relâchés mettant la poutre mixte en précontrainte et mobilisant simultanément son poids propre.

2.7. Les torons de précontrainte par adhérence sont relâchés apportant un complément de précontrainte à la poutre mixte. La poutre est mise au stock. (fig.3).

2.8. La poutre est transportée, mise en place sur chantier et reçoit le coffrage de la dalle, c'est-à-dire généralement des prédalles en béton.

2.9. Les efforts de précontrainte sur la semelle supérieure sont relâchés.

2.10. La dalle est coulée.

2.11. Les câbles de précontrainte chantier sont mis en tension et injectés.

2.12. La poutre est apte à reprendre les charges permanentes et les charges mobiles.

3. EVOLUTION DES CONTRAINTES (σ)

Nous allons suivre cette étude dans le cas précis du viaduc de Lixhe qui est un bon exemple d'application du procédé dans son ensemble.

3.1. Caractéristiques du viaduc (fig.4) :

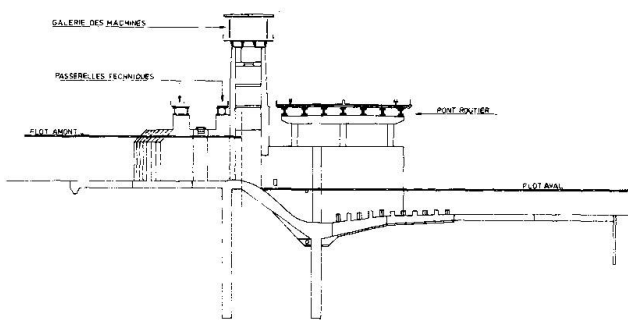


Fig.4 Coupe transversale de l'ouvrage.

Cet ouvrage permet le franchissement de la Meuse à 16 km en aval de Liège à hauteur d'un barrage, ce qui a conduit l'Administration à choisir une solution de tablier à poutres préfabriquées présentant une hauteur totale de 1m55. C'est un pont routier à 4 bandes de circulation qui doit permettre le passage de convois lourds de 240 tonnes.

Longueur totale : 324 m dont 4 travées de 47 m pour lesquelles les poutres faisant l'objet du présent exposé ont permis une solution économique avec une hauteur de 1m39 pour les poutres, soit 1/34 de la portée.

3.2. Caractéristiques de la poutre et de ses matériaux : (fig.5.)

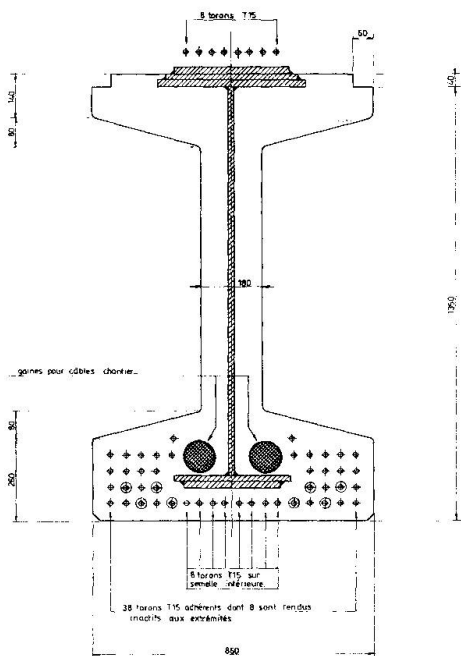


Fig.5 Coupe transversale de la poutre à mi-portée.

Longueur 46m90 - Portée 46m10 - Poids total 90 T

Poutrelle : Acier AE 355D - $E_a = 215.000 \text{ N/mm}^2$
Tension max. service : $0,8 \times 355 (= 288 \text{ N/mm}^2)$

T15.140.S : Charge de rupture $140 \times 1,86 = 260,4 \text{ KN}$
Effort initial sur béton : $0,7 \times 260,4 = 182,3 \text{ KN}$

Câbles 4T15.150 : Charge rupture $4 \times 150 \times 1,77 = 1062 \text{ KN}$
Effort initial sur béton : $0,7 \times 1062 = 744 \text{ KN}$

Aciers BE 50 : Limite élastique 500 N/mm^2
Tension max. service : $0,6 \times 500 (= 300 \text{ N/mm}^2)$

Béton poutre à la mise en précontrainte
Résistance moyenne $R^b = 45 \text{ N/mm}^2$
 $E_b = 37000 \text{ N/mm}^2$ $m_1 = E_a/E_b = 5,75$

Béton poutre à 28 jours :
Résistance garantie $R^{wk} = 54 \text{ N/mm}^2$
 $E_b = 42000 \text{ N/mm}^2$
 $m_2 = E_a/E_b = 5$ (valeur instantanée)
 $m'_2 = 8,4$ (valeur à la longue)

Béton dalle à 28 jours :
Résistance garantie $R^{wkd} = 45 \text{ N/mm}^2$
 $E_{bd} = 37000 \text{ N/mm}^2$
 $m_3 = 5,75$ (valeur instantanée)
 $m'_3 = 9,8$ (valeur à la longue)



3.3. Calcul aux différentes phases d'exécution

3.3.1. Calcul élastique :

Les caractéristiques composées dans la section à mi-portée sont données au tableau 1.
Les distances des centres de gravité (G) sont données par rapport à la fibre inférieure .

Stade du procédé	Dénomination	Section m ²	Distance G m	Inertie m ⁴
[2.1]	Poutrelle métallique	0,056440	0,874	0,016313107
[2.2][2.3]	Poutrelle métallique précont.	0,057560	0,858	0,017058762
[2.5] à [2.7]	Poutre terminée au coupage(m ₁)	0,152011	0,703	0,043032912
[2.6] à [2.10]	Poutre terminée à la longue(m' ₂)	0,124576	0,721	0,036209845
[2.11]	Poutre+dalle à la longue(m' ₂ ,m' ₃)	0,180074	0,947	0,057152327
[2.12]	Idem+câbles+injection(m' ₂ ,m' ₃)	0,185718	0,925	0,060209387

Sollicitations propres à la poutre :

Préflexion : 250 KN, entre-axe 18,60 M.

Poids poutrelle métallique : 163,563 KN

Poids béton+torons+armatures : 717 KN.

Poids de dalle et surcharges :

Poids dalle + câbles + armat.: 12,68 KN/M.

Charges permanentes : 8,95 KN/M.

Charges mobiles : 26,97 KN/M.

Tableau 2 des contraintes en N/mm² dans la section à mi-portée : + = tract. - = compres.

Stade	Dénomination	Moment KN x M	Fib.inf acier	Fib.s. acier	Fib.sup béton	Fib.inf béton	Fib.sup dalle
[2.1]	Poids Poutrelle acier	+ 1057,26	+ 50,1	- 35,1			
[2.2]	Précontrainte poutrelle	- 1201,02	- 82,8	+ 14,0			
[2.3]	Préflexion poutrelle	+ 4650,00	+ 220,5	-154,3			
	Poutrelle avant bétonnage.		+ 187,8	-175,4			
[2.5]	"Antiprécontrainte" (m ₁)	+ 1730,79	+ 14,5	- 38,4	+ 3,23	- 6,50	
[2.6]	Lâchage préflexion (m ₁)	- 4650,00	- 65,2	+ 76,9	-13,02	+13,00	
	Poids propre béton (m ₁)	+ 3551,00	+ 49,8	- 58,7	+10,10	- 9,93	
[2.7]	Précontrainte adhér.(m ₁)	- 4773,53	-100,4	+ 19,1	-19,04	+ 2,90	
	Poutre terminée au coupage		+ 86,5	-176,5	-18,93	- 0,53	
[2.8]	Coffrage dalle (25% dalle)	+ 842	+ 14,4	- 16,2	+ 2	- 1,85	
[2.9]	Enlèvement antiprécontr.	-1730,79	- 14,5	+ 38,4	- 3,23	+ 6,50	
	Après coffrage dalle,pas pertes		+ 86,4	+154,3	-20,16	+ 4,12	
	Valeurs à la longue						
[2.6]	Lâchage préflexion (m' ₂)	-4650	- 79,7	+ 89,2	-11	+10,2	
	Poids propre béton (m' ₂)	+3551	+ 60,9	- 68,1	+ 8,4	- 7,8	
[2.7]	Précontrainte (m' ₂)	-4773,53	-124,6	+ 21,6	-16,16	+ 2,24	
[2.10]	Coulée de la dalle (m' ₂)	+3367,49	+ 57,7	- 64,6	+ 7,98	- 7,41	
[2.11]	Précontr. chantier (m' ₃)	-4170	- 92,8	+ 3,1	-11,92	+ 0,16	+ 1,62
	Pertes précontrainte 10%	+1076	+ 22,3	- 1,2	+ 2,86	- 0,09	- 0,45
	Situation tablier terminé		+ 31,6	-195,4	- 19,84	- 2,70	+ 1,17
[2.12]	Surcharges fixes (m' ₂ ,m' ₃)	+ 2538,65	+ 34,8	- 20,7	+ 4,64	- 2,34	- 2,86
	Surch. mobiles (m' ₂ ,m' ₃)	+ 7163,96	+ 98,1	- 58,3	+13,10	- 6,59	- 8,08
	Poutre sous total charges		+164,5	-274,4	- 2,10	- 11,63	- 9,77

Quelles constatations peut-on faire à ce moment de l'étude ?

- La poutre est maintenue au cours des différentes opérations dans une situation de contraintes tout à fait confortable tant pour le béton que pour l'acier.
- Grâce à " l'antiprécontrainte " notamment, la poutre se trouve en compression à la fibre supérieure, ce qui permettra de lui donner certains porte-à-faux pour faciliter les manutentions de mise en place.
- Ce calcul réalisé dans toutes les sections de la poutre permet de connaître parfaitement la situation et donc d'exploiter au mieux les matériaux de la poutre composite.

3.3.2. Déformations

Le calcul des flèches aux différents stades du procédé et dans des sections entre-distantes de 1 m à partir de la section à mi-portée a été effectué. Nous résumons au tableau 4 les différentes valeurs dans la section à mi-portée.

Stade du procédé	Dénomination	Flèche : + = flèche - = contreflèche
[2.1][2.3] [2.2]	Préflexion + poids propre poutrelle Précontrainte poutrelle Précontrainte poutrelle avant enrobage	+ 388 mm. - 96 mm. + 292 mm. fibre inf. acier
[2.6] [2.7]	Relâchement préflexion Poids propre béton Précontrainte par adhérence Poutre complète au coupage	- 139 mm. + 119 mm. - 117 mm. - 137 mm. fibre inf. béton
[2.6] [2.7]	Relâchement préflexion Poids propre béton Précontrainte par adhérence Pertes de précontrainte Poutre complète à la longue après pertes	- 167 mm. + 142 mm. - 144 mm. + 20 mm. - 149 mm.
[2.10] [2.11]	Poids dalle à la longue Précontr. par câbles à la longue après pertes Tablier avant surcharges	+ 104 mm. - 66 mm. - 111 mm.
[2.12] [2.12]	Charges permanentes Tablier sous charges permanentes Charges mobiles (m ₂ m ₃) Tablier sous charges mobiles	+ 45 mm. - 66 mm. + 92 mm. + 26 mm.

Tab.3. Déformations.

3.3.3. Elastification de la poutrelle

Avant la mise en oeuvre de la poutrelle, il y a lieu de s'assurer de son comportement élastique et donc d'éliminer les contraintes résiduelles de fabrication. Pour ce faire, on soumet la poutrelle à des sollicitations qui créent en tous points des contraintes égales ou supérieures aux contraintes de service.

Pour ce faire, 2 poutrelles sont couchées sur des appuis à rouleaux, leur semelle inférieure mise au centre. Elles sont soumises :

- à flexion par tiges Dywidag agissant horizontalement pour les rapprocher.
- à un complément de compression introduit dans la semelle supérieure par une précontrainte à l'aide des torons " d'antiprécontrainte ". Ce complément est indispensable en raison de la dissymétrie de la poutrelle même et de l'importance des contraintes nécessaires en semelle supérieure.

Plusieurs mises en charge successives peuvent être faites jusqu'à obtention de flèches égales. En pratique, une seule opération a été nécessaire dans le cas présent.

3.4. Calcul à l'état limite ultime

Ce calcul a été fait suivant les méthodes du CEB en adoptant les coefficients de sécurité repris au tableau 4.

Dénomination	Béton poutre	Béton dalle	Barres BE50	Poutrelle	Précontrainte	Charges permanentes	Charges mobiles
Coefficient	1,4	1,5	1,15	1,15	1,15	1,35	1,5

Tab.4. Coefficients de sécurité

On obtient : Moment Résistant/Moment sollicitant = 26482 KNm/24941 KNm = 1,062



3.5. Constatations et mesures effectuées

3.5.1. Contrôles de contraintes et déformations : La fabrication des 28 poutres décrites ci-dessus a fait l'objet d'un autocontrôle de l'usine suivi journalièrement par la 2ème Division du Bureau des Ponts à Liège qui a par ailleurs établi un programme de mesures permettant de connaître le mieux possible les déformations et contraintes () à mi-portée et de les comparer aux valeurs calculées. Pour ce faire, 9 jauges de contraintes et 2 extensiomètres à corde vibrante ont été placés en différents points de la section médiane d'une poutrelle. Les différentes mesures sont reprises au Tableau 5.

Stade procédé	Dénomination	σ calcul.	σ mesurées (N/mm ²)		Fibre
[2.1]	Elastification	- 244 + 320	- 233 + 278		Sup. Inf.
[2.1] à [2,3]	Poutrelle avant bétonnage	- 175,4 + 187,8	- 172 + 171	- 168 (après 7 J) + 170 (après 7 J)	Sup. Inf.
[2.5] à [2,7]	Poutre au coupage et évolution	- 176,5 + 86,6	- 157 + 28	- 153 (à 21 J) -151 (à 132j) + 66 (à 21 J) + 30 (à 132j)	Sup. Inf.
[2.8]	Dalle coffrée	- 154,2	- 149		Sup.
[2.9]	sans antipréc.	+ 86,5	+ 10	(sans pertes)	Inf.
[2.10]	Dalle bétonnée et	- 195,4	- 205		Sup.
[2.11]	précontr.chantier	+ 31,6	+ 43	(avec pertes)	Inf.

Tab.5 Comparaison des contraintes poutrelles calculées et mesurées.

La corrélation entre valeurs théoriques et valeurs mesurées est satisfaisante. Toutefois, on peut se demander quelles valeurs de m conduiraient à une concordance encore meilleure. On trouve : au coupage des torons adhérents, $m = 8,5$; à 21 jours, $m = 13,5$; à 132 jours, $m = 18$. Néanmoins, l'utilisation de semblables valeurs pour le calcul correspondant des contraintes est tout à fait aberrante et nous en avons, bien involontairement eu la preuve. Lors du transport par eau des poutres vers leur destination, un chargement accidentellement basculé et des poutres se sont retrouvées au fond de la Meuse dans une position quelconque. Elles en ont été retirées de telle sorte que les contraintes en cours de manutention auraient atteint plus de 25 N/mm² dans certaines sections qui n'ont présenté aucune dégradation importante. Il y a donc bien eu une redistribution des contraintes entre béton et acier, l'acier ayant empêché le béton de prendre des allongements correspondant aux contraintes théoriques. Sans doute, faudrait-il trouver un moyen dans les calculs de plafonner la résistance du béton à la traction tout comme cela se fait à la compression dans les calculs aux états limites.

3.5.2. Mise en charge d'une poutre avant sortie d'usine : Un essai de mise en charge a été réalisé 21 jours après relâchement de la précontrainte par adhérence par application de 2 efforts de 250 kN à 4m45 de l'axe de la poutre ($M = 4650$ kNm). Les mesures de contraintes dans la poutrelle et les flèches élastiques mesurées correspondaient à des valeurs calculées pour $5 < m < 6$.

4. CONCLUSION ET COMPARAISON ECONOMIQUE : Les mesures effectuées confirment la fiabilité des méthodes et coefficients de calcul utilisés ainsi que des méthodes de fabrication. Economiquement, la comparaison entre la poutre nouvelle et ses consœurs, poutre précontrainte classique et poutre préfléchie classique se résume comme indiqué ci-dessous à égalité de portée, charge et hauteur de construction.

	Poutre nouvelle	Poutre préfléchie	Poutre précontrainte
Nombre	7	7	15
Poids poutrelle	114,5 T	255,7 T	-
BE50	20,1 T	22,6 T	59,6 T
T15, 140S	18,1 T	-	30,3 T
T15, 150	11,4 T	-	28,8 T
m ³ béton	201,3 m ³	282,7 m ³	590,2 m ³
Rapport prix placé	1	1,60	1,45