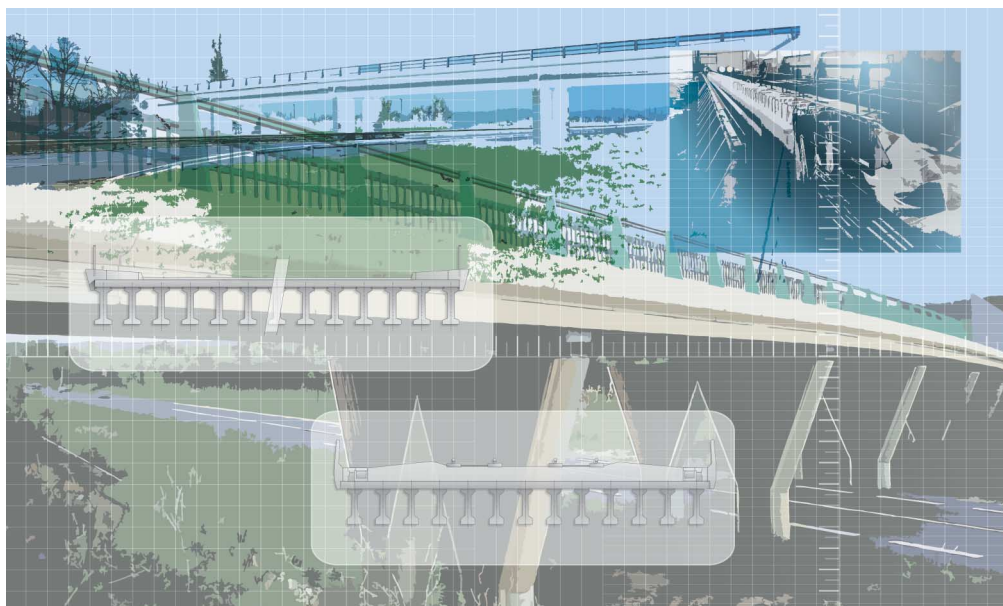


PONTS À POUTRES PRÉFABRIQUÉES PRÉCONTRAINTEES
PAR ADHÉRENCE : PRAD

Les atouts de l'offre industrielle
pour des ouvrages sobres,
économiques et pérennes



1. Définition des ponts PRAD

Les ponts PRAD (ouvrages de type courant à poutres sous chaussées) sont constitués de **poutres précontraintes par adhérence** (poutres précontraintes par prétension*) solidarisées par un hourdis en béton coulé en place (sur des coffrages perdus non participants). Les poutres sont reliées entre elles par des entretoises uniquement au niveau des appuis. Les poutres préfabriquées en usine sont de hauteur constante et leur espacement est de l'ordre de 80 cm à 1 m. Le hourdis a une épaisseur comprise entre 18 et 22 cm, pour les ponts-routes, et de 25 cm, pour les ponts-rails.



*L'un des franchissements de l'A64 (reliant Muret à Saint-Gaudens)
dessiné par les architectes Faup et Zirk.*

**La précontrainte est réalisée par des armatures tendues avant bétonnage et durcissement du béton.*

2. Domaine d'utilisation privilégiée des ponts PRAD

Les ponts PRAD sont devenus, depuis de nombreuses années, une solution classique pour la réalisation de **ponts routiers ou autoroutiers** dans la gamme des portées de 10 à 35 m (passage inférieur ou passage supérieur).

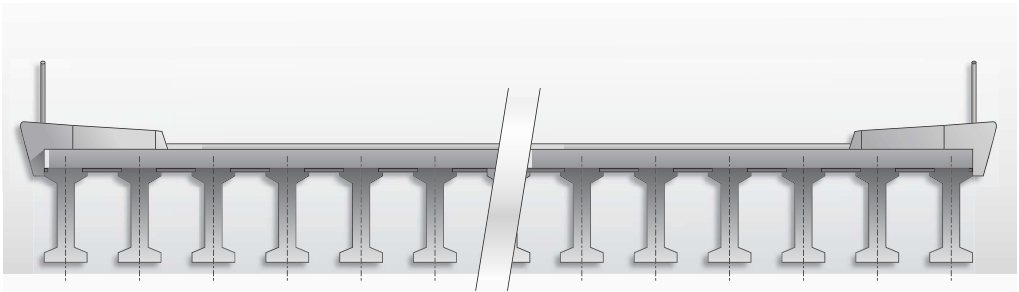


Figure 1: coupe type d'un pont routier PRAD.

Ils sont aussi utilisés désormais pour la réalisation d'**ouvrages ferroviaires** (à une travée isostatique ou plusieurs travées hyperstatiques).

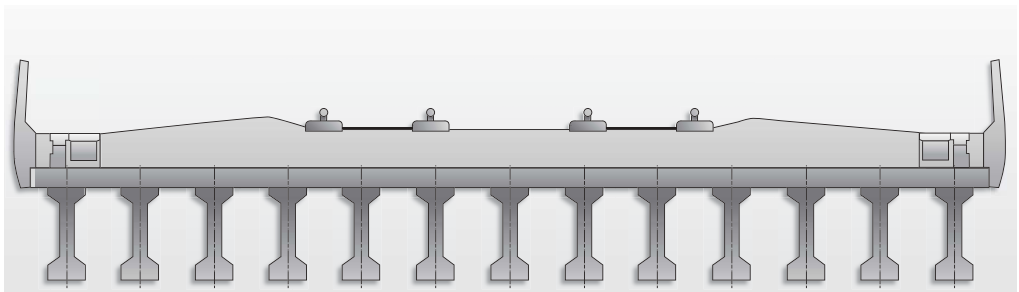


Figure 2: coupe type d'un pont-rails à 2 voies.

3. Différents types de ponts PRAD

3.1 - En fonction du schéma statique longitudinal

■ 3.1.1 - Pont PRAD isostatique

3.1.1.1 - Pont à une seule travée

Les poutres sont disposées directement sur des appareils d'appuis en néoprène fretté ou sont ancrées dans une entretoise d'about servant de chaînage pour le transfert des charges du tablier sur les appareils d'appui.

3.1.1.2 - Pont à plusieurs travées

Le tablier est constitué de travées indépendantes reliées au niveau du hourdis par des dallettes de continuité en béton armé (d'épaisseur 15 cm et de longueur minimum 1 m) au droit de chaque pile intermédiaire.

Cette succession de travées indépendantes repose au niveau de chaque appui intermédiaire sur deux lignes d'appareil d'appui.

■ 3.1.2 - Pont PRAD hyperstatique

La continuité mécanique du tablier est assurée après pose des poutres par un clavage (entretoise de continuité ou chevêtre) en béton armé coulé en place en même temps que le hourdis et solidaire des poutres et du hourdis, qui joue le rôle de raidissage transversal, au droit de chaque pile intermédiaire. Le tablier repose, dans ce cas, sur une seule ligne d'appareil d'appui.

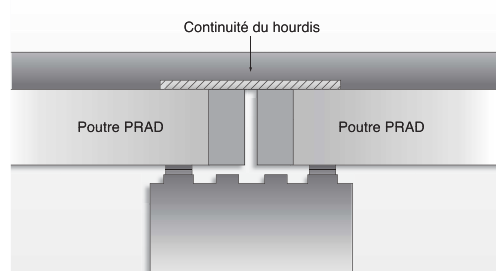


Figure 3: travées indépendantes reliées par des dallettes en béton armé.

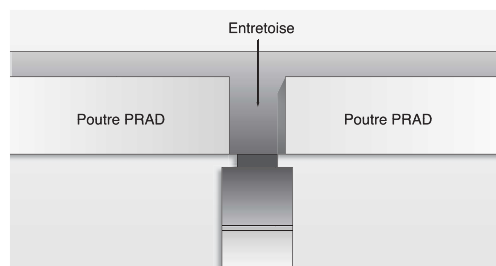


Figure 4: travées rendues continues par clavage.

3.2 - En fonction de la voie portée

■ 3.2.1 - *Ponts PRAD routiers et autoroutiers*

Les ponts PRAD sont utilisés pour la réalisation de tout type de ponts courants isostatiques ou hyperstatiques routiers ou autoroutiers.

■ 3.2.2 - *Ponts PRAD ferroviaires*

Ces ouvrages hyperstatiques dénommés Ra-PPAD ont fait l'objet de nombreuses études, de 1995 à 2000, visant à justifier leur intérêt et leur compétitivité pour la réalisation de ponts-rails, en particulier pour les lignes ferroviaires à grande vitesse.

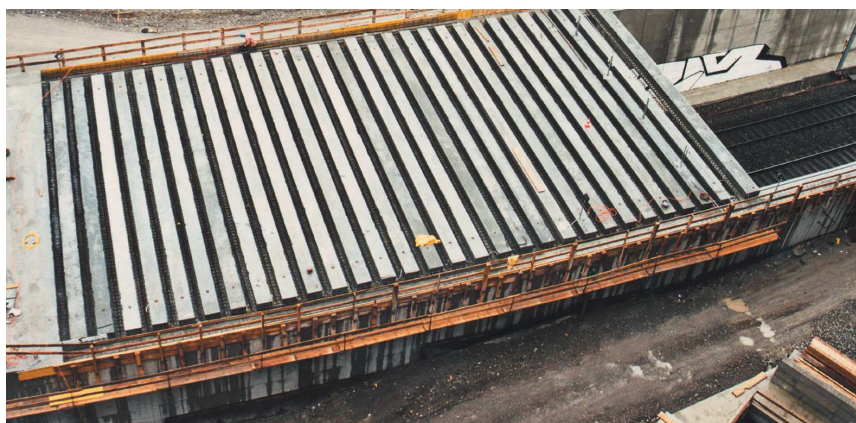
Les premiers tabliers de ce type ont été mis en œuvre sur la ligne LGV du TGV Est dès 2003.

3.3 - En fonction des profils en long et en travers

Les ouvrages à poutres sous chaussées conviennent particulièrement pour la réalisation d'ouvrages droits, perpendiculaires à la brèche à franchir, mais des dispositions constructives simples permettent de réaliser, à l'aide de poutres PRAD, des ouvrages courbes ou présentant un biais géométrique important et des dévers ainsi que des tabliers de largeur variable.

3.4 - Autres types d'ouvrages

Les poutres PRAD peuvent être utilisées pour la réalisation de la dalle supérieure de tranchées couvertes ou de couvertures phoniques. Elles permettent aussi la confection d'ouvrages cadres ou de portiques en noyant l'extrémité des poutres dans les voiles verticaux.



*Tranchée
couverte
avec
couverture
en poutres
préfabriquées.*

4. Éléments de dimensionnement

Le concepteur dispose d'une liberté de dimensionnement en optimisant le nombre de poutres, leur hauteur, leur espacement et l'épaisseur du hourdis afin d'adapter le tablier aux exigences du projet. Le choix judicieux du nombre de travées permet de donner à l'ouvrage une certaine transparence afin qu'il s'intègre parfaitement dans son site.

Les élancements globaux des ponts-routes, poutres et tabliers sont de l'ordre de $1/18$ à $1/20$ pour les ouvrages isostatiques et de l'ordre de $1/22$ à $1/25$ pour les ouvrages hyperstatiques. Pour les ponts ferroviaires, l'élancement est de l'ordre de $1/13$.

Pour le dimensionnement des ouvrages, il est supposé que toutes les poutres sont fabriquées et mise en précontrainte en même temps et que les bétonnages des clavages et du hourdis ont lieu simultanément pour tout l'ouvrage.

Les calculs des tabliers des ponts-routes sont effectués actuellement selon les règles BPEL en classe II de précontrainte et ceux des ponts-rails selon le livret 2.01 de la SNCF en classe I de précontrainte.

À partir de 2005, les calculs s'effectueront conformément aux eurocodes.

5. Différents types de poutres

Deux types de section de poutres sont le plus couramment utilisés :

- les poutres de section rectangulaire (de largeur comprise entre 25 et 40 cm et de hauteur 30 à 80 cm) pour des ouvrages de portées allant jusqu'à 15 m voire 20 m avec des bétons à hautes performances (BHP) ;
- les poutres de section en I avec ou sans blochet (section rectangulaire au voisinage des extrémités) pour des portées allant jusqu'à 35 m (largeur des âmes comprises entre 15 et 20 cm et hauteur des poutres 70 à 150 cm).



Figure 5: poutre rectangulaire et poutres en I

6. Caractéristiques des ciments

Les spécifications sur les ciments et les bétons, pour la fabrication des poutres, sont précisées dans le fascicule 65 A et son additif ou le livret 2.21 de la SNCF.

Les ciments à utiliser sont, de préférence, de type CEM I et, éventuellement, de type CEM II A ou B avec des compositions chimiques respectant des seuils maximaux sur les ions chlore et les sulfures. Le choix du ciment doit tenir compte du traitement thermique appliqué au béton lors de la préfabrication des poutres.

Les bétons à hautes performances peuvent être utilisés pour la fabrication des poutres.

7. Préfabrication des poutres

Les poutres PRAD sont préfabriquées en usine sur des bancs de préfabrication.



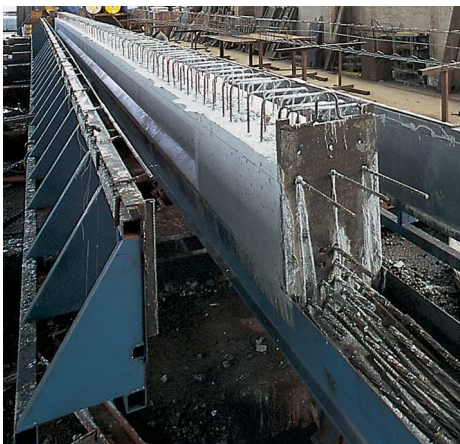
*Mise en tension des armatures de précontrainte.
Vue d'ensemble du peigne d'about permettant le positionnement des torons.*

Les armatures passives sont disposées dans des coffrages métalliques. Les armatures de précontrainte (torons) sont positionnées à l'aide de gabarits et fixées aux extrémités du banc puis mises en tension (ancrage fixe à une extrémité, mise en tension de l'autre côté).

Mise en place de la tête d'ancrage à clavette.



Mise en tension d'un toron de précontrainte.



Après ouverture du banc de préfabrication, les aciers actifs sont relâchés pour mettre la poutre en précontrainte.

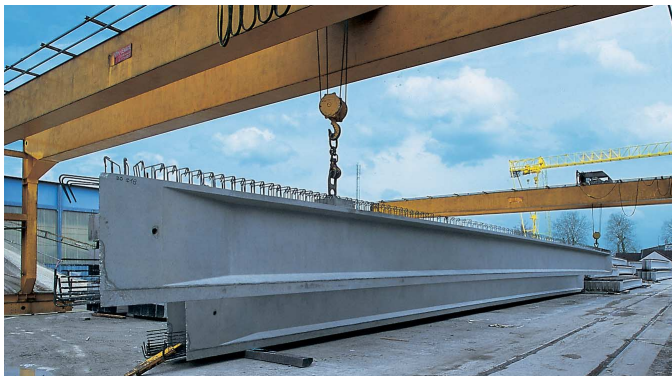
Le béton confectionné dans la centrale de l'usine présente des performances mécaniques élevées (résistance à 28 jours supérieure au minimum à 40 MPa, souvent 50, voire 80 MPa)

La mise en précontrainte obtenue par relâchement des câbles (la tension dans les câbles se transmet par adhérence au béton et engendre par réaction sa mise en compression) est possible dès que le béton atteint 30 MPa. Cette résistance est obtenue dans un délai de l'ordre de 16 heures avec un système d'étuvage et de traitement thermique adapté.

8. Manutention, transport et mise en place des poutres

8.1 - Manutention et transport des poutres

Les poutres PRAD sont fabriquées dans des usines de préfabrication puis stockées une vingtaine de jours avant d'être livrées sur les chantiers, en général par voie routière (parfois par voie ferrée). La fabrication des poutres en usine fait l'objet d'un plan d'assurance qualité en conformité avec le chapitre 5 de l'additif au fascicule 65-A dans le cas des ponts-routes et le livret 2.21 pour les ponts-rails.



Les poutres sont transférées et stockées sur le parc de l'usine, en appui sur des madriers.





Transport de poutres par camion.



Transport ferroviaire

8.2 - Mise en place des poutres

La mise en place définitive des poutres se fait à l'aide de grues ou d'engins de levage légers (à des cadences de pose de l'ordre de 15 à 30 minutes par poutre). Des dispositifs de sécurité permettent d'assurer la stabilité des poutres en phase de construction.



Mise en place des poutres.

9. Réalisation du tablier

La réalisation du tablier relève du fascicule 65-A pour tout ce qui concerne les éléments en béton coulés en place (entretoises et hourdis) pour les ponts-routes, et du livret 2.21 pour les ponts-rails.

Après la pose des poutres, on procède à la mise en place des coffrages du hourdis entre les poutres (en général coffrage perdu) et ceux éventuellement des encorbellements, puis des coffrages des chaînages ou des entretoises.



Dispositif de stabilisation des poutres.



Détail d'appui sur culée.

Après mise en place des ferrailages transversaux et longitudinaux, on procède au bétonnage (en général en une seule phase) des entretoises et du hourdis. Pour les ouvrages hyperstatiques on procède, après durcissement du béton, au transfert du tablier sur ces appuis définitifs.

Dispositif d'étaie sur pile.



Le tablier est ensuite équipé par des corniches, en général en béton préfabriqué (bénéficiant de traitement de surface architectonique), qui supportent les dispositifs de retenue.

10. Atouts des ponts PRAD

10.1 - La maîtrise de la qualité des poutres réalisées en usine

L'industrie de la préfabrication garantit aux poutres PRAD tous les atouts des fabrications selon des process éprouvés, l'expérience de la qualité des performances contrôlées et régulières et le respect des tolérances dimensionnelles. De nombreux ateliers produisent, sous référentiel ISO et intègrent des contraintes en matière d'impact environnemental et de développement durable.



Stockage provisoire en usine.

10.2 - La facilité, la rapidité et la sécurité de la réalisation de l'ouvrage

Les ponts PRAD sont parmi les ouvrages les plus rapides à réaliser. Les poutres sont mises en place sur chantier, à l'aide de moyens de levage courants (sans

nécessité d'échafaudages), à des cadences élevées. Le hourdis est bétonné sur des coffrages perdus, ce qui permet la réalisation d'ouvrage dans des délais réduits en favorisant la sécurité des ouvriers et en s'affranchissant des contraintes liées à la brèche à franchir.

Cette solution justifie d'autant plus son intérêt pour des ouvrages réalisés sous circulation ou pour franchir des voies ferrées et des cours d'eau. Le trafic peut être maintenu à l'exception de coupures très brèves au moment de la mise en place des poutres.

10.3 - L'intérêt économique en termes d'investissement et de coût global

La solution PRAD s'avère une solution économique en termes d'investissement compte tenu, en particulier, de la répétitivité de sa conception et de la rapidité de sa réalisation. L'optimisation de sa conception (armatures de précontrainte parfaitement protégées...) et la qualité des matériaux utilisés (poutres préfabriquées en usine) sont un gage de pérennité et d'entretien minimum.

10.4 - Des références nombreuses depuis plus de 30 ans

Plusieurs milliers de tabliers (isostatiques ou hyperstatiques) ont été mis en service ces trente dernières années avec des poutres PRAD. Ces ouvrages sont reconnus pour leur excellent comportement dans le temps.

10.5 - La richesse de l'offre structurelle

La variété de la gamme des poutres proposées (forme des poutres, longueur, performance des bétons) permet de réaliser des ouvrages dans une large gamme de portées en satisfaisant à toutes les exigences des projets.

10.6 - La sobriété d'un système structural efficace

Le fonctionnement structural des ouvrages PRAD est particulièrement simple, la logique de cheminement des efforts est évidente, ce qui permet de réaliser des ouvrages donnant une impression de grande stabilité et d'une rare sobriété.



11. Atouts complémentaires des ouvrages hyperstatiques

Les structures hyperstatiques offrent une grande liberté de conception et l'esthétique des ouvrages, tout en facilitant leur entretien.

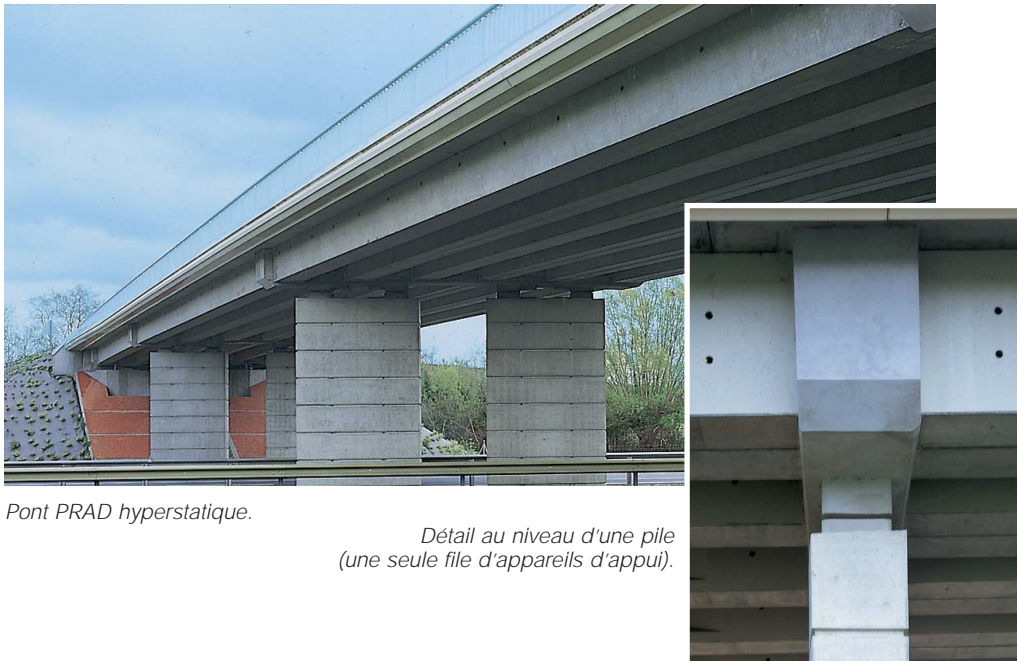
La continuité mécanique du tablier permet, en réduisant les moments fléchissants en travée, de diminuer l'épaisseur de l'ouvrage et de garantir le confort de roulement des usagers.



Le transfert des charges aux appuis est assuré, pour ce type d'ouvrage, par une seule file d'appui, ce qui permet de supprimer le chevêtre en tête de pile, d'optimiser la géométrie des piles et de faciliter les opérations de vérinage du tablier et les changements éventuels d'appareils d'appui.

Le comportement monolithique de l'ouvrage améliore sa résistance et sa ductilité vis-à-vis des efforts dynamiques, ce qui lui confère une grande capacité à dissiper l'énergie en cas de séisme.

La raideur importante du tablier continu permet d'en diminuer l'épaisseur et de conférer à l'ouvrage plus de transparence, une meilleure intégration dans le site ainsi qu'une plus grande harmonie entre les appuis et le tablier.

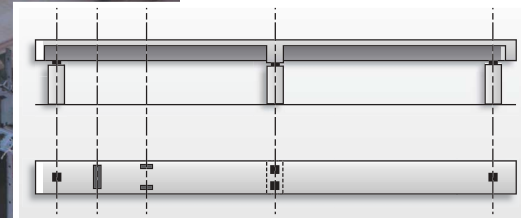
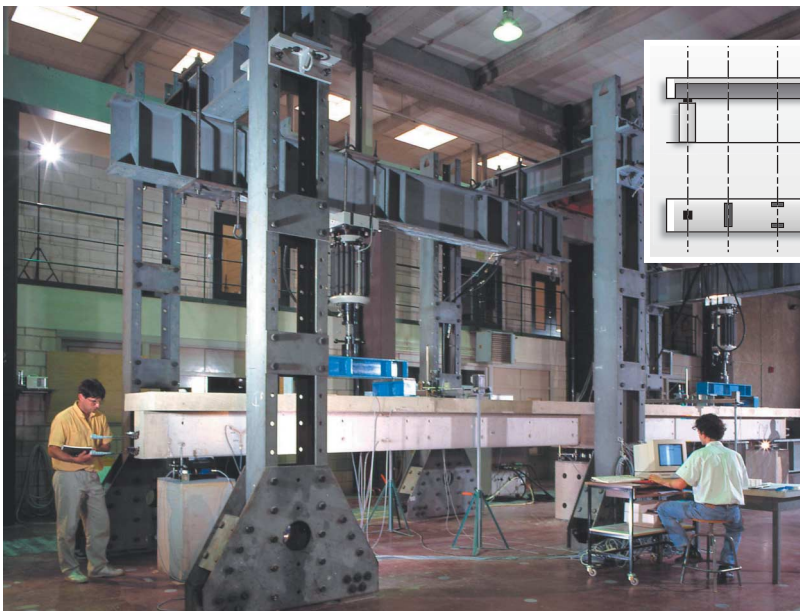


Pont PRAD hyperstatique.

*Détail au niveau d'une pile
(une seule file d'appareils d'appui).*

12. Ponts PRAD ferroviaires hyperstatiques

La solution pont-rails PRAD a fait l'objet, de 1995 à 2000, d'essais de fatigue accélérés et d'optimisation du dimensionnement, en partenariat entre la SNCF, le CERIB et la FIB, en vue de son utilisation pour les ouvrages ferroviaires de la ligne à grande vitesse, LGV Est. Les essais ont démontré l'aptitude des poutres précontraintes à résister aux sollicitations de fatigue pendant toute la durée de service de l'ouvrage. Les études paramétrées de dimensionnement ont justifié l'intérêt économique de la structure pour les portées comprises entre 15 et 25 m.



Essai de fatigue

La continuité mécanique améliore le comportement dynamique de l'ouvrage sous circulation à très grande vitesse, gage de sécurité et de confort pour les usagers. Cette solution répond parfaitement aux critères d'économie et de fiabilité en vigueur pour les ouvrages ferroviaires.

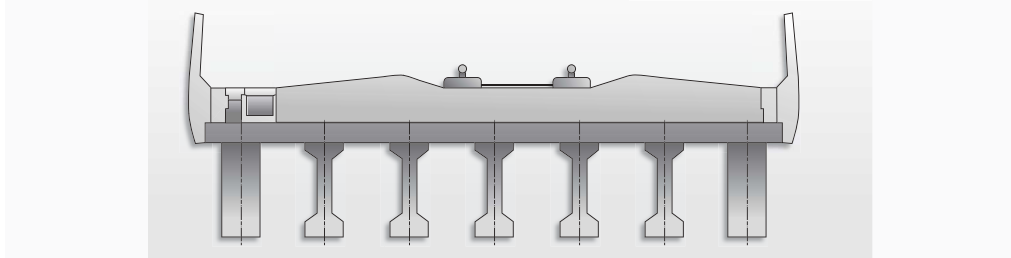


Figure 6: coupe type d'un pont-rails à une voie.

13. Avantages des BHP et des BAP pour la fabrication des poutres PRAD

Les évolutions de ces dernières années, concernant les bétons, sont parfaitement adaptées à l'optimisation des poutres PRAD.

Les BAP (bétons autoplaçant) permettent de faciliter la mise en œuvre des bétons en usine, d'améliorer la texture des parements et, surtout, de réduire l'impact sonore sur les ouvriers et les riverains.

Le recours aux BHP optimise le process de fabrication des poutres (mise en précontrainte plus rapide) et permet, en diminuant le nombre de poutres ou leur hauteur, d'élargir la gamme des portées, d'optimiser le dimensionnement (diminution des déformations par fluage) et d'augmenter la durabilité des ouvrages. Le recours au BHP entraîne un allègement des poutres, ce qui est particulièrement intéressant pour la réduction des impacts en matière de transport et pour les opérations de manutention.

14. Perspectives d'évolution vers les BFUP

Les BFUP (bétons fibrés à ultrahauts performances) vont trouver au cours des prochaines années un champ d'application dans les ouvrages d'art et en particulier dans les ponts à poutres préfabriquées. Les ponts PRAD bénéficieront de tous les atouts de ce type de béton en gagnant en transparence esthétique.



15. Documents de référence

- **Guide de conception**, Ponts-Routes à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence - PRAD, SETRA, septembre 1996.
- **Fascicule 65-A**, Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension, août 2000.
- **Additif au fascicule 65-A**, Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint, août 2000.
- **Livret 2.01**, Règles de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal, ou mixtes, SNCF.
- **Livret 2.21**, Exécution des ouvrages en béton armé et en béton précontraint, SNCF.
- **Guide du projecteur ouvrages d'art, Ponts courants**, SETRA, janvier 1999.
- **Guide de calcul, programme PRAD-EL pour tabliers à poutres précontraintes par adhérence**, SETRA, janvier 2001 (ce logiciel permet de dimensionner les ponts-routes et les ponts-rails à travée unique ou à plusieurs travées continues).
- **EN 1990 Eurocode**: Base de calcul des structures
- **EUROCODE 1: Actions sur les structures**
 - EN 1991-1.1: Densités, poids propres et charges d'exploitations pour les bâtiments
 - EN 1991-1.3: Charges de neige
 - EN 1991-1.4: Actions dues au vent
 - EN 1991-1.5: Actions thermiques
 - EN 1991-1.6: Actions en cours de construction
 - EN 1991-1.7: Actions accidentelles dues aux chocs et aux explosions
 - EN 1991-2: Charges sur les ponts, dues au trafic
- **Eurocode -2: Calcul des structures en béton**
 - EN 1992-1.1: Règles communes pour les bâtiments et ouvrages de génie civil
 - EN 1992-2: Pont

Réalisation
Amprincipe – Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Illustrations
David Lozach

Crédit photographique
Y. Brugeaud, P. Passeman
CIMBÉTON D.R.

Impression
Imprimerie Chirat

Édition, décembre 2003