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

Band: 11 (1980)

Artikel: Evolution dans la conception des grands ponts ferroviaires

Autor: Picquand, Jean-Louis

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-11345

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VIII

Evolution dans la conception des grands ponts ferroviaires

Tendenzen beim Entwurf grosser Eisenbahnbrücken

Trends in the Design of Big Railway Bridges

JEAN-LOUIS PICQUAND
Chef du Département des Ouvrages d'Art
Société Nationale des Chemins de Fer Français
Paris, France

RESUME
La valeur élevée des surcharges et l'importance des majorations dynamiques ont conduit la SNCF à employer, pour le dimensionnement de ses ouvrages, le convoi de calcul défini après les études menées sous l'égide de l'Union Internationale des Chemins de Fer. Des précautions ont été prises sur les lignes parcourues à très grande vitesse. Des recommandations ont été élaborées pour l'emploi notamment du béton précontraint.

ZUSAMMENFASSUNG
Die hohen Verkehrskosten und die Wichtigkeit des Stosszuschlages führten dazu, dass die SNCF bei der Bemessung ihrer Bauwerke den Typenzug nach UIC (Internationaler Eisenbahnverband) zugrunde legen. Besondere Vorsichtsmassnahmen wurden für Strecken, die mit sehr grossen Geschwindigkeiten befahren werden, vorgenommen. Empfehlungen wurden für die Verwendung von Stahlbeton erarbeitet.

SUMMARY
The high value of live loads and the importance of the impact factors led SNCF to use a theoretical train defined by UIC (Union International of Railways) for designing its civil engineering structures. Particular attention was paid to high speed operated lines. Rules especially applying to prestressed concrete were elaborated.

Après une longue période où la construction des voies ferrées était en France limitée à la création de triages et à l'établissement d'embranchements particuliers, la S.N.C.F. a, depuis les années 70, entrepris la construction de lignes nouvelles, d'abord dans le cadre suburbain pour la desserte des villes nouvelles de la Région Parisienne et de l'aéroport Charles de Gaulle à Roissy, puis, plus récemment, pour la réalisation de la ligne à très grande vitesse Paris-Sud-Est.

L'ensemble des travaux d'établissement des lignes nouvelles s'est traduit par la construction d'un nombre important d'ouvrages d'art neufs dont la conception a été marquée d'une certaine évolution tenant compte du fait que leur mise en œuvre se déroulait en dehors de tout trafic ferroviaire. Il en est résulté un emploi assez étendu du béton précontraint avec un certain nombre de précautions d'emploi qu'imposaient les caractéristiques spécifiques du trafic ferroviaire.

1. CARACTERISTIQUES PARTICULIERES DES PONTS-RAILS

Ce qui différencie les ponts-rails des ponts-routes c'est d'une part l'importance des surcharges roulantes, d'autre part la difficulté et le coût d'une intervention d'entretien sur un ouvrage exploité. Ces particularités ont de tout temps conduit à des structures de dimensions importantes en regard des portées des ouvrages. Des portées de viaduc de l'ordre de la centaine de mètres qui sont, somme toute assez courantes en matière de ponts-routes, posent des problèmes techniques ardus en matière de ponts-rails. Ces problèmes sont d'ailleurs accentués comme nous le verrons plus loin dans le cas où l'ouvrage est susceptible d'être parcouru par des circulations à grande vitesse.

2. DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES : DEFINITION DES SURCHARGES

2.1. - Les effets dynamiques

Ces effets sont essentiellement de trois ordres :

1) La force centrifuge verticale due à la charge de la voie

La flexion prise par l'ouvrage sous la surcharge donne à la voie une courbure concave vers le haut ce qui entraîne une force centrifuge dirigée vers le bas qui s'ajoute au poids propre et accroît la flèche donc la courbure de la voie. Cette variation de courbure provoque une nouvelle augmentation de la force centrifuge jusqu'à établissement d'un équilibre dynamique. La force centrifuge étant proportionnelle au carré de la vitesse, il se peut que pour une vitesse dépassant un seuil que nous appellerons vitesse critique la poutre ne trouve pas sa position d'équilibre dynamique. On notera que pour les convois légers du Train à Grande Vitesse (TGV) la vitesse critique sur les tabliers classiques en béton armé ou précontraint est de l'ordre de 1 500 km/h ce qui laisse une marge très suffisante ; par contre, la vitesse critique d'une machine lourde sur un tablier métallique léger est de l'ordre de 500 à 600 km/h ce qui pourrait poser des problèmes dans le cas de circulation de tels engins à 300 km/h. On remarquera que dans une telle éventualité l'effet de la force centrifuge peut être maitrisé en donnant une contreflèche à la voie.

2) Les variations dynamiques des charges d'essieu attribuables aux défauts de voie, aux irrégularités des organes de roulement, aux oscillations de caisses et bogies, aux effets de cabrage liés aux efforts de freinage et traction.

3) Les oscillations élastiques des poutres sous l'effet des sollicitations périodiques dues aux passages des groupes d'essieux.

Dans la pratique les divers effets sont en interaction mutuelle de sorte qu'il est nécessaire de les appréhender globalement. C'est l'objet du coefficient de majoration dynamique $1 + \varphi$.

Dès 1952, sous l'égide de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) des essais sur modèle réduit et sur ouvrages, des études théoriques ont été menés afin de mieux appréhender le coefficient de majoration dynamique. Ces études ont montré qu'on pouvait représenter le coefficient de majoration dynamique sous la forme $1 + \varphi = 1 + \varphi' + \lambda \varphi''$ où φ' représente la majoration dynamique pour une voie parfaite, φ'' la majoration dynamique due aux irrégularités verticales de la voie, λ un coefficient de prise en compte de ces dernières, variable avec la qualité de l'entretien de la voie.

Les coefficients φ' et φ'' sont fonction de :

- la vitesse du convoi,
- la fréquence propre d'oscillation du tablier,
- la longueur caractéristique de l'élément considéré qui est égale à la portée pour les poutres principales sur appui simple et qui est donnée par un tableau défini par les essais pour les autres éléments et pour les travées hyperstatiques.

2.2. - Le convoi de calcul

Sous peine de compliquer exagérément le calcul et d'entraîner par là des risques d'erreur, il n'est pas souhaitable de multiplier les paramètres entrant dans le dimensionnement des ouvrages. Aussi l'UIC a-t-elle cherché à couvrir par un schéma de charge unique les diverses circulations susceptibles d'emprunter une même ligne.

A cet effet, six trains types réels (TTR) ont été considérés chacun avec sa vitesse caractéristique.

On a d'abord établi un schéma de charge UIC couvrant du point de vue des charges statiques l'ensemble des TTR. On a pu alors définir un coefficient de majoration dynamique ϕ qui, appliqué au schéma UIC, puisse couvrir les effets des TTR avec leurs majorations dynamiques réelles.

Le coefficient ϕ ne dépend que de la longueur caractéristique de l'élément.

2.3. - La qualité de la géométrie de la voie dans le cas des circulations à grande vitesse

La sécurité et le confort des usagers circulant à grande vitesse (260 km/h) impose des variations extrêmement limitées à la géométrie de la voie.

a) Les déformations dues au *fluage* et au *retrait* du béton sont des phénomènes lents qui peuvent altérer le profil en long de l'ouvrage. Il y est remédié par une pose de voie ballastée qui permet toutes les corrections de nivellement désirables.

b) La dilatation thermique s'accompagne de courbures parasites des tabliers en plan et profils lorsque l'ensoleillement échauffe inégalement les faces du tablier. Une réduction de cet effet est obtenue par l'utilisation de matériaux à grande inertie thermique (béton) et par mise à l'ombre des faces exposées : encorbellement protégeant les faces latérales, ballast protégeant le hourdis supérieur.

c) La flexibilité des tabliers ne doit pas amener de défauts supérieurs à ceux admis en voie courante.

Les flèches sont limitées :

- au 1/1 500 de la portée si celle-ci est inférieure à 8 m,
- au 1/800 de la portée si celle-ci est supérieure à 16 m avec raccord entre ces deux valeurs.

En réalité, pour le TGV, du fait des prescriptions concernant le dimensionnement des ouvrages, ces flèches sont restées inférieures au 1/4000 de la portée pour les viaducs.

3. EMPLOI DU BETON PRECONTRAINT

Pour des raisons économiques, l'utilisation du béton précontraint s'est imposée pour les portées supérieures à une trentaine de mètres et par suite pour les viaducs.

Le béton précontraint ayant été peu utilisé pour les ponts-rails, un guide du projeteur a été établi en collaboration avec les bureaux d'études de deux grandes entreprises spécialisées, afin de déterminer le type optimal d'ouvrages à réaliser, compte tenu de l'économie du projet et de la pérennité à obtenir.

3.1. - Précautions d'emploi

Des interventions ultérieures sur les ouvrages perturbant le trafic ferroviaire et notamment le trafic à grande vitesse n'étaient pas acceptables. Pour réduire les risques correspondants, des prescriptions particulières aux ouvrages ferroviaires en béton précontraint ont été élaborées en liaison avec un bureau d'études spécialisé et le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.

Les précautions reprises par ce document s'efforcent de pallier les difficultés suivantes :

- incertitudes sur le comportement des ouvrages,
- durabilité des points faibles de construction et notamment des reprises,
- corrosion ultérieure des armatures actives,
- vieillissement des appareils d'appui.

Les dispositions principales sont les suivantes :

a) zones de moment réduit et zones voisines des appuis

Dans ces zones où les variations relatives des moments risquent d'être plus importantes que celles calculées du fait d'un comportement réel ne correspondant pas exactement aux hypothèses, un certain nombre de câbles sont disposés près des 2 fibres extrêmes de manière à augmenter la résistance limite des sections.

b) contrôle et réglage de certaines réactions d'appui

Pour tous les ouvrages à travées continues, un contrôle global de la bonne exécution et du comportement est effectué par pesées des réactions d'appui accompagné d'un réglage éventuel.

c) continuité des armatures passives dans les sections de reprise

Dans les ouvrages coulés en place, la totalité des aciers passifs longitudinaux doit être non seulement continue au droit des sections de reprise, mais encore renforcée dans ces zones.

d) disposition des armatures vis-à-vis du retrait différentiel

Lorsque le bétonnage des sections de tablier est effectué en deux phases il est tenu compte de l'action du retrait différentiel et des armatures sont prévues de manière à limiter les ouvertures de fissures éventuelles.

e) limitation de la tension maximale des armatures de précontrainte

Cette mesure permet de diminuer les risques de corrosion des armatures sous tension. Elle conduit à une augmentation des sections d'armatures et en conséquence de la résistance limite des ouvrages. Compte tenu de l'expérience acquise lors de la construction des premiers ouvrages de la ligne nouvelle Paris-Sud-Est, la tension des câbles est actuellement limitée pour les ponts-rails par la plus petite des deux valeurs suivantes 0,70 R_G et 0,80 T_G. De plus, si le remplacement d'un fil rompu lors de la mise en tension n'est pas possible, la valeur est limitée à 0,75 T_G.

Si un ou plusieurs fils se rompent, il convient de surtendre les autres fils sans toutefois dépasser 0,8 R_G de manière à se rapprocher au maximum de la force de précontrainte prévue à l'origine.

f) disposition de calcul

Les ouvrages sont dimensionnés pour qu'une perte de section des armatures de précontrainte de 30 % n'entraîne pas la rupture des éléments constituants de la structure sous la charge permanente et la surcharge majorée dynamiquement et multipliée par un coefficient de 1,3.

g) mise en place ultérieure d'une précontrainte complémentaire

Des bossages établis à la construction permettent la mise en œuvre d'une précontrainte complémentaire de telle sorte que la structure satisfasse encore aux prescriptions réglementaires dans l'hypothèse où la précontrainte totale serait réduite de 15 %.

h) cellules de mesures

De manière à suivre dans le temps le comportement de l'ouvrage, des cellules de mesures de contraintes sont placées dans le tablier en des points judicieusement choisis.

3.2. - Conception des ouvrages

Les viaducs de la ligne nouvelle à grande vitesse ont fait l'objet de recherches de standardisation qui ont conduit aux conceptions suivantes : le tablier à travées continues est généralement constitué par un caisson à deux âmes dont l'épaisseur est du 1/14ème de la portée environ. Ce type de tablier qui comporte des entretoises sur appui présente ainsi une grande rigidité à la torsion ce qui intéressant notamment pour les ouvrages en courbe. De plus la forme caisson s'accommode mieux d'une absence de précontrainte transversale ce qui simplifie le tracé des câbles longitudinaux et elle permet un cheminement qui facilite la surveillance ultérieure de l'ouvrage.

Pour les portées couramment rencontrées soit 45 à 50 m, le caisson est de hauteur constante mais pour des portées plus importantes, comme celles assurant le franchissement de la Seine par la ligne de desserte de la ville nouvelle de Cergy-Pontoise (85 m), il est plus intéressant de réaliser un caisson d'inertie variable.

Toutefois, nous signalerons la conception de deux ouvrages particuliers :

- un viaduc pour quatre voies dont le caisson comporte quatre âmes,
- un viaduc à béquille qui permet le franchissement d'une brèche de 104 m (73 m entre l'appui des béquilles).

Par ailleurs, ces ouvrages doivent se plier à des contraintes d'ordre esthétique, aussi la SNCF a fait appel à des architectes de renom pour le dessin de certains d'entre eux. Les corniches et les garde-corps ont été tout particulièrement étudiés ; dans le cas d'un environnement sensible au bruit, des garde-corps pleins en béton ont été utilisés. L'aspect des piles a été également soigné.

3.3. - Modes de construction

Les méthodes de réalisation des viaducs routiers en béton précontraint sont nombreuses. Toutefois l'importance relative des surcharges et des charges permanentes complémentaires (ballast) dans le cas d'ouvrages ferroviaires a privilégié la méthode du poussage dans le cas de géométrie régulière. En effet, compte tenu des efforts que doit supporter la structure en service, la précontrainte supplémentaire qu'impose le recours à la méthode du poussage reste relativement limitée ce qui fait que cette méthode s'est avérée, dans bien des cas, la plus économique. Bien entendu, d'autres méthodes ont été également employées, quoique de façon moins généralisée, notamment le bétonnage en place sur cintre et le montage par voussoirs coulés en place en encorbellement pour les grandes portées.

En ce qui concerne la protection des câbles de précontrainte, essentielle pour la pérennité de l'ouvrage, de bons résultats, contrôlés par gammagraphie ont été obtenus par l'injection sous vide des gaines de précontrainte.

4. LES OUVRAGES METALLIQUES

4.1. - Domaine d'emploi

L'emploi du métal est généralement considéré comme plus onéreux que celui du béton précontraint. Cependant, compte tenu du caractère particulier des ouvrages ferroviaires, le recours à la construction métallique est assez généralisé dans les cas suivants :

a) contraintes d'exploitation

Le renouvellement d'un ouvrage sur ligne exploitée impose généralement un travail par phase de manière à gêner le moins possible le trafic ferroviaire. Le métal, par sa légèreté et sa résistance en traction comme en compression, permet des manutentions relativement aisées qui rendent son utilisation compatible avec les nécessités de l'exploitation.

b) contraintes géométriques

L'utilisation de ponts à poutres latérales avec pose de voie directe sur longerons permet de franchir des portées importantes avec des épaisseurs entre rail et sous poutre très petites (par exemple ouvrage pour 2 voies de 53 m de portée et 0,90 m d'épaisseur, ouvrage pour 1 voie de 76 m de portée et 0,70 m d'épaisseur).

c) grandes portées

Les qualités propres du métal permettent d'envisager des ponts à poutres droites de dimensions raisonnables même pour des grandes portées ; c'est ainsi qu'a été réalisé, en 1978, le pont permettant à la ligne de Cergy de franchir l'Oise par 2 portées de 105 m chacune. Le tablier est constitué par un caisson d'inertie variable avec hourdis supérieur et inférieur raidis par poutrelles en T et cadres de contreventement. La hauteur maximale est de 6 m sur appui.

d) dans certains cas de portées courantes il peut s'avérer que le métal puisse concurrencer le béton précontraint sous la forme d'ouvrages de type fer-béton.

4.2. - Conception des ouvrages métalliques

Elle n'a pas donné lieu à des recherches spéciales mais a simplement bénéficié des progrès technologiques récents. Elle est guidée par le souci de projeter des ouvrages relativement simples à réaliser afin d'en diminuer le coût, et faciles à surveiller afin d'en augmenter la durabilité.

La construction métallique utilise maintenant très largement la soudure (les boulons HR ne sont employés au chantier que si la soudure s'avère impossible).

La conception des assemblages soudés tient compte des résultats des essais et recherches concernant les phénomènes de fatigue. La SNCF a établi un cahier des dispositions types pour les assemblages qui élimine les dispositions vicieuses sensibles à la fatigue. Par ailleurs, la conception des ouvrages prévoit une limitation des contraintes, notamment dans les assemblages de telle sorte que vis-à-vis de la fatigue la durée de vie de ces ouvrages soit d'au moins 50 ans.

En fonction des portées et des diverses contraintes, différents types d'ouvrages ont été conçus :

- ponts à poutres latérales à treillis type Warren avec longerons et pièces de pont,
- ponts à poutres latérales pleines avec dalle béton participante enrobant les pièces de pont,
- ponts « fer-béton » à poutres à âme pleine par en-dessous,
- ponts à poutres par en-dessous avec dalle métallique orthotrope,
- ponts à caisson métallique.

4.3. - Mise en place des ouvrages

Elle fait appel à l'imagination et aux moyens techniques des entreprises spécialisées.

Si le lancement est un moyen couramment utilisé, les entreprises ont également recours à des portiques plus ou moins sophistiqués permettant une mise en place soit latérale soit par en-dessus, soit par en-dessous.

4.4. - Contrôle d'exécution

Outre le contrôle classique des dimensions et l'examen visuel de l'ouvrage, la SNCF procède à un contrôle soigné des soudures exécutées tant en usine que sur le chantier :

- les procédés de soudages sont agréés,
- les soudeurs sont agréés après examen probatoire,
- le résultat des soudures est contrôlé par ressuage, radiographie et ultrasons pour certaines d'entre elles.

o 0 o

L'aptitude du chemin de fer aux transports à grande vitesse et en grande masse le place parmi les moyens de transport promis à un développement important dans l'avenir. Son fonctionnement économe en énergie et en espace ne peut que renforcer sa position. En contrepartie de ces qualités, la circulation de trains lourds ou à grande vitesse amène des sollicitations prononcées à l'infrastructure et tout particulièrement aux ouvrages d'art. Par ailleurs, la régularité de l'exploitation impose nécessairement la construction d'ouvrages dont la durée de vie ne saurait être inférieure à 50 ans. Nous sommes reconnaissants aux constructeurs des premiers chemins de fer du siècle dernier d'avoir établi des lignes dont la majorité des ouvrages supportent encore, à ce jour, un trafic beaucoup plus important et agressif que celui d'origine. En dimensionnant les ouvrages et en prenant les précautions constructives ainsi qu'il vient d'être exposé, nous avons l'espoir que nos successeurs pourront nous adresser les mêmes compliments.