

# Tendances européennes : Un duel entre la technique et l'esthétique?

Bertrand VOUTAZ  
*Dessau-Soprin, Laval*

Sylvie BOULANGER  
*Institut canadien de la construction en acier, Montréal*

## Résumé

Les ingénieurs européens adoptent-ils des pratiques différentes des ingénieurs nord-américains? Sur le plan constructif, des pratiques de conception et de montage reflètent d'autres façons de faire. Sur le plan esthétique, le soutien culturel et le souci pour l'intégration des ouvrages d'art à l'environnement peuvent influencer de façon importante le résultat final. Cet article n'a pas l'ambition de faire une analyse des différences entre Européens et Nord-Américains, voire Québécois. Toutefois, les auteurs souhaitent présenter certaines tendances techniques, telles l'utilisation plus soutenue de ponts bi-poutres, de ponts en profilés tubulaires, de pièces moulées et la méthode de montage par lancement, et quelques réflexions sur l'esthétique par des ingénieurs et architectes de premier plan, ainsi que le rôle des architectes dans la conception des ponts.

## 1. INTRODUCTION

Que ce soit pour des raisons culturelles ou des contraintes géographiques, les concepteurs de ponts européens cherchent à satisfaire des critères techniques et de faisabilité d'une part, et des critères esthétiques et d'adéquation environnementale d'autre part. Le résultat recherché? Un pont à valeur ajoutée. L'article abordera les deux thèmes, la technique et l'esthétique. La partie technique sera axée principalement sur le renouveau de l'acier, qui a connu un essor important cette dernière décennie, en France particulièrement. La partie esthétique se limitera à quelques réflexions et des citations qui reflètent l'état d'esprit de concepteurs européens, tels que les ingénieurs Schlaich et Leonhardt, ou les architectes Spielmann et Foster. On terminera en faisant un trait d'union entre la technique et l'esthétique pour souligner la tendance vers une intégration, plutôt qu'un duel.

## 2. LE DÉVELOPPEMENT DES PONTS EN ACIER

Depuis l'époque du premier pont en fonte sur la Severn en Angleterre (**Figure 1**), l'acier a fait un grand bout de chemin. En Europe, l'acier est redevenu compétitif durant ces 15 dernières années, principalement pour les ponts de moyenne portée ( $L = 30\text{m}$  à  $100\text{m}$ ). La part de marché des ponts mixtes a augmenté considérablement, de nouvelles tendances s'annoncent, accompagnées de recherche et de développement [1, 2, 3, 4].

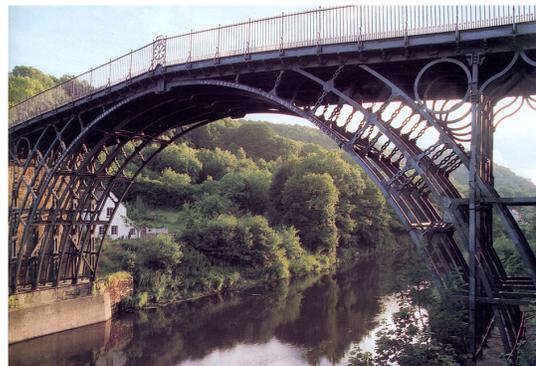


Figure 1 – Pont de Coalbrookdale (1779), Angleterre

À l'exception des ponts de très longue portée, à l'instar du pont de Normandie, les ponts en acier sont presque toujours réalisés en construction mixte avec une dalle en béton. Par la suite, nous parlerons donc exclusivement des ponts mixtes acier-béton.

## 2.1 Le renouveau de l'acier

Pour les quatre principaux pays (France, Italie, Grande-Bretagne, Allemagne), la production de ponts métalliques est passée de 77'000 tonnes en 1980, à 165'000 tonnes en 1990 [1]. En 1980, on comptait environ 5 ponts en acier, par an. En 1990, 26% des nouveaux ponts routiers sont des ponts mixtes. Aujourd'hui, en France, 80 % des ponts de portée moyenne (de 40m à 100m) sont construits avec un tablier mixte acier-béton [2]. Dans le domaine ferroviaire, contrairement aux ouvrages des premières lignes TGV en France, de nombreux ouvrages récents du TGV (**Figures 2, 7, 11**), dont les exigences de comportement sont très élevées, ont été réalisés en acier [3].



Figure 2 – Viaduc de Cheval Blanc, France

Plusieurs raisons expliquent le regain d'attractivité de l'acier [4, 5]:

- La durabilité des ouvrages en acier, qui a été réévaluée;
- La simplification des structures;
- Les progrès métallurgiques et l'optimisation de la production;
- L'amélioration des méthodes de montage, avec une importance accrue de la rapidité du montage;
- Les progrès des peintures anti-corrosion;
- L'évolution du calcul des ponts mixtes;
- La meilleure maîtrise de la fissuration de la dalle sur appui, suite à la recherche, qui est un élément clé pour la durabilité de l'ouvrage.

### La durabilité

De plus en plus, les aspects de développement durable sont pris en compte par les maîtres d'ouvrage. On considère que le coût d'un pont ne se limite pas au seul coût de construction, mais qu'il correspond au coût de l'ouvrage sur sa durée de vie ("life cycle cost"), comprenant l'entretien, les rénovations, et le remplacement. Le choix des matériaux et le soin des détails ont une importance accrue.

À la fin des années 1990, des études menées en Suisse et en Allemagne [6] sur plus de cent ponts mixtes âgés jusqu'à 30 ans ont montré que, contrairement aux idées reçues, ces ponts demandent peu d'entretien et sont dans un état très satisfaisant. Les ponts mixtes, en particulier ceux qui sont en acier patinable, présentent un profil écologique intéressant du fait du recyclage possible de l'acier.



Figure 3 – Pont de Nantenbach, Allemagne

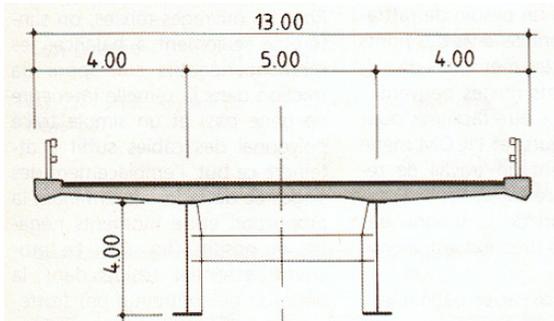


Figure 4 – Pont bi-poutre typique, Suisse  
*Les dimensions sont en mètres.*



Figure 5 – Viaduc des Vaux, Suisse

### La simplification des structures

La conception des ouvrages métalliques évolue vers une simplification des structures, qui comportent moins de détails qu'auparavant (**Figure 3**).

Ce développement engendre les effets bénéfiques suivants :

- Une automatisation de la production;
- Un nombre réduit de pièces à produire;
- Une moins grande sensibilité des structures à la fatigue;
- Une protection anti-corrosion plus facile à mettre en œuvre et moins sujette aux défauts;
- Un nombre réduit de détails sensibles à la corrosion.

La prédominance des ponts bi-poutres s'est accentuée [2]. La section typique (**Figure 4**) est composée de deux poutres avec un minimum de raidisseurs longitudinaux (habituellement aucun) et transversaux, des entretoises réduites à des raidisseurs renforcés et un profilé transversal. Le viaduc des Vaux en est un exemple (**Figure 5**).

### Les progrès métallurgiques

De nouveaux produits métallurgiques sont apparus sur le marché [3]. Dans le domaine des ponts, il s'agit surtout des aciers à haute résistance, des plaques de forte épaisseur et à épaisseur variable.

*Les aciers à grains fins à haute résistance.* Ces aciers présentent une excellente soudabilité et une excellente ténacité, donc un bon comportement face aux ruptures fragiles. On utilise en particulier l'acier de nuance  $F_y=460$  MPa dans les zones fortement sollicitées, ou pour l'ensemble des pièces maîtresses. Pour le viaduc de Millau, France (**Figure 6**), 15'600 tonnes d'acier S460 ont été utilisées sur un total de 36'000 tonnes d'acier structural.

Les avantages sont :

- Une réduction des dimensions et du poids de l'acier : pour des ponts de portée moyenne à longue, l'économie de poids peut aller jusqu'à 20%;
- Une réduction des épaisseurs des plaques, donc des dimensions des soudures.



Figure 6 – Photomontage du viaduc de Millau, France

*La production de plaques de forte épaisseur.* On les trouve surtout en France, jusqu'à 150mm, en acier de nuance  $F_y=350$  MPa avec une très bonne résistance à la rupture fragile.

*Le laminage de plaques à épaisseur variable.* Dans une moindre mesure, le laminage de plaques à épaisseur variable (jusqu'à 55mm de différence), est utilisé pour les semelles.

### **L'optimisation de la production**

Les progrès en matière d'automatisation de la production et de technique de soudage ont permis de réduire les coûts de production.

### **L'amélioration des méthodes de montage**

La rapidité de construction au-dessus d'infrastructures en service gagne en importance, ceci pour des raisons purement financières liées à la durée du chantier, mais aussi pour des raisons de gestion du trafic. Dans ce sens, le coût du montage des ponts en acier est devenu très compétitif.

Le lançage, utilisé depuis les années 1970, a connu un fort développement depuis les années 1980. Les exemples sont multiples, on peut citer le viaduc des Vaux, Suisse – caisson en courbe  $R=1000$ m, portée de 130m – ou le pont TGV de Bonpas, France (**Figure 7**) – portée de 124m.



Figure 7 – Lançage sur pneus du pont à arc de Bonpas, France

D'autres méthodes particulières ont également été développées, comme le lancement avec mât et haubans, le lancement des ponts à béquilles (**Figure 8**), le ripage de structures complètes ou la rotation. Le lancement par rotation permet de faire pivoter la structure de 90 degrés selon un axe vertical, sur sa pile, après l'avoir construite (spécialement en France).



Basculement de la béquille



Lancement de la poutre

Figure 8 – Pont à béquille de Gueuroz, Suisse

### **Les progrès des systèmes de peinture anti-corrosion**

Beaucoup de progrès ont été faits dans la chimie des peintures. Les deux à trois couches appliquées actuellement permettent de garantir une durée de vie de 15 à 20 ans. Dans la réalité, on constate généralement que les peintures ont une durée de vie plus longue que prévue.

### **L'évolution du calcul**

Le développement du calcul aux états limites a permis de simplifier le calcul des ponts mixtes. La fatigue, talon d'Achille des ponts en acier, a fait l'objet de nombreuses recherches. Le calcul à la fatigue, apparu seulement dans les années 1970, s'est beaucoup amélioré. L'Eurocode 3 a permis d'élaborer un calcul détaillé et uniformisé en Europe.

Le calcul sismique, qui devient de plus en plus exigeant, pourrait favoriser le recours aux structures en acier, du fait de leur poids réduit et de leur bonne ductilité. Mais il est encore trop tôt pour en voir les éventuels effets.

## **2.2 Tendances actuelles**

Outre les développements tendant à rationaliser la conception, la fabrication et le montage des ponts mixtes, certaines tendances se dessinent dans la conception des structures par l'utilisation de profilés tubulaires, de précontrainte extérieure et de pièces moulées [6].

*Recherche de la légèreté, de la transparence, et utilisation des profilés tubulaires.* Comme un peu partout dans le monde, un intérêt particulier se développe pour les structures filigranes, mettant en valeur la construction en acier. Dans ce domaine, les profilés tubulaires font une apparition remarquable. Le viaduc autoroutier de Lully, Suisse, et le pont d'Antrenas, France (**Figure 9**), en sont deux exemples.



Figure 9 – Pont tubulaire d'Antrenas, France

*Utilisation de la précontrainte extérieure.* La précontrainte extérieure a été utilisée sur plusieurs ouvrages, principalement dans le but de réduire le moment négatif sur appui des ponts continus. C'est le cas notamment pour le viaduc du Bois de Rosset, Suisse, et le pont d'Arbois, France. Cette solution semble être économique pour des ponts de portée supérieure à 70m, mais reste encore marginale.

*Utilisation de pièces moulées* Principalement en Allemagne, des assemblages réalisés en acier moulé ont fait leur apparition. Il s'agit cependant encore de cas isolés. Cette technique a été utilisée pour le pont ferroviaire de Humboldthafen à Berlin, Allemagne (**Figure 10**), qui a nécessité bien des études et des essais de fatigue, et dont le projet initial a été sensiblement modifié [7].



Figure 10 – Pont de Humboldthafen et ses pièces moulées, Allemagne

### 2.3 Les préoccupations actuelles et la recherche

Les préoccupations actuelles et la recherche vont dans le sens des développements récents présentés ci-dessus. Sans être exhaustif, on peut nommer la simplification des méthodes de calcul, la limitation de la fissuration du béton, l'effet de la précontrainte et la fatigue des joints soudés.

*La simplification des méthodes de calcul.* À ce jour, les améliorations apportées par le calcul aux états limites sont encore insuffisantes et le calcul d'un pont mixte reste encore bien plus fastidieux que celui d'un ouvrage en béton, ce qui préterite les ponts mixtes lors de la conception.

*La limitation de la fissuration du béton.* La fissuration reste un domaine d'étude actuel, car elle est un élément essentiel de la durabilité des structures d'acier. Aussi, une meilleure compréhension et une meilleure prise en compte du retrait du béton est nécessaire.

*L'effet de la précontrainte.* Qu'elle soit interne ou externe, elle doit encore être mieux comprise.

*La fatigue des joints soudés des tubes.* Ce domaine a été encore peu étudié, et doit faire l'objet de recherches et d'essais.

Dans ce courant de recherche, il est intéressant de mentionner le projet national français MIKTI [8] pour le développement de ponts et passerelles mixtes de demain, qui porte sur quatre ans. Le programme actuel a été organisé selon cinq composantes principales opérationnelles en thèmes d'application: 1) Les ouvrages de petites portées; 2) La dalle du pont mixte; 3) L'amélioration du "bi-poutre"; 4) Les tubes dans les ponts mixtes; et 5) La maintenance et l'inspection des ouvrages.

### **3. L'ESTHÉTIQUE**

#### **3.1 L'importance de l'esthétique**

De nos jours, dans une société où la sensibilité environnementale est accrue, on constate un peu partout que la population a plus d'attentes en matière d'aspect des structures. Pour les maîtres d'ouvrage, la qualité architecturale des projets devient un élément de choix de plus en plus important. La question de l'esthétique ne se pose plus pour l'ouvrage en tant que tel, mais pour l'ouvrage dans son environnement, quel qu'il soit. Le constructeur de pont doit à chaque fois se poser la question de l'intégration du pont dans le paysage, qu'il soit urbain ou rural. Des ingénieurs et architectes de renom, praticiens et académiciens, expriment cette préoccupation.

Jörg Schlaich, ingénieur

« La pensée synthétique globale, la conception préliminaire se doit d'être ingénieuse, pas spécialisée et analytique. Celui qui juge un pont uniquement selon le prix de l'offre contrevient à sa mission culturelle.[...] Les ponts sont des éléments indissociables de notre milieu de vie et de la culture de la construction ». [9]

Alain Spielmann, architecte

« Un ouvrage d'art doit avant tout être fait avec art. En ce sens les ponts, tout comme les bâtiments, ne peuvent plus être pensés sans tenir compte de l'urbanisme des villes, des sites, de cadre de l'environnement, des hommes qui y vivent. L'époque fonctionnaliste a montré ses limites ». [10]

#### **3.2 Esthétique et coût : inconciliables ?**

Dans la grande majorité des cas, l'aspect économique d'un projet est essentiel. Et l'ingénieur est appelé à jouer un rôle prépondérant, en cherchant la solution optimale.

Christian Menn, ingénieur

« L'art de la construction de pont consiste à trouver les solutions fonctionnelles satisfaisantes qui, dans le cadre financier donné, représentent l'optimum dans l'esthétique et l'intégration à l'environnement ».

« La conception préliminaire est la condition déterminante pour l'aspect économique et la qualité esthétique. La justesse statique et constructive arrive loin derrière ». [11]

Même si le critère financier est de poids, il n'est pas le seul dans la procédure d'adjudication. Les maîtres d'ouvrages ne sont pas contraints de choisir l'offre la plus basse. Cela laisse une marge de manœuvre pour qualifier la valeur ajoutée d'une variante, en termes de qualité de conception, de durabilité et d'intégration dans l'environnement. De façon générale, on peut admettre qu'un projet coûtant de 10% à 20% de plus que le projet le moins cher a des chances d'être choisi. Pour exemple, on peut mentionner le pont haubané en béton de Sunniberg, Suisse, achevé en 1998. Le maître de l'ouvrage a choisi de réaliser un ouvrage marquant, mettant en valeur la région (il s'agissait d'une première mondiale : un pont haubané en courbe, de 140m de portée, sur des piles hautes de 60m). Le surcoût pour cet ouvrage a été de 14% [12] par rapport à un pont conventionnel proposé dans le concours de projets. Sur le projet complet de route de contournement, cela a représenté un surcoût de 0.5%.

Jörg Schlaich, ingénieur

« Why should arched bridges be used only for big spans of around 200m, or cable stayed for spans of 400m, or suspension bridge spans exceeding 800m? Is diversity and variety not admissible in bridge design? »

« Should the least building cost be the only criterion for designing a bridge? Should we not look at the project as a whole, from the use of land and resources, through to the integration into the landscape, the demolition and even the recycling of a bridge? » [13]

Beaucoup plus rarement, des ouvrages de prestige sont réalisés, pour lesquels le coût est un critère secondaire. Un exemple de la dernière décennie montre que le client a choisi une option qui était 70% plus élevée que la solution la moins chère à l'occasion de l'Expo 92 de Séville [14], soit un pont en acier à hauteur variable avec un rapport d'élancement excessivement fin de  $L/57$  en travée et de  $L/28$  sur appui. La ligne du TGV Méditerranée en présente aussi quelques exemples récents (Figure 11) [3].



Figure 11 – Viaduc de la Garde-Adhémar, France

#### 4. La collaboration ingénieur – architecte

En Europe, pour les projets d'importance, on a de plus en plus recours à un architecte pour seconder, voire diriger l'ingénieur. Certains y voient le signe que les ingénieurs n'ont plus le sens de la conception et se perdent dans les calculs pointus et les normes. Toujours est-il qu'il n'est pas donné à chaque ingénieur d'avoir un sens esthétique, et que les architectes n'ont pas tous le sens statique et la notion des ponts. L'expérience a montré que la collaboration entre l'ingénieur et l'architecte représente un défi qui n'est pas toujours facile à relever. La clé d'un bon projet réside dans une collaboration harmonieuse et respectueuse entre l'ingénieur et l'architecte, où chacun a son rôle. Les avis sur les rôles respectifs de chacun varient.

Fritz Leonhardt, ingénieur

« L'ingénieur conçoit le pont et l'architecte sert de conseiller artistique. C'est sous cette devise et dès la construction des premiers grands ponts autoroutiers, vers 1934, qu'une fructueuse collaboration entre ingénieurs et architectes débuta; elle continue encore de nos jours ».

« Pour plusieurs [...] ouvrages, les architectes consultés étaient prêts à partir de la forme la plus favorable techniquement pour ensuite l'embellir en choisissant des proportions judicieuses et en créant un certain ordre. Les formes absurdes et les ajouts inutiles sont néfastes ». [15]

Foster & Partners, architectes

« Bridges are often considered to belong to the engineer's realm rather than the architect's. But the architecture of infrastructure has a powerful impact on the environment. The Millau Viaduct, designed in collaboration with engineers, illustrates how the architect can play an integral role in bridge design ». [16]

On notera également que le processus aura un impact considérable sur le résultat. Selon Saul [14], deux méthodes sont à éviter. La première résulte d'un processus où l'apparence du pont a été décidée, et les ingénieurs viennent ensuite trouver une solution technique pour réaliser l'ouvrage. La deuxième, très courante quand on privilégie la construction et la maintenance, est de choisir la solution la moins chère et ensuite de miser sur quelques astuces pour l'embellir. Pour éviter le duel, la collaboration est de mise, et l'intégration des professionnels doit se faire dès la conception préliminaire.

#### 5. Conclusions

La construction des ponts en acier en Europe, essentiellement des ponts mixtes, a connu une importante évolution depuis les années 1970. La recherche de structures économiques et durables a eu une influence sur tout le processus, de la conception à la réalisation, en passant par la production. Il en résulte une forte proportion de ponts en acier parmi les nouvelles constructions de moyenne et longue portée. L'importance de l'esthétique des ouvrages d'art s'est renforcée parmi la population et les maîtres d'ouvrages. L'ingénieur européen, de par son environnement culturel et sa formation, a souvent porté une attention à cet aspect. Cependant, le recours aux architectes est de plus en plus fréquent lors de la phase de conception. L'ingénieur et l'architecte doivent donc relever le défi de cette collaboration qui n'est pas toujours facile à rendre fructueuse. Lorsque la chimie de cette association fonctionne, ou en d'autres termes lorsque le duel pivote sur la collaboration, le résultat est en général très convaincant pour tous.

## Références

- [1] Grandboulan, Jérôme (1992) "Ponts métalliques: Connaissance et perspective du marché – Europe de l'Ouest". *Compte-rendus du Symposium international des Ponts métalliques*, 1992. pp 1/1-1/27
- [2] OTUA (2004) "Les ouvrages d'art en acier: Viaducs, ponts, passerelles". *Dossier thématique n° 2*, avril 2004 - <http://www.otua.org/pdf/dossierPONTS.pdf>
- [3] Raoul, Joël (1996) « Développements récents dans le domaine des ponts mixtes en France ». *Conférence tenue à l'École polytechnique fédérale de Zurich le 7 mai 1996*.
- [4] ECCS (2003) "Steel bridge demand is booming across Europe, delegates hear". *Bridge design and engineering Magazine*, Second Quarter 2003. p 16
- [5] CTICM (2000) *Ponts métalliques en sites montagneux*. Séminaire, Millau, France – 18, 19 avril 2000. <http://www.otua.org/ponts/Docs/cticm.pdf>
- [6] Dauner, Hans-Gerhard (1997) "Stahlverbundbrücken im Aufwind". *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Zurich, Suisse No. 26, 26 juin 1997, pp 534 – 540.
- [7] Schober, Hans (2003) "Steel Castings in Architecture and Engineering" Proceedings of the North American Steel Construction Conference 2003, published by AISC, Chicago.
- [8] MIKTI (2003) *Projet national de recherche et développement sur les ponts et les passerelles mixtes de demain*. <http://pnmikti.free.fr/>
- [9] Schlaich, Jörg (1996) *Allocutions à l'occasion de la remise du doctorat honoris causa au Prof. Christian Menn par l'Université de Stuttgart le 2 février 1996*. (traduit librement de l'allemand).
- [10] Spielmann, Alain (1992) "Réflexion architecturale sur les ponts métalliques pour une poésie nouvelle des ponts". *Compte-rendus du Symposium international des Ponts métalliques*, 1992. pp 8/1-8/10
- [11] Menn, Christian (1996) *Allocutions à l'occasion de la remise du doctorat honoris causa au Prof. Christian Menn par l'Université de Stuttgart le 2 février 1996*. (traduit librement de l'allemand).
- [12] Bänziger + Köppel + Brändl + Partner (1998) *Sunnibergbrücke der Umfahrung Klosters*. [http://www.bp-ing/b\\_sunniberg.htm](http://www.bp-ing/b_sunniberg.htm)
- [13] Bennett, David ed. (1997) *The architecture of bridge design*. Thomas Telford books, New York, USA, 1997. 199 p.
- [14] Saul, Reiner (2003) "Looking good". *Bridge design & engineering Magazine*, Second Quarter 2003. pp 20-26
- [15] Leonhardt, Fritz (1986) *L'esthétique des ponts*. Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse, 1986. 308 p.
- [16] Foster and Partners (2003) "Millau Viaduct, 1993-2005 – Millau, France" <http://www.fosterandpartners.com/internetsite/html/Project.asp?JobNo=0778>

## Crédits photos

Plusieurs photographies présentées dans cet article proviennent des sources suivantes:

Une collection de diapositives de l'ICOM, Laboratoire de structures métalliques de l'EPFL, Suisse, partiellement hébergée à l'adresse suivante:

<http://is-beton.epfl.ch/photos>

La galerie et base de données internationale d'ouvrages d'arts Structurae, Allemagne:

<http://www.structurae.de>