

Ponts avec un système statique innovant

Aurelio Muttoni, Lugano

1. Un exemple historique

La figure 1 montre une solution proposée par Guillaume-Henri Dufour en 1825 pour le « Grand Pont » de Fribourg. Dufour, habituellement connu comme le général de l'armée suisse dans la guerre du Sonderbund, était en ce temps un jeune ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Paris qui avait déjà acquis une importante expérience dans la construction de ponts suspendus et dans d'autres domaines du génie civil. Le pont ici présenté, avec deux portées assez remarquables pour l'époque, d'environ 121 m, n'a malheureusement pas été bâti. Il est caractérisé par des câbles porteurs formés par fils de fer sur lesquels sont disposées des fermes arquées d'une portée respective de 15 m environ qui soutiennent un tablier en bois [1].

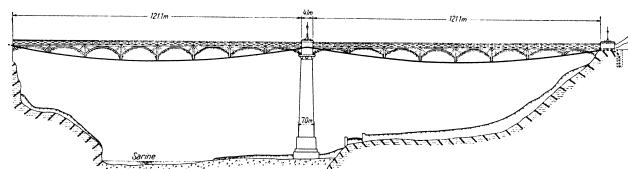


Figure 1: Projet de G.-H. Dufour pour le « Grand Pont » à Fribourg, 1825

Comme nous le verrons après, les fermes arquées n'ont pas seulement la fonction de réduire la portée du tablier entre les appuis sur les câbles, mais constituent un élément important d'un système statique très efficace.

2. Systèmes statiques obtenus par la combinaison d'un élément tendu et un élément comprimé

Des systèmes statiques efficaces peuvent être obtenus par la combinaison d'un arc et un tirant (figure 2a) ou d'un tablier comprimé et un câble

(figure 2b). Ces systèmes ont été expérimentés plusieurs fois pendant le siècle dernier.

Si la distance entre les deux éléments est affine au polygone funiculaire des charges, un tel système peut résister très bien aux charges permanentes, mais reçoit des sollicitations de flexion importantes si la répartition des charges accidentelles varie sensiblement par rapport à celle des charges permanentes (figure 2c). Ce problème est amplifié par l'effet du deuxième ordre et peut devenir déterminant si la rigidité de l'élément comprimé est insuffisante (figure 2d). Une simple solution à ce problème est constituée par la disposition d'une série de barres de liaison entre les deux éléments comprimés et tendus comme dans le cas de la figure 2b.

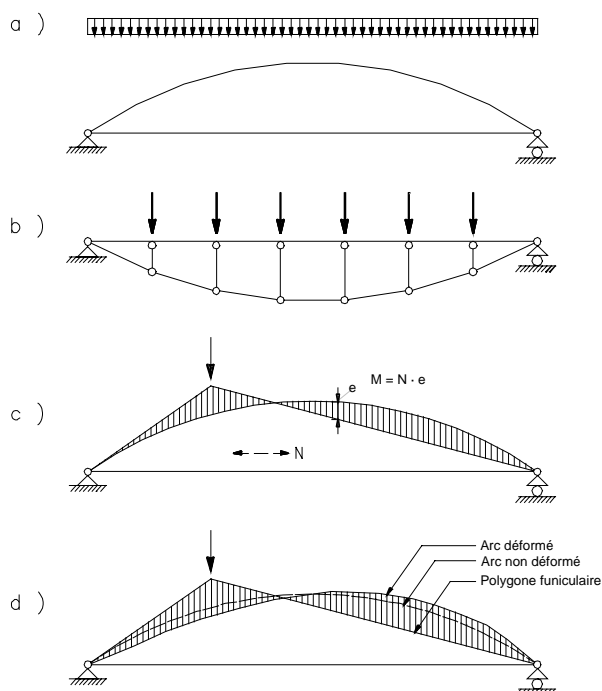


Figure 2: a) arc avec tirant, b) tablier comprimé soutenu par un câble polygonal, c) flexion de l'arc par effet de l'excentricité du polygone funiculaire (force concentrée) par rapport à l'axe de l'arc parabolique, d) amplification par effet du deuxième ordre

3. Un système statique efficient

Le système devient beaucoup plus efficient si les éléments de liaison peuvent introduire des efforts axiaux dans la membrure comprimée et dans le tirant. Ceci est par exemple possible avec les diagonales disposées entre l'arc et le tirant de la figure 3. Dans la même figure est représentée la ligne d'action de la compression dans l'arc parabolique par effet d'une force concentrée comme dans le cas de la figure 2c. Dans chaque portion de l'arc entre les paires de diagonales, à cause de la variation de l'effort axial, un polygone funiculaire différent doit être choisi : avec une flèche plus grande dans les parties latérales où l'effort axial est mineur et plus petite où la compression est majeure. La ligne d'action de la compression suit donc avec une excentricité sensiblement réduite la forme de l'arc et par rapport au système sans éléments inclinés, la flexion devient beaucoup plus petite.

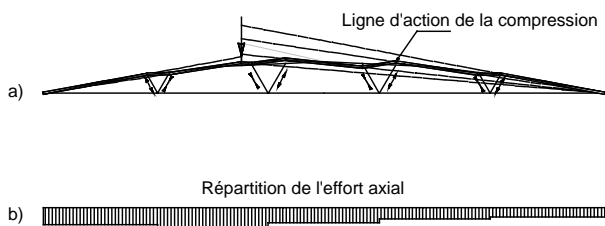


Figure 3: Système statique composé par un arc, un tirant et des éléments de liaison inclinés. Ligne d'action de la compression qui suit la géométrie de l'arc grâce à la variation de l'effort axial dans l'arc.

Cette structure peut aussi être interprétée comme un système triangulé lenticulaire avec des diagonales manquantes où l'effort tranchant doit être absorbé par la membrure supérieure en produisant une flexion locale comme dans le cas des poutres Vierendeel. Dans les ponts, si la distance entre les paires de diagonales n'est pas trop grande et le tirant peut absorber une partie de l'effort tranchant à l'aide de son inclinaison, la membrure supérieure constituée par le tablier possède normalement de toute façon une hauteur suffisante pour résister à cette flexion. L'avantage de la solution décrite par rapport au système triangulé résulte du nombre

réduit des diagonales et des nœuds avec des détails plus simples et une plus grande transparence.

La solution proposée par G.-H. Dufour en 1825 pour le « Grand Pont » de Fribourg suit le même principe. Il ne s'agit donc pas d'un système complètement innovant. Tout de même, malgré son efficacité, les applications ont été assez rares. Au-delà des solutions conçues par l'auteur [2] et présentées ensuite, il faut rappeler la très belle passerelle projetée par M. Kawaguchi et bâtie au Japon en 1994 [3].

4. Une passerelle sur le Tessin, 1987

C'est pour la construction de cette passerelle qui devait être la plus légère possible pour faciliter le montage dans un lieu peu accessible que le système décrit a été développé.

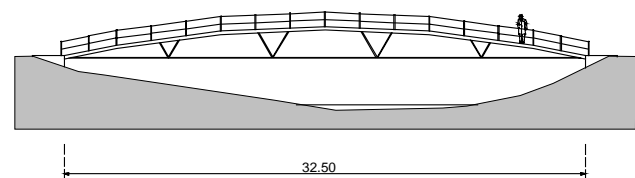
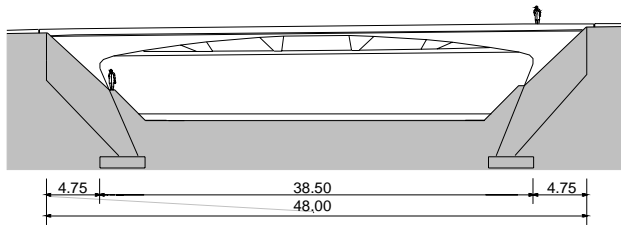


Figure 4 : Passerelle sur le Tessin à Faido, portée 32.50 m

La construction métallique, d'un poids de 105 kg/m, a été dimensionnée à l'aide la théorie de la plasticité en choisissant la ligne d'action de la compression décrite dans la figure 3 de sorte que son excentricité par rapport à l'arc soit la plus petite possible.

5. Le pont sur le Brenno à Loderio TI, 1993-94

La figure 5 montre une application du même système pour un pont en béton armé précontraint. Ici le tirant, l'arc et les éléments de liaison sont intégrés dans une structure à cadre. Les éléments de liaison en béton armé ont un fonctionnement similaire à celui des deux diagonales employées dans l'exemple précédent. En effet l'une des diagonales est remplacée par l'armature tandis que l'autre est remplacée par la bielle en compression qui peut se former dans le béton.



Figures 5 et 6 : Pont sur le Brenno à Loderio en béton armé précontraint, longueur 48 m

Le tirant en béton armé précontraint a été préfabriqué sur le chantier. Avec l'armature des éléments de liaison et une membrure supérieure provisoire constituée par des profils métalliques il formait un système stable qui a pu être utilisé comme cintre pour la construction du tablier.

6. Le pont sur le Capriasca à Odogno TI, 1995-96

Le même système a été employé pour ce pont (figure 7) où le tirant est constitué par une section hexagonale mixte et précontrainte (figure 8). Les câbles de précontrainte sont disposés sur toute la longueur du pont et sortent de la structure en béton en trouvant place dans le profil métallique.



Figure 7 : Pont sur le Capriasca à Odogno TI, longueur 68.50 m, portée centrale 38.00 m

Le procédé de construction était le suivant :

- montage de la structure métallique
- construction du tablier sur la structure métallique utilisée comme cintre
- injection du tirant avec mortier de ciment (sauf les gaines des câbles de précontrainte)
- précontrainte des câbles
- injection des gaines

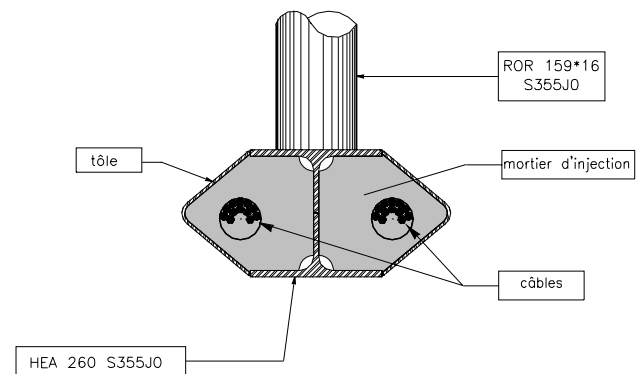


Figure 8 : Section transversale du tirant.

Par rapport aux ponts avec tirant constitué par précontrainte externe comme il a été proposé par C. Menn [4], cette solution a l'avantage de faciliter le montage par l'aide de la structure métallique qui peut être utilisée comme cintre, d'augmenter la rigidité du tirant et d'améliorer sa durabilité avec la protection du câble par le mortier d'injection et le profil métallique fermé.

7. Le pont sur le Tessin à Villa Bedretto, 1996

Dans ce pont le système est similaire à celui de Odogno. La présence de selles de déviation permettait ici d'appliquer une partie de la force de précontrainte déjà avant l'exécution du tablier et l'injection du tirant. Tout le tirant y compris les câbles a été injecté une fois que les travaux de précontrainte étaient terminés .



Figure 9 : Pont sur le Tessin à Villa Bedretto, longueur 44.00 m

8. Utilisation du même principe pour des ponts à travée continue

La figure 10 montre une possible utilisation du système décrit dans les ponts à travée continue. Une comparaison détaillée entre le projet d'un pont classique en béton armé précontraint et une alternative avec le tirant métallique précontraint a montré que ce système innovant est économique et permet une rapidité de construction intéressante.

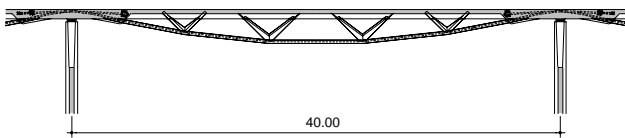


Figure 10 : Projet d'un pont à travée continue avec tirant mixte précontraint, portées : 40.00 m

9. Conclusions

A l'aide du système proposé, les ponts avec tablier en béton armé soutenu par un tirant deviennent très intéressants du point de vue économique. Avec un tirant en béton armé précontraint ou avec une section mixte précontrainte les problèmes de durabilité et de rigidité à l'état de service peuvent être très facilement résolus.

Références

- [1] **F. Stüssi**, *Un rapport inconnu de Navier*, Association Internationale des Ponts et Charpentes, Zürich, **1943**.
- [2] **A. Muttoni**, *Brücken mit einem innovativen statischen System*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 26, pp. 28-31, Zürich, **1997**.
- [3] **M. Kawaguchi**, *Granite Pedestrian Bridge, Beppu, Japan*, Structural Engineering International 3/96, pp. 148-149, **1996**.
- [4] **C. Menn, P. Gauvreau**, *Externally prestressed slab bridges : Model test results*, ACI SP 120, pp. 289-304, Detroit, **1990**.