

Ponts métalliques

Conception générale

par **Jean-Pierre DUCOUT**

Ingénieur de l'École nationale d'arts et métiers - CHEM

Professeur au Centre des hautes études de la construction (CHEM)

Chef de la division Ouvrages d'art à l'Office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA)

| | |
|--|---------------------|
| 1. Franchissement..... | C 2 675 – 2 |
| 1.1 Présentation..... | — 2 |
| 1.2 Typologie des ponts et éléments constitutifs..... | — 2 |
| 2. Systèmes porteurs de tabliers..... | — 3 |
| 2.1 Tablier appuyé sur piles ou « pont à poutres » | — 3 |
| 2.2 Arc porteur du tablier | — 4 |
| 2.3 Suspension par câbles..... | — 5 |
| 3. Poutraisons | — 6 |
| 3.1 Position relative poutraison-platelage | — 6 |
| 3.2 Poutraison « sous » chaussée..... | — 7 |
| 3.3 Poutraison « sur » chaussée | — 9 |
| 4. Platelages | — 10 |
| 4.1 Dalle en béton armé collaborante | — 10 |
| 4.2 Dalle mixte acier-béton..... | — 11 |
| 4.3 Dalle orthotrope tout acier | — 12 |
| 4.4 Domaines des dalles en béton et orthotropes..... | — 13 |
| 5. Équipements de ponts | — 13 |
| 5.1 Appareils d'appui..... | — 14 |
| 5.2 Joints de chaussée routière | — 15 |
| 5.3 Protection anticorrosion | — 16 |
| 5.4 Autres équipements..... | — 16 |
| 5.5 Intégration des équipements dans la conception | — 16 |
| 6. Procédés de construction | — 17 |
| 6.1 De l'usine au chantier | — 17 |
| 6.2 Montage des tabliers métalliques | — 17 |
| Pour en savoir plus | Doc. C 2 677 |

La conception d'un pont est un long travail d'études visant à concilier diverses contraintes dont l'importance et l'ordre de prééminence varient selon les projets : données naturelles du franchissement, données fonctionnelles de la voie portée, procédés de construction, insertion dans l'environnement, coûts, délais... Cet article, petit guide de conception et de construction, se propose de fournir au projecteur les éléments de base nécessaires à la formation de son jugement et à l'acquisition du processus de réflexion propre aux ouvrages d'art métalliques. Les solutions s'articulent à partir des trois composantes principales définissant la structure d'un pont : le **système porteur** (poutre, arc, suspension à câbles), la **poutraison** (âme pleine, caisson, treillis) et le **platelage** (béton, acier, mixte). La dernière partie est consacrée à l'exécution de l'ouvrage, but final du projet mais aussi phase essentielle inscrite dans le processus de la conception.

1. Franchissement

1.1 Présentation

Un pont est un ouvrage d'art permettant à une ou plusieurs voies de communication de franchir un accident du relief appelé brèche ou d'autres voies de communication (figure 1).

Selon la voie portée — route, rail, voie piétonnière ou canal — le pont sera dénommé, pont-route, pont-rail, passerelle piétonnière ou pont-canal. Les ouvrages peuvent avoir des formes extérieures semblables, mais se différencient et se caractérisent surtout par la nature particulière du trafic qu'ils ont à supporter.

La conception architecturale générale d'un ouvrage de franchissement fait appel aux trois modes fondamentaux de fonctionnement mécanique des structures (**flexion**, **compression** et **traction**) pour donner trois types de ponts fixes (figure 2) :

- le **pont à poutre**, image de la simplicité, limité à la flexion seule ;
- le **pont en arc**, qui associe la compression à la flexion ; son architecture s'enrichit ;
- les **ponts à câbles**, de type haubané et suspendu, combinent la traction, la compression et la flexion dans un fonctionnement plus complexe ouvrant sur un large éventail de solutions techniques et architecturales.

1.2 Typologie des ponts et éléments constitutifs

Pour remplir sa fonction, le pont est constitué d'une structure résistante capable de porter la voie et ses charges d'exploitation. Il possède par ailleurs des équipements spécifiques concourant à son bon fonctionnement, à la sécurité des usagers et à la durabilité de l'ouvrage (figure 3).

Les **structures du pont** doivent répondre aux données du projet. De formes multiples et variées, elles se réduisent finalement toujours à un tablier et un système porteur composé d'appuis et de suspensions éventuellement.

Les **équipements** respectent des standards propres à chaque type de voie concernée (route ou rail) et à son exploitation. Premier équipement : la structure de roulement qui est constituée par la chaussée pour la route et par le ballast et la voie pour le ferroviaire. Les équipements englobent aussi : les appareils d'appui, les joints de chaussée, les organes de sécurité (garde-corps, glissières de sécurité, barrières), les évacuations des eaux, l'étanchéité, la corniche, les circulations de visite, les matériels de voies (caténaires, poteaux, signalisation).

1.2.1 Tablier : platelage et poutraison

Le tablier est la partie d'ouvrage qui porte directement la voie (route ou rail) et en assure la continuité parfaite. Il comprend un platelage et une poutraison.

Le **platelage**, porteur de la chaussée ou du ballast, est le premier élément de résistance du pont. Nous verrons (§ 4) que le platelage travaille en dalle sous les surcharges de circulation de la voie et participe à la flexion d'ensemble du tablier. La dalle est le plus souvent en béton armé, dans certains cas en acier ; mais elle peut également être mixte.

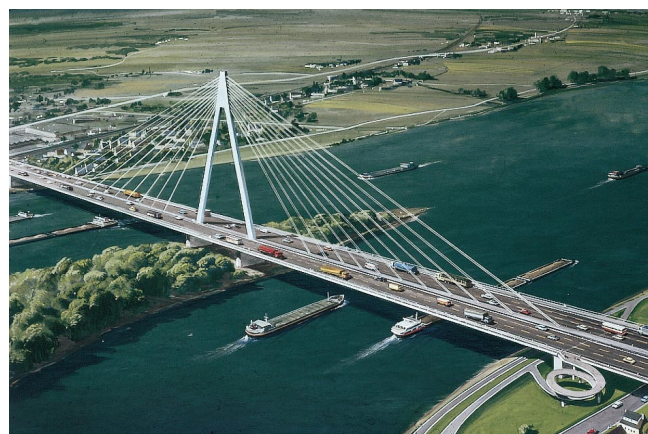


Figure 1 – Pont haubané de Neuwied sur le Rhin (doc. CFEM/P. Mantes)

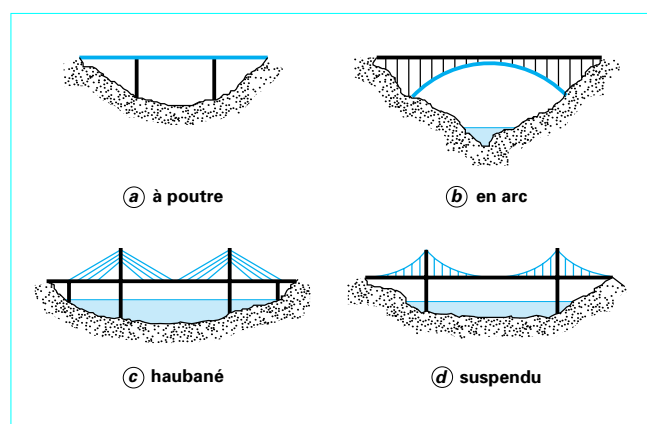


Figure 2 – Différentes structures de pont

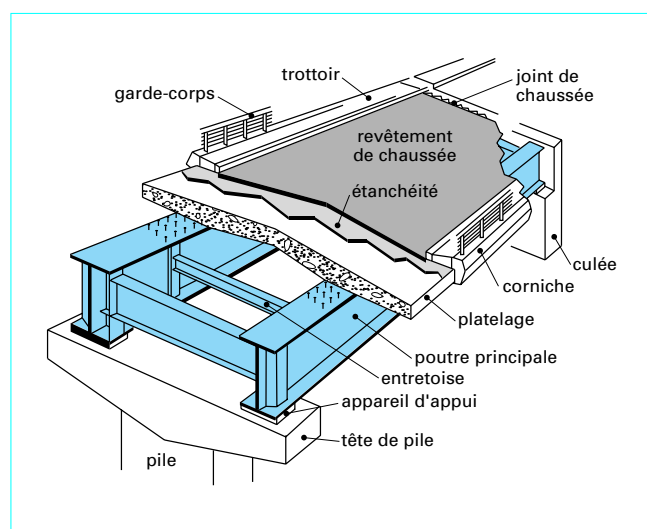


Figure 3 – Éléments constitutifs d'un pont à poutres sous chaussée

La **poutraison métallique** porte le platelage auquel elle est connectée (dalle en béton) ou soudée (dalle en acier) et se compose de :

- poutres longitudinales principales, complétées parfois par des poutres secondaires appelées longerons ;
- structures d'entretoisement disposées transversalement aux poutres pour les lier entre elles et supporter éventuellement la dalle.

1.2.2 Système porteur

Le système porteur désigne l'ensemble des parties d'ouvrage qui supportent le tablier.

Les **culées** marquent les origines du pont à chaque extrémité du tablier et assurent la transition entre la voie sur terre et la voie sur pont. Ce sont des appuis indéformables. À ce titre, on y installe les appareils de voies ou joints de chaussée destinés à absorber les déplacements du tablier sous les déformations et effets thermiques.

Entre les culées, le tablier est porté, selon les cas :

- « par le dessous » sur des **piles** ou des **pilettes** ;
- « par le dessus » au moyen de **câbles** et **pylônes**.

Les différentes variations sur ces deux modes de « portage » donnent les ponts à poutres, les ponts en arc, les ponts haubanés et les ponts suspendus (figure 2) développées dans le paragraphe 2 consacré à la typologie des « systèmes porteurs », premier volet de l'analyse.

Systèmes porteurs, poutraisons et platelages constituent les trois composantes fondamentales d'un pont. Chacune ayant des formes différentes, on imagine les nombreuses combinaisons qu'il est possible d'en faire. Pour un site donné, la combinaison « gagnante » n'est pas le fait du hasard, mais le résultat d'un travail de réflexion et d'études recherchant le meilleur compromis entre des exigences de nature souvent contradictoires : techniques, économiques, architecturales, environnementales, politiques même... et aboutissant à un projet d'ouvrage qui soit à la fois constructible, stable, résistant, durable, beau, en harmonie avec le site... et économique. On réalise mieux aussi pourquoi les ponts présentent une telle diversité.

2. Systèmes porteurs de tabliers

La disposition des appuis de tablier et leur nature dépendent de nombreux facteurs dont l'importance varie selon les données du projet : grandeur et profondeur de la brèche, données géotechniques du sol, servitudes des voies franchies, dégagement d'un gabarit, tracé de la voie, conditions d'exploitation de la voie dont la vitesse, les procédés de construction et de montage...

Il y a de multiples façons de porter le tablier d'une culée à l'autre, mais elles se ramènent toutes à deux principes fondamentaux caractérisant la position et la nature des appuis :

- le **système porteur sur appuis inférieurs « rigides »** : le tablier est en appui sur des piles. Cette disposition classique donne l'immense famille des ponts à poutres à travées continues multiples de petites et moyennes portées ;
- le **système porteur par suspension « souple »** : au-delà d'une certaine distance entre appuis (environ 200 m), ou pour des brèches profondes qui nécessiteraient des piles trop hautes, le tablier sera plus économiquement porté par un arc, ou suspendu à une structure en câble de type haubanée ou suspendue. Les appuis

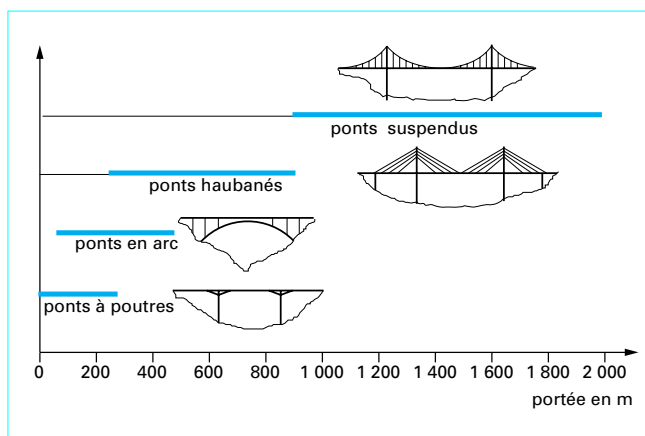


Figure 4 – Les grands systèmes de pont en fonction de la portée

passent du « dessous » au « dessus ». D'un système d'appuis fixes et écartés on passe à un système d'appuis élastiques et rapprochés ; d'un fonctionnement rigide en flexion seule on évolue vers un fonctionnement plus souple mais plus complexe aussi, mêlant flexion, compression et traction ; enfin, du calcul linéaire on passe au calcul non linéaire avec grandes déformations.

Au total, trois possibilités de porter un tablier : sur des **piles**, sur un **arc** et avec des **câbles**, possibilités auxquelles sont attachées les quatre grandes familles classiques d'ouvrages traditionnellement appelés ponts à poutres, ponts en arc, ponts à haubans et ponts suspendus. La figure 4 indique le domaine d'application de chacun d'eux en fonction de la portée principale de l'ouvrage.

2.1 Tablier appuyé sur piles ou « pont à poutres »

2.1.1 Système constructif simple

Le tablier prend appui sur des piles et culées matérialisant des travées dont les portées varient de quelques mètres pour les ponceaux à 300 m, record mondial établi pour le pont de *Costa e Silva* au Brésil en 1974. En France, c'est le pont de Cornouaille à Bénodet (1972) qui détient le record avec 200 m de portée principale.

Parce que la majorité des franchissements peut être économiquement traitée en multitravées avec des portées n'excédant pas 100 à 120 m, il n'est donc pas étonnant que cette construction soit de très loin la plus développée. Son montage d'ailleurs ne pose pas de difficulté majeure dès lors que la méthode du lançage peut être adoptée.

2.1.2 Continuité sur appuis et variation d'inertie

Les poutres principales travaillent en flexion entre les appuis. Les sollicitations augmentent d'une part avec le carré de la portée, d'autre part et simultanément avec le poids mort dont la part due à l'acier croît avec la portée pour satisfaire les besoins en résistance. Plusieurs solutions permettent de limiter l'effet de dérive due au poids mort d'acier.

■ **Choix d'un élanement correct.** Pour obtenir un bon rendement, la hauteur de la poutre doit être en proportion avec sa portée. Cette propriété est caractérisée par une grandeur essentielle appe-

lée « élancement », qui exprime le rapport entre la longueur L de la travée principale et la hauteur H_p de la poutre principale L/H_p .

Pour une loi de hauteur constante, le tableau 1 donne les valeurs d'élancements moyens adoptés, selon que la poutre est du type à âme pleine, en caisson ou en treillis, que le pont est routier ou ferroviaire et que la configuration est en travée indépendante ou en travées continues.

Tableau 1 – Valeurs d'élancements moyens pour différentes configurations

| | Pont-route | | Pont-rail | |
|------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | Travée indépendante | Travées continues | Travée indépendante | Travées continues |
| Treillis | 11 | 15 | 10 | 12 |
| Âme pleine | 22 | 30 | 14 | 16 |
| Caisson | 30 | 30 à 60 | — | 19 |

■ La **continuité sur appuis** est un facteur d'économie important. Les statistiques montrent qu'une travée continue de 50 m, par exemple, consomme 20 % d'acier en moins qu'une travée indépendante de même longueur. Aussi la continuité est-elle toujours adoptée, sauf cas particulier.

■ La **variation de hauteur ou d'inertie** accentue l'effet de continuité : un accroissement de hauteur ou d'inertie sur appuis provoque une augmentation des moments fléchissants négatifs sur appuis accompagnée d'une égale diminution des moments positifs en travée (figure 5).

L'inertie variable, avantageuse pour un tablier tout acier, n'offre pas le même intérêt pour un tablier mixte. On sait en effet que le meilleur rendement d'une section mixte est obtenu sous moment fléchissant positif en travée, lorsque la semelle supérieure en béton est correctement comprimée. Si bien qu'en construction mixte, l'intérêt serait plutôt de faire migrer les moments fléchissants négatifs sur appuis vers le moment fléchissant positif en travée ; d'où le recours parfois à des formules de dénivellation d'appui ou d'assouplissement des sections sur appuis par l'emploi d'aciers à plus haute limite d'élasticité tendant à réduire l'inertie par diminution des sections.

Architecturalement, l'effet bénéfique de l'inertie variable pour un tablier à poutres sous chaussée n'est plus à démontrer. Dans sa ligne générale, l'ouvrage y gagne nettement en finesse.

■ Le **pont Cantilever** a l'apparence de la continuité, mais sa structure est rendue mécaniquement isostatique par l'aménagement d'articulations en pleine travée en des endroits qui pourraient être des points de moment « nul » de la poutre supposée continue. Cette conception se révèle intéressante lorsque les conditions de sol sont médiocres et qu'il existe un risque de tassement d'appui sur les fondations. Un déplacement vertical d'appui est alors sans effet sur les sollicitations d'ensemble du tablier et sur les réactions d'appuis (figure 6).

2.2 Arc porteur du tablier

L'arc est depuis longtemps considéré comme une forme de structure mécaniquement efficace et architecturalement réussie. Le pont en arc est un symbole.

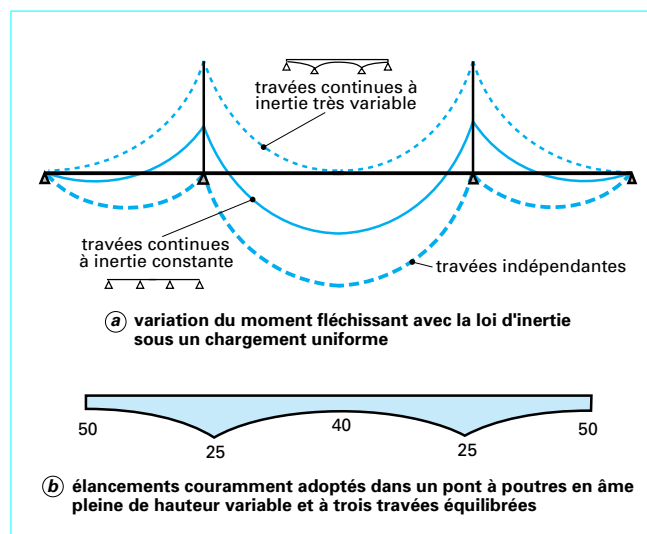


Figure 5 – Poutre continue et à inertie variable

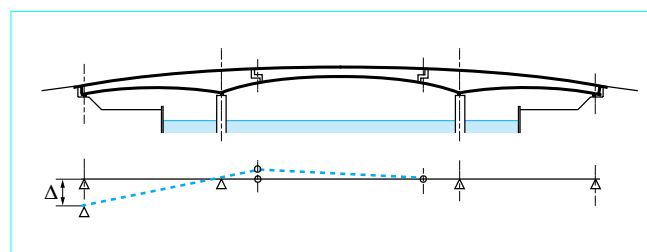


Figure 6 – Pont Cantilever. Figure déformée après un tassement vertical sous un appui décalé

2.2.1 Justification et domaine d'application

Pour franchir une brèche encaissée, large, profonde et avec des accès de chantier difficiles sur ses flancs, une conception classique de pont à poutres à travées multiples impliquant la construction de piles verticales hautes et nombreuses et autant de fondations peut s'avérer inadaptée pour des raisons économique, technique ou esthétique. La solution consiste à faire reposer les piles du tablier non pas sur le sol au fond de la brèche, mais sur une structure en arc franchissant la brèche d'une seule portée.

L'arc reçoit les charges du tablier par l'intermédiaire de multiples pilettes ou suspentes et les « descend », par compression principalement, jusqu'à ses naissances sur les massifs de fondations qui sont soumis à une forte poussée (figure 7).

Le record mondial de portée de pont en arc est détenu avec 518 m par le pont du New river Gorge construit en 1977 dans le West Virginia aux États-Unis.

2.2.2 Formes de ponts en arc

■ L'arc classique

Selon la position occupée par le tablier sur l'arc (figure 8), le pont en arc est « à tablier supérieur » appuyé sur des pilettes, « à tablier intermédiaire » à la fois appuyé et soutenu par des suspentes, ou « à tablier inférieur » entièrement suspendu.

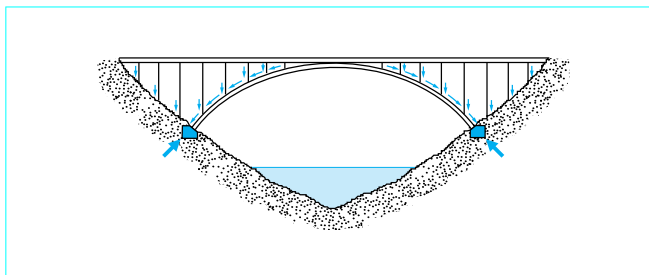


Figure 7 – « Travail » de l'arc

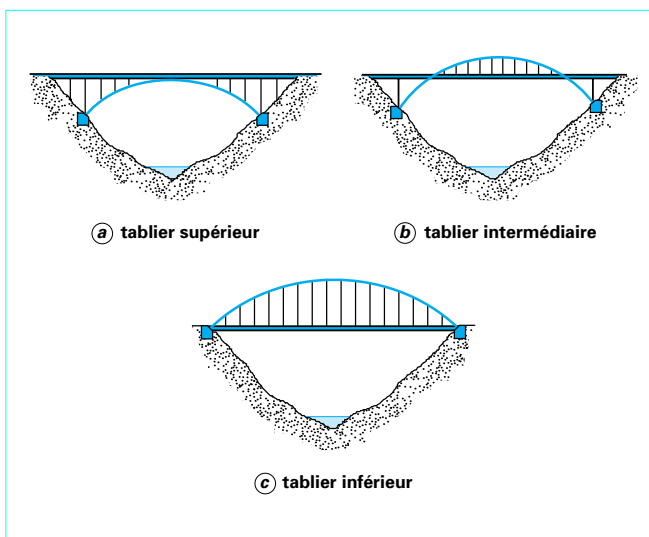


Figure 8 – Ponts en arc

■ Le **bow-string** est de la forme dans laquelle le tablier relie l'arc à ses naissances et reprend par traction la composante horizontale de la poussée. Les réactions d'appui sur les fondations sont alors identiques à celles d'une travée indépendante.

■ **Pont à béquilles.** Bien qu'il n'en ait pas exactement la silhouette, il est apparenté à l'arc en raison d'une similitude de fonctionnement. Le pont à béquilles a la forme d'un portique avec des piles inclinées et encastrées dans le tablier (figure 9).

2.3 Suspension par câbles

Comme pour l'arc, mais de façon encore plus marquée, il est des conditions de site qui interdisent ou ne favorisent pas l'implantation de piles intermédiaires : grand gabarit de navigation à préserver, vallée très profonde, sol instable, hauteur disponible extrêmement faible, etc. L'impossibilité de mettre le tablier en appui « par le dessous » oblige à le tenir totalement « par le dessus ».

Ce sont les solutions de suspension par haubannage et par câbles porteurs. Les éléments porteurs du tablier sont constitués de pylônes et de câbles. Comme pour le système en arc, les points « d'appui » du tablier par suspension sont multiples, rapprochés mais plus élastiquement déformables.



Figure 9 – Pont à béquilles de Martigues (doc. CFEM)

2.3.1 Intérêt et domaine d'application

Ce sont :

- la libération totale de l'espace inférieur ;
- les franchissements de très grandes portées ;
- les tabliers élancés ;
- le montage facilité par la suspension elle-même.

2.3.2 Suspension par haubans

Par l'étendue de ses ressources techniques et architecturales, on peut dire que le pont à haubans est une structure d'une grande « générosité » et d'un immense intérêt pour le concepteur.

■ Principe de fonctionnement du pont haubané

Le tablier est supporté par un système de câbles obliques (haubans) qui reportent les charges verticales en tête des pylônes prolongeant les piles principales de l'ouvrage (figure 10a).

Chaque part de charge verticale prise par le hauban s'accompagne dans le tablier d'un effort de compression égal à la composante horizontale de l'effort de traction du hauban. Tous ces efforts de compression s'ajoutent pour atteindre un maximum au droit du pylône (figure 10b) où la compression de droite équilibre celle de gauche.

■ Diversité des formes de haubannage

Le pont haubané se présente sous des formes très variées issues des nombreuses combinaisons qu'il est possible d'obtenir en jouant sur la forme et le fonctionnement des pylônes, du système de haubannage, des liaisons entre tablier et pylône et du tablier (cf. article *Ponts métalliques. Applications spécifiques* dans cette rubrique).

Selon les conditions du site, la stabilité, la résistance, la tenue aux effets aéroélastiques et les procédés de construction de l'ouvrage se partagent la prééminence des rôles dans la conception du projet.

2.3.3 Suspension sur câble porteur

La suspension d'un tablier à une chaînette est une conception très ancienne puisque l'idée remonte au début de l'humanité avec la construction des passerelles en lianes. On comprend que le principe en ait été appliqué aux premiers grands ponts métalliques suspendus grâce au développement de l'industrialisation du fer au milieu du XIX^e siècle et à la fabrication des fils en fer qui a suivi.

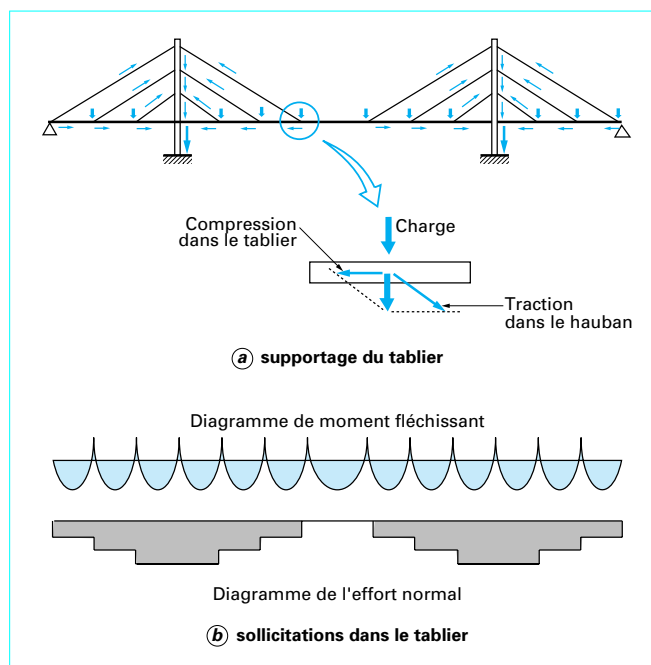


Figure 10 – Principe de fonctionnement du pont haubané

2.3.3.1 Principe de fonctionnement du pont suspendu

Le tablier est tenu de proche en proche par des suspentes accrochées à un système de câbles porteurs paraboliques et continus, prenant appui sur les têtes des pylônes et ancrés dans le rocher ou dans de puissants massifs poids (figure 11). La répartition de la surcharge sur les câbles porteurs et l'étalement de la déformation longitudinale sont obtenus grâce à la raideur flexionnelle du tablier : c'est de là que lui vient son nom de « poutre de rigidité ».

Le rapport entre la portée centrale et la flèche du câble porteur est de l'ordre de 9.

2.3.3.2 Évolution des formes

Depuis l'origine, le pont suspendu s'est développé et adapté aux conditions imposées par l'augmentation des portées. Quelle est la situation aujourd'hui ?

Le tablier suit deux tendances : selon que l'ouvrage est essentiellement routier ou à la fois routier et ferroviaire, selon que le concept de l'ouvrage est d'inspiration européenne ou américaine, les formes du tablier seront en caisson élancé et profilé ou en poutre en treillis.

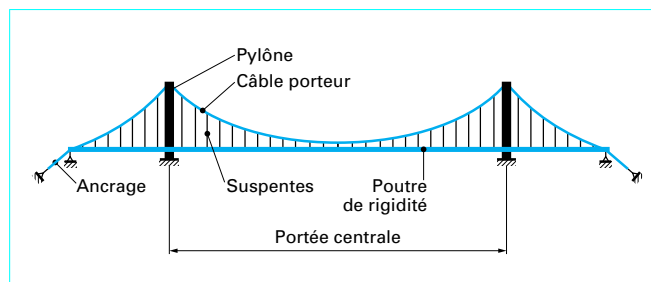


Figure 11 – Suspension du tablier sur un câble porteur

La suspension à double nappe conserve la préférence. Pour améliorer la stabilité d'ensemble, les suspentes verticales sont remplacées par des suspentes inclinées.

3. Poutraisons

Rappelons que le terme poutraison recouvre tous les éléments structuraux du tablier autres que le platelage. Plus précisément, il s'agit des poutres principales et de leur entretoisement. Dans ce paragraphe, vont être examinées les trois formes classiques de construction de poutraison : poutres à âme pleine, en caisson et en treillis, avec les formes d'entretoisement qui leur sont adaptées ; et ce dans les deux façons de disposer la poutraison : au-dessous et au-dessus du platelage.

3.1 Position relative poutraison-platelage

Il y a trois façons de placer la poutraison par rapport au platelage :

- au-dessous ; la poutraison est dite « sous chaussée » ou « sous rail » (figure 12a) ;
- au-dessus ou à côté, la poutraison est dite « sur chaussée » ou « latérale » (figure 12b) ;
- à un niveau intermédiaire (figure 12c).

■ La **poutraison « sous » platelage** est la plus naturelle et la plus satisfaisante des trois possibilités, sur les plans structurel et fonctionnel. Cette disposition classique a toutefois une contrainte : comme la totalité du tablier se situe sous le profil en long, il faut pouvoir compter sur une hauteur disponible H_d suffisante pour y « loger » le système constructif poutre-dalle. Dans la majorité des cas et notamment pour les tabliers de ponts en arc, haubanés et suspendus, cette condition est largement satisfaite, la hauteur H_t nécessaire pour inscrire le tablier étant libre ou considérée comme telle (figure 13).

■ En revanche, dans certains cas, la hauteur disponible H_d peut se trouver limitée en raison d'un gabarit à dégager sous l'ouvrage.

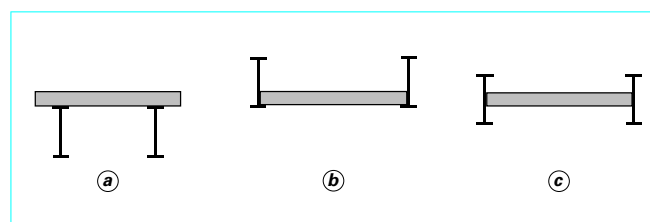


Figure 12 – Dispositions poutraison-platelage

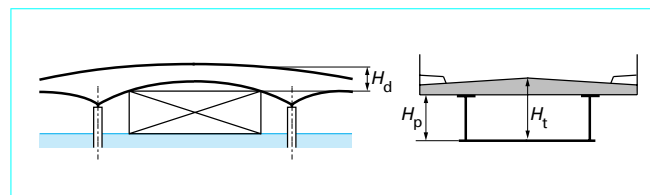


Figure 13 – Hauteur disponible et hauteur nécessaire de construction

Si l'on dispose d'une certaine marge de manœuvre sur le tracé du profil en long, on peut alors remonter légèrement son niveau haut en jouant sur la longueur des rampes d'accès ou sur leur pente. On peut également réduire la hauteur d'encombrement du tablier en adoptant une variation de hauteur sur l'intrados de la poutre au droit du gabarit, et/ou en choisissant une structure plus élancée de type caisson.

■ La **poutraison « sur » platelage** est utilisée pour les cas difficiles. En effet, il y a des situations où la retouche de profil en long et la réduction de hauteur du tablier se heurtent à des impossibilités. Ces cas se rencontrent surtout en franchissement ferroviaire, car :

- la voie ferrée s'accommode mal des pentes dépassant 1,5 % (2,5 % en TGV) ;
- le tablier de pont-rail doit respecter un élanement L/H_p modéré pour satisfaire les conditions limites de flèche ;
- le passage au-dessus d'un gabarit par une solution de remblai ou de viaduc d'accès peut s'avérer coûteux ; en site urbain, il est souvent impossible de remonter le profil en long sans remettre en cause tout le réseau des circulations et voies adjacentes...

Finalement, lorsque la hauteur disponible entre le profil en long et le gabarit à franchir est trop faible pour placer les poutres principales sous la chaussée, il faut se résoudre à disposer les poutres « au-dessus » du platelage.

3.1.1 Interaction poutres et entretoisement

L'étude des éléments transversaux permet de fixer la coupe transversale de l'ouvrage par le nombre de poutres, leur écartement, leur entretoisement ainsi que le mode de fonctionnement de l'ensemble de la structure.

L'entretoisement intervient dans le mode de fonctionnement de la poutraison. Le rôle joué par les éléments transversaux s'exprime dans plusieurs domaines.

■ **En flexion générale de l'ouvrage**, l'ensemble composé par les poutres principales et l'entretoisement constitue une structure spatiale résistante et stable, d'abord lors des phases de montage, puis en situation de service grâce au complément structurel apporté par la dalle.

Pour sa part, l'entretoisement participe au maintien de la forme de la section droite en fonction du rapport existant entre sa raideur flexionnelle propre et les raideurs flexionnelle et torsionnelle de l'ensemble de la poutraison principale.

Ainsi, une poutre en caisson caractérisée par une grande raideur de torsion exige un entretoisement spécifique capable d'accompagner le travail en torsion de la section.

En revanche, pour un pont à poutres droites à âme pleine, cette caractéristique est beaucoup moins prononcée et se traduit par des exigences différentes.

■ **En flexion locale**, les structures transversales peuvent être amenées à supporter directement la dalle avec ses équipements et les surcharges de chaussée, pour reporter ensuite ces charges sur les poutres principales. Ce rôle s'ajoute au précédent.

■ **Sur appuis**, un entretoisement spécial et renforcé est nécessaire pour résister aux fortes sollicitations développées par les réactions d'appui verticales et horizontales.

■ **En fabrication et en montage**, l'entretoisement garantit la géométrie et la stabilité de la structure lors des phases d'assemblage en usine et sur chantier.

Le comportement de l'entretoisement est donc très dépendant du type de poutraison auquel il est associé, et réciproquement. Il en résulte des solutions et des dispositions constructives propres à chaque tablier.

3.2 Poutraison « sous » chaussée

Il y a trois façons de concevoir les poutres : à âme pleine, en caisson ou en treillis.

3.2.1 Poutres à âme pleine

3.2.1.1 Poutrelles et PRS

Dans les ouvrages de moyennes et grandes portées, domaine des tabliers métalliques, les poutres principales, de grande hauteur (5 m pour une travée « route » de 100 m), sont fabriquées « sur mesure » par soudage. La poutre prend le nom de « poutre reconstituée soudée », ou PRS.

Chaque semelle, dont la section est ajustée sur la courbe-enveloppe des moments fléchissants, voit son épaisseur varier tout au long de la poutre. La variation est réalisée soit de façon discontinue par des tôles d'épaisseur différente mais constante, soit de façon continue par des tôles d'épaisseur variable dites « tôles profilées en long ». L'épaisseur maximale acceptée par les agréments est de 150 mm en acier S355N.

Les âmes, dont l'élanement moyen (hauteur/épaisseur) varie de 100 sur appui à 200 en travée, comportent les raidisseurs verticaux et horizontaux indispensables pour assurer leur stabilité au voilement.

Les profilés laminés en I ont un champ d'application relativement restreint en portée. Par leur hauteur qui ne dépasse pas 1 100 mm, ils sont réservés aux ouvrages dont la portée maximale est de l'ordre de 25 à 30 m en version pont-route. C'est le domaine des petits ponts, marché important, dominé par le béton armé et le béton précontraint, mais dont une part non négligeable revient aux ponts dits « à poutrelles enrobées » très prisés en ponts-rails.

3.2.1.2 Poutraison à deux ou plusieurs poutres

■ **Le tablier bipoutre** constitue le tablier métallique le plus simple. Avec un platelage en béton armé connecté à la poutraison (figure 14a), le bipoutre mixte est actuellement le type de tablier le plus économique. Au-delà de 120 m de portée, il est associé à un platelage orthotrope pour donner le tablier « tout acier ».

Structurellement, le bipoutre convient aussi bien aux ponts-rails qu'aux ponts-routes (cf. article *Ponts métalliques. Applications spécifiques* dans ce traité), quelle que soit la largeur de la chaussée, en jouant sur le mode d'entretoisement.

Le **tablier multipoutre** comprend plusieurs poutres espacées de 3 à 5 m (figure 14b). Cette formule, qui a très longtemps dominé le marché avant l'introduction du bipoutre dans les années soixante, est désormais réservée aux tabliers très larges ou très élancés, comme alternative au bipoutre. A l'étranger, le multipoutre continue d'être largement développé.

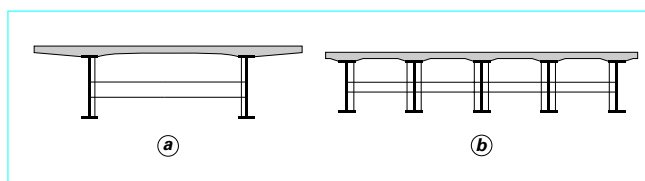


Figure 14 – Tabliers bipoutre et multipoutre

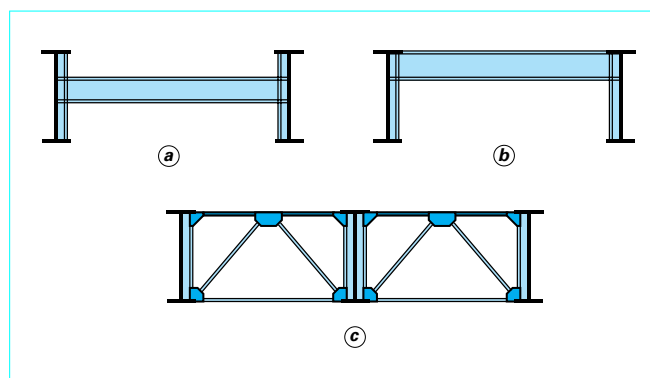


Figure 15 – Entretoisements souples et entretoisement rigide (multipoutre à entretoise triangulée)

3.2.1.3 Entretoisement des poutres

Réparti tous les 7 à 10 m s'il ne porte pas la dalle, ou tous les 4 m s'il est porteur, l'entretoisement se présente sous deux aspects :

- l'**entretoisement souple**, fait d'un profilé en double té soudé sur les montants et placé environ à mi-hauteur des poutres (entretoise, figure 15a) ou en partie haute sous le platelage (pièce de pont, figure 15b). La structure en portique (H ou Ω) ainsi réalisée est déformable ;

- l'**entretoisement rigide** de type triangulé (figure 15c) est fait de barres (membrures, diagonales et montants) assemblées souvent par boulons. Cette forme est maintenant peu employée en France.

3.2.1.4 Fonction de l'entretoisement dans les ponts à poutres

■ **Sous les actions locales**, la pièce de pont supporte la dalle et les surcharges verticales de circulation et reporte les efforts sur les poutres principales. L'entretoise simple, en revanche, n'est pas concernée directement par les actions locales puisqu'elle ne porte pas la dalle.

■ **Sous les actions d'ensemble**, l'entretoisement, assume plusieurs fonctions :

- la **répartition des charges entre les poutres principales** en imposant le déplacement « en bloc » de l'ensemble des poutres (figure 16) ;
- la **stabilisation des poutres contre le déversement** par le maintien des semelles inférieures comprimées aux montants des cadres (figure 17) ;
- le **contreventement horizontal** avec le platelage, pour le report des charges horizontales de vent sur les appuis ;
- la **transmission des réactions d'appui** verticales et horizontales sur les lignes d'appuis, par un entretoisement spécial renforcé sur appuis ;
- le **raidissage transversal des poutres** par le biais des montants d'entretoise.

3.2.2 Poutres en caisson

3.2.2.1 Conception générale de la poutre en caisson

Dans sa forme la plus simple, la poutre en caisson comporte deux âmes, verticales ou inclinées, reliées à leur base par une tôle de fond raidie formant la semelle inférieure (figure 18).

La semelle supérieure, identique à celle du tablier à poutres, est adaptée au type de platelage choisi : béton armé ou dalle orthotrope métallique. La semelle inférieure, large et mince, donc sensible à

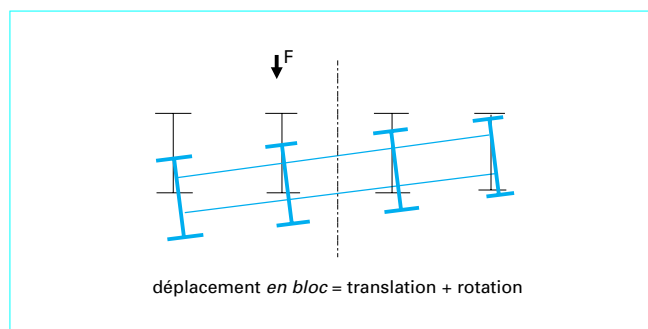


Figure 16 – Solidarisation des poutres par l'entretoisement

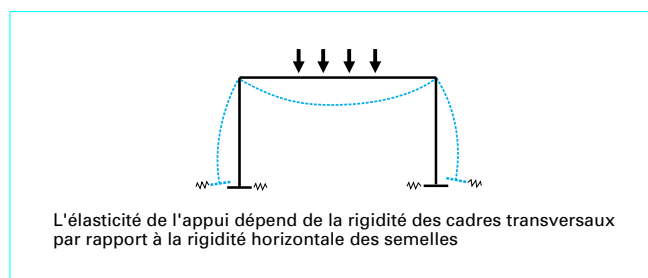


Figure 17 – Liaison élastique entre cadre et semelles des poutres

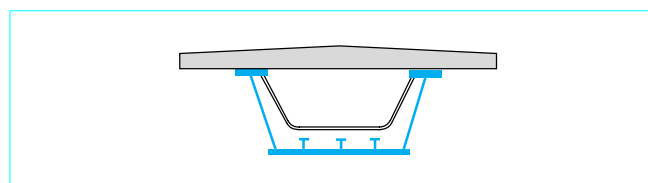


Figure 18 – Poutre caisson

l'instabilité de voilement, est raidie par des raidisseurs longitudinaux et transversaux.

3.2.2.2 Cas d'utilisation des poutres en caisson

Plusieurs considérations justifient l'adoption de cette solution :

- les **ponts courbes** : avec un profil résistant en torsion, le caisson s'impose dans les ouvrages où l'effet de courbure induit des moments de torsion tels qu'un profil ouvert ne peut les reprendre en résistance ou en déformation (figure 19) ;
- la **réduction des déformations transversales** : en bloquant la quasi-totalité du déplacement de rotation, le caisson réduit la déformation verticale sous les chargements excentrés. Les sollicitations de flexion s'en trouvent diminuées ;
- les **tabliers à grands élancements** : le module de flexion I/v d'une poutre élancée ($\gamma \geq 30$) est plus facile à obtenir avec un caisson qu'avec une poutre à âme pleine, grâce à la plus grande capacité de « stockage » de section dans la large semelle inférieure ;
- l'**aérodynamisme** : par son aptitude au profilage, le caisson est tout indiqué dans la conception d'ouvrages exceptionnels soumis aux effets aérodynamiques ;

la **qualité architecturale** : le dessin d'un caisson favorise la diversité des formes architecturales.

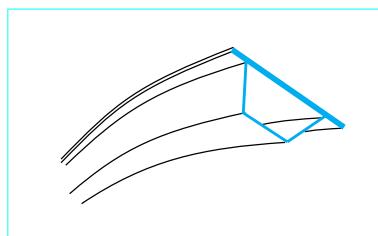


Figure 19 – Pont courbe en caisson

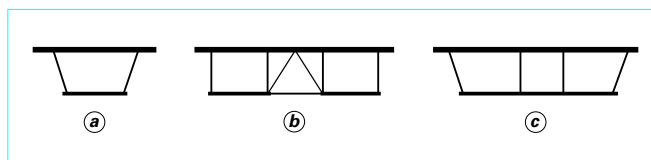


Figure 20 – Types de caisson

3.2.2.3 Types de tabliers à poutres en caisson

■ Le **caisson unique** ou monocaisson est la solution la plus courante (figure 20a) ; elle convient à toutes les largeurs de tablier. En tabliers larges, le monocaisson est souvent associé à des consoles portant les encorbellements.

■ Le **double caisson** est l'association de deux caissons liés entre eux par un entretoisement triangulé (figure 20b). Cette conception convient particulièrement bien aux tabliers relativement larges et de faible hauteur.

■ Le **caisson multicellulaire** (figure 20c) se justifie dans des cas particuliers de ponts haubanés aux tabliers très larges, très élancés et comportant un haubanage en nappe centrale.

3.2.2.4 Entretoisement des tabliers en caisson

Parce qu'il possède une grande inertie de torsion, le caisson peut résister aux sollicitations de torsion. Cette propriété donne lieu à un fonctionnement très différent de celui des ponts à poutres. La contribution des éléments transversaux dans la résistance en torsion est essentielle puisqu'elle vise à assurer la conservation des angles de la section.

■ **Pour résister aux sollicitations de torsion**, la poutre en caisson mobilise deux types de résistance :

- la résistance de torsion classique ;
- la résistance de gauchissement.

Ce but est atteint en disposant de proche en proche dans la poutre en caisson des éléments transversaux d'entretoisement, d'une raideur suffisante.

■ **Trois formes principales d'entretoisement répondent à cet objectif.** Leur domaine d'application est fonction du chargement, des dimensions du caisson, du type et de la largeur du platelage (figure 21) :

- le **cadre souple « ouvert »** en forme de U, qui est constitué d'une traverse inférieure et de deux montants, alors que le **cadre « fermé »** est obtenu par addition d'une pièce de pont ;
- le **cadre rigide triangulé** très peu déformable, qui fonctionne sur le mode de la poutre en treillis ;
- le **diaphragme**, structure quasi-indéformable attachée sur tout le pourtour de la section du caisson, qui est réservé à des caissons plats ou de formes géométriques polygonales très profilées (ponts de très grandes portées).

Sur appuis, la reprise des sollicitations élevées conduit fréquemment à des structures renforcées de types diaphragmes.

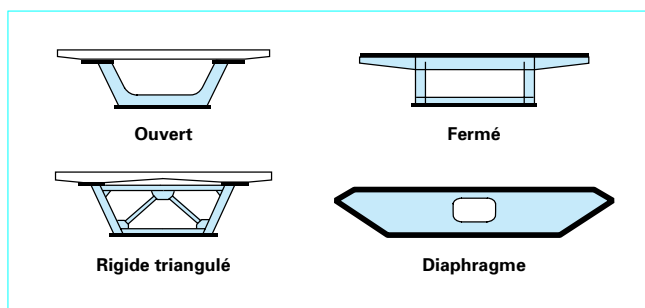


Figure 21 – Entretoisement des tabliers en caisson



Figure 22 – Pont à treillis sous chaussée de Blois (doc. Baudin)

3.2.3 Poutres en treillis sous chaussée

Parce qu'elle demande environ deux fois plus de hauteur qu'une poutre à âme pleine, et que sa fabrication atteint un coût plus élevé, la poutre en treillis sous chaussée est une solution peu employée. Cette structure présente pourtant des avantages : elle est légère et possède une grande raideur flexionnelle.

Depuis peu, un intérêt se manifeste sur des formes de ponts en treillis sous chaussée à hauteur très variable (figure 22), rappelant en cela les premiers ponts métalliques en arches.

Dans le même esprit, on note l'introduction des structures tubulaires spatiales dans la construction de tabliers en caisson triangulaire à inertie constante ou variable. Outre sa grande transparence architecturale, cette structure « nouvelle » est susceptible de trouver des applications intéressantes dans des ponts de grandes portées, à poutres ou haubanés.

3.3 Poutrason « sur » chaussée

Cette disposition s'adresse aujourd'hui presque essentiellement aux seuls ponts à poutres soumis à de difficiles contraintes de profil en long et de gabarit ainsi qu'aux ponts mobiles. Elle est plus couramment utilisée en pont-rail qu'en pont-route (cf. article *Ponts métalliques. Applications spécifiques* dans cette rubrique).

Deux emplacements sont possibles pour disposer les poutres « au-dessus » du platelage :

- à l'extérieur des voies : le tablier est dit « à poutres latérales » ;
- dans l'axe du tablier : la poutre est unique et axiale ; cette disposition est très rare.

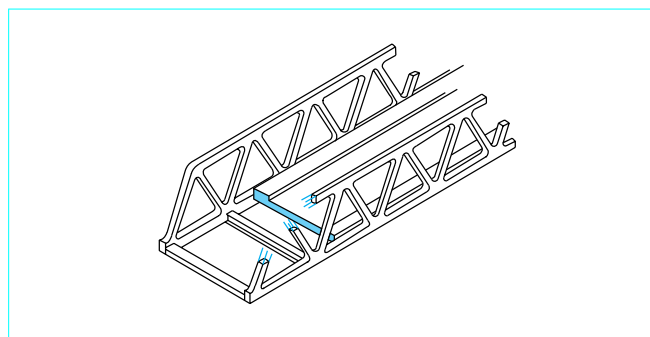


Figure 23 – Tablier en Warren

Les formes de poutre utilisées sont le plus souvent en treillis, quelquefois à âme pleine, très rarement en caisson.

3.3.1 Poutres latérales en treillis

Les poutres sont placées à l'extérieur des gabarits des voies routières ou ferroviaires. Elles sont liaisonnées par une structure faite de pièces de pont et de longerons qui porte le platelage en béton ou métallique et transmet les charges et surcharges aux nœuds inférieurs de la poutre.

■ La **poutre Warren** est aujourd'hui la forme de treillis la plus répandue. Du point de vue géométrique, elle est de hauteur constante avec un élanement L/H_p allant de 10 pour les ponts-rails et à 15 pour les ponts-routes ; l'angle d'inclinaison des diagonales par rapport à l'horizontale est d'environ 45° pour une poutre sans montant et de 55° pour une poutre avec montant ; le nombre de panneaux et la distance entre nœuds en découlent (figure 23).

Les sections généralement retenues sont :

- des caissons pour les membrures des poutres principales ;
- des PRS (poutres reconstituées soudées) pour les pièces de pont, les diagonales et les montants. Les assemblages sur chantier sont soudés ou boulonnés au moyen de boulons à serrage contrôlé.

■ L'**entretoisement** des deux poutres est assuré par les pièces de pont rigidifiées par le platelage et attachées aux poutres principales au droit des nœuds de membrures inférieures. Cet ensemble constitue une structure spatiale. Dans sa forme classique et pour des ponts de petites et moyennes portées, la section transversale est celle d'un profil ouvert en forme de U (figure 24a).

La raideur du « cadre » en U est obtenue par la combinaison des raideurs des pièces de pont et des montants et diagonales des poutres. De cette raideur dépend la stabilité au déversement de la membrure supérieure comprimée de la poutre. Pour satisfaire cette condition, principalement pour des ouvrages de grande portée, il est parfois nécessaire de disposer un contreventement supérieur dans le plan horizontal des membrures supérieures (figure 24b). Ce contreventement doit se situer au-dessus du gabarit de circulation.

3.3.2 Poutres latérales à âme pleine

Le concept d'ensemble est identique à celui des poutres latérales en treillis mais les poutres sont ici à âme pleine, donc moins hautes.

L'entretoisement est constitué par les pièces de pont et les montants qui forment un cadre en U (figure 25). La coupe transversale en forme de H est plus rare : les pièces de pont sont alors placées à un niveau intermédiaire.

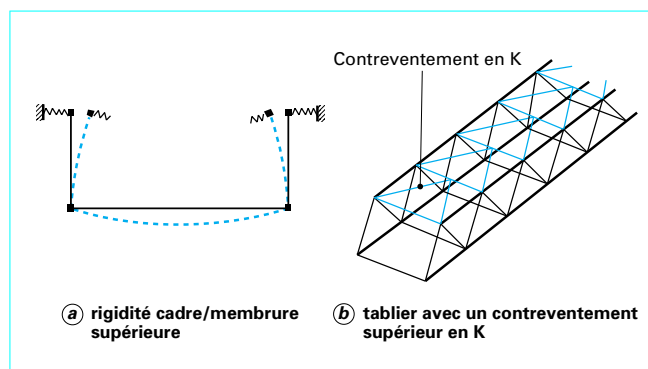


Figure 24 – Entretoisement de poutres

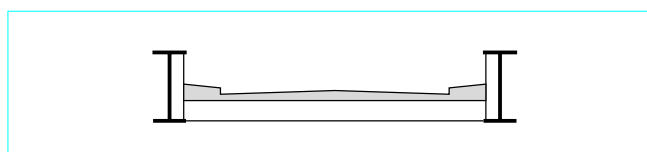


Figure 25 – Tablier à poutres latérales à âme pleine

L'application la plus intéressante qui en est faite concerne les ponts-rails de moyenne portée (cf. article *Ponts métalliques. Applications spécifiques* dans cette rubrique). En pont-route, en revanche, l'effet de paroi bordant la chaussée lui est préjudiciable à partir d'une certaine hauteur de poutre : aussi ne rencontre-t-on ce tablier que rarement et plutôt pour des petits ponts mobiles que pour des petits ponts fixes.

4. Platelages

Cette partie du tablier qui supporte en premier les surcharges d'exploitation a connu des évolutions structurelles et fonctionnelles depuis une trentaine d'années. Construits à partir de structures aussi différentes que sont les dalles en béton, les mixtes acier-béton et les dalles orthotropes tout acier, dont nous étudierons pour chacune le domaine d'emploi, les platelages de tabliers doivent dans tous les cas être conçus afin de :

- résister aux efforts locaux apportés par les surcharges roulantes ;
- transmettre ces efforts locaux aux poutres principales ;
- assurer le contreventement horizontal du tablier ;
- participer (sauf cas particulier) à la flexion d'ensemble des poutres principales.

4.1 Dalle en béton armé collaborante

En France, le mixte a vu sa première application dans le pont-rail de Bouzonville en 1950. Il a fallu attendre 1964 pour enregistrer les premières réalisations de ponts-routes mixtes. Jusqu'alors, les tabliers des ponts-routes métalliques à poutres multiples sous chaussée comprenaient une charpente métallique qui assurait intégralement la résistance du tablier en flexion d'ensemble et un platelage en béton armé « non participant » dont le seul rôle était de résister aux actions locales des surcharges.

4.1.1 Fonctions de la dalle

4.1.1.1 Résistance en flexion locale

Dans sa fonction de platelage du tablier, la dalle en béton doit pouvoir supporter les surcharges locales de circulations routières ou ferroviaires, que le tablier soit mixte ou non. Plusieurs facteurs permettent d'ajuster la résistance de la dalle aux sollicitations locales :

- le **schéma d'appui de la dalle** (figure 26) sur la poutraison métallique détermine le niveau des sollicitations. On en déduit l'écartement des poutres et le type d'entretoisement porteur de la dalle, si nécessaire ;
- l'**épaisseur de la dalle et son ferrailage** fixent les propriétés mécaniques de résistance avec toutefois une limite d'épaisseur afin de ne pas augmenter les charges mortes ni aggraver le bilan des sollicitations de flexion d'ensemble (30 cm d'épaisseur moyenne en pont-route) ;
- la **résistance du béton** : on choisit généralement des qualités B35... en attendant les bétons à haute performance dont l'emploi est encore à l'état expérimental en ce domaine.

4.1.1.2 Résistance en flexion d'ensemble et connexion de la dalle

La participation de la dalle dans le travail de flexion d'ensemble suppose que le béton soit comprimé, sinon faiblement tendu, et exige une connexion entre les poutres métalliques et la dalle en béton capable de s'opposer au glissement et au soulèvement de la dalle par rapport aux semelles des poutres (figure 27).

On distingue quatre genres de connexion se différenciant par leur mode de fonctionnement :

- la **connexion par butée**, qui bloque l'effort horizontal avec plus ou moins de brutalité selon son degré de raideur : le connecteur goujon est plus souple que le connecteur en cornière ;
- la **connexion par ancrage**, qui travaille en traction comme des barres d'ancrage ou comme des étriers de ferrailage (connecteur à boucles) ;
- la **connexion par butée et ancrage**, qui reprend les deux modes précédents ;
- la **connexion par frottement**, peu employée, qui consiste à mobiliser le frottement entre le béton et un plat vertical continu soudé sur la semelle de la poutre au moyen d'une précontrainte transversale de la dalle.

On ne rencontre plus aujourd'hui en France que les connecteurs goujons et les connecteurs en cornières. Le goujon présente une résistance individuelle inférieure à la cornière. Il en faut donc un plus grand nombre, mais cet inconvénient est compensé par une plus grande facilité de mise en œuvre en usine. La pose de goujons sur chantier suppose la disponibilité d'une puissance électrique suffisante.

4.1.2 Méthodes d'exécution de la dalle en béton

Elles font appel à deux techniques :

- la dalle coulée en place sur l'ossature à l'aide d'un outil de coffrage mobile complété parfois par un coffrage traditionnel est actuellement la méthode la plus répandue ;
- la préfabrication de la dalle par petits panneaux posés à la grue ou par grandes longueurs mises en place par poussage. Ces procédés, qui apportent une réponse favorable au problème de la fissuration par retrait au jeune âge, devraient connaître un certain développement.

Mais, quel que soit le procédé retenu, le problème de la dalle en béton des ponts mixtes est le contrôle de sa fissuration provoquée par le dépassement de la capacité de résistance en traction du béton (cf. article *Ponts métalliques. Applications spécifiques* dans cette rubrique).

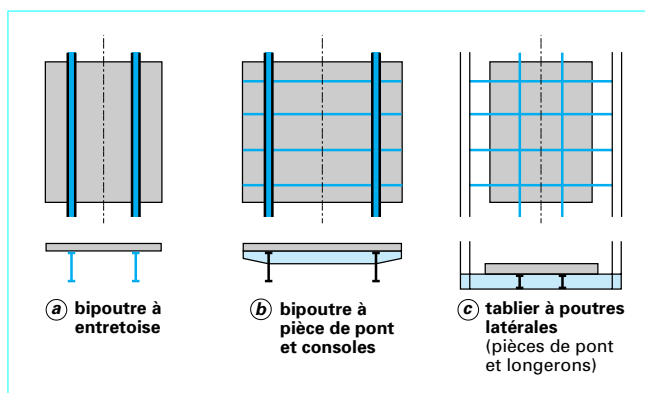


Figure 26 – Dispositions d'appui de dalle

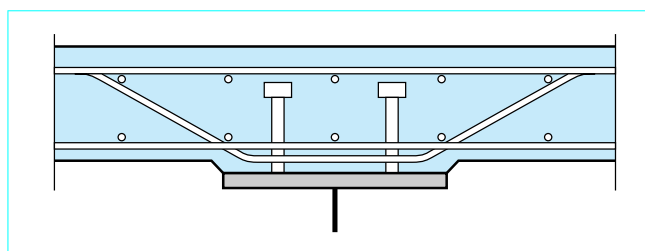


Figure 27 – Dalle en béton. Appui et connexion sur poutre

4.2 Dalle mixte acier-béton

Les ingénieurs recherchaient des solutions de dalles légères pour résoudre les problèmes des grands franchissements en pont-route. On savait que les hourdis en béton, d'une masse de 750 kg par mètre carré pour une épaisseur de 30 cm, nuisaient au rendement des tabliers de grandes portées : ceux-ci consommaient en effet beaucoup plus d'acier pour se porter eux-mêmes que pour porter les surcharges d'exploitation !

Ainsi est née la dalle mixte. Elle connut un certain succès en France dans les années cinquante et au début des années soixante, et fut développée, entre autres, dans les ponts suspendus de Tancarville et d'Aquitaine à Bordeaux. Elle précédait la fameuse dalle orthotrope.

Basée sur le concept d'une dalle mixte, elle est constituée :

- d'une tôle en acier, épaisse de 6 à 10 mm, servant à la fois de coffrage et d'armature inférieure pour la dalle en béton ;
- d'une dalle mince en béton armé (8 à 10 cm d'épaisseur) ;
- d'un système de connecteurs assurant la liaison et la transmission des efforts de glissement entre la tôle et la dalle ; connecteurs goujons (figure 28) ou connecteurs en plats pliés (dalle Robinson).

Elle repose sur des pièces de pont distantes de 6 à 8 m et des longerons espacés de 1 à 2 m formant un réseau de poutres croisées.

C'est donc bien une structure mixte, puisque les deux matériaux sont liés pour travailler ensemble afin de reprendre les efforts de flexion locale et de cisaillement.

Malgré ses avantages reconnus, légèreté (300 kg/m²), réduction de l'épaisseur du tablier, coffrage tout fait, participation à la résistance d'ensemble, la dalle mixte était lourdement handicapée par un prix de revient élevé lié au coût de la pose des connecteurs. Avec l'évolution des procédés de construction, l'idée peut renaître.

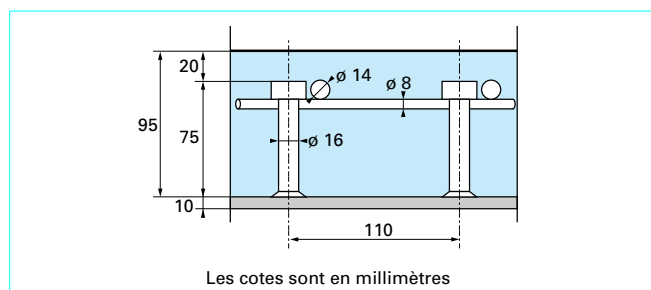


Figure 28 – Principe de la dalle mixte avec une connexion par goudjons

4.3 Dalle orthotrope tout acier

La quête de légèreté pour les grands franchissements d'une part, le développement de la soudure grâce aux améliorations apportées sur la soudabilité des aciers d'autre part, ont favorisé l'émergence, à partir de 1950, en Allemagne, d'une dalle entièrement métallique appelée « dalle orthotrope » (figure 29). En France, c'est dans les années soixante que la dalle orthotrope a connu ses premières applications, en remplacement de la dalle mixte.

N'accusant qu'une masse moyenne de 185 kg par mètre carré, la dalle orthotrope tout acier est quatre fois plus légère qu'une dalle en béton armé de 30 cm.

Cet avantage de légèreté s'exprime pleinement lorsque la « chasse » au poids est une condition déterminante du projet : c'est le cas des ouvrages de grandes portées et des ponts mobiles.

4.3.1 Conception de la dalle orthotrope sur pont-route

La dalle est constituée d'une tôle de platelage de 12 mm d'épaisseur au minimum, renforcée sur sa face inférieure par un système de raidisseurs orientés selon deux directions orthogonales, d'où le qualificatif « orthotrope », contraction des mots « orthogonal » et « anisotrope ».

4.3.1.1 Raidissage longitudinal

Utilisant au début des profils plats espacés de 300 mm, le raidissage a ensuite évolué vers des profils composés et fermés pour aboutir assez vite à sa forme actuelle trapézoïdale, forme à laquelle on doit le nom d'« auget » attribué à ce raidisseur (figure 30). L'espacement de 300 mm a été conservé entre chaque ligne d'attache sur la tôle, donnant à chaque auget une ouverture de 300 mm et un entraxe de 600 mm.

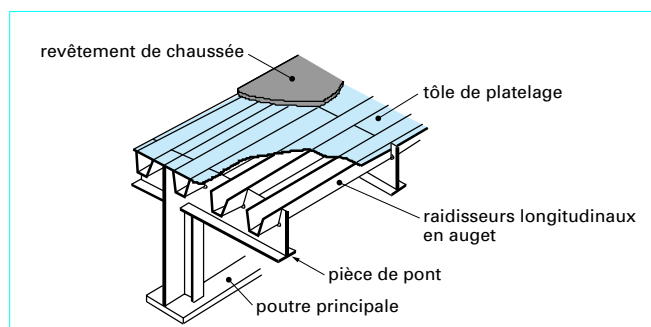


Figure 29 – Tablier à platelage orthotrope et poutres à âme pleine

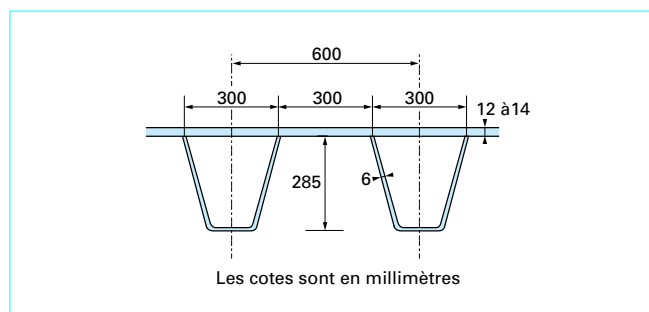


Figure 30 – Raidisseur en auget

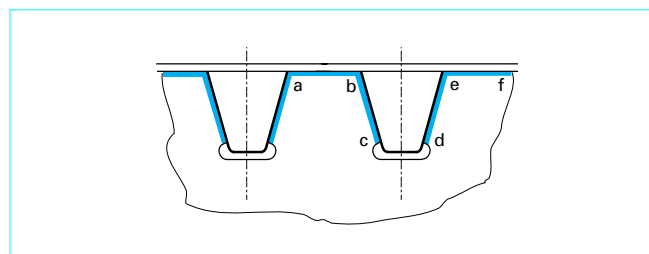


Figure 31 – Liaison soudée du platelage sur l'âme de la pièce de pont

Les augets ont une épaisseur minimale de 6 mm, à condition que l'intérieur de la section soit garantie étanche et à l'abri de toute corrosion. Leur hauteur est de l'ordre de 250 à 300 mm pour une portée de flexion de 4 m entre appuis sur pièces de pont.

L'ensemble tôle-raideurs possède ainsi des caractéristiques de rigidité flexionnelle et torsionnelle lui permettant à la fois de supporter les actions locales de poinçonnement, la flexion locale, et d'assurer la fonction de semelle supérieure de la poutre dans la flexion d'ensemble.

4.3.1.2 Raidissage transversal

Tous les 4 m environ, une pièce de pont prolongée par des consoles rigidifie la dalle dans la direction transversale ; elle constitue l'appui du platelage et fait aussi partie du dispositif d'entretoisement transversal de la section du tablier. Les augets, dont la continuité doit être préservée, s'emboîtent dans les découpes pratiquées dans l'âme à laquelle ils sont soudés sur leurs flancs (figure 31).

Les cisaillements d'effort tranchant, amenés par les faces obliques de l'auget sont repris suivant les cordons de soudure obliques (b – c) et (d – e). Les cisaillements développés par le travail de flexion transversale de la pièce de pont sont attachés suivant les cordons horizontaux discontinus (a – b) et (e – f)...

En dehors de ces liaisons strictement nécessaires, la découpe laisse un jeu suffisant pour permettre une soudure continue par contournement des points (c) et (d), au-delà de la zone de pliage de la tôle du raidisseur.

4.3.2 Prise en compte de la fatigue dans la dalle orthotrope

Appliqué aux ponts-routes, le platelage orthotrope reçoit les surcharges roulantes au travers d'une couche d'environ 8 cm de revêtement de chaussée. La tôle de platelage ainsi que les tôles de l'auget sont donc soumises à des sollicitations locales très agressives (figure 32).

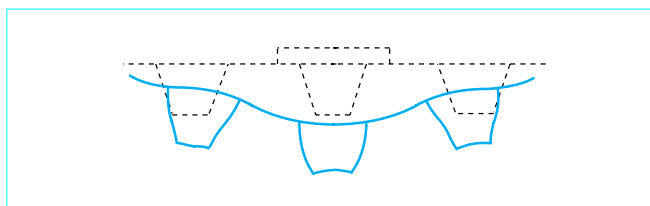


Figure 32 – Déformation élastique du platelage entre deux pièces de pont sous le passage d'une charge centrée sur une ligne de raidisseur

Les contraintes cycliques et alternées affectant les liaisons soudées sont typiques d'un mode de sollicitation de fatigue. Il convient donc d'en limiter les effets par l'adoption de bonnes dispositions constructives telles que la continuité des augets au travers des âmes de pièces de pont et le respect d'un bon niveau de qualité pour l'exécution des soudures de liaison de l'auget sur la tôle de platelage et sur la découpe de la pièce de pont.

4.4 Domaines des dalles en béton et orthotropes

En ponts routiers à poutres, on observe que l'intérêt économique de la dalle en béton, dans sa forme actuelle, en justifie l'emploi jusqu'à 120 m environ de portée principale dans des ouvrages en travées continues de type « pont à poutres ». Au-delà de 120 m, le relais est pris par la dalle orthotrope.

Cette portée limite a été mise en évidence par une étude statistique menée par le SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes) et portant sur les consommations d'acier enregistrées sur un échantillonnage d'ouvrages du type « pont à poutres » ayant :

- trois travées continues de portées $0,6 X$; X ; $0,6 X$;
- un tablier à poutres à âme pleine sous chaussée ;
- un élargissement standard X/H égal à 30.

Dans ces conditions, la quantité d'acier consommée (G_a) en kg par m^2 de « surface utile » de tablier, exprimée en fonction de la portée centrale X (mètres) est la suivante :

- pour un tablier mixte :
 $G_a = 100 + 0,105 X^{1,6} \text{ kg/m}^2$
- pour un tablier à dalle orthotrope :
 $G_a = 200 + 0,13 X^{1,44} \text{ kg/m}^2$

La « largeur utile » de tablier étant par convention égale à :

$$L_u = L_{\text{chaussée}} + 0,2 L_{\text{trotoirs}}$$

La figure 33 donne l'évolution comparée des consommations d'acier pour chacune des solutions. Les deux courbes de consommation se coupent autour d'une valeur de portée principale X égale à 120 m.

Les formules statistiques peuvent être appliquées à d'autres configurations de ponts à poutres sous chaussée, moyennant une correction de valeur. Ainsi, pour une travée différente, il faut intégrer dans la formule une portée fictive $X' = k X$ dans laquelle :

- $k = 1,4$ pour une travée indépendante de portée X ;
- $k = 1,2$ pour deux travées égales de portée X ;
- $k = 1,0$ pour une suite de n travées égales à X .

En ponts-rails à poutres, les platelages en béton occupent une place prépondérante car, en trafic ferroviaire et en travées de petites et moyennes portées, la légèreté n'est pas une exigence mise en avant ; elle est même un handicap pour les tabliers sensibles aux phénomènes dynamiques. Cet argument est primordial, notamment pour les ponts à poutres mixtes des lignes du TGV.

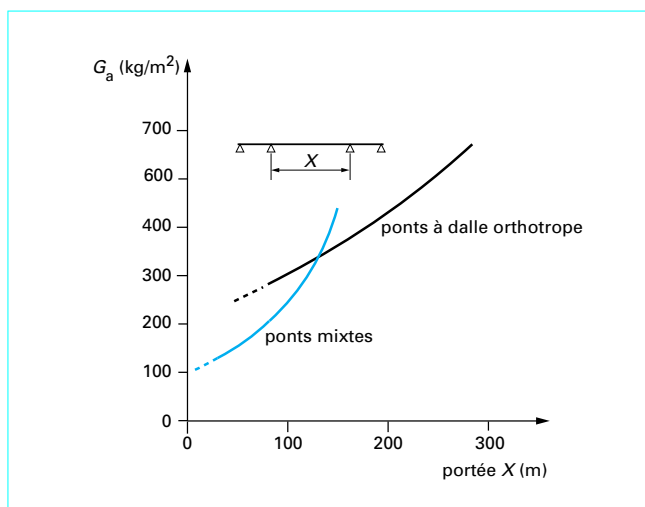


Figure 33 – Consommation d'acier des ponts à dalle béton et ponts à dalle orthotrope

La dalle orthotrope connaît en revanche un certain succès en Allemagne pour servir de cuves à ballast dans des ouvrages de petites et moyennes portées, là où en France est préférée une forme de cuve à ballast en béton armé.

En ponts en arc et haubanés, la règle des 120 m, valable pour le système porteur sur appuis rigides (ponts à poutres), ne s'applique pas ici de la même manière car on change de système porteur : les appuis deviennent multiples, rapprochés et souples. La répartition entre dalle béton et dalle orthotrope est fondée sur la recherche d'une solution globale économique. Le critère de légèreté est plus que jamais mis en avant, mais il ne prend vraiment tout son sens que pour des portées dépassant souvent 200 m en pont en arc et 300 à 400 m pour des ponts à haubans.

En ponts mobiles, c'est évidemment le domaine de prédilection pour la dalle orthotrope puisque la légèreté diminue les masses en mouvement et produit un effet bénéfique sur le dimensionnement des mécanismes et sur le bilan de puissance nécessaire qui en découlent.

En ponts préfabriqués, la dalle orthotrope se substitue à la dalle en béton pour des tabliers de petits ponts entièrement préfabriqués en usine, transportables par route et mis en place facilement par des moyens de levage simples et rapides. C'est le cas des viaducs métalliques routiers démontables (VMD) ou autoponts installés en quelques nuits sur un carrefour en centre-ville.

5. Équipements de ponts

Les ponts comportent un certain nombre d'équipements indispensables au fonctionnement et à la pérennité de l'ouvrage :

- les appareils d'appui ;
- la chaussée ;
- les joints de chaussée ;
- les dispositifs de retenue ;
- la protection anticorrosion ;
- l'évacuation des eaux pluviales ;
- les corniches ;
- les installations de visite.

Le choix de ces équipements dépend non seulement de leur coût initial, qui peut atteindre 10 % du prix total de l'ouvrage, mais aussi

des frais d'exploitation liés à leur entretien et à leur remplacement dans le temps. Ils ne doivent pas être à l'origine de désordres qui pourraient affecter la résistance du pont. Pour toutes ces raisons, les équipements de ponts sont des produits couverts par des homologations délivrées par l'administration compétente.

Seront abordés ici plus particulièrement les appareils d'appui qui sont directement impliqués dans le fonctionnement du pont.

5.1 Appareils d'appui

5.1.1 Fonction et disposition

Les appareils d'appui assurent la liaison mécanique entre les éléments porteurs principaux (poutres principales, arcs...) et les appuis (piles, culées, massifs, etc.). Ils contribuent au fonctionnement d'ensemble de l'ouvrage et transmettent aux appuis les actions provenant des charges permanentes, surcharges d'exploitation, effets thermiques, actions sismiques, vent et tassements d'appui :

- les forces verticales et horizontales ;
- les déplacements de translation et de rotation.

Dans son plan horizontal, et sous les actions horizontales, l'équilibre du tablier doit être satisfait tout en garantissant une libre dilatation tant longitudinalement que transversalement pour les ouvrages de grande largeur. De sorte que le schéma d'appui idéal bâti sur ce principe doit comprendre (figure 34) :

- un appareil d'appui fixe bloquant les efforts horizontaux ;
- des appareils d'appui mobiles unidirectionnels en x ou y ;
- des appareils d'appui mobiles multidirectionnels en x et y .

La figure 35 illustre la disposition classique en plan pour une travée indépendante courbe avec lignes d'appuis en biais. On remarque que les appareils mobiles sont orientés en direction selon les rayons polaires tracés à partir du point fixe.

5.1.2 Types d'appareil d'appui

On distingue quatre grandes familles d'appareils d'appui se différenciant par leur mode de fonctionnement et les matériaux employés.

5.1.2.1 Appareils d'appui en acier

Réalisés à l'origine en acier moulé, maintenant usinés à partir de tôles épaisses et de ronds, ils sont de trois types.

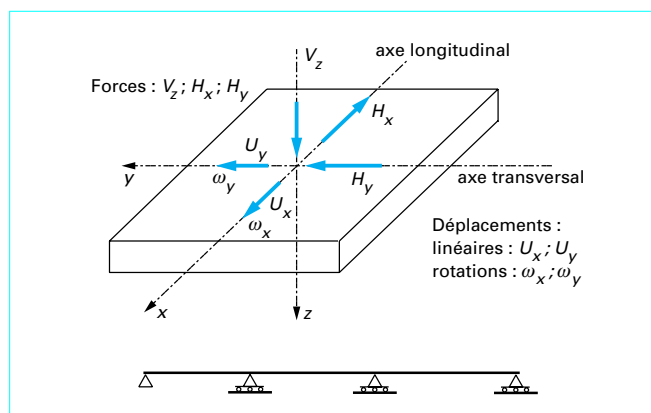


Figure 34 – Forces et déplacements sur appuis

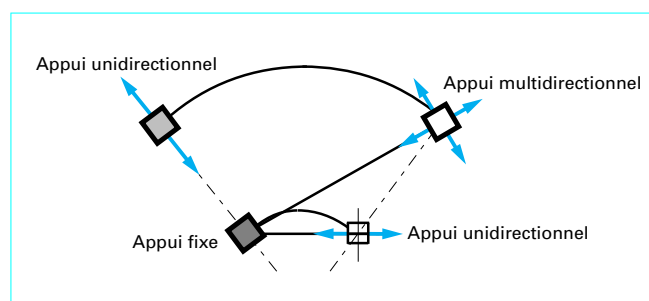


Figure 35 – Disposition des appuis en plan

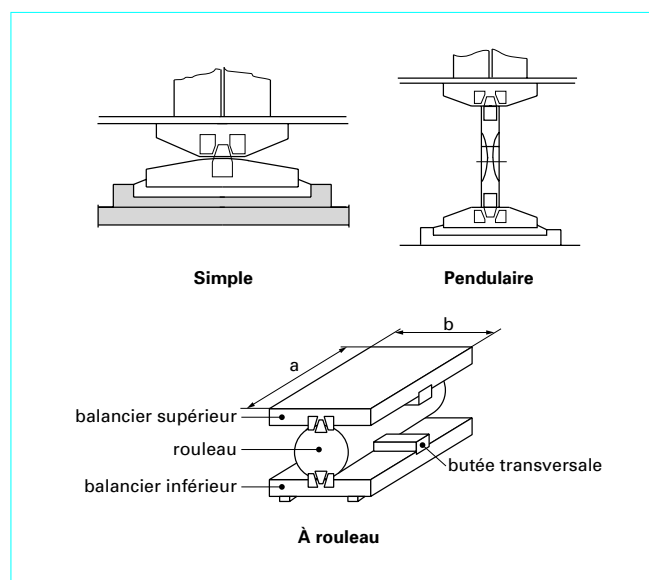


Figure 36 – Appuis linéaires

■ **L'appui linéaire.** La rotation s'effectue par roulement d'une surface cylindrique sur une surface plane. En intercalant un rouleau entre les deux plans, l'appareil devient mobile (figure 36).

■ **L'appui ponctuel** procure une liberté de rotation multidirectionnelle. Il s'agit d'une rotule sphérique réalisée par un contact plan sur calotte sphérique ou un contact sphère sur sphère.

■ **L'appui ponctuel mobile** est obtenu en ajoutant à la rotule sphérique un plan de glissement, unidirectionnel ou multidirectionnel selon la condition à réaliser, par interposition d'une plaque d'acier inoxydable poli associée avec une plaque de PTFE (polytétrafluoroéthylène) (figure 37).

5.1.2.2 Appui en élastomère fretté

Il est constitué d'un empilage de plusieurs plaques d'élastomère d'épaisseurs variant de 8 à 20 mm et solidarisées entre elles par des tôles d'acier de 1 à 4 mm d'épaisseur. Ce frettage permet au bloc de subir des déformations verticales, des distorsions horizontales γ et des rotations ω (figure 38).

Utilisés tels que, et empêchés de tout cheminement, ces appuis possèdent une certaine capacité de résistance et de distorsion devant les efforts et déplacements horizontaux imposés. Cette aptitude augmente avec la souplesse des piles.

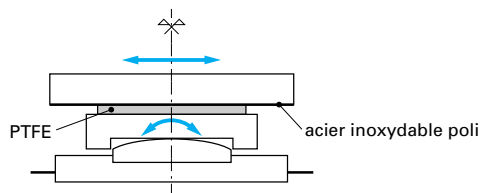


Figure 37 – Appui ponctuel et mobile

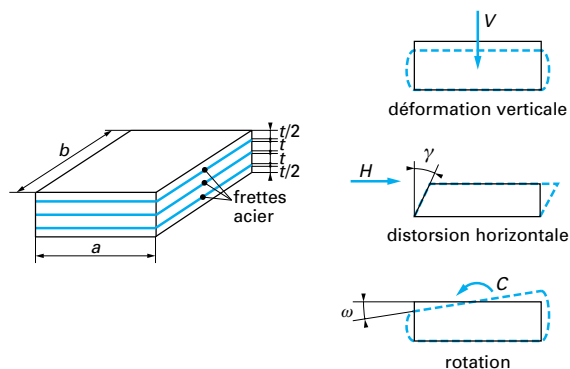


Figure 38 – Bloc d'appui en néoprène fretté : déformations

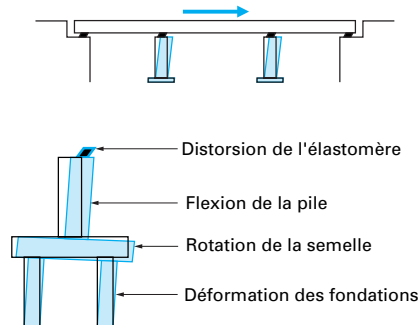


Figure 39 – Fonctionnement d'ensemble

Ils fonctionnent en appuis semi-fixes ; les efforts horizontaux se répartissent au prorata des raideurs des appareils d'appui combinés avec les raideurs des piles et fondations (figure 39).

Au-delà d'un certain rapport entre la hauteur du bloc et sa petite dimension en plan caractérisant l'élancement, le bloc devient instable. Le déplacement ne peut plus être repris simplement par distorsion du Néoprène.

■ Les **appuis glissants en élastomère fretté** sont composés d'un bloc en élastomère fretté auquel est ajoutée par adhérisation, une plaque en PTFE glissant sur une plaque en acier inoxydable (figure 40).

L'association acier inoxydable-PTFE présente un coefficient de frottement dont la valeur est d'autant plus basse que la contrainte de compression est élevée.

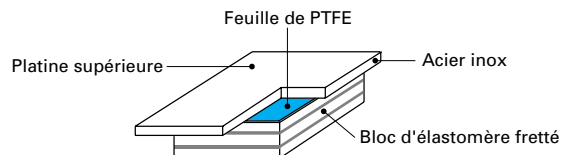


Figure 40 – Appui glissant

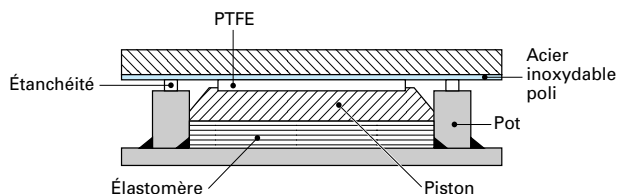


Figure 41 – Appui glissant à pot d'élastomère

5.1.2.3 Appareils à pots d'élastomères

L'élastomère est emprisonné dans un pot métallique cylindrique et coiffé d'un couvercle à piston. Enfermé dans le pot, l'élastomère se déforme à volume constant et se comporte comme un liquide. Du fait de contraintes de cisaillement pratiquement nulles, il peut ainsi supporter à la fois des pressions élevées (25 MPa) et des rotations importantes (1/100 rad). L'appareil d'appui fixe ainsi constitué équivaut à une véritable rotule.

La conversion en appui mobile est simplement réalisée par l'addition d'un plan de glissement (acier inoxydable-PTFE) disposé sur le couvercle à piston (figure 41).

5.1.2.4 Appuis à calottes en acier

Il s'agit d'une variante tout acier des appuis précédents à pot. Le bloc d'élastomère est remplacé par une calotte sphérique convexe glissant sur une forme sphérique concave.

5.1.3 Conditions de pose des appareils d'appui

La bonne tenue dans le temps des appareils d'appui dépend beaucoup du soin apporté à leur mise en place. Il se manifeste par le respect de conditions essentielles :

- un nivellement précis sur chaque ligne d'appui ;
- des plans de contact garantis par un bon surfacage de zones d'appui ;
- la prise en compte de l'état de contreflèche résiduelle des poutres principales dans la phase de pose ;
- l'alignement des appareils directionnels selon les axes de dilatation ;
- le réglage de la position selon la température de pose ;
- la protection des surfaces de glissement.

5.2 Joints de chaussée routière

Cet équipement assure la continuité de roulement à la jonction entre tablier et culées. Les joints sont classés selon le trafic en poids lourds journalier moyen, et caractérisés par leur « souffle » qui exprime la capacité de déplacement total du tablier sous les surcharges et les effets thermiques. Les diverses conceptions de joints se différencient par leur capacité de souffle et leur aptitude à supporter des trafics légers, semi-lourds ou lourds.

■ Le **joint avec continuité du revêtement**, très confortable et étanche, est proposé avec un souffle de 30 mm et pour des trafics légers ou semi-lourds.

■ Le **joint en élastomère alvéolé** (figure 42a) est réalisé avec un profil en élastomère alvéolé accroché à deux profilés métalliques ancrés dans la dalle. Les souffles varient de 15 à 50 mm.

■ Le **joint à peigne** (figure 42b) pour trafic lourd est constitué de deux tôles épaisses solidement ancrées qui pénètrent l'une dans l'autre grâce à des découpes conjuguées en forme de dents de peigne ou de dents de scie. Il permet des souffles de 25 à 550 mm.

■ Le **joint en accordéon** est composé de bandes transversales articulées entre elles et glissant sur un guide. Il autorise de grandes déformations dépassant un mètre.

5.2.1 Dispositifs de visites

La nécessité d'effectuer des visites périodiques de surveillance et des travaux d'entretien des ponts oblige à prévoir des installations de visite, offrant l'accès à toutes les parties de l'ouvrage. Trois principes répondent à cet objectif :

- des **passerelles fixes internes** installées dans la poutraison (figure 43a) ;
- des **passerelles mobiles** motorisées qui cheminent sur des voies de roulement installées sur toute la longueur de l'ouvrage (figure 43b). Des éléments rétractables et repliables permettent l'accès extérieur et sous les parties en encorbellement ;
- le **véhicule spécialisé** avec nacelle télescopique est une solution économiquement intéressante lorsqu'elle peut couvrir un grand nombre d'ouvrages.

5.3 Protection anticorrosion

On se limite ici à rappeler que l'efficacité de la protection anticorrosion dépend non seulement de la qualité des produits et du soin apporté à leur mise en œuvre, mais aussi, et pour une part importante, de la conception même de la structure. Pour une meilleure exécution des travaux, le projeteur doit s'attacher à rendre toutes les zones accessibles au peintre. Il doit veiller à éliminer toute rétention d'eau par un drainage approprié et éviter les angles morts susceptibles d'accumuler des saletés gorgées d'humidité. Une bonne ventilation naturelle des zones semi-fermées, telles que les abouts de tabliers sur culée, contribue grandement à repousser l'attaque de la corrosion.

5.4 Autres équipements

Les **dispositifs de retenue**, le **système d'évacuation des eaux**, les **corniches** et le **revêtement de chaussée** sont traités dans l'article *Conception des ponts* du présent traité.

5.5 Intégration des équipements dans la conception

Si la conception globale d'un ouvrage est d'abord déterminée par les conditions fonctionnelles et naturelles du site, elle doit aussi intégrer les contraintes diverses générées par les équipements :

- les contraintes géométriques liées à l'encombrement des équipements et à leur implantation dans la structure (renforts, ancrages nécessaires, accessibilité...) ;
- les contraintes mécaniques, à savoir la prise en compte des efforts (passage des essieux sur les joints de chaussée, chocs sur les

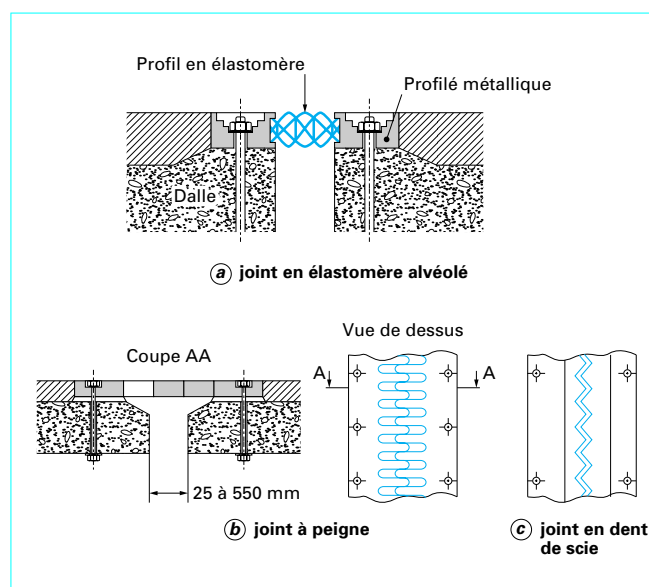


Figure 42 – Joints de chaussée

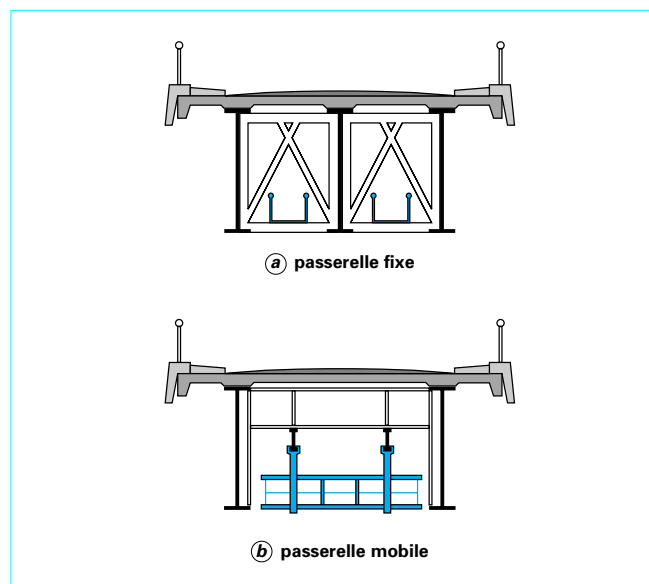


Figure 43 – Passerelles de visite

dispositifs de retenue, transfert des charges sur les appareils d'appui...) et la reprise par des structures secondaires résistantes ;

— les contraintes esthétiques : harmoniser par exemple le dessin de la corniche et du garde-corps avec le reste de l'ouvrage et avec le site ;

— les contraintes de maintenance : pour assurer l'inspection, l'entretien ou le remplacement des équipements, prévoir des facilités d'accès en réservant les espaces suffisants.

La prise en compte de tous ces facteurs ne peut que favoriser le bon déroulement du projet.

6. Procédés de construction

6.1 De l'usine au chantier

Pour mieux comprendre cette discipline, il faut avoir présent à l'esprit que la construction d'un pont métallique associe deux activités aux contraintes différentes : une activité industrielle en usine et une activité de travaux publics sur le chantier ; chacune couvrant la mise en œuvre de pièces volumineuses et lourdes. Il s'agira de concilier les exigences de l'une et de l'autre.

Le procédé de construction au chantier est dicté par les données naturelles de la brèche à franchir. Joint aux données fonctionnelles du projet, il oriente la conception de l'ouvrage ; et pour les franchissements exceptionnels, il en devient la composante principale.

En amont, la fabrication en usine vise à mettre à la disposition du chantier des éléments de tablier les plus grands et les plus achevés possible.

Entre l'usine et le chantier, la voie empruntée (route, rail, eau) pour l'acheminement des pièces fixe les dimensions et le poids maximal des éléments préfabriqués.

La conception d'un pont ne peut donc être conduite et validée en l'absence d'une étude complète de toute la chaîne de construction.

Du point de vue des textes officiels, ces activités sont couvertes par le fascicule 66 du CCTG [24].

6.2 Montage des tabliers métalliques

Parmi les travaux entrant dans la réalisation d'un pont, le montage est une activité essentielle. Il a une part influente sinon déterminante sur la conception initiale. Il représente un poste de dépenses important et sujet à dérapage si les études portant sur les méthodes et la conception des outils et installations spécifiques ont été insuffisamment développées.

Mais surtout, le montage met en cause la sécurité et la capacité résistante finale des sections de l'ouvrage. Le projeteur doit donc intégrer les phases de montage dans le calcul de l'ouvrage au stade du dimensionnement et des vérifications aux états limites ultimes d'équilibre et de résistance en ne perdant jamais de vue que :

- les charges et surcharges de la phase de montage ont la particularité d'être toujours atteintes (poids mort de la structure, poids des engins...), voire quelquefois dépassées à la suite d'aléas (inadvertance, charges sous-évaluées, tassements différentiels d'appuis provisoires, mauvais calage, dilatations thermiques empêchées...) ou de défaut de construction, au contraire des charges en exploitation qui ont un caractère aléatoire très net, notamment dans les grandes portées ;
- pendant son montage, l'ouvrage change constamment d'état et de position. Il n'atteint d'ailleurs sa pleine et entière sécurité qu'à la fin du montage, lorsqu'il est sur ses appuis définitifs ;
- les cas de charges de montage développent dans certaines sections du tablier des sollicitations nettement plus défavorables que les cas de surcharges de service : par exemple, un montage en encorbellement amène des efforts dimensionnants pour les sections sur appuis.

Les procédés de montage des ponts ont tous en commun de faire appel à des techniques de déplacement de pièces volumineuses et lourdes. Il convient donc de manipuler les charges de montage et de définir le schéma statique de calcul avec prudence et réalisme. Les plans et les procédures de montage développés par le bureau des méthodes sont des documents majeurs qui ont pour but de détailler les séquences des opérations, de mentionner les précautions à prendre, dresser la liste des contrôles... dans l'esprit du Plan d'assurance de la qualité.

Les accidents graves portés au passif des ponts sont toujours survenus lors d'opérations de montage à la suite de négligences.

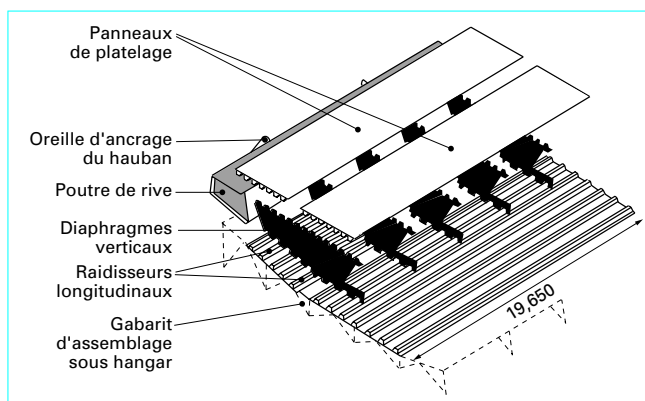


Figure 44 – Assemblage au chantier sur mannequin des éléments du caisson du pont de Normandie. Vue d'un demi-caisson

6.2.1 Assemblage du tablier au sol

Avant le montage proprement dit, il est nécessaire de procéder à l'assemblage des éléments résultant du découpage transversal et longitudinal (figure 44). Le travail se déroule sur une plate-forme aménagée à l'arrière d'une culée. Le degré d'équipement du chantier d'assemblage est fonction de l'importance des reconstitutions à faire. Le bipoutre se satisfait d'un plan de calage sur camarteaux et de grues mobiles, tandis qu'un caisson de grande largeur, acheminé en de nombreux morceaux, a besoin d'une installation spécifique plus importante, le plus souvent couverte et dotée de moyens de manutention et de déplacement de colis lourds.

6.2.2 Lançage

Construit totalement ou partiellement sur la berge, l'ouvrage est tiré ou poussé dans son alignement puis, au terme de ce parcours, il est pris en charge sur des vérins pour être descendu sur ses appuis.

L'usage de cette méthode suppose que soient remplies certaines conditions :

- la mise à disposition d'une plate-forme suffisamment longue en arrière de la culée et dans l'axe de l'ouvrage pour installer le chantier d'assemblage du tablier ;
- l'ouvrage doit être à alignement droit en plan ou courbe suivant un rayon constant. Un pont courbe à rayon très variable ou en S prononcé n'est a priori pas lançable ;
- l'intrados des poutres qui constitue le plan de roulement doit être droit, ce qui toutefois n'exclut pas certaines formes de ponts à hauteur variable ;
- lorsque les portées dépassent 100 m en travées continues, il est nécessaire de prévoir un appui complémentaire appelé « palée provisoire » ou un pylône haubané.

L'intérêt du procédé réside dans la facilité de montage de la charpente. Les travaux d'assemblage, de réglage et de soudage de l'ossature sont exécutés sur une plate-forme aménagée et dotée de moyens de manutentions et d'abris permettant une bonne maîtrise de la qualité et de la productivité.

6.2.2.1 Principes du lançage

Le lançage proprement dit est une opération qui consiste à faire rouler le tablier sur des appuis à galets ou à le faire glisser sur des patins acier inoxydable-Téflon. Il est tiré ou poussé par effet de rappel à l'aide d'une installation comprenant un treuil de traction, un treuil de retenue et les mouflages nécessaires (figure 45). L'avant du tablier est souvent prolongé par une structure légère appelée « avant-bec » et destinée à réduire les effets du poids en porte-à-faux.

Malgré cette simplicité apparente de l'opération, il ne faut jamais oublier que la poutre roule sur toute sa longueur et que chaque centimètre d'âme de poutre est soumis plusieurs fois au poinçonnement du train de galets auquel s'ajoutent les contraintes normales et de cisaillement.

Pour éviter tout risque d'effondrement de l'âme entraînant in fine une perte d'équilibre global de la structure, le lançage doit ętre sęrieusement contręlę :

- sur le plan thęorique : par un calcul pas à pas des ręactions d'appui prenant en compte la dęformę ręelle de la poutre intęgrant le profil en long, la contreflęche de fabrication, les variations de masse et d'inertie... et par la vęrification de la tenue de l'me dans chaque phase ;

- sur le plan pratique sur le chantier : par une surveillance rigoureuse du nivellement des appuis, de l'ętat de contreflęche ręsiduelle des poutres, voire par une pesęe des ręactions d'appui.

Par sa grande souplesse torsionnelle et sa relative souplesse flexionnelle, le bipoutre est assez tolęrant devant ces phęnomęnes. Ce n'est pas le cas d'un tablier en caisson fermę.

Transversalement, un systęme de guidage (figure 46) doit obliger le tablier à rester en ligne de façon que les plans de roulement des galets soient toujours maintenus dans le plan vertical des mes des poutres. Faute de quoi une sortie des galets du plan des mes entraęnerait une rotation de la semelle suivie d'une instabilitę par dęversement de la poutre.

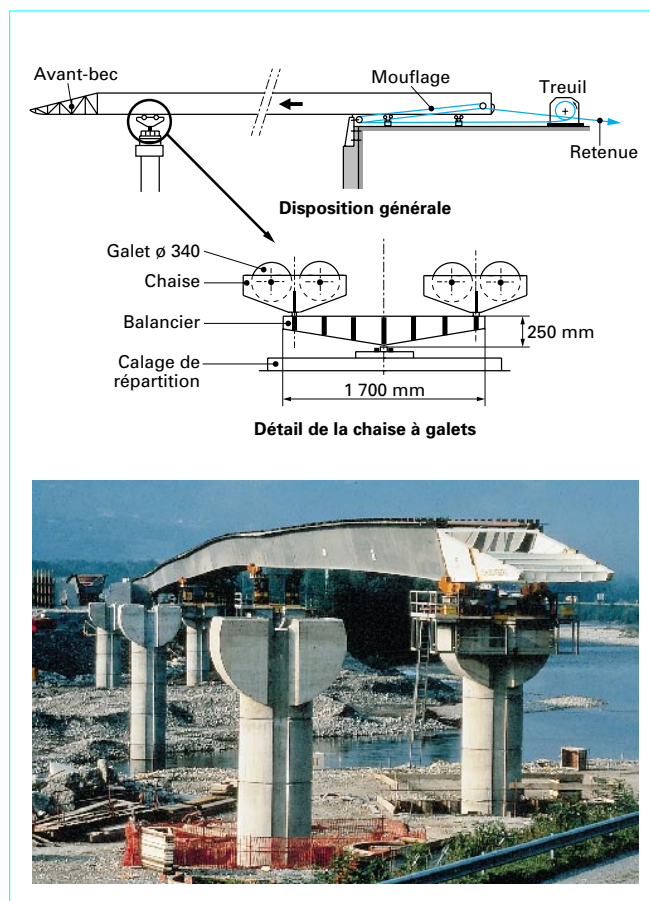


Figure 45 – Lançage d'un tablier

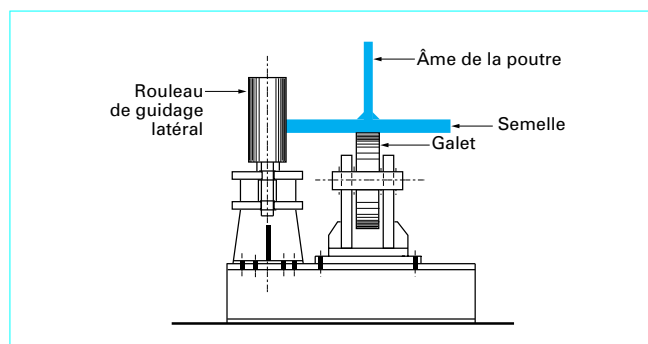


Figure 46 – Guidage latéral sur chaise à galets

Enfin, pour certains tabliers sensibles au gradient thermique horizontal et se dęformant dans le plan horizontal comme un bilame, il faut impérativement prendre des dispositions afin de ne pas s'opposer aux dęplacements transversaux en plaçant certains appuis sur un plan glissant.

6.2.2.2 Peut-on lancer un pont de hauteur variable ?

Oui, mais à la condition expresse que l'opération puisse se faire en limitant à deux le nombre des lignes d'appuis sur galets. En effet, dans cette configuration isostatique, le tablier repose toujours sur les deux lignes quelle que soit la position relative des appuis sur la courbe de l'intrados, sous ręserve que le centre de gravitę de l'ouvrage soit toujours entre les deux lignes d'appuis.

6.2.3 Lançage sur ponton flottant

C'est une méthode classique utilisęe pour le franchissement des voies d'eau navigables en travers desquelles il est impossible d'implanter une palęe provisoire. Après un lançage partiel amenant l'avant du tablier à l'aplomb d'un ponton flottant équipé d'une palęe solidement implantęe sur le pont, la prise en charge est effectuęe par dęballastage du ponton. Bien arrimé à la palęe, le tablier est acheminé en douceur au travers de la voie d'eau par treuillage ętant porté à l'avant par le support flottant pendant que l'arrière roule sur une ou plusieurs lignes de galets (figure 47). La charge croissante sur le ponton provoque un enfoncement de celui-ci dont la simple mesure permet de calculer la valeur de la ręaction par la poussęe d'Archimęde. Selon la procédure de lançage, il peut ętre demandé de ręduire ou d'augmenter la charge en jouant sur l'ętat du ballastage.

Cette technique est pleinement justifięe pour lancer une travęe indépendante, mais elle est ęgalement utilisęe pour des ouvrages à travęes multiples. Dans ce cas, le lançage sur ponton au-dessus de l'eau est associé à un lançage classique sur appuis multiples à galets disposés sur piles et sur plate-forme en arrière de la culęe.

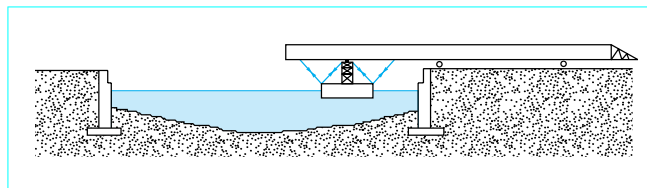


Figure 47 – Lançage sur ponton flottant

6.2.4 Levage à la grue

Il convient parfaitement aux ouvrages de faibles et moyennes portées, pour autant que l'accès par le dessous ou sur le côté soit possible, non seulement pour l'acheminement des tronçons de charpente mais aussi pour l'implantation et le calage de la grue. Les éléments sont levés en tronçons (indépendants ou jumelés) dont le poids et les dimensions sont ajustés aux capacités de levage de la grue. Une vérification au déversement permet de fixer les points d'élingage. La détermination de la puissance de levage nécessaire intègre de nombreuses données : la masse et les dimensions de la pièce, la portée et la hauteur de levage sous crochet, l'emplacement et l'espace nécessaire à l'évolution de la grue, enfin la nature du terrain. Il est donc essentiel que l'étude de faisabilité soit faite très tôt, surtout pour les gros levages qui nécessitent des grues puissantes, encombrantes et coûteuses, rares, peu disponibles sur le marché et qui doivent être réservées longtemps avant le démarrage de l'opération.

Pour réduire la durée de l'opération de levage et de location de l'engin, les poutres ou tronçons de tabliers sont posés provisoirement sur la partie porteuse au moyen de « corbeaux » d'appui ou d'un système de clamage (dispositif de positionnement et de réglage). Après le réglage fin de la géométrie basé sur le montage à blanc en atelier et sur les lignes de références, les joints sont boulonnés ou soudés en position.

6.2.5 Levage par bigue flottante

Extrêmement performant en capacité de levage, ce procédé est réservé aux ponts situés au-dessus de plans d'eau navigables (figure 48). Il vise à la mise en place d'éléments caractérisés par leur poids et leur grande longueur pour éviter le maximum de joints en l'air.

Sur fleuve navigable, la capacité de levage des bigues fluviales, bien que limitée par les gabarits des écluses à franchir sur le parcours, permet la mise en place rapide de grosses sections de tablier (de 200 à 300 t et de 50 à 100 m) moyennant une très courte interruption de la navigation.

Sur plan d'eau ouvert à la mer, on utilise les bigues maritimes dont les capacités vont de 500 t couramment à 3 000 t pour les plus grosses. Au Japon, la construction des ponts en site maritime (ponts à poutre, en arc, haubanés et suspendus de très grandes portées) fait usage de bigues flottantes, souvent groupées par paires pour en accroître la capacité. Ainsi, le pont *bow-string* à double tablier de Kôbe (8 050 t – 235 m) a-t-il été manutentionné par un ensemble de 6 bigues accouplées deux par deux et développant une capacité totale de 8 223 t.

6.2.6 Montage par encorbellement

Ce procédé, appelé aussi « montage à l'avancement », implique l'exécution en l'air de nombreux joints, ce qui rend l'opération longue et coûteuse. Il est donc réservé aux situations exceptionnelles rencontrées dans la construction des ponts haubanés de grandes portées, ou à l'occasion du montage de ponts à poutres pour lesquels le levage ou le lançage sont écartés.

L'ouvrage est construit à partir d'un appui par tronçons de 15 à 20 m. La progression se fait en console, avec l'aide du haubanage définitif ou d'un haubanage provisoire, jusqu'à la jonction avec la partie de tablier montée symétriquement (figure 49).

La mise en place des éléments s'effectue au moyen d'engins de levage simples appelés « derricks » ou chèvre. L'engin doit être léger afin de ne pas trop augmenter le moment de flexion de la console ; pour ce faire, le contrepoids est avantageusement remplacé par un ancrage arrière de l'engin dans le tablier.



Figure 48 – Levage à la bigue flottante (doc. CFEM)



Figure 49 – Montage par encorbellement du pont de Normandie (doc. SETRA/G. Forquet)

L'approvisionnement des éléments se fait comme suit :

- par le dessous si la voie franchie est une voie d'eau autorisant l'aménée des colis sur barge ; une chèvre suffit comme moyen de levage (figure 50) ;
- par l'arrière avec un transport des pièces sur chariots depuis la culée ; il faut alors un engin de levage approprié pour prendre la pièce en arrière et l'amener en avant (grue ou derrick haubané).

6.2.7 Hissage

Utilisée dans des cas exceptionnels, cette méthode consiste à lever sur une grande hauteur tout ou partie du tablier (figure 51). L'opération suppose la possibilité d'amener le tronçon sous l'ouvrage par voie d'eau, ou de le construire aisément au niveau du sol. Les appareils de hissage sont installés sur des parties d'ouvrage déjà construites et en console. On utilise la technique du levage par câbles tirés par treuils ou par vérins.

Le procédé est séduisant car il offre les avantages d'une mise en place rapide qui n'entraîne pas d'encombrement sur le site, en tout cas sur un laps de temps très court, et d'une exécution de l'ouvrage, avant hissage, dans des conditions favorisant le rendement et la qualité.

Ce procédé vise des tronçons de tablier de 1 000 à 3 000 t et de longueur allant de 100 à 300 m.

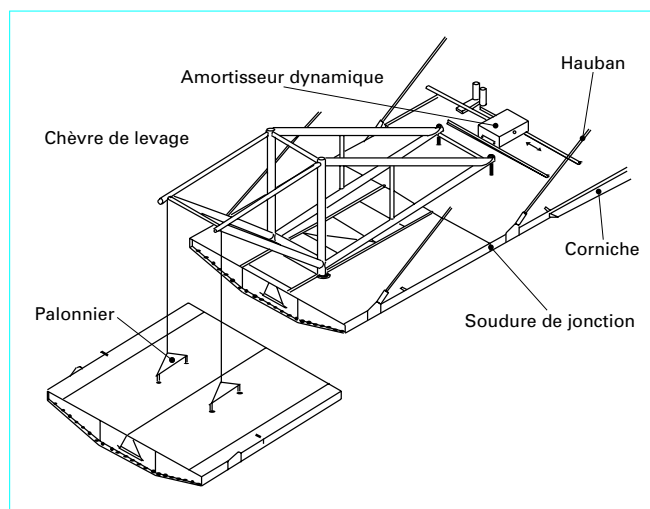


Figure 50 – Chèvre de levage ancrée



Figure 51 – Hissage de la travée principale du pont de Cheviré à Nantes (doc. OTUA)

6.2.8 Montage des arcs

Plusieurs méthodes ont été développées au fil du temps :

- montage par blondins d'éléments légers (figure 52) ;
- construction de l'arc en deux moitiés et dans une position « verticale » le long de chaque pile rehaussée d'un mât, puis basculement de chaque demi-arc par pivotement autour de sa base et clavage (figure 53) ;
- construction en position par encorbellement : l'arc est maintenu de proche en proche par un haubanage monté sur un mât auxiliaire, rappelant la construction sur cintre, mais à l'envers ;

— une autre méthode consiste à monter simultanément arc et tablier et à stabiliser la construction par l'addition de barres ou câbles diagonaux provisoires entre les pilettes (figure 54).

Dans les deux cas, après achèvement de la construction, l'enlèvement des haubans ou des diagonales provisoires provoque une redistribution des efforts dans l'arc qu'il convient de conjuguer avec l'effort de clavage pour déterminer les sollicitations d'ensemble. Notons l'intérêt qu'il y a à pouvoir jouer sur la tension préalable des haubans afin d'équilibrer au mieux, si nécessaire, les efforts de compression et de flexion dans l'arc en phase finale.

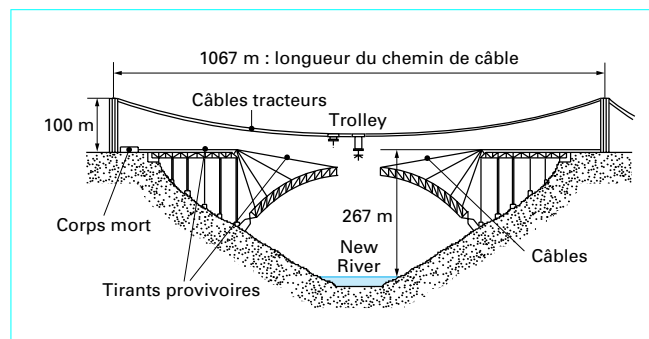


Figure 52 – Montage d'un arc par encorbellement et blondin. Pont de New River

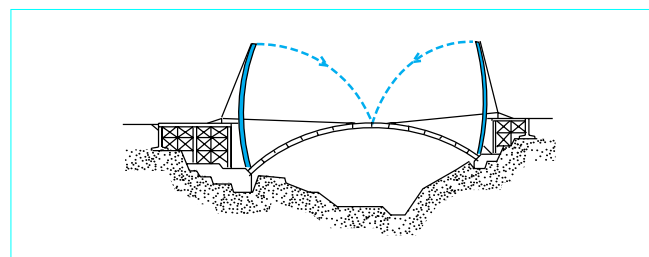


Figure 53 – Montage par basculement

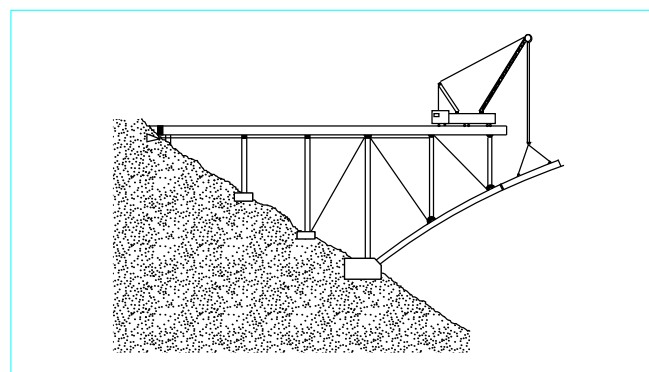


Figure 54 – Montage à l'avancement par triangulation provisoire

Ponts métalliques

par **Jean-Pierre DUCOUT**

Ingenieur de l'École nationale d'arts et métiers - CHEM

Professeur au Centre des hautes études de la construction (CHEM)

Chef de la division Ouvrages d'art à l'Office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA)

Bibliographie

CALGARO (J.-A.) et VIRLOGEUX (M.). – *Projet et construction des ponts. Généralités, fondations, appuis, ouvrages courants*. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1991.

BERNARD-GELY (A.) et CALGARO (J.-A.). – *Projet et construction des ponts. Conception des ponts*. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1994.

CIOLINA (F.). – *Construction métallique. Ouvrages d'art*. Éditions Eyrolles, 1979.

GRATTESAT (G.). – *Conception des ponts*. Éditions Eyrolles, 1978.

Stahlbau Handbuch. Band 2. Stahlbau-Verlags-GmbH Köln.

WALTHER (R.), HOURIET (B.), ISLER (W.) et MOIA (P.). – *Ponts haubanés*. Presses Polytechniques Romandes. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1985.

Les ponts mobiles. AFPC, 1991.

Ponts mixtes acier-béton bipoutres. Guide de conception, SETRA, octobre 1985.

Calculs et conception des ponts métalliques. Bulletin technique n° 5. SETRA, juillet 1970.

Montage des ponts métalliques. Bulletin technique n° 8. SETRA, novembre 1973.

Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées. Conception et calcul. SETRA et SNCF, 1995.

Construction mixte acier-béton. IABSE Symposium. Rapports AIPC, vol. 60, Bruxelles, 1990.

Interaction between Construction Technology and Design. IABSE Symposium. Rapports AIPC, vol. 64, Leningrad 1991.

Symposium International Ponts métalliques. CECM, 1992.

Ponts suspendus et à haubans. Proceedings. Conférence Internationale AIPC de Deauville. Publications AFPC, vol. 1 et 2, octobre 1994.

Bulletins Ponts métalliques. OTUA.

Bulletins de liaison « Ouvrages d'Art ». SETRA.

La construction du pont de Seyssel. Les ponts à haubans de moyenne portée. Bulletin technique AFPC, 1986.

FOUCRIAT (J.-C.) et ROCHE (J.). – *Conception et calcul des éléments transversaux dans les ponts-routes mixtes*. Bulletin Ponts métalliques n° 11, OTUA, 1985.

Statistiques. Construction des ouvrages d'art. SETRA, 1976 à 1995.

Règlements

Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art. Fascicule 61 du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicables aux marchés de l'État :

- Titre II. *Programme de charges et épreuves des ponts-routes*, 1981 ;

- Titre V. *Conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier*, 1978 ;

- *Règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton*. Circulaire n° 81-63 du 28 juillet 1981.

Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal ou mixtes. Livret 2.01 du Cahier des Prescriptions communes applicables aux marchés des ouvrages d'art de la SNCF, janvier 1989.

Eurocodes (concernant les ponts) :

- *EC1 : Bases des calculs et Actions sur les constructions*. Charges pour les ponts (vol. 3) ;

- *EC3 : Conception et calcul des constructions en acier*. Règles générales et règles pour les bâtiments (partie 1). Ouvrages d'art (partie 2) ;

- *EC4 : Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton*. Règles générales et règles pour les bâtiments (partie 1). Ouvrages d'art (partie 2) ;

- *EC8 : Constructions parasismiques*. Règles générales et règles pour les bâtiments (partie 1). Ouvrages d'art (partie 2) ;

Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier. Fascicule 66 du CCTG, 1994 ;

Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion. Fascicule 56 du CCTG.