

Procédés Généraux de Construction

# LES PONTS EN BÉTON



CRUCHET Nicolas

DELAGE Luiza

MARQUES Anthony

SADI Bilal



## **RESUME**

Ce rapport traite des différents types de ponts en béton. Tout d'abord, nous avons référencé les ponts de petite à moyenne portée en béton armé en expliquant leur domaine d'utilisation et leur fonctionnement. Il nous a ensuite paru important d'aborder les équipements techniques d'un pont avant d'orienter notre rapport sur une technique de construction de pont particulière : la construction par encorbellements successifs.

**Mots clés :** caisson, chevêtre, cintre, encorbellement, entretoise, équipage mobile, fléau, gaine, hourdis, piédroit, tablier, voussoir.

## LEXIQUE

**Ame** : partie relativement mince, verticale ou légèrement inclinée d'une poutre ou d'un caisson.

**Ancrage de câble de précontrainte** : extrémité d'un dispositif de précontrainte, appliquant la force de précontrainte au béton.

**Batardeau** : ouvrage de protection, provisoire ou définitif, permettant de travailler à l'air libre plus bas que le niveau de l'eau pour la réalisation en particulier de fondations d'ouvrage.

**Bossage** : saillie aménagée à la surface d'une pièce en béton, permettant d'assurer l'ancrage de câbles de précontrainte.

**Caisson** : structure en forme de tube rectangulaire ou trapézoïdal, monocellulaire ou multicellulaire composée d'âmes et de membrures (hourdis) supérieures et inférieures.

**Chevêtre** : élément horizontal situé en partie supérieure d'une pile et servant à l'appui du tablier d'un pont.

**Cintre** : ouvrage provisoire permettant de supporter des structures en phase de construction.

**Clavage** : partie d'ouvrage où est réalisée l'opération de clavage (voussoir de clavage).

**Corbeau** : saillie sur une paroi, destinée à soutenir une dalle ou une poutre.

**Corniche** : élément de superstructure destiné à couronner le bord d'un ouvrage.

**Elégissement** : évidemment pratiqué dans une structure (dalle, poutre, ...) pour l'alléger.

**Encorbellement** : partie d'une structure en porte à faux.

**Entretoise** : élément transversal permettant de rigidifier une structure à poutres et limiter les déformations de flexion et de torsion.

**Fléau** : partie d'ouvrage (construit par encorbellements successifs) constituée par deux consoles équilibrées, construites de part et d'autre d'un appui intermédiaire.

**Gaine** : tube cylindrique entourant un câble de précontrainte.

**Gargouille** : dispositif d'évacuation des eaux pluviales, traversant le tablier de telle sorte qu'elles ne coulent pas le long des parois de l'ouvrage.

**Gousset** : renforcement triangulaire de l'angle de deux pièces perpendiculaires.

**Hauban** : câble généralement métallique, rectiligne, oblique, supportant un tablier d'ouvrage.

**Hourdis** : dalle en béton armé appuyée sur la totalité ou la quasi-totalité de son pourtour. On distingue le hourdis supérieur et le hourdis inférieur.

**Injection** : action d'injecter du coulis (de béton ou de ciment) dans une gaine ou des vides.

**Piédroit** : mur vertical ou légèrement incliné supportant la traverse supérieure d'un pont-cadre, d'une voûte ou d'un portique.

**Tablier** : partie d'un pont reposant sur les appuis (piles ou culées) et servant au franchissement.

**Voussoir** : élément d'un ouvrage en béton précontraint construit par encorbellements successifs.

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>I- Les différents types de ponts de petite à moyenne portée</b> .....	<b>6</b>
I-1) Les ponts-cadres et portiques [SETRAPCP] [TDP 2015] [LP 2015] [DTP 2015].....	6
I-2) Les ponts à poutres [PC 2015] [IPC 2015] [DTP 2015] [LP 2015] .....	7
I-2-a) Les principaux systèmes structuraux.....	8
I-2-b) Sections transversales les plus courantes .....	10
I-3) Les ponts-dalles [IPC 2015] [SETRAPD] [LP 2015] [DTP 2015] .....	10
I-3-a) Sections transversales les plus courantes .....	11
<b>II- Les équipements techniques</b> .....	<b>13</b>
II-1) Appuis .....	13
II-1-a) Eléments d'appui [TDP 2015] .....	13
II-1-b) Appareils d'appui .....	14
II-2) Continuité du franchissement [TDP 2015] .....	16
II-2-a) Dilatation du tablier .....	16
II-2-b) Tassement du remblai d'accès .....	17
II-3) Etanchéité et drainage [ALL 1987] [TDP 2015] .....	17
II-3-a) Etanchéité .....	17
II-3-b) Drainage .....	18
II-4) Sécurité .....	18
II-4-a) Les garde-corps .....	19
II-4-b) Les glissières de sécurité .....	19
II-4-c) Les barrières de sécurité .....	20
II-4-d) Les grilles centrales .....	20
II-5) Esthétique [APC 2015] .....	20
<b>III- Les ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs</b> .....	<b>22</b>
III-1) Domaine d'utilisation [LAM 2010] .....	22
III-2) Les différentes méthodes de mise en œuvre [F0308] .....	22
III-3) Les différents moyens de mise en œuvre [F0308] .....	24
III-3-a) Voussoirs préfabriqués.....	24
III-3-b) Voussoirs coulés en place.....	29
III-4) Le fonctionnement mécanique .....	31
III-4-a) Principe de la précontrainte [BEN 2000] [LAM 2010] .....	31
III-4-b) Câbles de fléau [F0308] .....	32
III-4-c) Stabilité des fléaux [F0308] .....	33
III-4-d) Câbles de continuité [F0308] .....	35
<b>Conclusion</b> .....	<b>38</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>39</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>40</b>

## INTRODUCTION

Un pont est une construction qui permet de franchir un obstacle comme un cours d'eau, une voie de communication, ou une vallée, en passant par-dessus cette séparation.

Concernant l'évolution de la technologie des ponts, historiquement, le matériau de construction de base était la pierre. Puis, quand il a fallu construire une plus grande quantité de réseaux de communication (pendant la Révolution industrielle avec l'essor des chemins de fer, des routes et donc des ponts), de nombreux progrès ont permis le développement des ponts en béton armé puis précontraint, qui ont été rendus possibles avec l'introduction de l'acier.

C'est le matériau utilisé et le paysage (portée, hauteur, ...) où doit être implanté l'ouvrage d'art qui définissent les différents types et formes de ponts et donc les différents modes de conception et de construction à utiliser. Notre étude sera donc articulée ainsi.

Dans un premier temps, nous aborderons les différents types de ponts, à savoir les ponts-dalles, les ponts à poutres, les passages inférieurs à cadre fermé et en portique ouvert.

Dans une seconde partie, nous traiterons des différents équipements techniques que l'on rencontre habituellement sur les ponts.

Enfin, dans une dernière partie, nous détaillerons le procédé de construction d'un pont en béton précontraint construit par encorbellements successifs.

## I- Les différents types de ponts de petite à moyenne portée

Dans cette première partie, nous allons traiter des ponts de petite et moyenne portée. En d'autres termes, nous allons parler des ponts en béton armé, qui est le matériau le plus utilisé pour ce type d'ouvrage.

Les ponts en béton armé ne sont pas seulement économiques dans l'exécution, mais aussi en service car ils n'exigent pratiquement pas d'entretien lorsque le béton est fabriqué convenablement. En outre, l'expérience montre qu'ils se comportent bien sous les surcharges du trafic et qu'ils ont une sécurité élevée.

Actuellement, le béton armé est essentiellement réservé afin de réaliser les ponts de portée moyenne (jusqu'à 40 m environ). Dans les autres domaines, il est largement supplanté par le béton précontraint.

### I-1) Les ponts-cadres et portiques [SETRAPCP] [TDP 2015] [LP 2015] [DTP 2015]

Les ponts-cadres et portiques sont apparus dans les années 1960 et depuis cette époque, ce type d'ouvrage est largement utilisé. Ce sont des structures monolithiques en béton armé en forme de U renversé. Les « jambes » du U constituent les piédroits et sont reliées par la traverse qui fonctionne comme tablier. L'ouvrage est complété par des murs de tête qui soutiennent des remblais.

Ils sont plutôt utilisés pour les franchissements jusqu'à une vingtaine de mètres, leur simplicité de forme et leur robustesse les rendent bien adaptés et compétitifs dans cette gamme de portées. Lorsque la largeur de la brèche franchie est plus importante, il est avantageux de chercher à implanter un appui intermédiaire afin de réduire la longueur des travées et l'épaisseur du tablier.

Ces ouvrages sont normalement coulés en place. Cependant, leur conception très simple est adaptable à une préfabrication de l'ensemble ou à des parties de la structure. Dans leurs grandes majorités, ces ouvrages ne nécessitent ni joints de chaussée ni appareils d'appui (détaillés par la suite), ce qui leur confère une grande facilité d'entretien.

Ce modèle de pont peut être séparé en deux types : les passages inférieurs à cadre fermé (PICF) et les passages inférieurs en portique ouvert (PIPO). L'ouvrage type PICF est un cadre fermé en béton armé reposant sur le sol de fondation par sa face inférieure. Il est complété par des murs de soutènement destinés à retenir les terres qui constituent le remblai de la plateforme (voir Figure 1). Le plan présent en Annexe 2 donne plus de détails sur ces éléments.

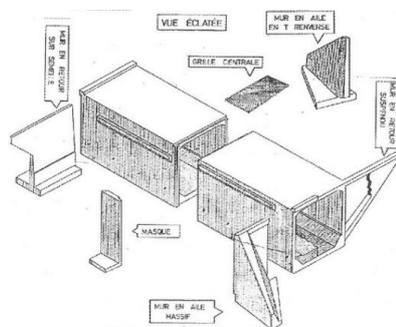


Figure 1 - Les différents éléments d'un PICF

Le PICF est utilisé dans le cadre de passages de cours d'eau ou de chemins modestes sous voie autoroutière. Lorsque cet ouvrage est utilisé comme un pont, il a l'inconvénient de nécessiter une déviation provisoire du cours d'eau pendant la phase de construction.

Les ponts-cadres sont établis sur radier, ce qui leur confère une très bonne portance, même sur un sol de qualité médiocre et d'une faible profondeur de fondation (la pression sur le sol est de l'ordre de 0,1 MPa). L'épaisseur constante conseillée de la dalle supérieure est de l'ordre de 1/25 de l'ouverture biaise (environ 40 cm).

Le deuxième modèle de structure est l'ouvrage type PIPO, qui consiste en un portique ouvert en béton armé avec une dalle encastrée sur piliers. Il est complété par des murs de soutènement destinés à retenir les terres qui constituent le remblai de la plateforme (voir Figure 2). Comme le PICF, il ne comporte ni appareils d'appui, ni joints de chaussée.

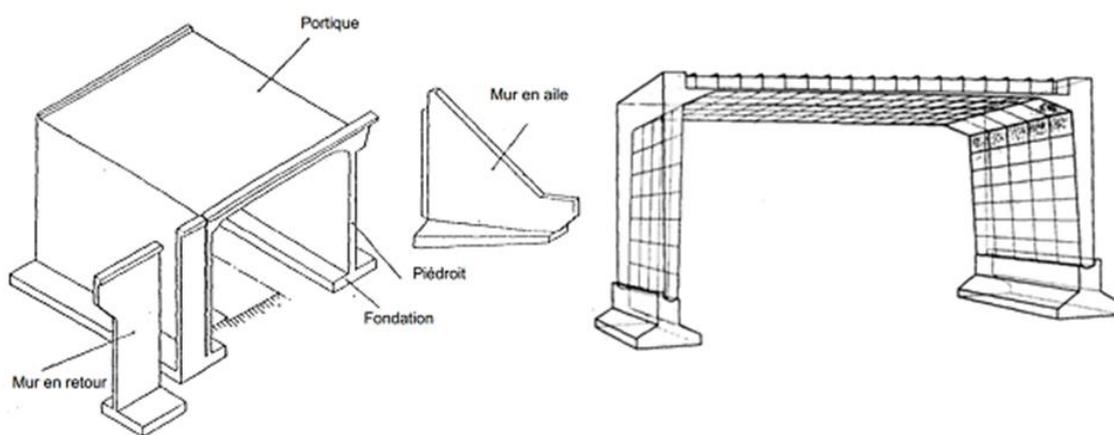


Figure 2 - Les différents éléments d'un PIPO

Le domaine d'emploi du portique ouvert se situe entre 10 et 20 m. Comme le PICF, il est utilisé dans le cadre de passages de cours d'eau ou de chemins modestes sous voie autoroutière avec une portée plus importante (travée de 20 m). De plus, il ne nécessite pas de déviation provisoire du cours d'eau lorsque cet ouvrage est utilisé comme franchissement de cours d'eau.

Toutefois, à la différence du type PICF, cet ouvrage nécessite un bon sol pour une fondation superficielle de bonne qualité (pression admissible supérieure à 0,3 MPa) ou des fondations sur pieux verticaux ou inclinés.

L'épaisseur constante conseillée de la dalle supérieure est de l'ordre de 1/25 de l'ouverture biaise (40 à 80 cm).

## I-2) Les ponts à poutres [PC 2015] [IPC 2015] [DTP 2015] [LP 2015]

Les ponts à poutres en béton armé sont les ponts les plus répandus pour les petites portées. Une des explications du succès de ce type de pont serait que sa conception est extrêmement simple : il consiste en un tablier porté par une ou plusieurs poutres en bois, en acier ou en béton armé, car ces matériaux résistent bien à la flexion.

Sur les ponts à poutres, ne sont pratiquement exercées que des forces verticales : poids de la superstructure, charges liées au trafic et actions des appuis. Les forces horizontales, créées par le freinage des véhicules ou par les effets du vent, sont nettement moins importantes. En effet, comme montre la figure ci-après, un pont à poutres est formé de parties

en traction et de parties en compression. Pour cette raison, le matériau qui convient le mieux à ce type de pont est le béton armé, car il résiste bien à ces deux types d'efforts.



Figure 3 - Répartition des efforts dans un pont à poutres

Quand on choisit, en fonction du coût, de l'utilisation ou de la configuration du site, d'édifier un pont en poutre, on atteint vite la limite de portée. En effet, si l'on veut allonger la portée, on doit augmenter la section des poutres pour empêcher leur fléchissement, ce qui augmente le coût et accroît le poids propre de la structure. Pour remédier à ce problème, on distingue quatre solutions :

- Utiliser du béton précontraint ;
- Recourir aux appuis intermédiaires pour que le tablier soit constitué de plusieurs travées juxtaposées ;
- Incliner les piles pour obtenir un pont à béquilles dont les appuis se rapprochent de ceux d'un pont en arc ;
- Utiliser des poutres en treillis pour augmenter la portée sans augmenter excessivement le poids propre de la structure.

De plus, si la longueur du pont et les variations de températures sont trop importantes, l'utilisation de joints de chaussée s'avère nécessaire.

## I-2-a) Les principaux systèmes structuraux

### *Poutres simplement appuyées*

Dans ce système, le processus de construction habituellement utilisé est à base de poutres préfabriquées. Comme on peut le voir avec la Figure 4, le pont est constitué de poutres simplement appuyées avec une ou plusieurs travées.

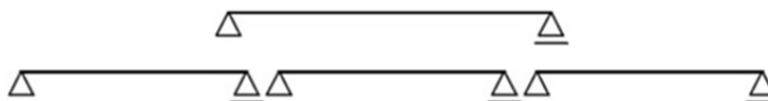


Figure 4 - Modèles mécaniques des poutres d'un pont à poutres

La dalle, quant à elle, est continue (voir Figure 5). Cela permet d'obtenir une bonne distribution des efforts sur les appuis dus à des actions horizontales telles que les actions de freinage.

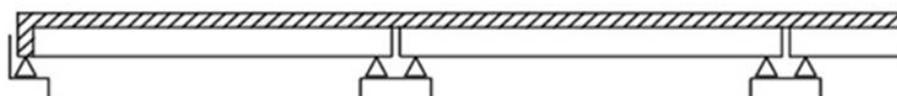


Figure 5 - Dalle continue sur poutres simplement appuyées d'un pont à poutres

### *Poutres en console*

Ce type structural permet une meilleure répartition des forces internes, car par l'introduction de moments négatifs au niveau des appuis, il y aura une réduction des moments positifs au milieu de la travée. La longueur de console doit être fixée afin d'obtenir une bonne distribution des efforts, il faut toutefois tenir compte des conditions topographiques. Dans la phase de préconception, on peut adopter une longueur de console initiale comme étant environ 15 à 20 % de la longueur du pont. Nous devons éviter les longueurs beaucoup plus élevées que ce pourcentage afin de ne pas introduire des vibrations excessives aux extrémités du pont.

### *Poutres continues*

Lorsque la longueur du pont peut être subdivisée en plusieurs parties, le système de poutres continues apparaît comme une solution naturelle (voir Figure 6).



Figure 6 - Modèle mécanique d'une poutre continue

S'il n'y a pas de restrictions d'ordre urbain, topographique ou constructif, il faut envisager des travées extérieures environ 20 % plus petites que les travées intérieures, de sorte que le maximum des moments de flexion soit approximativement équivalent, conduisant à une meilleure répartition des sollicitations.

La distribution des moments fléchissant peut être améliorée par la modification des moments d'inertie à l'aide de sections variables dans une travée. L'augmentation du moment d'inertie à proximité des appuis se traduira par une augmentation du moment négatif de ces sections et par une diminution du moment positif dans les sections centrales des travées, ce qui permettra une réduction de la hauteur des sections dans ces positions (principe des goussets dans un PICF ou un PIPO).

D'après la Figure 7, on observe la répartition des moments fléchissant dans une poutre bi-encastée avec un moment d'inertie constant et un moment d'inertie variable (supérieur au niveau des appuis). Nous constatons alors une réduction significative du moment fléchissant à mi-portée de la poutre à inertie variable par rapport à celle à inertie constante.

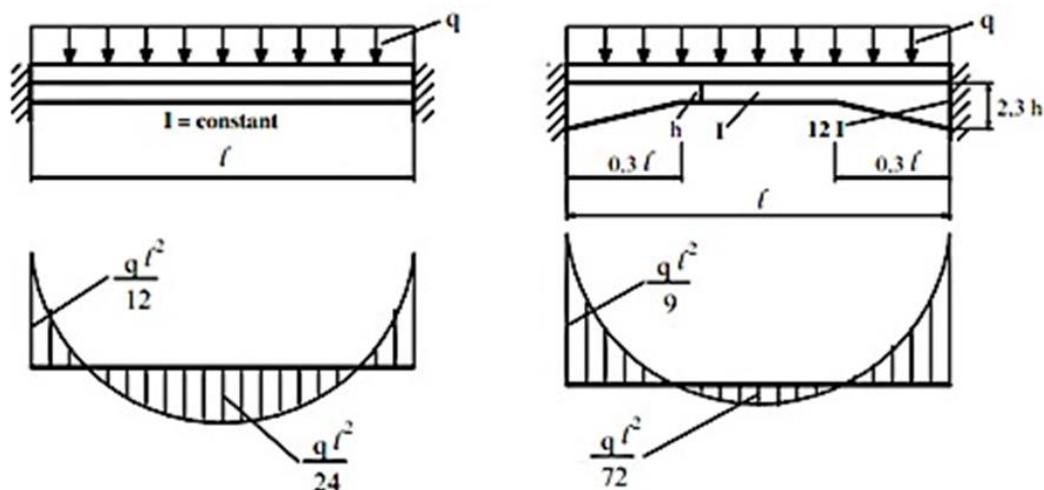


Figure 7 - Moment fléchissant d'une poutre bi-encastée à inertie constante et variable

## I-2-b) Sections transversales les plus courantes

### *Poutres en T*

Les poutres en T sont préconisées pour les situations où il y a un moment positif très élevé, car dans ce type de section, la zone de compression, formée par la table supérieure, est très importante et par conséquent résiste bien à ces efforts.

### *Poutres en caisson*

Ce type de section peut être comparé à une section en T associée à une dalle inférieure (voir Figure 8). Cette dalle inférieure, en plus d'améliorer la distribution transversale des efforts, provoque un comportement semblable à une section en I. Ainsi, l'utilisation de cette section est appropriée pour les poutres continues, en particulier celles qui sont précontraintes. En raison de sa grande rigidité à la torsion, les poutres en caisson sont plutôt indiquées pour les ponts courbes et pour les ponts droits avec des supports formés par un seul pilier isolé. Grâce à ces avantages par rapport au comportement structurel, ce type de section est l'un des plus employés actuellement, notamment pour les grandes portées.



Figure 8 - Section transversale d'une poutre en T et d'une poutre en caisson

## I-3) Les ponts-dalles [IPC 2015] [SETRAPD] [LP 2015] [DTP 2015]

Les ponts-dalles sont constitués dans le sens longitudinal, soit par une dalle pleine, soit par une dalle élagie à inertie constante à travée unique ou à plusieurs travées. L'épaisseur optimale de la dalle, qui dépend essentiellement de la répartition des travées et de la portée la plus longue de l'ouvrage, varie normalement de 0,45 à 1 m.

Dans la plupart des cas, les appuis d'extrémité sont appuyés sur des piles-culées enterrées dans les talus ; les travées de rive ayant pour seule fonction d'équilibrer le fonctionnement des travées principales et de franchir l'emprise du talus. Cette solution est à la fois plus économique et plus esthétique qu'une culée massive : l'ouvrage présente une silhouette beaucoup plus légère et n'encombre pas la perspective de la voie franchie.

Les ponts-dalles constituent en général une solution viable pour les franchissements des brèches de longueur variant entre 15 à 60 m, avec des portées unitaires maximales d'environ 25 m. Dans le cas où la dalle est en béton armé et en tenant compte de l'aspect économique, le domaine de portée se situe entre 7 et 15 m pour les ouvrages à une ou deux travées, et entre 6 et 18 m pour les ponts avec trois travées ou plus.

Ce type d'ouvrage consomme un peu plus de béton et d'aciers que les ponts à poutre. Par contre, l'utilisation d'autres matériaux et de la main d'œuvre est plus faible : leurs coffrages et cintres sont plus simples que pour les structures à poutres coulées en place. De plus, la main d'œuvre requise est moins importante et ne nécessite pas spécialement une qualification dans la mise en œuvre du ferrailage. Cela fait des ponts-dalles une structure facile et rapide à exécuter, ce qui conduit à un bas prix unitaire et ainsi ils deviennent une option très compétitive économiquement.

Un autre avantage de ce type de structure est qu'elle présente un comportement satisfaisant sous fissuration et une résistance élevée à flexion. Ces caractéristiques rendent les

dalles insensibles aux tassements différentiels d'appuis inférieurs ou égaux à 2 ou 3 cm. De plus, grâce à leur rigidité horizontale, les dalles peuvent résister sans trop de dommages aux chocs de véhicules lourds circulant sur la voie.

### I-3-a) Sections transversales les plus courantes

#### *Section en dalle pleine*

Ce type de section présente comme principale caractéristique la simplicité de mise en œuvre des coffrages, des armatures et du béton. En outre, la section transversale en dalle pleine assure une bonne distribution transversale des efforts.

La dalle pleine est plutôt appropriée pour les ponts de petite portée. Ils atteignent, exceptionnellement, des portées jusqu'à 20 m avec une seule travée, et des portées jusqu'à 30 m en travées continues avec variation de hauteur sur la longueur du franchissement.

Compte tenu de l'esthétique, il convient de privilégier les structures qui « cachent » l'épaisseur de la dalle ; par exemple, les sections (c) et (d), sur la Figure 9, sont meilleures du point de vue esthétique que les sections (a) et (b).

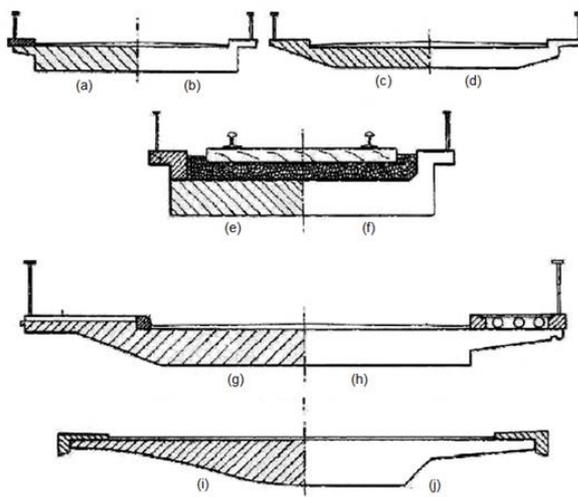


Figure 9 - Différentes sections en dalle pleine pour un pont dalle

Bien que ce type de section soit avantageux vis-à-vis de la mise en œuvre, il en est moins pour la quantité de béton utilisée d'où un poids propre relativement important.

#### *Section en dalle élégie*

La dalle élégie est une dalle coulée avec des réservations permettant de diminuer son poids propre (voir Figure 10). Ce type de dalle est nécessaire lorsque la hauteur de la section est de l'ordre de 60 cm ou plus. Il convient de noter que cette procédure va diminuer les avantages de la mise en œuvre, mais le bon comportement transversal n'est pas affecté.

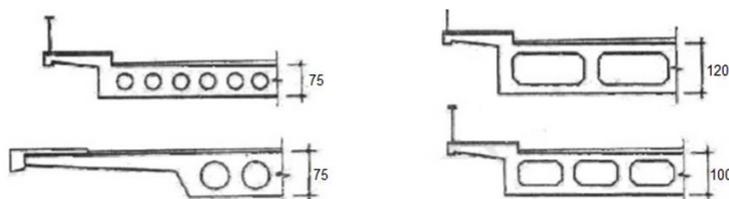


Figure 10 - Différentes sections en dalle élégie pour un pont dalle

Les dimensions recommandées pour les dalles élégies sont présentées sur la Figure 11. La largeur minimale des nervures est déterminée de sorte que l'on n'ait pas de difficultés dans le lancement et la consolidation du béton.

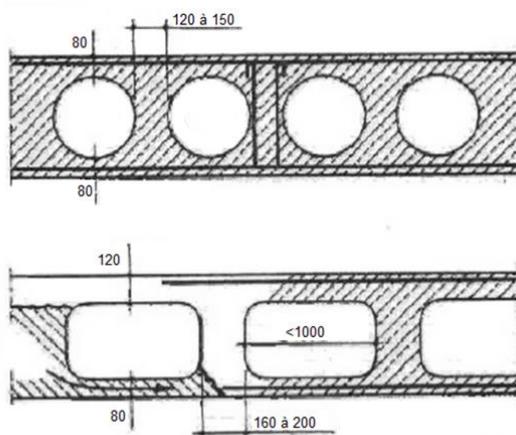


Figure 11 - Dimensions recommandées pour les réservations des dalles élégies

Les calculs des sollicitations de ce type de dalle sont réalisés, soit par la théorie des plaques orthotropes, soit par la méthode de Guyon-Massonnet.

## II- Les équipements techniques

### II-1) Appuis

#### II-1-a) Eléments d'appui [TDP 2015]

Les éléments d'appui ont pour rôle de transmettre au sol les actions provenant du tablier. Ils sont généralement en béton armé et sont constitués par les piles et les culées.

#### *Les piles*

Une pile comporte deux parties : la superstructure (ou fût) et la fondation. En fonction de sa hauteur, le fût peut être constitué par :

- Des voiles qui comportent au minimum deux points d'appui pour supporter le tablier et qui conviennent pour des grandes hauteurs ;
- Des colonnes (section circulaire) ou des poteaux (section rectangulaire) dans le cas contraire, qui comportent chacun un point d'appui ou qui sont reliés en tête par un chevêtre (précontraint ou non) sur lequel repose les points d'appui du tablier.

La figure ci-dessous met en évidence ces deux types de fût.

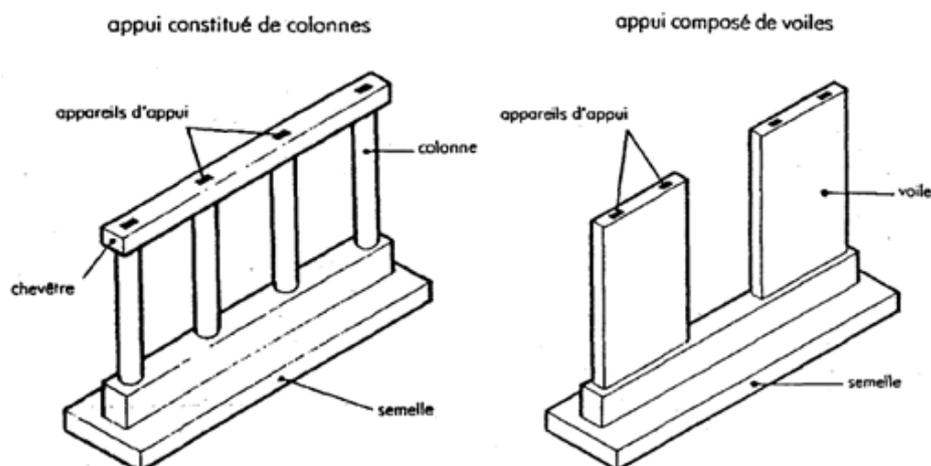


Figure 12 - Appui constitué de colonnes et de voiles

#### *Les culées*

Les culées, contrairement aux piles, sont des appuis d'extrémité qui ont pour rôle supplémentaire le soutènement du remblai d'accès à l'ouvrage. Elles comportent quatre parties :

- Une fondation ;
- Une partie supérieure (chevêtre ou sommier) sur laquelle repose le tablier ;
- Un mur de front pour supporter le chevêtre et assurer la stabilité du remblai d'accès ;
- Des murs de tête pour assurer le soutènement des remblais latéralement.

On peut également rencontrer des culées en terre armée où le sommier repose directement sur les terres (voir Figure 13).

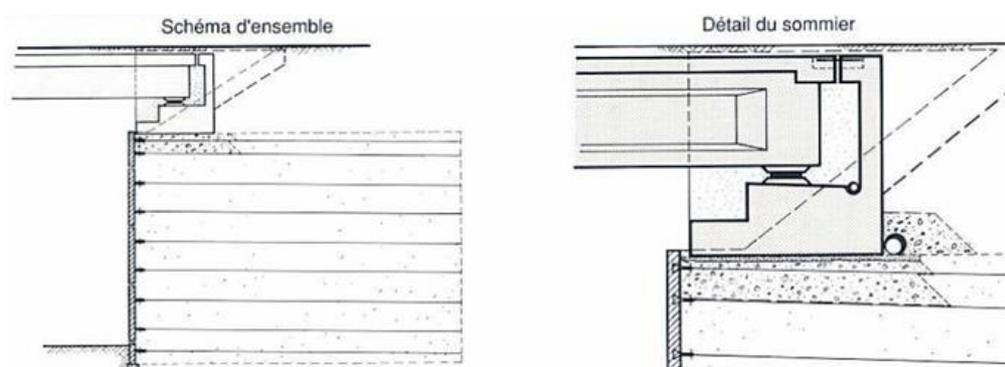


Figure 13 - Culée de pont en terre armée [CTA 2015]

## II-1-b) Appareils d'appui

### *Rôle et choix des appareils d'appui [F0032]*

Les appareils d'appui sont situés en tête des piles et des culées. Ils ont pour rôle de transmettre à ces derniers les actions provenant du tablier tout en autorisant ou non certains degrés de liberté. Ce sont des éléments importants de la structure et non des équipements, pour lesquels il existe une notion d'usure et de durabilité inférieure à celle de l'ouvrage et que l'on considère alors comme de la matière consommable. Il faut donc apporter tout le soin nécessaire à leur choix, leur qualité, leur conception et leur mise en œuvre.

Le choix du type d'appareil d'appui dépend essentiellement du gradient thermique qui va engendrer des déplacements de certains points dans la structure du tablier. En effet, les matériaux le constituant sont soumis à des variations de températures qui génèrent de la dilatation ou du retrait. Suivant la nature du déplacement, un type liaison, donc un type d'appareil d'appui, sera choisi afin de limiter au maximum les efforts en tête de pile ou de culée en permettant des degrés de liberté. La Figure 14 est un exemple de choix du type de liaison de différents appuis. Bien qu'il s'agisse d'un pont mixte, le principe reste le même pour un pont en béton.

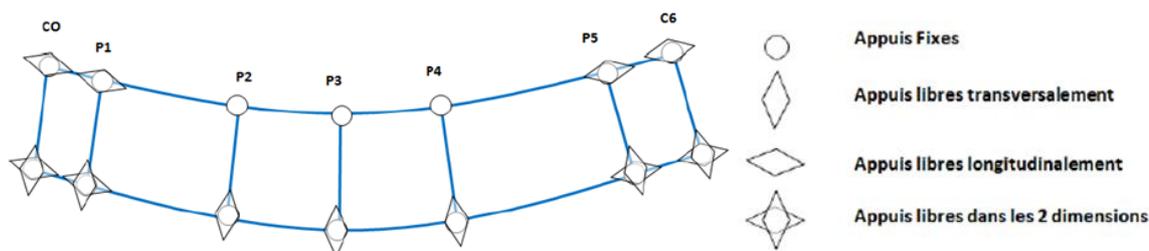


Figure 14 - Type de liaison des différents appuis du Viaduc du Chadon [Travail personnel]

Le choix du type d'appareil d'appui dépend également de nombreux autres facteurs : descente de charge, rotation maximale, déplacements horizontaux, durabilité, coût, type d'ouvrage, son environnement et ses dispositions constructives. C'est pourquoi il est délicat de pouvoir préciser le domaine d'emploi respectif d'une technique par rapport à une autre.

### *Les appareils d'appui en béton armé*

Les appareils d'appui en béton armé sont le plus souvent réalisés avec une section rétrécie en béton armé dans laquelle est mise en place un goujon pour pouvoir reprendre les efforts de cisaillement. Ce type d'appui autorise donc les rotations imposées par la structure

comme degré de liberté. On rencontre généralement ce type d'appui pour réaliser la liaison entre la dalle de transition et le corbeau des piédroits d'un PICF ou d'un PIPO (voir Figure 15).



Figure 15 - Détail de la liaison du corbeau avec la dalle de transition d'un PICF [Travail personnel]

### ***Les appareils d'appui en élastomère fretté (AAEF) et à pot (AAP) [F0032] [F0033]***

Les appareils d'appui en élastomère fretté et à pot représentent plus de 90% des appareils d'appui utilisés sur les ponts en France. Les AAEF conviennent parfaitement pour des réactions d'appui limitées à 12 MN (calculées à l'Etat Limite Ultime). Cette valeur correspond à des dimensions en plan de l'ordre de 700x700 mm. Au-delà de 20 MN, les AAP sont préférables car ils limitent l'encombrement du dispositif. Par contre, si une rotation importante est à prévoir sur appui, l'AAEF peut convenir mais il faut souvent augmenter exagérément l'épaisseur d'élastomère, ce qui pose d'autres problèmes. Au niveau des déplacements horizontaux, les systèmes de glissement des AAP offrent une meilleure qualité et donc une meilleure durabilité : c'est donc le critère du déplacement qui va influencer sur le choix de ces deux types d'appareil d'appui. De plus, en zone sismique, même pour de fortes descentes de charges, il est préférable de prévoir des AAEF. En effet, en l'absence de point fixe et compte tenu de la souplesse qu'apportent les AAEF, le comportement global de l'ouvrage sous séisme d'amplitude modéré sera meilleur. Néanmoins, les AAEF se déchireront sous fort séisme mais leur remplacement sera moins coûteux que s'il s'agit d'AAP.

Selon la norme NF EN 1337-3, un AAEF est un « *bloc d'élastomère vulcanisé (...) renforcé intérieurement par une ou plusieurs frettes en acier, collées chimiquement (adhésion) pendant la vulcanisation. (...). L'élastomère est un matériau macromoléculaire qui reprend approximativement sa forme et ses dimensions initiales après avoir subi une importante déformation sous l'effet d'une faible variation de contrainte* » (voir Figure 16).

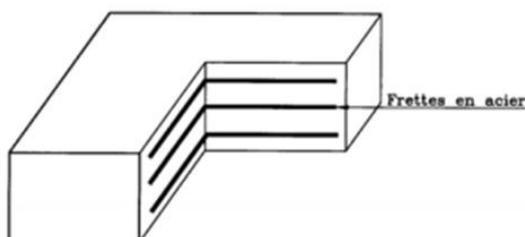


Figure 16 - Constitution type d'un AAEF

En fonction des degrés de liberté qu'il autorise, un AAEF peut être soit un appareil d'appui mobile, soit un appareil d'appui fixe. En effet, outre les rotations sur appui, les déplacements sont permis dans les deux directions planes et on peut soit augmenter les possibilités de déplacement par l'ajout d'un plan de glissement, soit empêcher les distorsions par des platines métalliques.

Le principe d'un AAP est d'avoir un coussin cylindrique d'élastomère enfermé dans un pot qui reçoit la charge par l'intermédiaire d'un piston formant le couvercle du pot. L'élastomère ne peut donc se déformer qu'à volume constant, ce qui lui permet de transmettre des charges élevées et d'autoriser les rotations imposées par la structure.

Un AAP est constitué de trois parties principales pour donner les trois degrés de liberté en rotation et éventuellement d'une quatrième pour assurer un ou deux degrés de liberté supplémentaires en déplacement. Ces quatre parties sont illustrées sur la Figure 17.

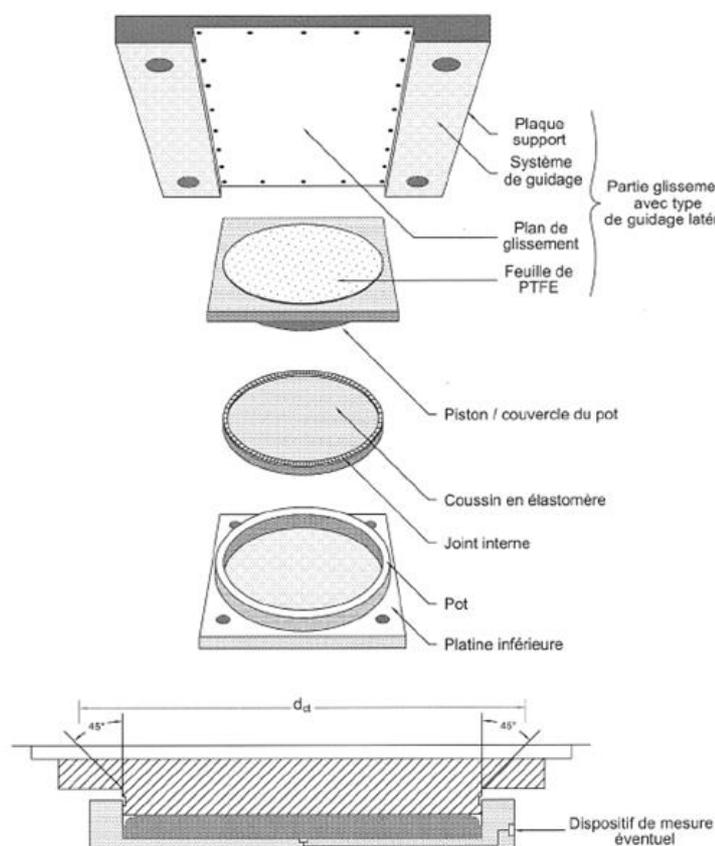


Figure 17 - Composition schématique d'un AAP

## II-2) Continuité du franchissement [TDP 2015]

### II-2-a) Dilatation du tablier

Comme on l'a montré précédemment pour le choix du type d'appareil d'appui, les matériaux constituant le tablier sont soumis à des variations de températures qui génèrent de la dilatation ou du retrait. Bien que ces appareils d'appui absorbent ou laissent libres ces mouvements, il ne faut pas pour autant qu'ils soient empêchés longitudinalement au niveau des culées. Dans le cas contraire, cela induit dans le matériau de fortes contraintes susceptibles de provoquer des fissurations et donc la ruine de l'ouvrage.

Pour pouvoir laisser ces dilatations se produire librement, on emploie des joints de chaussée généralement en forme de peigne (voir Figure 18). Pour les tabliers très longs, des joints intermédiaires sont prévus. La longueur courante d'un tablier continu sans joint est de l'ordre de 500 à 600 m.

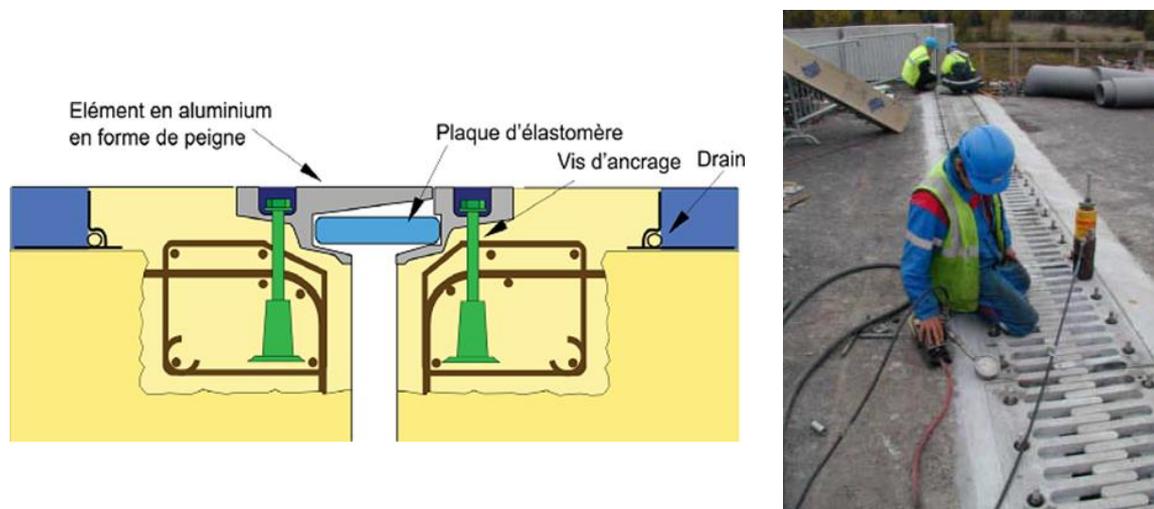


Figure 18 - Détail d'un joint de chaussée type cantilever et serrage des vis d'ancrage

### II-2-b) Tassement du remblai d'accès

Pour éviter qu'un tassement du remblai ne se produise aux abords du pont et crée une dénivellation entre le tablier et la route au fil des années, une dalle de transition est coulée sur le remblai et repose par une de son extrémité sur le corbeau des piliers, s'il s'agit d'un PICF ou d'un PIPO, ou sur le sommier, s'il s'agit d'une culée d'un pont plus important. En effet, suivant la taille des engins de compactage, il est plus ou moins difficile d'accéder aux abords des piliers ou des sommiers, et ainsi d'assurer un compactage optimal. La coupe B-B du plan présent en Annexe 2 est un exemple de PICF où l'on peut voir la dalle de transition.

## II-3) Etanchéité et drainage [ALL 1987] [TDP 2015]

### II-3-a) Etanchéité

La pénétration de l'eau à l'intérieur du tablier entraîne des risques de corrosion des armatures en acier et doit donc être évitée. Pour cela, tous les ouvrages d'art ont recours à une chape d'étanchéité dont l'exécution nécessite beaucoup de soin si on veut obtenir une protection efficace. Comme il existe plusieurs types d'étanchéité et qu'ils font l'objet de permanentes améliorations, nous avons décidé d'en étudier deux (à base d'asphalte ou de feuilles bituminées).

Le complexe d'étanchéité à base d'asphalte coulé est constitué :

- D'une couche d'indépendance ;
- D'une première couche d'asphalte pur plastique assurant l'étanchéité (8 mm d'épaisseur) ;
- D'une seconde couche d'asphalte plus rigide assurant un complément et une protection de l'étanchéité (30 à 35 mm d'épaisseur) ;
- Du revêtement courant de la chaussée (couche de roulement).

Le complexe d'étanchéité à base de bitume est constitué :

- D'une couche de vernis bitumineux assurant la fermeture des pores du béton, facilitant l'accrochage de la couche suivante et activant le séchage du béton ;
- D'une chape de bitume armée préfabriquée (4 mm d'épaisseur) ;
- D'une couche de protection en asphalte (25 mm d'épaisseur).

Il est de plus indispensable de prévoir un système d'évacuation des eaux pluviales pour éviter l'inondation de la chaussée. Celui-ci est généralement constitué de gargouilles disposées tous les 20 m environ (voir Figure 19). Elles recueillent l'eau de surface et l'évacuent par des chéneaux vers les descentes d'eau situées au niveau des piles ou des culées.

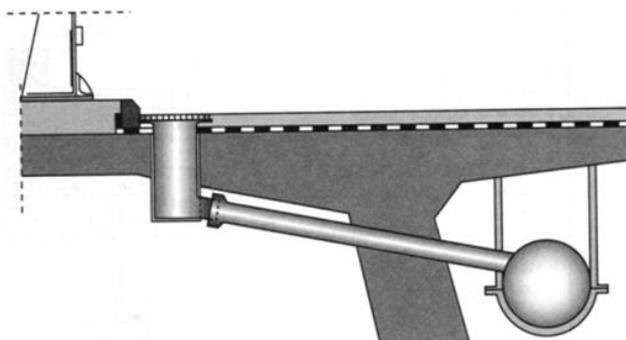


Figure 19 – Détail d'une gargouille avec étanchéité et système d'évacuation des eaux

### II-3-b) Drainage

Le remblai d'accès doit être drainé au niveau de la culée pour éviter que la pression supplémentaire apportée par l'eau ne crée des désordres tels que l'apparition de fissures, la corrosion des armatures, ou des coulures et des dégradations d'aspect. Généralement, on dispose un feutre drainant sur la surface de culée en contact avec le remblai, et on associe à ce système, un drain tubulaire qui permet l'évacuation de l'eau vers l'extérieur du remblai, comme représenté ci-dessous. Le plan présent en Annexe 2 donne plus d'informations à ce sujet.

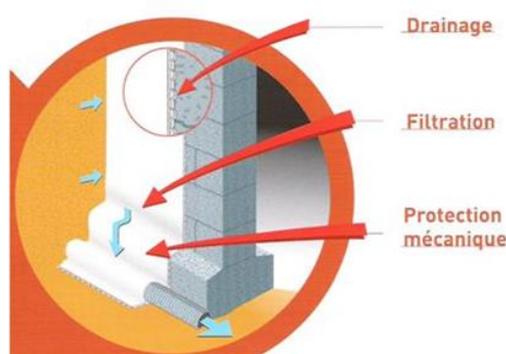


Figure 20 - Constitution d'un système drainant

### II-4) Sécurité

Afin de garantir une certaine sécurité aux usagers empruntant le pont, il existe des dispositifs de sécurité. Nous allons en étudier quatre, à savoir les garde-corps, les glissières de sécurité, les barrières de sécurité et les grilles centrales.

#### II-4-a) Les garde-corps

Il existe de nombreux types de garde-corps, leur forme varie suivant que l'ouvrage est accessible ou non aux piétons, suivant que le pont est situé en pleine campagne ou en zone urbaine. Il faut également tenir compte des raisons d'urbanisme qui peuvent imposer un soin particulier à l'esthétique de l'ouvrage. Cependant, sans tenir compte des caractéristiques architecturales, les garde-corps des ponts routiers et autoroutiers sont choisis parmi les modèles donnés par le SETRA (Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes).

Les indications générales sont les suivantes : les garde-corps sont soit en acier soit en alliage d'aluminium, ils sont généralement réalisés avec des tubes soudés et les montants sont scellés dans le tablier (voir Figure 21). Ce dernier point pose un problème car le scellement doit être résistant sans pour autant provoquer des désordres graves dans l'ouvrage en cas d'accident entraînant sa rupture. C'est pour concilier ces exigences que l'on dispose devant le garde-corps d'autres dispositifs de sécurité.



Figure 21 - Garde-corps

#### II-4-b) Les glissières de sécurité

Les glissières de sécurité sont destinées à maintenir sur la plateforme du pont, un véhicule qui, accidentellement, risquerait d'en sortir (voir Figure 22). On les trouve également sur les autoroutes afin d'augmenter la sécurité de la circulation.

La glissière de sécurité absorbe les chocs en se déformant et est essentiellement constituée de profilés en acier, fixés sur des montants métalliques qui sont scellés dans le tablier du pont. Elle est implantée devant le garde-corps, parallèlement à celui-ci à une distance minimal de 60 cm afin de réserver un passage de service.

Ce dispositif de sécurité ne peut résister qu'au choc de véhicules relativement légers, c'est pourquoi il peut être envisageable, selon la situation de l'ouvrage, de prendre des mesures plus efficaces capables de protéger même les véhicules lourds, à savoir installer des barrières de sécurité.

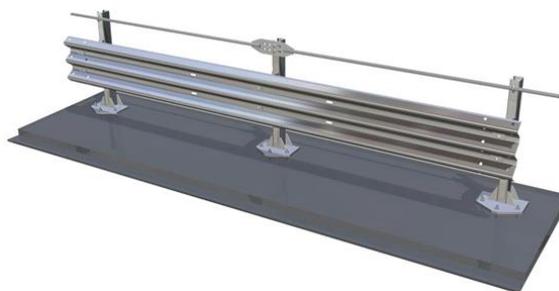


Figure 22 - Glissière de sécurité

#### II-4-c) Les barrières de sécurité

Les barrières de sécurité sont de véritables murets armés qui se substituent aux garde-corps. Afin de retenir les véhicules dits très lourds, la barrière de sécurité peut être, soit métallique avec des supports fortement ancrés dans le tablier, soit en blocs de béton liés par précontrainte. Dans ce cas les blocs sont simplement posés sur le tablier, comme ci-dessous, et ce sont les câbles de précontrainte qui sont ancrés.



Figure 23 - Barrière de sécurité

#### II-4-d) Les grilles centrales

Lorsque la voie est large et comporte donc un terre-plein central, les ponts qui la supportent sont généralement constitués de deux ouvrages distincts séparés par un espace dont la largeur correspond à celle du terre-plein. C'est pourquoi, par mesure de sécurité, cet espace est recouvert par des grilles métalliques en acier galvanisé à chaud ou en tôle d'alliage léger, destinées à éviter la chute de personnes ou de véhicules.

Pour finir, il faut également assurer la sécurité des ponts en protégeant les piles (par glissières ou barrières), en signalant les gabarits de l'intrados, et en signalant les charges maximales supportées.

#### II-5) Esthétique [APC 2015]

Même des ouvrages d'arts courants ont une conception complexe. Elles doivent respecter certains critères esthétiques pour qu'elles puissent faire partie harmonieusement de l'environnement qui l'entoure. Bien que ces règles varient selon l'endroit, le temps et l'évolution du matériau, les choix techniques doivent être toujours confrontés aux exigences architecturales afin de trouver le meilleur résultat possible et garantir la pérennité esthétique des ouvrages. Ci-dessous, nous allons parler de certains de ces aspects.

- Proportions et dimensions harmonieuses : l'ouvrage doit être cohérent d'une forme générale. La proportionnalité entre les éléments de la structure (tels que la hauteur et largeur des piles, longueur des travées et épaisseur du tablier) vont donner à l'ouvrage soit une impression de solidité et stabilité, soit, si les relations ne sont pas bonnes, une impression de fragilité. Les ouvertures dégagées entre les piles et le tablier ne doivent pas avoir une forme trop carrée, ni à l'inverse une forme de rectangle très allongé.
- Transparence : l'ouvrage d'art ne doit pas être un obstacle visuel trop marqué dans le paysage. Alors, il convient de réduire au maximum le nombre d'appuis, les culées trop massives et des perrés en pente douce.
- Adaptation au site d'accueil : l'ouvrage doit être intégré discrètement au paysage comme un composant qui a toujours été là. Pour ce faire, il convient d'analyser les bâtiments environnants, la végétation, les pratiques constructives locales, etc.

- Maîtrise esthétique des parements : la combinaison des différentes techniques et traitements de surface des bétons résultent en différentes textures et reliefs qui, combinés avec la variation des formes, créent des effets d'ombre et lumière et donnent à l'ouvrage une impression de légèreté ou accentue les courbures.
- Architecture générale des équipements : les dimensions, formes et aspects des divers équipements de l'ouvrage, dont les corniches, doivent permettre leur intégration harmonieuse et équilibrée dans la structure.

### III- Les ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs

#### III-1) Domaine d'utilisation [LAM 2010]

Si le pont ne peut être poussé, si les travées ont de trop grandes portées pour des poutres, et si la brèche est trop importante pour un étaielement, on peut construire le tablier du pont en encorbellement, c'est-à-dire construire un fléau, à partir d'une pile, constitué de 2 demi-travées de part et d'autre de celui-ci. Le pont est alors réalisé par tranches successives appelées voussoirs.

Nous avons choisis d'utiliser ce mode de construction car, en général, il est toujours envisageable et son domaine d'utilisation est vaste. En effet, il permet le franchissement de vallées profondes et les obstacles présents le long de l'ouvrage ne perturbent pas la construction. Les portées compétitives de ces ouvrages se situent entre 80 et 150 m, mais la construction reste tout à fait envisageable pour des portées allant jusqu'à 300m. Entre 60 et 100 m, le tablier peut avoir une hauteur constante. Au-delà, il est indispensable de prévoir un tablier à inertie variable. En ce qui concerne la répartition des travées, il est généralement préférable de choisir des travées de longueurs égales et d'adopter un rapport tracé de rive/travée centrale compris entre 0,6 et 0,7.

Avantages :

- La majeure partie de l'ouvrage peut être construite sans contact avec le sol ;
- Éventail de géométries assez large ;
- Le découpage en voussoir permet la réutilisation des outils de coffrages ;
- Préfabrication envisageable ;
- Portée pouvant atteindre 300 m.

Inconvénients :

- Les ponts en béton précontraint sont beaucoup plus lourds que les ouvrages mixtes, les appuis et fondations sont donc plus importants et plus chers ;
- Les tâches à réaliser in situ sont plus importantes ;
- Le tablier épais impose une esthétique ;
- Le découpage en voussoirs peut poser problème sur les teintes de béton ;
- Les nombreux voussoirs impliquent beaucoup de main d'œuvre ;
- Beaucoup de joints de voussoirs sont nécessaires ;
- Les engins de levage impliquent un coût élevé.

#### III-2) Les différentes méthodes de mise en œuvre [F0308]

Les différentes méthodes de mise en œuvre de l'encorbellement sont les suivantes :

- Encorbellement à l'avancement : on commence à travailler à une extrémité du pont puis on travaille en continu jusqu'à l'autre extrémité de l'ouvrage ;
- Encorbellement équilibré : le premier voussoir est fixé en haut d'une pile puis les deux autres de part et d'autre.

Chaque méthode fonctionne grâce à la précontrainte et chaque étape de construction correspond à la mise en place de la précontrainte.

On choisit dans ce rapport de ne présenter que la méthode de mise en œuvre par encorbellement équilibré (voir Figure 24). Cette technique consiste à construire un pont de

façon symétrique à partir de ses appuis, en ajoutant à chaque étape de construction deux éléments de tablier identiques qui s'équilibrent. Chaque pile est considérée comme une balance à laquelle on rajoute progressivement deux demi-travées de chaque côté. Cet élément pile/fléau est alors isolé et isostatique. Les différents fléaux sont alors clavés, ce qui a pour effet de rétablir la continuité de l'ouvrage : la structure devient alors hyperstatique.

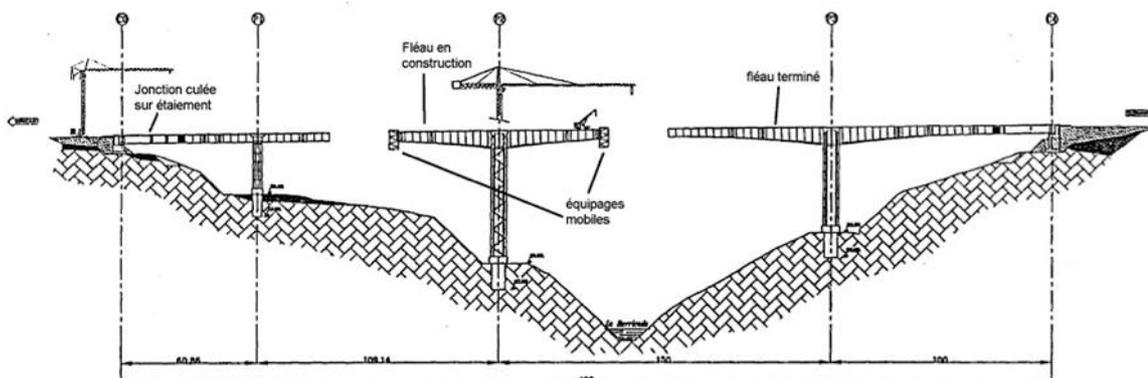


Figure 24 - Construction en encorbellement équilibré [PRO 2015]

La première phase consiste donc à la réalisation des appuis piles et culées. Les culées pour un pont construit par encorbellements successifs n'ont pas de spécificité.

Les piles témoignent souvent d'une recherche architecturale, c'est pourquoi leurs coffrages sont alors très spécifiques. Comme tous les types de ponts, ceux-ci peuvent être glissants ou grimpants.

En général, pour des raisons de coûts, les parties de tablier à la sortie des culées sont réalisées sur cintre, comme représenté ci-dessous.



Figure 25 - Assemblage de voussoirs préfabriqués sur cintre [LGV 2015]

Après la construction de la pile, il faut construire le voussoir sur pile (VSP) ; celui-ci est souvent coulé en place. Il mesure en général 8 m, de manière à supporter les deux équipages mobiles (ce terme sera expliqué plus loin).

Lorsque le VSP est préfabriqué, ses dimensions importantes impliquent de le diviser en deux ou trois pièces, de manière à ne pas surdimensionner le matériel de levage et de transport. Celles-ci seront assemblées par précontrainte.

Ce voussoir est ensuite encastré sur pile pour que la stabilité du fléau soit assurée lors de la réalisation des autres voussoirs. Les différentes méthodes permettant d'assurer la stabilité des fléaux sera détaillée plus loin.

Il faut savoir que la longueur de fléau entraîne la longueur des travées, comme le représente la figure ci-dessous.

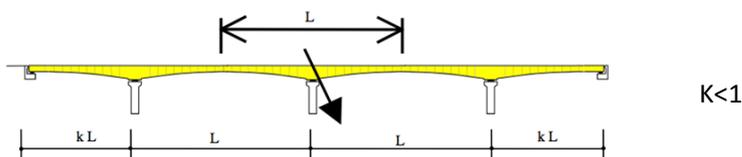


Figure 26 - Longueurs des travées [TDP 2015]

### III-3) Les différents moyens de mise en œuvre [F0308]

#### III-3-a) Voussoirs préfabriqués

##### *La préfabrication des voussoirs*

Les voussoirs peuvent être préfabriqués, soit sur chantier sur rive, soit en usine. On considère que la préfabrication est intéressante économiquement lorsque le nombre de voussoirs dépasse les 400 unités. Un délai très court ainsi que des conditions climatiques difficiles augmentent l'intérêt de cette méthode. Néanmoins, l'absence de zones de stockage proches du chantier où des conditions d'accès chantier compliquées peuvent imposer le coulage en place des voussoirs. La vitesse instantanée de pose des voussoirs est alors en moyenne de 6 m par jour.

Un atelier de préfabrication de voussoirs courants doit avoir une superficie de deux hectares environ, et être situé proche du chantier. Il est souvent décomposé en deux parties :

- La partie coulage ;
- La partie stockage.

La construction s'effectue alors grâce à des cellules de préfabrication (voir Figure 27). C'est un atelier mesurant l'équivalent de trois voussoirs. Le coffrage en amont est réalisé par le voussoir n-1 assurant ainsi une parfaite conjugaison entre les deux éléments. Dans le sens de la longueur, le coffrage est assuré par un masque métallique, et selon la largeur, par des joues métalliques.

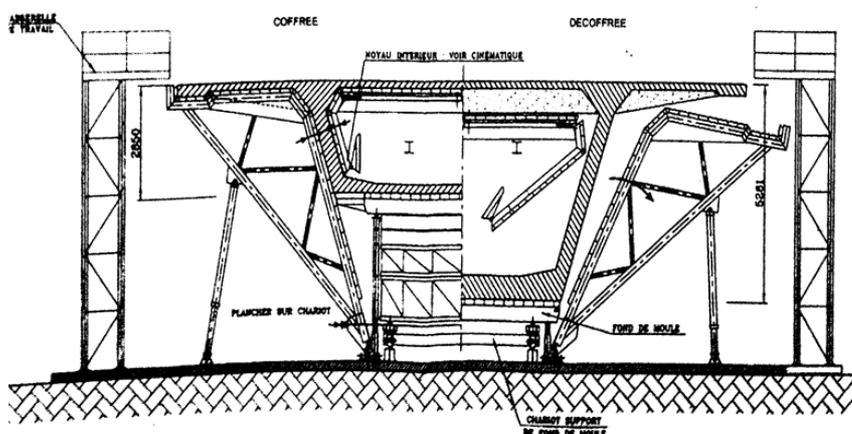


Figure 27 - Cellule de préfabrication de voussoirs courants et sur pile

Une cellule produit alors un voussoir courant par jour et un voussoir sur pile en deux jours. Pour justifier ces cadences, elles doivent être équipées de mâts de bétonnages alimentés en béton par des canalisations ou des convoyeurs reliés à une centrale à béton. Il faut également qu'elles soient approvisionnées en cage d'armatures préfabriquées conçues par des ateliers spécialisés, et équipées d'éléments de type gaine, rail d'ancrage et plaque d'ancrage.

Selon le nombre de voussoirs à réaliser, il faut adapter le nombre de cellules. Celui-ci peut varier de trois à plus de dix. Sachant qu'une cellule est dédiée à la réalisation d'un type de voussoir spécifique, il peut donc y avoir une cellule pour les voussoirs sur pile, une pour les voussoirs sur culée, une pour les voussoirs d'articulation, s'ajoutant aux cellules des voussoirs courants.

Comme la construction commence par la pose des voussoirs sur pile, il faut tout d'abord préfabriquer ces voussoirs afin que ceux-ci servent de base (coffrage amont) des voussoirs courants ou d'articulation selon les cas.

Enfin, les voussoirs sont stockés dans la zone de stockage, comme celle présentée sur la Figure 28, durant un délai de 1 à 3 mois.



Figure 28 - Zone de stockage de voussoirs [LGV 2015]

### *Le transport des voussoirs*

Les voussoirs sont acheminés de leur lieu de coffrage vers la zone de stockage par de grands portiques roulants puis vers l'engin de transport lorsqu'il doit être posé. Le mode le plus utilisé pour le transport des voussoirs est le transport par fardier sur pneus (voir Figure 29) ; mais lorsque l'ouvrage franchit une voie d'eau, il est possible d'approvisionner les voussoirs par barges.



Figure 29 - Fardier sur pneus [LGV 2015]

Ensuite, la pose peut s'effectuer de différentes façons :

- Par poutre de lancement ;
- Par chariot mobile où l'approvisionnement peut se faire par camion ou par barge (voir Figure 30) ;
- Par l'utilisation d'une grue (voir Figure 30) ;
- Par un portique de pose roulant de part et d'autre du tablier.

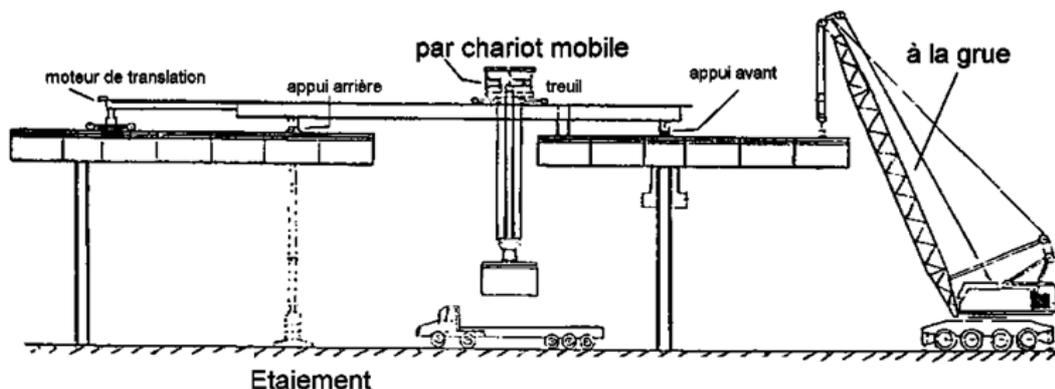


Figure 30 - Principe de pose de voussoirs par chariot mobile et par grue [PRO 2015]

Pour cette phase, l'utilisation d'une poutre de lancement est la solution la plus couramment utilisée car elle permet de s'affranchir de tous les problèmes de franchissement comme elle s'appuie sur les piles et le tablier. Malgré un coût initial très élevé, elle est souvent construite en vue d'une réutilisation ou pour un chantier de très grande envergure, comme celui présenté sur la photo ci-dessous. Son poids est compris entre 300 et 600 tonnes, et son délai d'exécution est d'environ un an avec un coût variant de 1,5 à 3 millions d'euros.



Figure 31 - Poutre de lancement pour la construction du Pont de l'île de Ré [APC 2015]

Ces structures sont le plus souvent constituées de la manière suivante (voir Figure 32) :

- Deux poutres treillis à section triangulaire de hauteur variant de 3 à 5 m, de longueur comprise entre 100 et 250 m assemblées par des barres de précontrainte ;
- Deux pylônes avant et arrière, servant d'appuis principaux ;
- Deux bécquilles avant et arrière, servant d'appuis secondaires ;
- Deux ponts roulants circulant sur les poutres en treillis et prenant en charge les voussoirs.

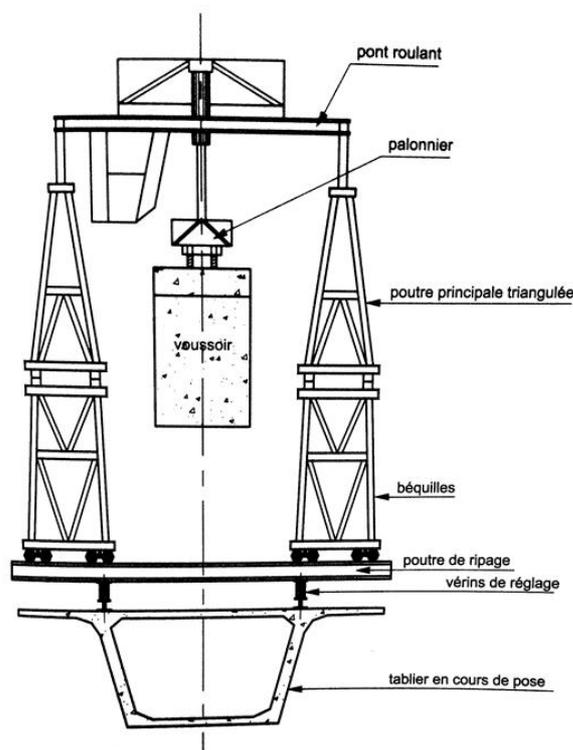


Figure 32 - Constitution d'une poutre de lancement

Le principe de pose suit les étapes suivantes (voir Figure 33) :

1. Pour pouvoir avancer, il faut tout d'abord mettre en place les deux demi-voussoirs sur pile. Pour cela, la poutre de lancement se tient sur le fléau le plus proche de cette pile et déploie une béquille sur la pile en question.
2. Alors, la translation des pylônes peut se faire, en sachant que toute translation de pylône est effectuée lorsque la poutre de lancement est positionnée sur ses deux béquilles.
3. Ensuite, un pylône peut alors se mettre en place sur la pile et permettre ainsi de faire coulisser la poutre.
4. Enfin, on peut alors construire le fléau par la méthode d'encorbellement équilibré.

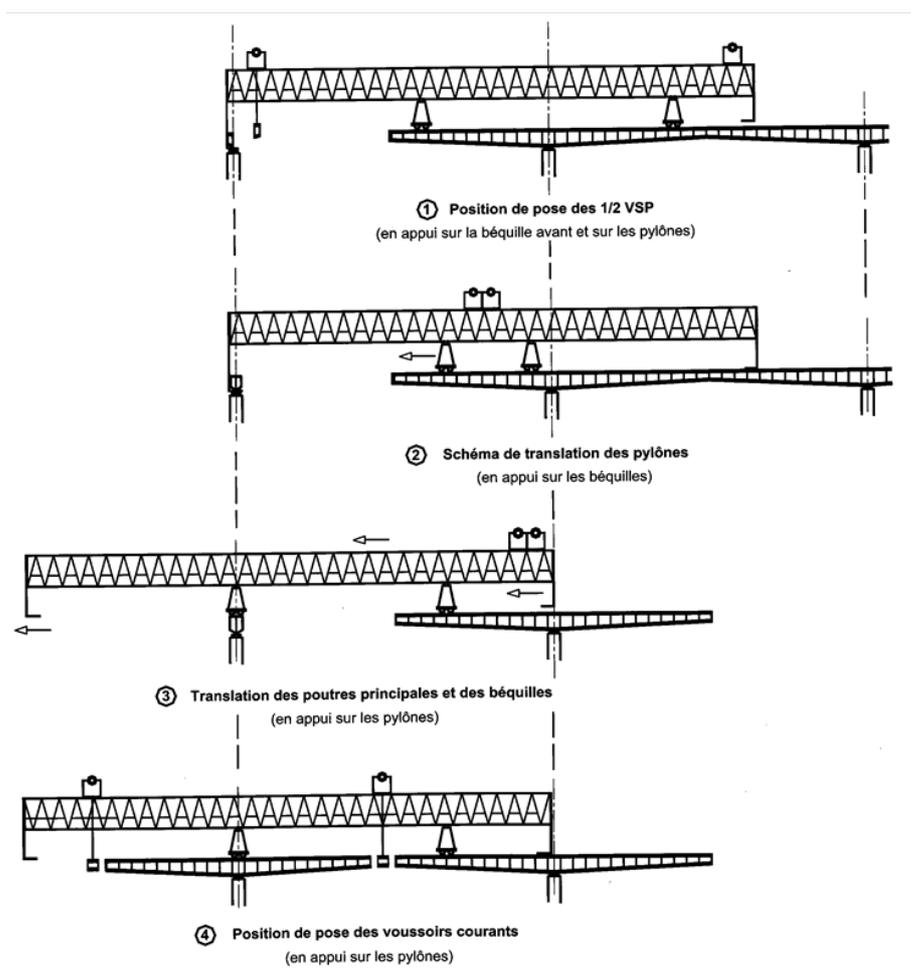


Figure 33 - Principe de pose de voussoirs par poutre de lancement

### *La mise en place des voussoirs*

Avant la pose des voussoirs, une colle époxydique est étalée sur la tranche à la main et d'une épaisseur d'un millimètre.

Lorsque les voussoirs préfabriqués sont disposés, ceux-ci doivent être maintenus de façon provisoire afin de libérer l'engin de pose. Cette phase s'appelle le brélage (voir Figure 34). Ce sont des barres parallèles qui permettent de maintenir le voussoir et d'assurer le bon collage entre deux voussoirs (compression d'environ 0,2 MPa). Celles-ci seront démontées une fois les câbles définitifs tendus et la colle époxydique durcie.

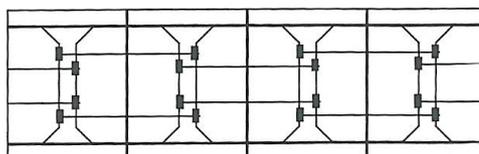


Figure 34 - Principe de brélage des voussoirs préfabriqués

Le clavage de deux fléaux s'effectue à l'aide d'un coffrage traditionnel et se fait par coulage du béton en place. De l'ordre d'une dizaine de centimètres, ce coffrage se réalise généralement par des coffrages bandes.

### *L'influence des méthodes sur le dimensionnement des ouvrages*

Selon le mode de mise en œuvre et les moyens de mise en œuvre, le dimensionnement va varier et ne prendra pas en compte les mêmes hypothèses. En effet, la pose à la grue ou au portique roulant n'engendre pas de surcharges sur le tablier. Ainsi, les charges appliquées se limitent seulement au poids des passerelles de travail. Lorsque les voussoirs sont positionnés sur la poutre de lancement, celle-ci repose sur le tablier (300 à 600 tonnes) et doit être prise en compte dans le dimensionnement des voussoirs.

De manière plus locale, chaque voussoir doit être vérifié individuellement sur sa capacité à reprendre les moments transversaux qui ont lieu pendant la manutention et le stockage.

Lorsque les voussoirs sont coulés en place (développé dans la sous-partie suivante), il convient d'étudier en simultanément le positionnement des suspentes de manutention et les câbles intérieurs afin d'éviter des interférences problématiques.

Enfin, on comprend ici l'importance de la relation entre le bureau d'études et les ingénieurs méthodes.

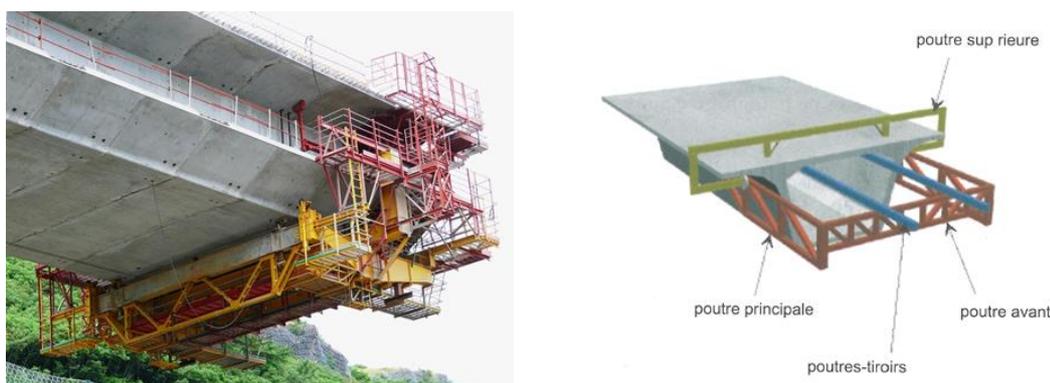
#### **III-3-b) Voussoirs coulés en place**

Lorsque le nombre de voussoirs à exécuter est inférieur à 400, ce qui correspond à la très grande majorité des ponts, le tablier de l'ouvrage est coulé en place. Nous allons donc étudier les techniques utilisées afin de réaliser les voussoirs sur piles, les voussoirs courants et les voussoirs de clavage.

##### *Voussoirs courants*

La longueur des voussoirs courants est constante et varie entre 2,5 à 4 m. Lorsqu'ils sont coulés en place, les deux critères de choix sont le temps de bétonnage ainsi que le nombre de cycle souhaité et possible.

Les voussoirs courants sont construits à l'aide d'outils coffrant très complexes qu'on appelle des équipages mobiles, comme celui présenté sur la Figure 35. Il faut savoir que ce type d'équipage est soit construit spécifiquement pour le chantier, soit existant mais adapté pour le chantier.



**Figure 35 - Photo et schéma de principe simplifié d'un équipage mobile**

Les équipages comportent trois éléments majeurs :

- Une charpente métallique qui permet d'accrocher l'équipage et le futur voussoir au dernier voussoir exécuté ;

- Des parois coffrantes métalliques permettant de donner au béton la forme souhaitée ;
- Des passerelles et des plateformes de travaux servant au personnel pour accéder et travailler en tout point du voussoir.

Comme il existe une grande variété d'équipages mobiles, nous avons décidé de retenir ceux dont les poutres porteuses se trouvent le long des âmes du caisson : ce sont les plus utilisés en France.

De manière très schématique, leur charpente métallique est composée de trois grandes sous-structures (voir Figure 35) :

- La structure en U sous le tablier qui supporte les coffrages du dessous des encorbellements et des faces extérieures des âmes ainsi que le coffrage du hourdis inférieur ;
- Une poutre supérieure transversale posée sur le hourdis supérieur du voussoir n-1 ;
- Des poutre-tiroirs situées sous la partie centrale du hourdis supérieur et qui supportent le coffrage des surfaces intérieures du voussoir n.

Tous ces éléments sont conçus en tenant compte des déplacements, mais également du ferrailage, du câblage ainsi que du bétonnage. Ainsi les grandes étapes de la construction du voussoir courant n sont les suivantes :

- Enfilage et mise en tension des câbles de fléaux du voussoir n-1 ;
- Mise en place des tiges fixant la structure en U au béton du voussoir n-1 ;
- Réglage des coffrages extérieurs et du coffrage du hourdis inférieur ;
- Mise en place de la cage d'armatures inférieure du voussoir n (avec gaines et ancrages) ;
- Réglage du coffrage intérieur ;
- Mise en place de la cage d'armatures supérieure du voussoir n (avec gaines et ancrages) ;
- Bétonnage du voussoir n.

### *Voussoirs sur pile*

Les voussoirs sur pile (VSP) sont toujours construits à l'aide de coffrages spécifiques dédiés à cette partie du tablier et posés sur un plancher de travail fixé au sommet des piles (voir Figure 36). Ils mesurent en général au moins 8 m de façon à pouvoir supporter les deux équipages mobiles. En effet, afin de monter la paire d'équipages sur le VSP, il faut que ce dernier ait une longueur égale à deux fois celle des voussoirs courants augmentée de cinquante centimètres voire un mètre.

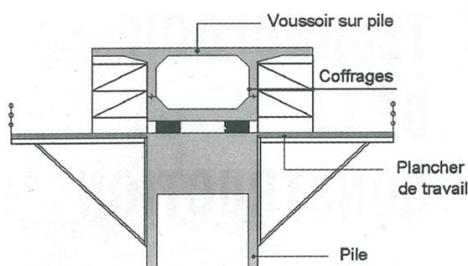


Figure 36 - Principe de coffrage d'un VSP

Les coffrages extérieurs sont des coffrages fixes métalliques alors que les coffrages intérieurs sont le plus souvent réalisés en bois.

Le plancher de travail est fixé à l'aide d'inserts métalliques noyés dans le sommet de la tête de la pile.

Les voussoirs sur pile sont en général exécutés en deux phases : la première comprend le hourdis inférieur, les goussets et la partie inférieure des âmes ; la seconde phase comporte le reste de la section transversale et l'entretoise sur pile.

Le délai d'exécution d'un VSP est compris entre 6 et 10 semaines pour les ouvrages classiques.

### *Voussoirs de clavage*

Les voussoirs de clavage sont en général exécutés en une seule phase grâce à un équipement mobile servant à la réalisation des voussoirs courants. Il faut savoir que leur longueur varie considérablement selon la technique utilisée.

S'il est possible d'avoir un accès au noyau central, les parties intérieures sont coffrées avec le noyau d'origine. Si tel n'est pas le cas, il faut concevoir un noyau spécifique qui puisse être démonté en petits morceaux facilement transportables.

Pendant les opérations de clavage, l'outil coffrant est en appui simple sur chacune des deux extrémités des fléaux.

## III-4) Le fonctionnement mécanique

### III-4-a) Principe de la précontrainte [BEN 2000] [LAM 2010]

La précontrainte consiste à exercer sur le béton une compression préalable à l'application de toute charge. Pour ce faire, des câbles d'acier sont tendus, ce qui, une fois relâchés, mettent le matériau en compression (on parle de pré-tension quand les câbles sont mis en tension avant le coulage du béton et coupés après durcissement du béton et de post-tension lorsque les câbles sont mis en tension après le durcissement du béton). De ce fait, lorsque la structure sera sollicitée en traction, le béton aura tendance à se décompresser sans se mettre en traction. Ce procédé est mis en évidence sur la figure ci-dessous. Il permet d'éviter l'apparition de fissures lorsque le béton est sollicité en traction. Plus efficace, la précontrainte est de loin la technique la plus employée de nos jours dans la construction des tabliers de ponts en béton.

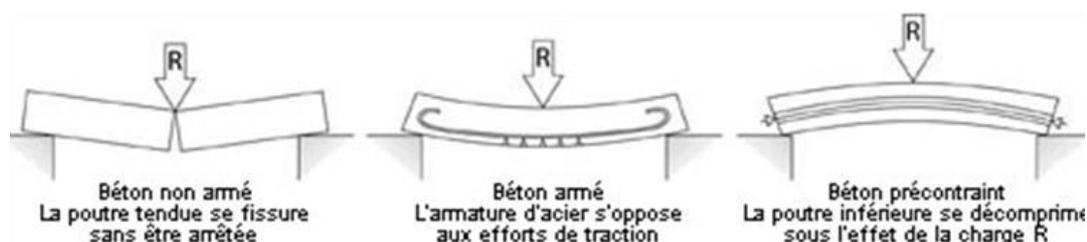


Figure 37 - Principe de la précontrainte

La construction d'un ouvrage par encorbellements successifs se décompose en plusieurs phases au cours desquelles le fonctionnement structurel de l'ouvrage évolue. On recense donc deux précontraintes :

- La précontrainte de fléau nécessaire à l'assemblage des voussoirs pendant la phase de construction par encorbellements ;
- La précontrainte de continuité assurant la reprise des efforts en phase d'exploitation (trafic et superstructure).

### III-4-b) Câbles de fléau [F0308]

En phase de construction, les câbles de fléau sont nécessaires à l'assemblage des voussoirs successifs. Bien qu'ils soient dimensionnés en construction pour assembler les voussoirs successifs et reprendre les moments négatifs dus au poids propre des fléaux et aux charges de chantier, ils sont également dimensionnés en service. En effet, ces câbles doivent participer, avec les câbles de continuité extérieurs au béton, à la reprise des moments négatifs dus aux charges permanentes et d'exploitation. Pour s'opposer efficacement à ces moments négatifs et obtenir un excentrement maximal, ces câbles sont positionnés au voisinage de la fibre supérieure du tablier à l'intérieur du béton (voir Figure 38).

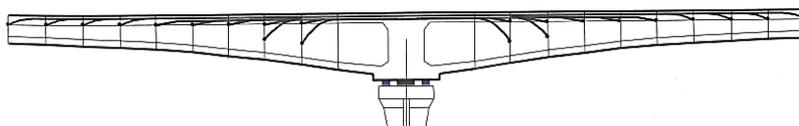


Figure 38 - Elévation d'un fléau avec câbles de fléau

Cependant, pendant la construction d'un fléau, il n'est pas nécessaire d'ancrer les câbles de la dernière paire de voussoirs qui fonctionnera ainsi provisoirement en béton armé, car ces câbles sont surabondants en service. De plus, on remarque sur la figure 1 qu'une partie des câbles est descendue dans les âmes, notamment ceux des premiers voussoirs. Cette disposition permet de réduire les fortes contraintes de cisaillement pour :

- Des ouvrages de hauteur variable dont on veut limiter la hauteur des voussoirs sur pile ;
- Des ouvrages de hauteur constante de portée supérieure à 60 m environ.

Les câbles de fléau subissent des déviations verticales et horizontales, dissociées les unes par rapport aux autres. En général, le tracé des câbles est rectiligne dans la traversée des joints entre voussoirs, c'est-à-dire perpendiculaire à la surface coffrée du masque, afin d'assembler correctement les éléments de conduits des câbles (voir Figure 39).

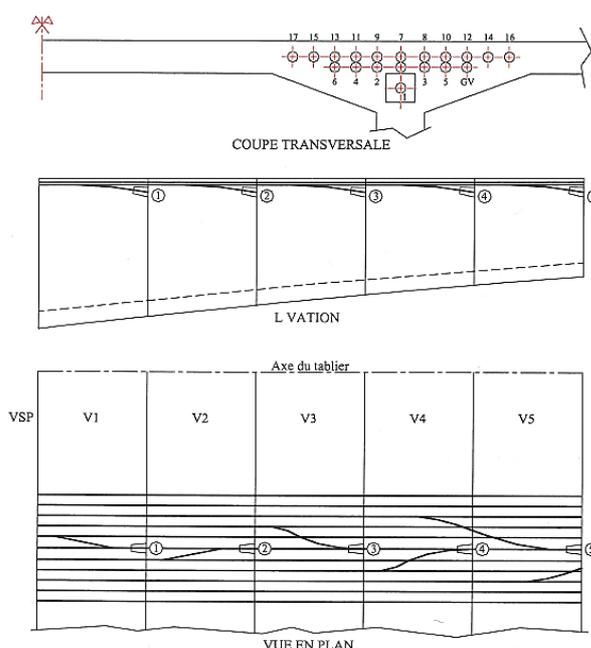


Figure 39 - Tracé des câbles de fléau

Il faut également noter, lors du tracé des câbles, les contraintes liées à la présence de câbles de clouage sur appui ainsi que celles liées aux réservations pour l'accrochage des équipements mobiles (voussoirs coulés en place) ou pour les dispositifs de levage (voussoirs préfabriqués).

Le nombre optimal de câbles arrêtés en extrémité de chaque voussoir est égal à deux (un câble par âme) afin de ne pas augmenter la taille des goussets supérieurs (charges permanentes) et de permettre une standardisation du ferrailage des voussoirs. Dans le cas des très grands ouvrages (portée supérieure à 120 m environ) où le nombre de câbles ne peut être égal à deux, une partie de ces derniers peut être extérieure au béton afin de pouvoir toujours respecter ces deux critères.

### III-4-c) Stabilité des fléaux [F0308]

Pendant la phase de construction, il est nécessaire d'assurer la stabilité des fléaux sur le chevêtre de leur pile, afin d'éviter tout basculement avant clavage avec le fléau voisin ou la partie coulée sur cintre en travée de rive. Deux situations doivent être prises en compte pour éviter ce risque :

- Une situation temporaire où le fléau est en déséquilibre sous l'effet du poids d'un voussoir construit ou posé avant son symétrique, de charges de chantier non symétriques, ou d'un vent ascendant s'exerçant sur l'un des demi-fléaux ;
- Une situation accidentelle correspondant à la chute d'un équipage mobile ou d'un voussoir préfabriqué.

Pour la première situation, il faut vérifier que le fléau ne décolle pas de ses appuis provisoires ; pour la seconde, un léger décollement est toléré avec une surtension limitée des armatures assurant le clouage du fléau sur sa pile.

Le choix du procédé de stabilisation des fléaux dépend essentiellement de la conception générale de l'ouvrage. En effet, le système d'appui définitif et la conception des piles jouent un rôle majeur pour le choix de ce dispositif.

#### *Clouage par précontrainte*

Le clouage par câbles de précontrainte est la méthode la plus économique et la plus utilisée pour les ponts dont la portée des travées est inférieure à 120 m et dont les piles sont relativement massives avec une surface de chevêtre importante. Le principe consiste à tendre des armatures verticales pour plaquer le voussoir sur pile sur des cales provisoires afin de créer un encastrement et de ne pas détériorer l'appareil d'appui définitif. Les ancrages supérieurs sont soit placés dans des bossages provisoires préfabriqués posés sur le hourdis supérieur, soit sur une poutre de répartition métallique (voir Figure 40).

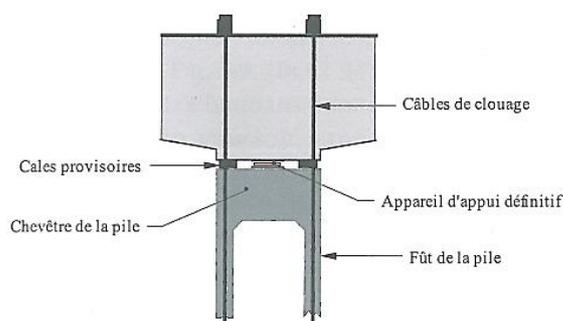


Figure 40 - Coupe longitudinale d'un VSP avec ses câbles de clouage

Les câbles descendent ensuite à travers le voussoir sur pile en longeant les âmes, à côté ou dans l'entretoise d'appui, puis passent près des cales provisoires avant d'arriver dans le chevêtre de la pile. En partie inférieure, les câbles sont soit bouclés dans le fût de la pile, soit ancrés dans la face latérale de la semelle de fondation ou dans des bossages situés à l'intérieur des piles si celles-ci sont évidées. En général, la précontrainte de clouage est centrée sur l'axe de la pile ; mais peut aussi être excentrée longitudinalement si les demi-fléaux sont dissymétriques ou composés de bétons différents, ou transversalement si les fléaux sont courbes, pour équilibrer le moment de torsion engendré par cette courbure.

### ***Palées provisoires***

Pour des portées supérieures à 100 mètres et lorsque les dimensions des têtes de pile sont réduites pour causes architecturales et que les fûts présentent une faible résistance en flexion, il est nécessaire d'augmenter l'entraxe des cales provisoires. Pour se faire, celles-ci sont placées sur des palées provisoires métalliques ou en béton (voir Figure 41). En revanche, ce procédé n'est applicable uniquement si le tablier est situé à une hauteur modérée au-dessus du sol, soit moins de 15 mètres environ.

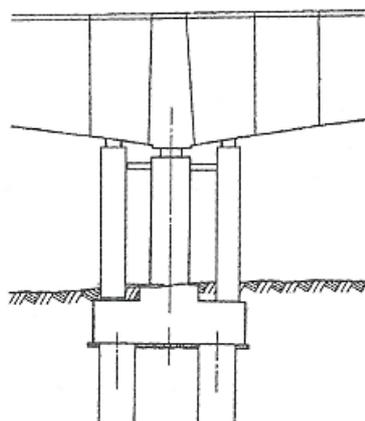


Figure 41 - Elévation d'une pile avec palées provisoires

Pour certains ouvrages, il est possible de stabiliser le fléau par une palée unique, notamment lorsque :

- Un sens de pose ou un ordre de bétonnage est imposé au chantier ;
- Une différence de poids, due à la géométrie ou à l'emploi de différents bétons, affecte les demi-fléaux.

### ***Câbles extérieurs ou haubanage provisoire***

Pour les mêmes raisons précédentes justifiant le choix de palées provisoires et suivant le même principe, il est également possible de disposer les câbles de clouage à l'extérieur de la pile afin d'en augmenter l'efficacité (voir Figure 42). Ils sont ainsi ancrés dans les premiers voussoirs en partie haute, et dans des massifs contrepoids ou dans la semelle de la pile en partie basse (notamment en site aquatique où les ancrages bas peuvent être logés dans le batardeau).

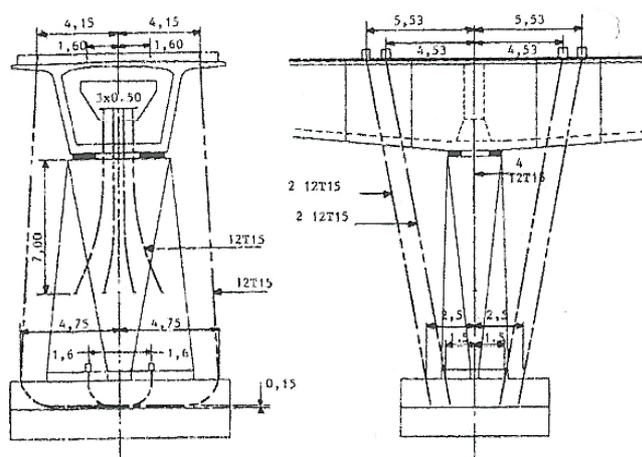


Figure 42 - Elévation d'une pile avec haubannage provisoire

Les câbles doivent être injectés pour les rendre adhérents dans la semelle et doivent être tendus à des valeurs modérées correspondant environ à 30 % de la tension maximum du câble. De plus, pour limiter la torsion de la pile sous les effets dynamiques du vent s'exerçant sur chaque demi-fléau, certains haubans peuvent être inclinés.

#### *Clavage de la travée arrière*

Dans le cas où l'ouvrage comporte des travées de longueurs très inégales ou des travées de rives très courtes, on peut profiter des clavages sur les petites portées pour assurer la stabilité des demi-fléaux adjacents. En effet, une fois le vousoir de clavage réalisé, le demi-fléau le plus long est alors construit en surencorbellement et peut donc profiter du poids de la travée arrière pour compenser le déséquilibre.

#### *Encastrement sur pile*

Enfin, si le fléau est encastré de façon définitive sur sa pile, le calcul de stabilité se réduit aux calculs de résistance du fût et des fondations de la pile. Cependant, des haubans complémentaires sont à prévoir si l'ouvrage est soumis à des vents très importants.

### III-4-d) Câbles de continuité [F0308]

Les câbles de continuité sont destinés à reprendre toutes les actions complémentaires appliquées à la structure après réalisation des fléaux. Pour la majorité des ouvrages actuels, la précontrainte de continuité est mixte, c'est-à-dire composée à la fois de câbles intérieurs et extérieurs au béton. La figure ci-dessous met en évidence le positionnement des différents câbles au sein d'un vousoir sur pile et en travée.

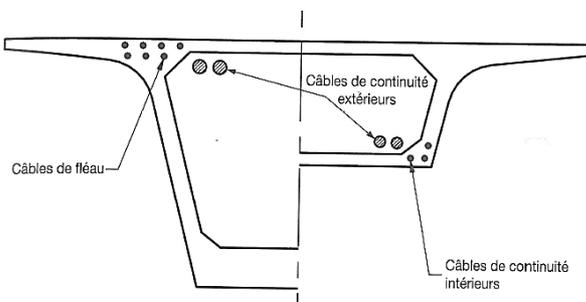


Figure 43 - Coupe d'un vousoir sur pile et courant

### *Câbles de continuité intérieurs*

Les câbles de continuité intérieurs (ou câbles éclisses) sont positionnés en partie centrale des travées courantes et dans les extrémités des travées de rive afin de reprendre les moments positifs (voir Figure 44).

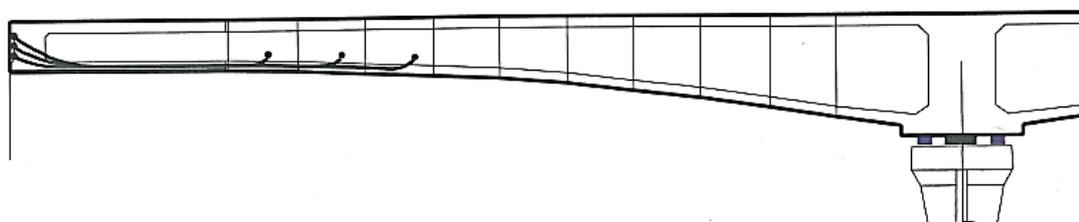


Figure 44 - Elévation d'un demi-fléau avec ses câbles de continuité intérieurs

Transversalement, on peut voir sur la Figure 45 que ces câbles sont situés dans les goussets inférieurs et sont ancrés dans des bossages réalisés à la jonction âme-hourdis inférieur.

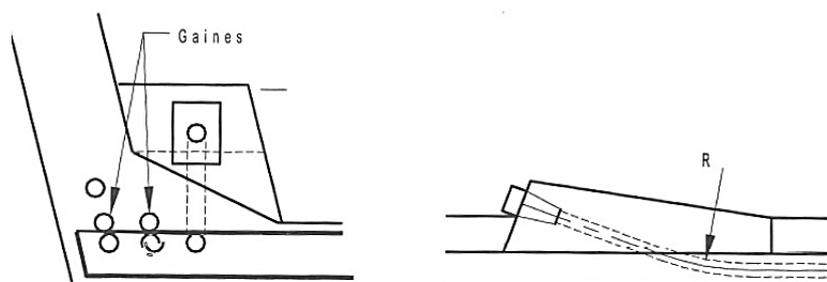


Figure 45 - Bossage des câbles de continuité intérieurs

Les câbles intérieurs sont dimensionnés pour pouvoir reprendre, en plus des moments positifs, le retrait après clavage, les effets thermiques et les effets d'adaptation de la structure pendant les phases de construction entre le coulage des bétons de clavage et la mise en tension des câbles extérieurs au béton.

### *Câbles de continuité extérieurs*

Les câbles de continuité extérieurs sont destinés à reprendre, en complément des câbles de continuité intérieurs, les moments positifs en travée dus aux charges permanentes dont le retrait et la redistribution des efforts de fluage, ainsi que ceux dus aux charges d'exploitation. En complément des câbles de fléau, ils participent également à la reprise des moments négatifs sur pile dus aux charges permanentes et d'exploitation.

Pour reprendre efficacement ces efforts, les câbles extérieurs sont positionnés près du hourdis inférieur en travée et près du hourdis supérieur sur appuis. Transversalement, ils sont situés près des âmes. Pour tenir compte des tolérances d'exécution, une distance de l'ordre de 5 cm est prévue entre l'extérieur de la gaine des câbles et le parement en béton des hourdis, des âmes et des divers bossages d'ancrage.

Afin de créer une précontrainte suffisante, les câbles sont déviés par les entretoises sur piles et par des entretoises intermédiaires en travée appelés déviateurs. Ces derniers sont situés entre le tiers et le quart de la travée (voir Figure 46).

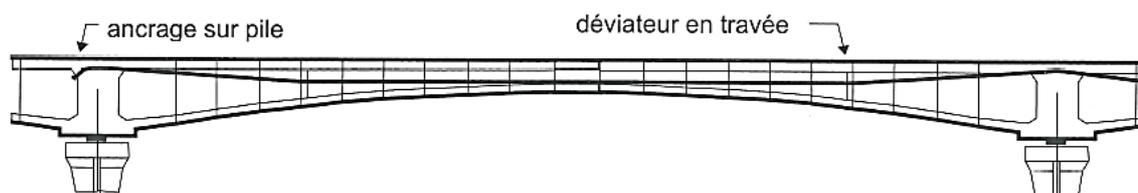


Figure 46 - Elévation d'une travée avec ses câbles de continuité extérieurs

Suivant la longueur de l'ouvrage et le nombre de travées, les câbles extérieurs peuvent être filants d'un bout à l'autre du tablier, ou se recouvrir en régnant sur deux ou plusieurs travées successives (voir Figure 47). En effet, ces câbles peuvent aussi bien être ancrés dans les entretoises sur piles que dans les déviateurs. Cependant, s'ils sont ondulés, leur longueur est limitée à 200 m environ compte tenu des difficultés liées à l'enfilage et à l'injection.

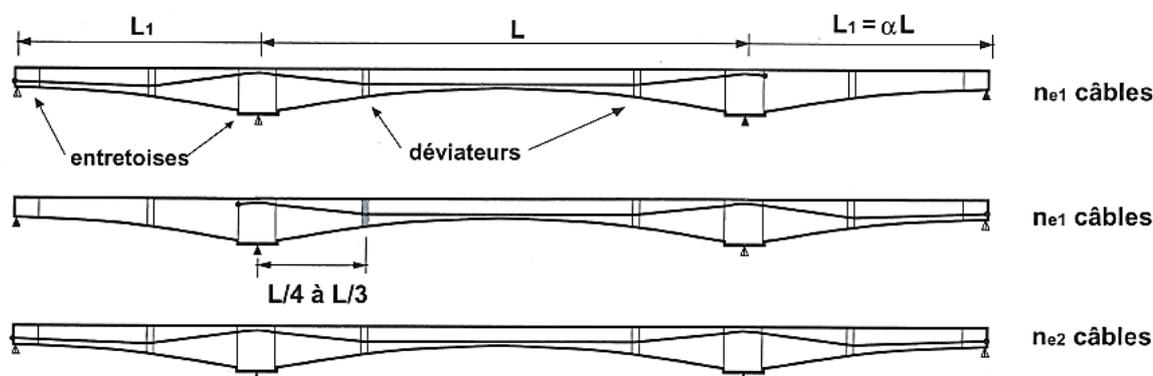


Figure 47 - Différents types de câbles utilisés pour optimiser le câblage extérieur d'un pont à trois travées

Le nombre de câble doit être ni trop faible afin d'éviter toute insuffisance structurelle en cas de rupture ou de démontage d'un câble, ni trop élevé pour ne pas gêner les opérations de maintenance par encombrement du caisson.

## CONCLUSION

La diversité des ponts à réaliser a permis de développer plusieurs types de ponts en béton armé et béton armé précontraint. Le choix du type de ponts est fonction des différentes contraintes liées au chantier qui peuvent définir la portée du pont et, à cela s'ajoute l'enjeu économique.

Divers équipements techniques constituant un pont ont de l'importance sur la qualité de l'ouvrage autant du point de vue de la sécurité et de la durée de vie, que du point de vue esthétique.

Les ponts construits par encorbellements successifs sont des ponts de très grande envergure, dignes de chantiers exceptionnels. Leur mode de construction peut paraître extraordinaire mais repose sur un principe simple d'équilibre de la structure auxquelles s'ajoutent des techniques du BTP comme le béton précontraint. En fonction des contraintes du chantier et de la longueur du pont, des techniques particulières sont utilisées et peuvent même être uniques dans leur genre. La construction peut se faire par le biais de voussoirs préfabriqués qui nécessitera des moyens de manutention et de transport importants, mais aussi en voussoirs coulés en place à l'aide d'un équipage mobile technique et précis.

Finalement, aujourd'hui il n'y a plus tellement d'innovation dans la construction des ponts depuis une cinquantaine d'années et les techniques actuelles de l'ingénieur ne permettent pas de réaliser certaines idées en utilisant les matériaux usuels de construction (béton et acier). C'est pourquoi la recherche de technologies et de matériaux nouveaux, pour des ouvrages d'art plus gracieux et plus légers, peut avoir un impact futur sur la réalisation de ces ponts.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ALL 1987] Allard R. *Les travaux publics*. Eyrolles, 1987.
- [APC 2015] Agnesina F, Chignon M et Derache C. *Bétons et ouvrages d'art (Tome 1)*. DGB Studios, 2005. Architecture des ponts courants en béton, p. 66-69.
- [BEN 2000] Bennett D. *Les ponts – Histoire et Techniques*. Eyrolles, 2000.
- [CTA 2015] Les culées de pont en terre armée. *Cours de Génie Civil*. [En ligne]. [Consulté le 22 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.cours-genie-civil.com/>>
- [DTP 2015] Agnesina F, Chignon M et Derache C. *Bétons et ouvrages d'art (Tome 1)*. DGB Studios, 2005. Différents types de ponts courants routiers, autoroutiers et ferroviaires, p. 15-29.
- [F0032] Appareils d'appui en élastomère fretté. *Sétra : service d'Etudes techniques des routes et autoroutes*. [En ligne]. Juillet 2007, [consulté le 22 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://dtrf.setra.fr/>>
- [F0033] Appareils d'appui à pot. *Sétra : service d'Etudes techniques des routes et autoroutes*. [En ligne]. Novembre 2007, [consulté le 22 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://dtrf.setra.fr/>>
- [F0308] *Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs*. Sétra : service d'Etudes techniques des routes et autoroutes, juin 2003. 271 p. (Les outils).
- [IPC 2015] Khalil El Debs M. et Takeya T. *Introdução às Pontes de Concreto* (Introduction aux ponts en béton). Sao Carlos, 2007. P. 75-84 et p. 94-104.
- [LAM 2010] Lambert L. *Ouvrages précontraints construits par encorbellements successifs*. INSA Strasbourg, 2010.
- [LGV 2015] LISEA. [En ligne]. [Consulté le 20 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.lgv-sea-tours-bordeaux.fr/theme/infos-chantier/5/viaduc-de-l-indre-a-monts-37-le-tablier-prend-forme/1250/>>
- [LP 2015] Les Ponts. *Cours de Génie Civil*. [En ligne]. [Consulté le 20 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.cours-genie-civil.com/>>
- [PC 2015] Quelque chose en bas ne tourne pas rond ! *Planète sciences*. [En ligne]. [Consulté le 25 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.planete-sciences.org/national/>>
- [PRO 2015] Procédés de construction des ponts. *Cours de Génie Civil*. [En ligne]. [Consulté le 20 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.cours-genie-civil.com/>>
- [SETRAPCP] Ponts-cadres et Portiques : Guide de conception. *Sétra : service d'Etudes techniques des routes et autoroutes*. [En ligne]. [Consulté le 18 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://dtrf.setra.fr/>>
- [SETRAPD] Ponts-dalles : Guide de conception. *Sétra : service d'Etudes techniques des routes et autoroutes*. [En ligne]. [Consulté le 18 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://dtrf.setra.fr/>>
- [TDP 2015] Nehou L. Technologie des ponts. *Cours de Génie Civil*. [En ligne]. [Consulté le 22 janvier 2015]. Disponible sur : <<http://www.cours-genie-civil.com/>>

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Les différents éléments d'un PICF .....	6
Figure 2 - Les différents éléments d'un PIPO.....	7
Figure 3 - Répartition des efforts dans un pont à poutres.....	8
Figure 4 - Modèles mécaniques des poutres d'un pont à poutres.....	8
Figure 5 - Dalle continue sur poutres simplement appuyées d'un pont à poutres .....	8
Figure 6 - Modèle mécanique d'une poutre continue .....	9
Figure 7 - Moment fléchissant d'une poutre bi-encastree à inertie constante et variable.....	9
Figure 8 - Section transversale d'une poutre en T et d'une poutre en caisson .....	10
Figure 9 - Différentes sections en dalle pleine pour un pont dalle .....	11
Figure 10 - Différentes sections en dalle élégie pour un pont dalle .....	11
Figure 11 - Dimensions recommandées pour les réservations des dalles élégies.....	12
Figure 12 - Appui constitué de colonnes et de voiles.....	13
Figure 13 - Culée de pont en terre armée [CTA 2015].....	14
Figure 14 - Type de liaison des différents appuis du Viaduc du Chadon [Travail personnel].....	14
Figure 15 - Détail de la liaison du corbeau avec la dalle de transition d'un PICF [Travail personnel] .....	15
Figure 16 - Constitution type d'un AAEF.....	15
Figure 17 - Composition schématique d'un AAP .....	16
Figure 18 - Détail d'un joint de chaussée type cantilever et serrage des vis d'ancrage .....	17
Figure 19 - Détail d'une gargouille avec étanchéité et système d'évacuation des eaux .....	18
Figure 20 - Constitution d'un système drainant .....	18
Figure 21 - Garde-corps.....	19
Figure 22 - Glissière de sécurité .....	19
Figure 23 - Barrière de sécurité.....	20
Figure 24 - Construction en encorbellement équilibré [PRO 2015] .....	23
Figure 25 - Assemblage de voussoirs préfabriqués sur cintre [LGV 2015].....	23
Figure 26 - Longueurs des travées [TDP 2015].....	24
Figure 27 - Cellule de préfabrication de voussoirs courants et sur pile .....	24
Figure 28 - Zone de stockage de voussoirs [LGV 2015] .....	25
Figure 29 - Fardier sur pneus [LGV 2015].....	25
Figure 30 - Principe de pose de voussoirs par chariot mobile et par grue [PRO 2015].....	26
Figure 31 - Poutre de lancement pour la construction du Pont de l'île de Ré [APC 2015] .....	26
Figure 32 - Constitution d'une poutre de lancement.....	27
Figure 33 - Principe de pose de voussoirs par poutre de lancement .....	28
Figure 34 - Principe de brèlage des voussoirs préfabriqués .....	28
Figure 35 - Photo et schéma de principe simplifié d'un équipage mobile .....	29
Figure 36 - Principe de coffrage d'un VSP .....	30
Figure 37 - Principe de la précontrainte .....	31
Figure 38 - Elévation d'un fléau avec câbles de fléau.....	32
Figure 39 - Tracé des câbles de fléau .....	32
Figure 40 - Coupe d'un VSP avec ses câbles de clouage .....	33
Figure 41 - Elévation d'une pile avec palées provisoires .....	34
Figure 42 - Elévation d'une pile avec haubanage provisoire .....	35
Figure 43 - Coupe d'un voussoir sur pile et courant .....	35
Figure 44 - Elévation d'un demi-fléau avec ses câbles de continuité intérieurs .....	36
Figure 45 - Bossage des câbles de continuité intérieurs.....	36
Figure 46 - Elévation d'une travée avec ses câbles de continuité extérieurs.....	37
Figure 47 - Différents types de câbles utilisés pour optimiser le câblage extérieur d'un pont à trois travées .....	37

## Annexe 1 - Tableaux comparatifs des différents types de ponts en béton

### *Ponts routiers et autoroutiers*

■ Type de pont	PICF
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portées inférieures à 12 m</li> <li>• Biais supérieur à 65 grades</li> </ul>
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epaisseur de la dalle supérieure 1/25 de l'ouverture biaise</li> </ul>
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure très résistante</li> <li>• Exécution facile</li> <li>• Utilisation possible sur sol médiocre</li> </ul>
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supporte un remblai d'épaisseur modérée (2 à 3 m)</li> </ul>
■ Type de pont	PIPO
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portées comprises entre 10 et 20 m</li> <li>• Biais supérieur à 65 grades</li> </ul>
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epaisseur de la dalle supérieure 1/25 de l'ouverture biaise</li> </ul>
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure sensible aux tassements différentiels entre piliers</li> <li>• Supporte un remblai de l'ordre de 1 m</li> </ul>
■ Type de pont	DALLES NERVURÉES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portées comprises entre : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 25 et 30 m pour tablier de hauteur constante</li> <li>- 30 et 45 m pour tablier de hauteur variable</li> </ul> </li> <li>• Biais entre 70 et 100 grades</li> </ul>
Spécificités de mise en œuvre	Construction sur cintre
■ Type de pont	DALLES ÉLÉGIES
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portées comprises entre 25 et 35 m</li> </ul>
■ Type de pont	PONTS À POUTRES EN BÉTON ARMÉ
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portées entre 20 et 25 mètres</li> </ul>

### *Ponts ferroviaires*

<b>■ Type de pont</b>	<b>CADRE EN BÉTON ARMÉ</b>
Domaines d'utilisation	• Portée de 10 à 15 m
Spécificités de mise en œuvre	• Ouvrage coulé en place en trois phases : radier, piédroits, traverse supérieure
Atouts	• Ouvrage économique adapté à des sols de portance médiocre
Particularités	• Couverture de remblais importante pour de faibles ouvertures • Possibilité de mise en place par ripage ou par fonçage
<b>■ Type de pont</b>	<b>PORTIQUE EN BÉTON ARMÉ</b>
Domaines d'utilisation	• Portée de 8 à 18 m
Spécificités de mise en œuvre	• Ouvrage coulé en place en 4 phases : fondations, semelles, piédroits, traverse supérieure
Atouts	• Ouvrage économique
Particularités	• Ouvrage sensible aux tassements différentiels ou déplacements des fondations
<b>■ Type de pont</b>	<b>DALLE EN BÉTON ARMÉ</b>
Domaines d'utilisation	• Portée jusqu'à 15 m
Spécificités de mise en œuvre	• Les ouvrages isostatiques peuvent être préfabriqués • Les ouvrages continus sont réalisés en place sur étalement général ou sur cintre
Atouts	• Coffrage simple • Tablier relativement mince • Solution économique
<b>■ Type de pont</b>	<b>DALLE EN BÉTON PRÉCONTRAIT</b>
Domaines d'utilisation	• Portée courante de 15 à 20 m
Spécificités de mise en œuvre	• Les ouvrages isostatiques peuvent être préfabriqués • Les ouvrages continus sont réalisés en place sur étalement général ou sur cintre
Atouts	• Coffrage simple • Tablier relativement mince • Solution économique

<b>Type de pont</b>	<b>TABLIER À POUTRES EN BA</b>
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Travées comprises entre 20 et 25 m pour les ouvrages isostatiques et entre 25 et 30 m pour les ouvrages hyperstatiques</li> </ul>
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrage réalisé sur place, sur étaielement général ou sur une aire de préfabrication et mis en œuvre par poussage</li> </ul>
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût faible</li> </ul>
Particularités	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tablier relativement épais</li> </ul>
<b>Type de pont</b>	<b>TABLIER À POUTRES EN BP PAR POST TENSION</b>
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Travées comprises entre 20 et 35 m</li> <li>• Biais inférieur à 70 grades</li> </ul>
Spécificités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les poutres sont coulées en place ou préfabriquées et mises en place par des engins de levage</li> <li>• Le hourdis est coulé en place sur des prédalles</li> </ul>
Atouts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette solution permet des portées supérieures et des épaisseurs du tablier plus faible que la solution poutres en béton armé</li> </ul>