# Les ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs

Septembre 2016

**La technique consiste à construire un ouvrage par éléments successifs appelés voussoirs. Chaque voussoir est construit en encorbellement par rapport au voussoir précédent.**

## Présentation Générale

La technique consiste à construire un ouvrage par éléments successifs appelés voussoirs. Chaque voussoir est construit en encorbellement par rapport au voussoir précédent.

La construction est en général réalisée symétriquement de part et d'autre d'une pile pour limiter les moments de déséquilibre. On constitue ainsi une partie d'ouvrage ayant la forme d'une double console appelée fléau.

Après bétonnage (voussoir coulé en place) ou pose (voussoir préfabriqué) d'une paire de voussoirs de part et d'autre du fléau, des câbles de précontrainte sont tendus et permettent aux deux nouveaux voussoirs de compléter le fléau en cours de construction et de créer ainsi un nouveau tronçon d'ouvrage autoporteur.

La technique de construction par encorbellements successifs s'applique au tablier en caisson en béton précontraint dont les portées sont comprises en général entre 60 et 150 mètres.

*Nota : Le record du monde de portée est de 300 m en Norvège .Le record en France est le pont sur le Rhin à Strasbourg avec une portée de 205 m.*

Cette technique présente l'avantage de pouvoir réaliser des ouvrages sans contact avec le sol (pas de cintre, d'échafaudage ou d'étaiement en contact avec le sol) .Elle est particulièrement adaptée pour le franchissement de rivières, de fleuves et de vallées profondes.

Selon la longueur de la portée, le tablier peut être :

- de hauteur constante : portée en général inférieure à 100 m
- de hauteur variable : portée en général supérieure à 100 m, la variation de hauteur est en général parabolique : hauteur importante à proximité des piles et faible en travée.

La technique a profité ces dernières décennies de nombreuses innovations et évolutions en particulier au niveau :

- des règles de calcul : EUROCODE 2
- de la précontrainte : développement de la précontrainte extérieure
- de la durabilité : meilleure prise en compte des phénomènes defluage du béton

Ces ouvrages font l'objet de règles de dimensionnement qui ont évolué régulièrement au cours des cinquante dernières années afin de tirer profit des constatations et pathologies découvertes sur les ouvrages antérieurs, ce qui permet de construire des structures de plus en plus pérennes.

### Ratios et chiffres clefs des ponts construits par encorbellements successifs

Epaisseur équivalente de béton : e = 0.4 + 0.0035 L

avec L la portée principale en mètre (L compris entre 60 et 120 m)
pour L = 100 m e = 0.75 m

Armatures passives : 100 à 160 kg / m3

Précontrainte : Longitudinale 50 kg / m3
Transversale 5 kg par m2 de tablier

Les fléaux reposent en général en phase de service sur des appareils d'appuis enélastomère disposés sur les têtes de piles .Les fléaux sont dans certains cas encastrés sur les piles. En phase de construction les fléaux sont solidarisés avec la pile par un système de stabilisation des fléaux.

Capture d'écran 2019-02-28 à 10.59.04.png

TABLEAU N° HAUTEUR COURANTE DU TABLIER

*Nota : la hauteur minimale du tablier est de l'ordre de 2.2 à 2.5 mètre afin de permettre la visite et l'entretien des ouvrages par l'intérieur du caisson.*

*Nota : Les appareils d'appuis sont de plusieurs types en fonction des déplacements du tablier pris en compte dans le dimensionnement :*

- *appuis fixes*
- *appuis glissants monodirectionnels*
- *appuis glissants multidirectionnels*

*Nota : en fonction de la répartition de la longueur des travées, le tablier d'un ouvrage construit par encorbellements successifs peut être constitué de travées de hauteur constante et d'autres de hauteurs variables. Certains fléaux peuvent être encastrés sur pile (en général pour les piles les plus hautes) les autres étant sur appuis simples.*

Les ouvrages peuvent être :

- composés de fléaux identiques, les travées sont toutes de même longueur .Les travées de rive ont dans ce cas une longueur égale à 0,6 à 0,7 fois la longueur de la travée courante.
- composés de fléaux de longueur variable (plusieurs types de fléaux)

*Nota : dans le cas d'ouvrage nécessitant des fléaux non symétriques , la technique de construction consiste à prolonger la construction du fléau en surencorbellement par un ou plusieurs voussoirs .*

L'épaisseur courante du hourdis supérieur est comprise entre 20 et 25 cm .

Les âmes sont en général inclinées (de 10 à 30 % par rapport à la verticale ). Leur épaisseur est en général variable pour les tabliers de hauteur constante (plus épaisse au niveau des appuis qu'en travée) et en général constante pour des tabliers de hauteur variable .

Le hourdis inférieur a une épaisseur minimale en travée de l'ordre de 20 cm .Cette épaisseur peut être variable et être plus importante à proximité des appuis.

L'épaisseur des âmes dépend du type de câblage .L'ordre de grandeur est donné par la formule :

e = 26 + L / 5

Avec e épaisseur de l'âme en cm et L longueur de la travée en m

Si les câbles descendent dans les âmes pour contribuer à la résistance vis-à-vis de l'effort tranchant, l'épaisseur des âmes est imposée par les dimensions des éléments d'ancrage de la précontrainte.

Les voussoirs sur pile et les voussoirs des culées comportent des entretoises enbéton qui permettent en particulier de raidir la section transversale du tablier et de la rigidifier entorsion dans les zones d'appuis et d'ancrer les câbles de précontrainte extérieure.

Certains voussoirs en travée sont équipés de déviateurs qui permettent de dévier les câbles de précontrainte extérieure.

La longueur des voussoirs est fonction de la technique utilisée (coulé en place ou préfabriqué), des dimensions géométriques de l'ouvrage et éventuellement des longueurs des éléments de corniche ou de l'espacement des bracons ou des nervures transversales. La longueur courante est de l'ordre de 2 à 4 mètres.

La dimension des voussoirs est limitée par leurs poids et donc par les moyens de levage et de transport sur le chantier, dans le cas des ouvrages construits en voussoirs préfabriqués (de l'ordre de 50 tonnes).

Dans le cas des voussoirs coulés en place, la longueur (de l'ordre de 8 à 10 mètres) résulte d'un compromis visant à optimiser les cycles de bétonnage et de réduire la complexité des équipages mobiles.

*Nota : le voussoir sur pile dans le cas de voussoirs préfabriqués est souvent découpé en plusieurs éléments afin de réduire le poids des éléments à transporter, qui sont assemblés en place à l'aide de barres ou de câbles de précontrainte.*

Pour un ouvrage coulé en place, la longueur du voussoir sur pile doit permettre le montage et l'accrochage de l'équipage mobile .Il est construit à l'aide d'un échafaudage fixé aux piles .

*Nota : le voussoir de clavage a une longueur de l'ordre de 2 mètres pour les ouvrages coulés en place et de quelques dizaines de centimètres pour les ouvrages construits à l'aide de voussoirs préfabriqués.*

## Cinématique de construction

Les ouvrages sont construits en général par **fléau** les uns après les autres .Mais pour réduire les délais d'exécution les fléaux peuvent être construits simultanément .Dès qu'un fléau est terminé il est solidarisé par clavage avec le fléau précédent.

*Nota : pour un ouvrage à trois travées (et donc 2 fléaux) la cinétique de construction courante est la suivante :*

- réalisation des parties coulées sur cintre au niveau des culées
- réalisation des 2 fléaux
- clavage de chaque fléau avec la partie coulée sur cintre de rive
- clavage des fléaux au milieu de l'ouvrage.

## Principe de câblage des ponts construits par encorbellements successifs

Les câbles de précontrainte des ponts construits par encorbellements successifs se décomposent en deux principales familles.

- Les câbles de fléaux qui permettent l'assemblage des voussoirs lors de la construction des fléaux et assurent la reprise des sollicitations créées au cours de la construction des fléaux.

  Ils compensent les moments négatifs engendrés par le poids propre des voussoirs et les charges de coffrages et de chantier. Ils sont intérieurs au **béton**.

  On dispose en général un **câble de précontrainte** de fléau par âme et par voussoir. Les câbles sont tendus après bétonnage dans le cas de voussoirs coulés en place ou après mise en place des voussoirs préfabriqués

  Les câbles de fléau sont logés dans les goussets supérieurs. Leurs ancrages sont situés sur la tranche des voussoirs aux nœuds entre les âmes et le **hourdis** supérieur ou dans les âmes. Des dispositions constructives relatives à l'espacement entre les câbles doivent être respectée pour permettre le bétonnage. Les câbles sont déviés en plan et en élévation selon des règles géométriques précises.

- Les câbles de continuité qui compensent les efforts et les charges appliquées en phase de service de l'ouvrage et le poids des équipements (chaussées, trottoirs…). Ils permettent de solidariser les fléaux et les parties coulées sur cintre et de s'opposer aux sollicitations (moments hyperstatiques) induites en particulier par les déformations différées du béton (redistribution des efforts dus au fluage dans la structure construite en plusieurs phases à des âges différents) et les gradients thermiques (liés aux effets de l'ensoleillement sur le tablier).

  Les câbles de continuité (dont la tendance depuis plusieurs années est au câblage mixte) sont :

- soit intérieurs au béton : câbles éclisses disposés en travée courante et dans les extrémités des travées de rive et mis en tension lors du clavage des fléaux pour assurer la continuité de l'ouvrage. Ces câbles sont ancrés dans des bossages situés à la jonction des âmes et du hourdis inférieurs.

  Les câbles éclisses sont dimensionnés pour s'opposer aux effets thermiques et aux efforts induits par la structure entre la phase de clavage et la mise en précontrainte des câbles de continuité.

- soit extérieurs au béton : câbles se développant sur plusieurs travées. Mis en place à l'intérieur du caisson ,ils sont en partie basse en travée et déviés pour se retrouver en partie haute aux niveaux des piles. Ils sont déviés ou ancrés dans des entretoises massives sur piles et déviés en travée grâce à des voiles en béton appelés déviateurs situés entre le quart et le tiers de la travée.

  Les câbles extérieurs reprennent :

- en travée : les moments positifs dus aux charges permanentes ;
- sur appui : les moments négatifs dus en particulier aux charges d'exploitation

  Ils ont un tracé polygonal (ou trapézoïdal) et rectiligne par tronçons, situés près du hourdis inférieur en travée et près du hourdis supérieur sur appuis. Les déviateurs ont en général la forme d'une entretoise (voile d'épaisseur 50 à 80 cm) comportant une ouverture pour permettre la circulation à l'intérieur du caisson. La précontrainte de continuité est en général réalisée avec des câbles de grande puissance ce qui permet d'en réduire le nombre.

  Les câbles les plus employés ont des unités de type 12T15 ou 12T15S .Pour de grandes travées et des ouvrages de grande largeur on utilise des câbles de type 19T15.

  Les câbles de précontrainte sont protégés par des conduits (tubes en acier, gaines rigides , gaines en feuillard) pour les câbles intérieurs au béton et généralement des gaines en PEHD (Polyéthylène à Haute Densité) pour la précontrainte extérieure.

  Les câbles intérieurs au béton sont injectés par un **coulis de ciment** (mélange d'eau, de ciment et d'adjuvants) afin d'être protégés de la corrosion.

  Les câbles extérieurs au béton sont désormais injecté avec un produit souple (graisse ou **cire** pétrolière) mise en œuvre à chaud afin de pouvoir les démonter en cas de besoin.

  *Nota : les câbles de précontrainte extérieure sont en général démontables .Ils doivent pouvoir être changés et remplacés pour pallier d'éventuelles insuffisances de précontrainte ou de corrosion des câbles.*

  L'ordre de mise en tension des câbles est le suivant :

- câbles de fléau au fur et à mesure de la réalisation ou de l'assemblage des voussoirs
- câbles de continuité intérieurs qui permettent de solidariser les travées de rive et les fléaux, au fur et à mesure des clavages
- câbles de continuité extérieurs.

  *Nota : il est prévu en général des gaines de précontrainte vides qui permettent de recevoir une précontrainte complémentaire en cas de besoin.*

## Section transversale

La section transversale de ce type d'ouvrage est en général en forme de **caisson** afin d'offrir une bonne résistance à la **torsion**.

On distingue plusieurs types de caissons :

- **Monocaisson** simple : pour des largeurs de tablier inférieures à 20 mètre .Le caisson est constitué des hourdis supérieur et inférieur associés à des âmes inclinées ou verticales .Le hourdis supérieur est précontraint transversalement si la largeur du tablier est supérieur à 15 mètres.
- **Monocaisson** à nervures : pour des largeurs de tablier supérieures à 20 mètres, les nervures transversales espacées de 3 à 5 mètres permettent de rigidifier le caisson .Ces nervures peuvent être précontraintes.
- **Monocaisson** à bracons : les bracons espacés de 3 à 5 mètres sont disposés sous les encorbellements .Ils sont en général constitués de tubes en acier.
- **Bicaisson** : le tablier est dans ce cas constitué de deux caissons monocellulaires reliés par un hourdis intermédiaire.
- **Monocaissons** à trois âmes : pour des tabliers de grande largeur.

## Détermination de la précontrainte longitudinale

Le calcul des sollicitations dans la structure et la détermination de la précontrainte longitudinale doit prendre en compte :

- le phasage de construction et le planning de réalisation
- les différents bétonnages ou poses des voussoirs
- les mises en tension des câbles de précontrainte

- les avancements des équipages mobiles
- les clavages
- les transferts d'appuis
- la pose des équipements de l'ouvrage
- les effets différés du béton : retrait et fluage

Les calculs compte tenu de la complexité du comportement de ces structures hyperstatiques sont effectués à l'aide de logiciel de calcul spécifiquement adaptés (en 2 D ou 3 D) .

Ils sont menés suivant la théorie de la RDM appliquée aux poutres élastiques, chaque voussoir étant en général représenté par un élément de poutre.
Ils prennent en compte :

- les états limites de service : ELS
- les états limites ultimes : ELU

Ils doivent suivre le phasage complet et précis de la construction, pour tenir compte des dates d'application des charges et de l'évolution du comportement des matériaux (retrait, fluage, relaxation) entre ces différentes phases.

La détermination de la précontrainte longitudinale se fait de manière successive par :

- détermination du câblage des fléaux
- détermination du câblage de continuité intérieure au béton
- détermination du câblage de continuité extérieur au béton

## Dimensionnement du tablier vis-a-vis des sollicitations transversales et locales

Le **caisson** du tablier des ouvrages construits par encorbellements successifs est soumis à :

- une flexion transversale
- des sollicitations tangentes
- des efforts localisés : poids des équipages mobiles (50 à 100 t)
- des diffusions d'efforts en particulier au niveau des déviateurs et des voussoirs sur pile.

La justification de la **section** transversale et la détermination des **armatures** dans la section transversale du tablier doit prendre en compte l'éventuel cumul ou concomitance des diverses sollicitations.

Les principales sections à **dimensionner** sont :

- dans le hourdis inférieur, au niveau du gousset
- dans les âmes, au centre et aux extrémités supérieures et inférieures
- dans le hourdis supérieur, au niveau de l'encorbellement, au droit des goussets intérieurs et au centre de la dalle.

Le calcul doit aussi intégrer:

- la poussée au vide du béton dans les hourdis courbes (cas des tabliers de hauteur variable )
- la poussée au vide des câbles éclisses
- la poussée des câbles de précontrainte au droit des déviateurs.

Selon la complexité de l'ouvrage et de la géométrie du caisson (caisson monocelulaire de grande largeur, caisson multicellulaire, caisson à nervures transversales…) et du type de voussoir (VSP , voussoir avec déviateur…) le calcul des sollicitations transversales est effectué :

- à l'aide d'abaques
- un modèle 3D
- un calcul aux éléments finis.

Pour les voussoirs préfabriqués, les armatures passives des voussoirs sont aussi déterminées en considérant les sollicitations induites lors du stockage et du transport des voussoirs et les efforts générés par les engins de pose (**poutre** de lancement, fardier …).

Le hourdis supérieur est essentiellement dimensionné par sa résistance aux charges concentrées .Son épaisseur est pour les ouvrages courants de l'ordre de 20 à 30 cm et de 25 à 30 cm pour les caissons de grande largeur non nervurés transversalement. L'épaisseur du hourdis inférieur est imposée par des contraintes de résistance en flexion.

## Construction par voussoirs coules en place

Le premier voussoir construit est le Voussoir Sur Pile (VSP). Il est réalisé à l'aide d'un **coffrage** spécifique (coffrage intérieur en bois ou métallique, coffrage extérieur métallique) mis en place au sommet de la pile.

Ce voussoir est en général coulé en deux étapes :

- bétonnage du hourdis inférieur, des goussets et du début des âmes.
- bétonnage des âmes, de l'entretoise sur pile, du hourdis supérieur et des encorbellements.

La réalisation de ce voussoir complexe (géométrie particulière due aux entretoises, densités d'armatures et de câbles importantes) nécessite plusieurs semaines.

Les autres voussoirs constituant le **fléau** appelésvoussoirs courantssont construits en utilisant un coffrage spécifique appelé équipage mobile.On dispose un équipage mobile au niveau de chaque demi fléau, les deux équipages se déplacent de manière symétrique au fur et à mesure des bétonnages, de la pile vers le milieu de la **travée**.

L'équipage mobile est constitué :

- d'une charpente métallique .Cette charpente permet d'assurer l'accrochage de l'équipage mobile à la partie déjà construite et de supporter le poids du voussoir en cours d'exécution. Elle est en général constituée de poutres porteuses situées le long des âmes.
- des coffrages intérieurs et extérieurs des hourdis et des âmes,
- des plate-formes de travail et des passerelles d'accès.

L'équipage mobile est conçu pour se déplacer en extrémité de fléau après le bétonnage du voussoir et la mise en tension des câbles de fléaux afin de permettre la réalisation du voussoir suivant. Il doit supporter le poids des voussoirs avant qu'ils ne soient assemblés par précontrainte au fléau déjà construit et permettre un positionnement géométrique précis du coffrage du voussoir dans l'espace.

Le poids des équipages mobiles doit être pris en compte pour le dimensionnement de la précontrainte de fléau. Il augmente les sollicitations dans la structure en flexion longitudinale mais aussi en flexion transversale. Il induit des efforts locaux en phase de construction au niveau des fixations aux voussoirs ce qui nécessite de renforcer le **ferraillage** du hourdis supérieur.

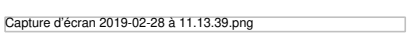



TABLEAU - CINEMATIQUE SIMPLIFIEE DE REALISATION D'UN VOUSSOIR COURANT (VOUSSOIR n)

Le bétonnage d'un **voussoir** est réalisé en continu : **hourdis** inférieur, âme, hourdis supérieur. Des fenêtres sont aménagées dans les coffrages intérieurs des âmes pour permettre le bétonnage.

Le voussoir de clavage (voussoir situé entre les deux extrémités de deux fléaux successifs) est en général coulé en une seule étape, à l'aide d'une partie de l'équipage mobile utilisé pour la réalisation du voussoir courant.

*Nota : Les fléaux sont stabilisés en phase de construction en général par des câbles de précontrainte appelés câble de clouage. Ces câbles sont ancrés d'un coté en partie haute du voussoir sur **pile** et de l'autre côté, en sous face du chevêtre. Ils sont mis en tension dès que le béton a atteint une résistance en **compression** de l'ordre de 25 MPa.*

La cadence de réalisation d'une paire de voussoirs est de l'ordre d'une semaine (parfois deux paires par semaine avec l'emploi de bétons à hautes performances) .

## Construction par voussoirs préfabriqués

### Généralités

Les voussoirs préfabriqués en béton sont confectionnés dans une installation de **préfabrication** installée à proximité de l'ouvrage à réaliser. Les voussoirs sont coffrés, ferraillés et bétonnés sur un banc (ou doucine) ou le plus souvent dans des cellules de préfabrication de longueur égale à 2 à 3 voussoirs courants.

Le voussoir courant « n » est bétonné au contact du voussoir « n-1 », préalablement réalisé ce qui permet de garantir une parfaite conjugaison entre deux voussoirs successifs (technique appelée à voussoirs conjugués, le voussoir n-1 sert de fond de coffrage au voussoir n)

Les cadences de fabrication sont en général de 1 voussoir courant par jour. Les voussoirs sur pile sont réalisés en général en plusieurs parties (compte tenu de leur poids important) dans des cellules spécifiques.

Après bétonnage les voussoirs sont stockés à l'aide de grands portiques roulants sur une aire de stockage sur un ou plusieurs niveaux pendant une période minimale de l'ordre d'un mois. Le stockage et le chargement pour le transport des voussoirs sont assurés par un portique de manutention.

#### Méthodes de pose des voussoirs

Au niveau des travées de rive coté culées, les voussoirs sont en général posées et assemblés sur un cintre.

Les voussoirs sont transportés :

- par un fardier qui se déplace sur une piste de chantier jusqu'au pied de la pile ou sur la partie de tablier déjà réalisée.
- par barge si l'ouvrage franchit une rivière navigable.

Plusieurs techniques de pose des voussoirs sont utilisées :

- Pose à la poutre de lancement

Les voussoirs préfabriqués sont souvent posés à l'aide d'une poutre de lancement .Cette structure métallique auto déplaçable est constituée en général de deux poutres **treillis**, de deux pylônes et de béquilles servant d'appuis et de ponts roulants assurant la **prise** en charge des voussoirs .Elle prend appui sur le tablier et permet d'approvisionner l'ouvrage à construire en continue à partir d'une extrémité .La longueur de la poutre est de l'ordre du double de la **portée** courante de l'ouvrage (soit 100 à 200 m ) .

En phase de construction courante d'un fléau la poutre repose sur la partie de tablier déjà réalisée au droit de la pile du fléau à construire et sur la pile suivante .Elle met en place en général de manière symétrique les voussoirs de part et d'autre du VSP pour construire successivement l'ensemble du fléau.

Les voussoirs sont acheminés jusqu'à la poutre depuis l'aire de stockage par des fardiers se déplaçant sur la partie de l'ouvrage déjà construite.

- Pose à l'aide d'une grue

Les voussoirs peuvent aussi être approvisionné à l'aide d'une grue mobile , si l'accès en pied du fléau est possible et si la pile n'est pas trop haute .Pour des ouvrages situés en site maritime ou fluvial la pose peut s'effectuer à l'aide d'une grue fixée sur une barge qui se déplace en alternance d'une extrémité à l'autre du fléau .

- Pose à l'aide d'un fardier

Les voussoirs peuvent aussi être approvisionnés en pied de pile (par voie terrestre ou par barge) et pris en charge par un fardier se déplaçant sur l'ouvrage en alternance de chaque côté du fléau à construire ou par des grues fixées aux extrémités des fléaux.

- construction à l'avancement par haubanage provisoire

Cette technique consiste à construire le tablier de manière continue d'un bout à l'autre de l'ouvrage en partant d'une culée et en réalisant les travées successivement en posant les voussoirs les uns après les autres.

Un haubanage provisoire permet de maintenir l'extrémité du tablier en fléau.

Les voussoirs sont approvisionnés depuis l'aire de préfabrication jusqu'à l'extrémité de la partie construite par un fardier roulant sur la partie d'ouvrage réalisée.

L'appareil de pose des voussoirs se déplace sur le tablier .Il est équipé d'une potence orientable qui permet de prendre en charge le voussoir sur le fardier et de le placer à sa position définitive en extrémité de fléau .Le nouveau voussoir est alors assemblé par brélage au fléau.

Cette solution permet de franchir des brèches encombrées ou de grands axes routiers ou ferroviaires sans perturber le trafic .Elle permet de réaliser sans difficulté des ouvrages courbes ou de largeur variable.

#### Clés des voussoirs préfabriqués

Les voussoirs préfabriqués comportent des clefs sur la **section** des âmes (partie de **béton** en relief, système de tenons et mortaises) qui assurent au niveau du **joint** la transmission des efforts tranchants. La section des voussoirs est enduite avant assemblage d'une colle à base de résine époxyde) qui va assurer l'étanchéité du joint et permettre la transmission des contraintes de **traction** et de cisaillement. Une fois la colle polymérisée la liaison est continue et l'effort tranchant est repris sur toute l'épaisseur de l'âme. Les clés sont en général de petite taille et réparties sur toute la hauteur des âmes et dans les **hourdis**.

#### Assemblage provisoire des voussoirs

Les voussoirs en cours de pose sont assemblés au **fléau** à l'aide d'un brélage provisoire (constitué en général de barres de précontrainte ancrées dans des bossages) .Le brélage est démonté dès que les câbles définitifs des fléaux ont été tendus .La pression exercée par le brelage permet de comprimer la colle dans les joints.

### Stabilité des fléaux en phase de construction

La construction des ouvrages par encorbellements successifs impose une phase délicate de réalisation .En effet il convient lors de toutes les phases de la réalisation du fléau d'en assurer la stabilité avant clavage avec le fléau voisin ou la **travée** de rive.

Il faut lors de la confection des voussoirs coulés en place ou la pose des voussoirs préfabriqués éviter le basculement du fléau sur le chevêtre de la **pile**.

Le déséquilibre du fléau peut être généré en particulier :

- par la chute d'un équipage mobile
- par la chute d'un voussoir préfabriqué en cours de pose ou de brelage.
- par un chargement non symétrique du fléau (pose d'un voussoir par exemple d'un seul coté)
- par les effets du vent s'exerçant sur un seul fléau.

La stabilité du fléau sur la pile peut être assurée :

- par un clouage du fléau sur la pile à l'aide de câbles de précontrainte. Cette technique consiste à solidariser le voussoir sur pile avec la pile en mettant en tension des câbles de précontrainte. C'est la technique la plus utilisée.

Le VSP est posé sur des cales provisoires (appelées boites à **sable**). Les câbles de précontrainte sont ancrés dans des bossages provisoires posés sur le hourdis supérieur du VSP .Ils traversent le VSP et le chevêtre dans lequel ils sont ancrés. Une autre solution consiste à faire suivre au câble une boucle dans le fut de pile et d'ancrer les deux extrémités sur le hourdis du VSP.

Le système de **stabilisation** est en général constitué de 4 câbles ou de deux câbles en boucle.

- Par des palées provisoires .Le fléau repose dans ce cas sur des appuis provisoires éloignés de quelques mètres de la pile, ce qui permet d'augmenter l'entraxe des cales d'appuis.

- Par haubanage .La stabilisation du fléau est assurée par des câbles de précontrainte ancrés dans les premiers voussoirs en encorbellement et en partie basse dans des massifs de fondation ou les semelles des piles.

- Par encastrement sur pile .Dans ce cas le fléau est encastré lors de la construction du voussoir sur pile avec la pile de manière définitive. Cette solution nécessite une rigidité importante de la pile (pile de section en forme de caisson, pile dédoublée constituée de deux voiles parallèles).

Pour le calcul de la stabilité du fléau les charges suivantes sont prises en compte :

- les charges permanentes : poids total des divers voussoirs en intégrant les entretoises, les déviateurs, les bossages…(le poids du demi-fléau situé du côté du déséquilibre est majoré de 2%, son symétrique est minoré de 2%).

- les charges variables d'exécution : équipages mobiles, poutres de lancement, grues …(ces charges sont majorées de 6% du côté du déséquilibre et minorée de 4% de l'autre coté).Il est aussi pris en compte des charges de chantier aléatoires correspondants aux divers matériels et matériaux stockés sur le fléau .
- les effets du vent .Ces effets s'appliquent verticalement de bas en haut sur un demi-fléau.
- les actions accidentelles : chute d'un équipage mobile ou d'un voussoir en cours de pose (cette charge est pris en compte avec un coefficient de majoration de 2)

La justification de la stabilité des fléaux est effectuée vis-à-vis :

- de l'Etat Limite Ultime d'équilibre des fléaux sur la pile (non décollement du fléau de ses appuis provisoires).
- de l'Etat Limite Ultime de résistance pour les piles et les fondations.

Les phases de travaux dimensionnantes correspondent en général au coulage ou à la pose des dernières paires de voussoirs.

## Contrôles de chantier

Lors de la réalisation des piles et du tablier des contrôles de la géométrie et une surveillance topographique de l'ouvrage sont effectués en continu, de façon à pouvoir intervenir sur la géométrie des piles et sur les contreflèches des voussoirs et intégrer les déformations de l'ouvrage.

Le fléau est constitué de plusieurs voussoirs fabriqués, posés et mis en charge à des âges différents, avec un matériau dont les caractéristiques varient dans le temps. Il est important de prévoir avec précision quelle sera la déformation du fléau, de manière à déterminer la contre-flèche à donner à la géométrie du voussoir que ce soit dans la cellule de **préfabrication** pour les voussoirs préfabriqués, ou dans les équipages mobiles pour les voussoirs coulés en place.

Pour les ouvrages coulés en place lors de la construction d'un nouveau voussoir, il faut régler la position de l'équipage mobile en prenant en compte la géométrie du fléau déjà coulé. La géométrie des fléaux est donc ainsi corrigée de proche en proche au fur et à mesure de la réalisation des voussoirs.

L'ouvrage va subir au cours du temps un phénomène de**fluage** et de déformations différées .La déformée du tablier évolue au cours du temps. Afin d'obtenir au bout d'un temps infini un ouvrage proche du profil théorique, on vise lors de la fabrication des voussoirs un profil déformé (chaque voussoir a ainsi une contre-flèche) qui est à l'opposé des déformations qui vont se produire au cours du temps.

Auteur

**Patrick Guiraud**

**Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr**

**Consultez** les derniers projets publiés
**Accédez** à toutes nos archives
**Abonnez-vous** et gérez vos préférences
**Soumettez** votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr