

Récents développements des ponts à voussoirs préfabriqués

Autor(en): **Mathivat, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE surveys = Revue AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **1 (1977)**

Heft S-2: **Recent developments in precast segmental bridge construction**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-43579>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Récents développements des ponts à voussoirs préfabriqués

Neuere Entwicklungen im Bau von segmentweise
vorgefertigten Hohlkastenbrücken

Recent developments in precast segmental bridge construction

J. MATHIVAT

Professeur, Directeur des Etudes
Entreprises CAMPENON BERNARD CETRA
Paris, France

RÉSUMÉ

L'auteur fait le point sur les derniers développements de la construction des tabliers de ponts par voussoirs préfabriqués en examinant successivement:

- les caractéristiques générales des voussoirs à joints conjugués collés
- l'évolution de la section transversale des voussoirs
- les progrès dans les méthodes de pose des voussoirs.

Il évoque également les problèmes de conception posés par les voussoirs spéciaux assurant l'entretoisement des tabliers.

ZUSAMMENFASSUNG

Der folgende Bericht befasst sich mit neueren Entwicklungen im Bau von segmentweise vorgefertigten Hohlkastenbrücken. Er behandelt folgende Problemkreise:

- allgemeine Kennzeichen der Segmente mit geklebten Fugen
- Entwicklung der Querschnittsform
- Fortschritte bei der Montage der Segmente.

Der Bericht geht schliesslich auf Probleme ein, die sich mit der Aussteifung des Querschnitts durch spezielle Segmente stellen.

SUMMARY

In this state-of-art report the author describes recent developments in the construction of precast segmental bridges with reference to the following topics:

- the general characteristics of the elements with epoxy joints
- the development of the design of the cross section of a segment
- the improvement in the methods of placing the segments.

as well as the design problems for special segments used as cross-beams.



1- LES VOUSSOIRS A JOINTS CONJUGUES COLLES

Le principe des voussoirs à joint conjugés collés est maintenant bien connu. Lors de leur préfabrication la conjugaison des voussoirs est réalisée en bétonnant ceux-ci les uns contre les autres, la face avant de chaque élément servant de coffrage à la face arrière de l'élément suivant.

Au moment de la pose des voussoirs, les joints, de faible épaisseur, sont simplement garnis d'une colle polymérisable à base de résine époxyde, à durcissement rapide et peu sensible aux conditions thermohygro-métriques.

1,1- Voussoirs de la première génération

1,11- Dispositions constructives des joints

Dans les ouvrages construits jusqu'à ces dernières années la colle jouait un quadruple rôle. Elle avait pour objet :

- pendant la construction, avant durcissement :
 - de lubrifier les surfaces en contact lors de la mise en place des voussoirs
 - de compenser les imperfections mineures dans la conjugaison des surfaces
- dans l'ouvrage terminé, après durcissement :
 - de réaliser l'étanchéité à l'eau des joints, en particulier au droit de la dalle de chaussée
 - de participer à la résistance de la structure en transmettant à travers les joints des efforts de compression et de cisaillement.

Mais, par suite de leur lubrification, les joints ne présentent pratiquement aucune résistance au cisaillement avant polymérisation de la colle. Il a donc été nécessaire, dans les premiers ouvrages de ce type, de ménager dans chaque âme des voussoirs une clé destinée à empêcher le glissement relatif au droit des joints et à assurer le transfert de l'effort tranchant.

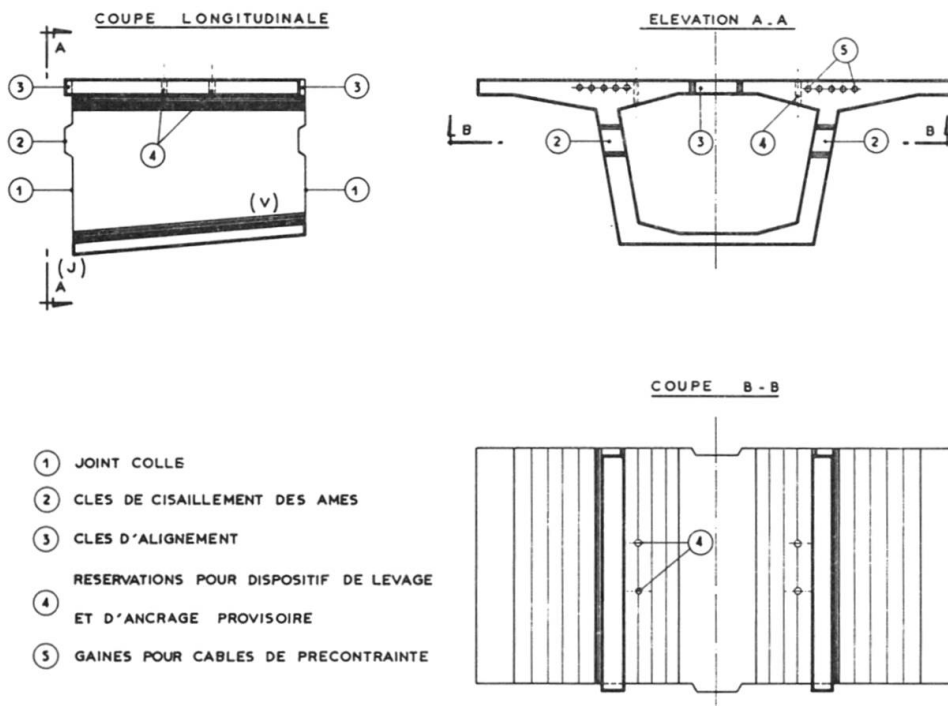


Fig. 1 - Voussoir préfabriqué de la première génération

Ces clés, complétées par une troisième située dans la table supérieure, réalisent également un guidage et un centrage extrêmement précis des voussoirs les uns par rapport aux autres, la position que ceux-ci occupaient à la préfabrication étant reproduite exactement dans l'ouvrage (Fig. 1).

1, 12- Assemblage provisoire des voussoirs. Equilibre des efforts dans les joints

Lors du montage du tablier, une solidarisation provisoire de deux voussoirs successifs à l'aide de dispositifs mécaniques ou d'armatures de précontrainte permet de libérer rapidement le ou les engins de pose, sans qu'il soit nécessaire d'attendre la mise en tension des câbles de précontrainte définitifs.

La figure 2 montre comment un voussoir type de la 1ère génération est assemblé au reste de la structure par des dispositifs temporaires situés, par exemple, au niveau des tables supérieures et inférieures et destinés à créer des efforts de précontrainte F_1 et F_2 assurant la stabilité du voussoir au droit du joint qui vient d'être enduit de colle.

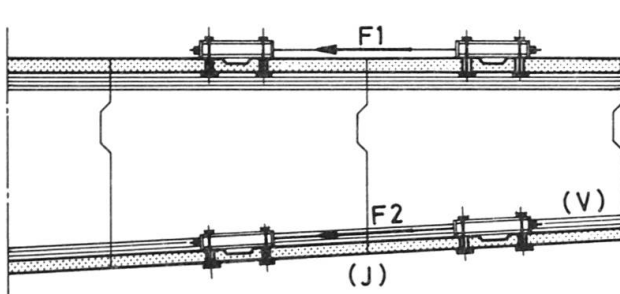


Fig. 2- Assemblage provisoire

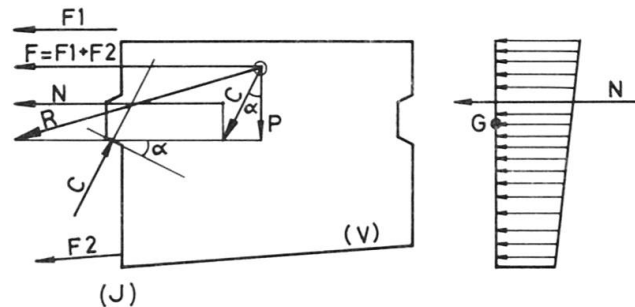


Fig. 3 - Equilibre du joint

Ces deux efforts peuvent être combinés avec le poids P de l'élément en une résultante R inclinée par rapport au joint. En raison du faible coefficient de frottement de la colle, l'effort de glissement dans le joint produit par le poids P ne peut être équilibré que par la composante verticale de la réaction oblique C prenant naissance perpendiculairement à la face inférieure des clés des âmes.

La résultante R se décompose alors en une réaction C supportée par la clé et une réaction horizontale N contribuant seule au serrage du joint (Fig. 3).

La répartition des contraintes normales dans la section du joint est ainsi différente de celle que l'on obtiendrait par un calcul classique. En particulier, l'effort normal N est inférieur à la somme F des efforts de précontrainte provisoire appliqués au voussoir. En appelant α l'inclinaison sur l'horizontale des faces d'appui des clés, $F - N$ est égal à $P \operatorname{tg} \alpha$, c'est-à-dire, dans le cas courant où $\operatorname{tg} \alpha = 1/2$, à $P/2$.

Pour un voussoir de 50 t., solidarisé provisoirement aux éléments précédents par des barres de précontrainte d'une force utile de 100 t. disposées au niveau de la table supérieure, la réduction de l'effort normal est égale à 25 t., soit au quart de la précontrainte appliquée.

Si la mise en place des voussoirs dans l'ouvrage est suffisamment rapide pour que 4 voussoirs puissent être posés avant que la colle du premier joint soit polymérisée, la réduction de l'effort normal dans ce joint atteindra 100 t., correspondant sensiblement à la suppression d'un câble de précontrainte 12 T 13. Il en est évidemment de même dans le cas où, n'utilisant pas de dispositifs provisoires d'assemblage, la stabilité des voussoirs est assurée par des câbles de précontrainte définitifs.



Il est par conséquent souhaitable, lors des vérifications de la résistance des fléaux en cours de construction, de tenir compte de cette diminution de l'effort de précontrainte effectif sous peine de voir les joints de certains voussoirs s'ouvrir. Dans l'ouvrage en service, après polymérisation de la colle, la précontrainte déterminée à partir du plan de câblage définitif est surestimée dans les mêmes proportions. Il est également recommandé de choisir la position et l'intensité des efforts de précontrainte provisoire F1 et F2 de manière que l'effort normal N soit peu éloigné du centre de gravité de la section, afin d'obtenir une distribution à peu près uniforme des contraintes normales sur la hauteur du joint, tendant à réaliser un film de colle d'épaisseur constante.

1,13- Assemblage définitif des voussoirs - Rôle structurel de la colle

En ce qui concerne le tracé des armatures de précontrainte, on sait que la résistance des fléaux est assurée par une première famille de câbles, inclinés ou non, dont les ancrages sont généralement disposés sur la tranche des voussoirs: les opérations de mise en oeuvre de la précontrainte sont alors intégrées au cycle des opérations de pose puisqu'une nouvelle paire de voussoirs ne peut être placée qu'après mise en tension des câbles de précontrainte de la paire précédente (Fig. 4).

Les câbles de solidarisation des divers fléaux - constituant la seconde famille - sont ancrés soit au niveau de la table inférieure dans des bossages, soit dans les goussets de raccordement de la dalle de chaussée et des âmes, après avoir été remontés dans celles-ci.

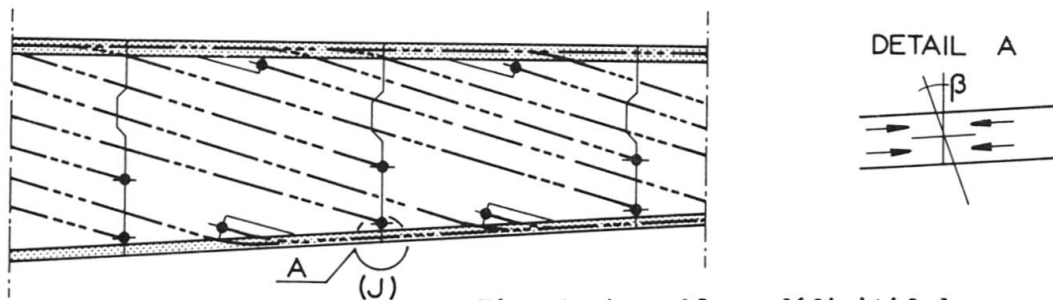


Fig. 4- Assemblage définitif des voussoirs

Les efforts tranchants en service sollicitant les joints varient beaucoup en fonction des caractéristiques des ouvrages. Dans les ouvrages à hauteur variable comportant des armatures de précontrainte inclinées dans les âmes, les efforts de cisaillement traversant les joints demeurent limités; ils sont généralement négligeables sous les charges permanentes et sont compris entre 10 et 25 kg/cm² sous l'effet des surcharges. Mais, dans un tablier de hauteur constante de grande portée, dont la précontrainte longitudinale est réalisée par des câbles horizontaux, les contraintes de cisaillement à travers les joints sous surcharges peuvent dépasser 40 kg/cm², comme au pont de Conflans sur la Seine et au pont de Rio-Nitério, au Brésil, où chaque âme a d'ailleurs été équipée de trois clés. Un choix ou un usage impropre de la colle peut alors être critique à l'égard de la résistance à l'effort tranchant, ce qui impose un contrôle sévère des joints collés.

D'une manière générale, les colles disponibles sur le marché présentent des résistances finales supérieures aux besoins, à la condition que la polymérisation soit suffisamment complète. Ceci suppose :

- le respect de la proportion des constituants
- l'absence de solvants qui sont de véritables poisons
- l'élimination de produits souples, tels que les Thiokol, qui augmentent exagérément la déformabilité de la colle

- une application soignée.

Concernant ce dernier point, le traitement des surfaces à encoller revêt une importance primordiale. Il a été démontré par des essais comparatifs que le sablage donnait les meilleurs résultats, les surfaces devant être maintenues sèches et propres pendant les opérations de pose, exemptes d'huile notamment. En cas de pluie, les joints sont brûlés à l'alcool pour éliminer l'humidité superficielle. La présence d'eau dans le béton ne modifie par contre pas les propriétés des résines.

Il a été également établi que la pose rapide des voussoirs successifs avait une influence favorable sur le comportement de la colle. L'application sur un joint en cours de polymérisation d'une contrainte de compression supplémentaire créée par la précontrainte des voussoirs suivants améliore dans une proportion non négligeable les caractéristiques mécaniques ultimes de la résine.

On notera enfin que dans les ouvrages de hauteur variable, le tracé des joints entre voussoirs ne permet pas de disposer le plan de joint perpendiculairement aux efforts, notamment au niveau de la membrure inférieure. Le joint collé est dans ce cas localement soumis à des efforts de cisaillement qui peuvent être importants et qui en cas de non polymérisation de la colle risquent d'entraîner une rupture du hourdis inférieur, ce dernier étant soumis au voisinage du joint à des efforts de flexion verticaux dirigés d'un côté vers le haut et de l'autre vers le bas.

En plus des dispositions habituelles destinées à assurer une polymérisation normale de la colle, on peut se prémunir contre un tel risque en prévoyant dans le hourdis inférieur des clés supplémentaires réalisant une liaison mécanique ou en plaçant une fourrure dans le coffrage de façon à obtenir une surface normale aux efforts à transmettre.

1,2- Voussoirs de la seconde génération

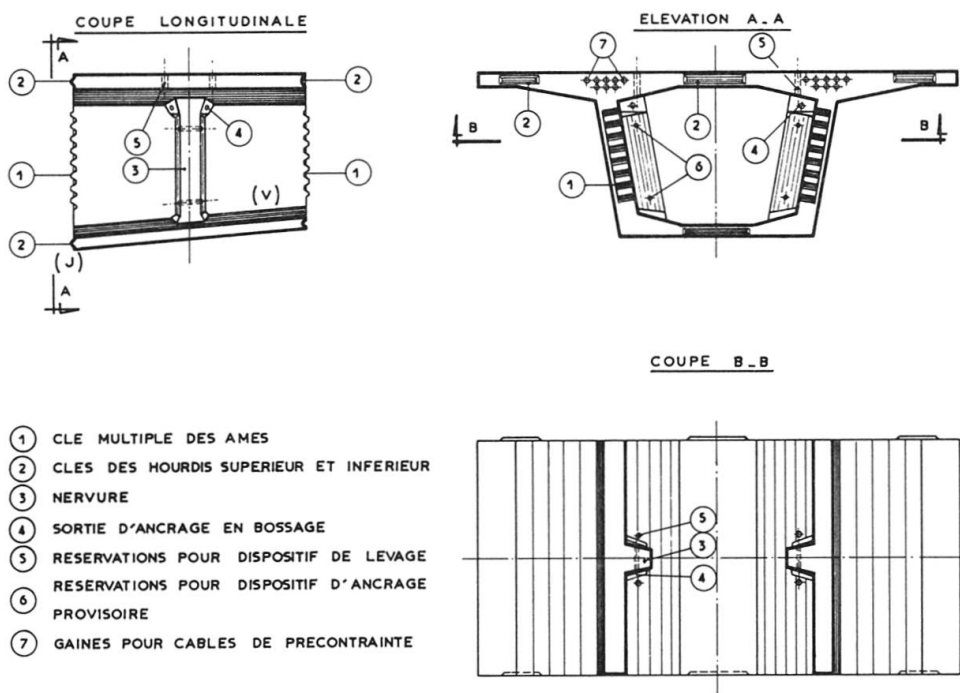


Fig. 5 - Voussoir préfabriqué de la seconde génération



1,21- Joints à clés multiples

Sans remettre aucunement en cause les caractéristiques et le comportement des premiers ouvrages préfabriqués à joints conjugués, il a paru intéressant de rechercher de nouvelles formes de joints permettant la transmission des efforts de cisaillement entre voussoirs sans faire appel à la résistance des colles époxy (Fig. 5 et 6).

- 1 et 2 . Clés
- 3 . Nervure
- 4 et 5 . Bossages d'ancrage
- 6 . Réservations pour précontrainte provisoire

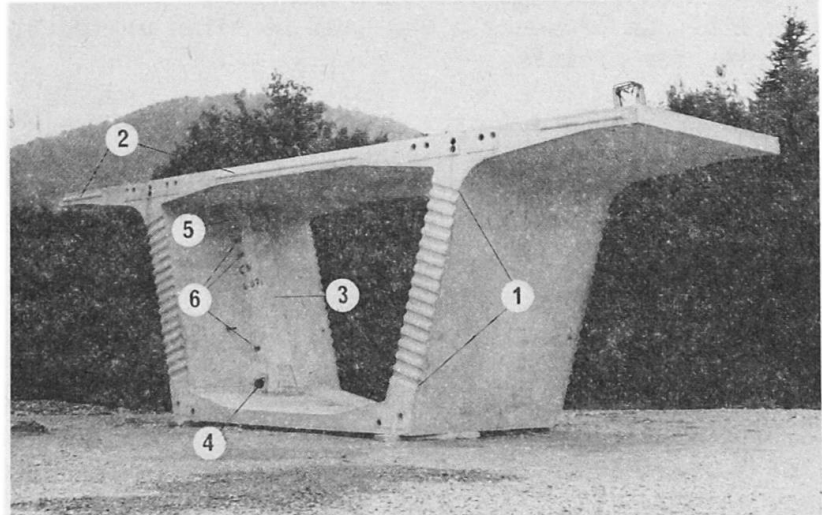


Fig. 6 -
Clés multiples

C'est le cas des joints de la seconde génération de voussoirs qui comportent, dans l'épaisseur des hourdis et sur toute la hauteur des âmes, une série de clés à engrènement réparties de façon régulière. Cette amélioration dans le fonctionnement des joints, qui soulage la colle de son rôle structural, a l'avantage de la simplicité et de la sécurité. Cette disposition a été mise en oeuvre avec succès sur plusieurs ouvrages, notamment aux viaducs des Autoroutes Alpines, au pont de St-André-de-Cubzac et aux ponts d'Angers.

1,22- Nervures et bossages intérieurs

Des bossages ou des nervures de raidissement des âmes sont maintenant couramment utilisés à l'intérieur des voussoirs pour loger les ancrages de la précontrainte longitudinale définitive. Les câbles, assurant la stabilité des fléaux et mis en place au fur et à mesure du montage du tablier, peuvent ainsi être ancrés en dehors des joints, rendant dès lors les opérations de pose des voussoirs et de mise en oeuvre de la précontrainte complètement indépendantes.



Fig. 7 -
Mise en tension
des câbles de
précontrainte



Cette solution offre également l'avantage d'effectuer les opérations de mise en tension, d'ancrage et d'injection des câbles longitudinaux à l'intérieur du tablier dans des conditions idéales de confort et de sécurité au moyen de dispositifs mécanisés et sans risque de projection de matériel divers à l'extérieur des poutres. Elle permet d'autre part de limiter le nombre des câbles des fléaux au minimum nécessaire pour assurer leur résistance au poids propre, les câbles complémentaires pouvant être enfilés sur la longueur de plusieurs travées après clavage des fléaux (Fig. 7).

Les bossages sont généralement situés au droit des goussets de raccordement des âmes avec les hourdis supérieur et inférieur, de sorte que la poussée au vide due au tracé des câbles se décompose suivant la direction des plans des âmes et des membrures. Certains bossages sont conçus de manière à permettre l'ancrage de deux câbles qui s'y croisent (Fig. 8).

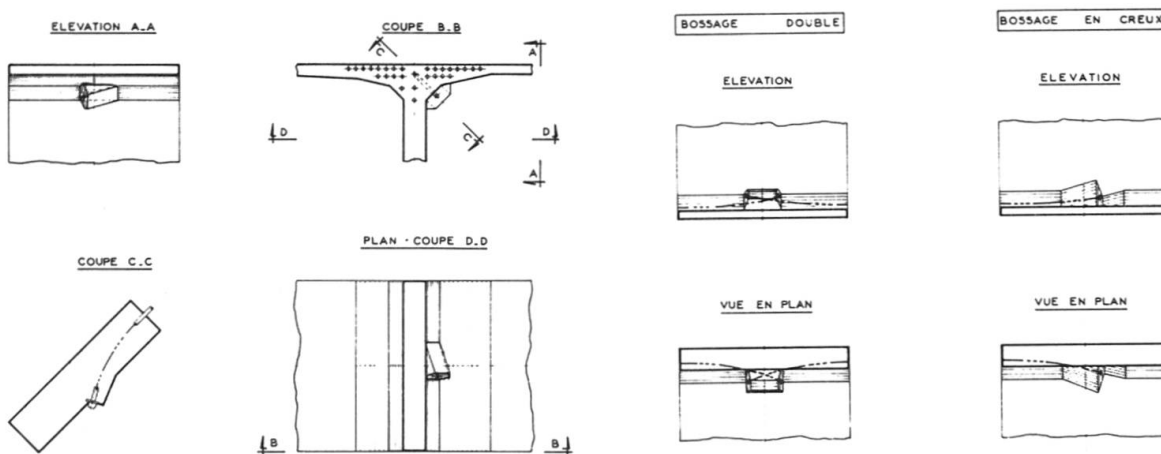


Fig. 8 - Bossages supérieurs et inférieurs

Les nervures et les bossages sont généralement mis à profit pour y placer la précontrainte réalisant l'assemblage provisoire des voussoirs, dégagant ainsi complètement la table supérieure des tabliers.

1,23- Nervures boulonnées

Bien que la colle puisse restituer dans une certaine mesure la résistance à la traction des joints, il n'en est pas tenu compte dans les projets puisque les structures à voussoirs sont habituellement totalement précontraintes et qu'en conséquence aucune contrainte de traction ne peut théoriquement s'y développer à travers les joints.

Une nouvelle amélioration peut cependant être apportée aux joints conjugués collés en reconstituant leur résistance à la traction au moyen de nervures boulonnées qui assurent la continuité des armatures passives longitudinales des voussoirs (Fig. 9).

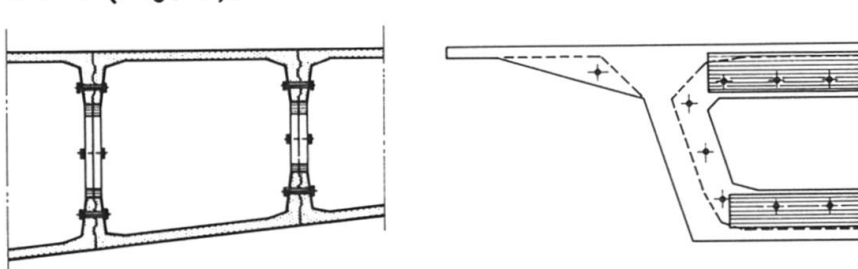


Fig. 9 -
Joints à nervures
boulonnées



1,3- Problèmes particuliers aux voussoirs à joints conjugués collés

1,31- Conservation de la conjugaison

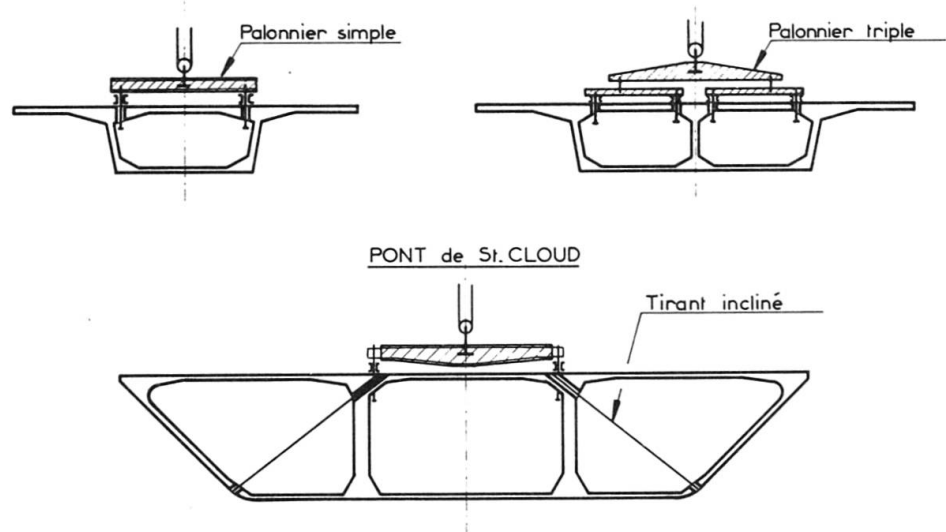
Des précautions doivent être prises pour que la conjugaison des joints soit effective malgré les déformations que peuvent subir les voussoirs pendant leur fabrication, leur stockage et leur transport.

Au stade de la préfabrication, il est impératif qu'en cas de traitement thermique celui-ci soit appliqué de façon homogène à chaque voussoir, à la fois dans sa position de bétonnage et dans sa position de contre-moule.

Au stockage, il faut éviter les déformations par fluage et le gauchissement des voussoirs en faisant reposer ceux-ci sur trois points. Il en est de même lors du transport des voussoirs, quand le béton est très jeune. Au pont de St-Cloud par exemple, en raison de la grande dimension des voussoirs, on a dû avoir recours à des dispositions originales faisant appel à des tirants inclinés pour assurer la stabilité de forme des voussoirs durant leur transport et leur mise en place.

Le levage et la manutention d'un voussoir à deux âmes s'effectuent généralement au moyen d'un palonnier simple. Au contraire, pour un voussoir à trois âmes, il est souhaitable d'utiliser un palonnier triple (Fig. 10).

Fig. 10 -
Transport des
voussoirs



1,32- Injection des câbles de précontrainte

Dans les ouvrages à voussoirs préfabriqués, l'injection des câbles de précontrainte pose un problème délicat en raison de la présence des joints où les gaines sont nécessairement interrompues.

Le rôle d'étanchéité joué par la colle est en effet inefficace dans les zones de grande concentration de câbles de précontrainte où les gaines sont très proches les unes des autres et où le coulis d'injection tend à cheminer d'un câble à l'autre (Fig. 11).

On choisira de préférence un coulis d'injection dit "retardé" qui présente une plus grande souplesse d'utilisation qu'un coulis traditionnel :

- durée d'intervention plus longue (jusqu'à 10 heures)

- Injection d'un volume plus important (jusqu'à 5 m³)
- possibilité de lavage des gaines en cas d'incident.

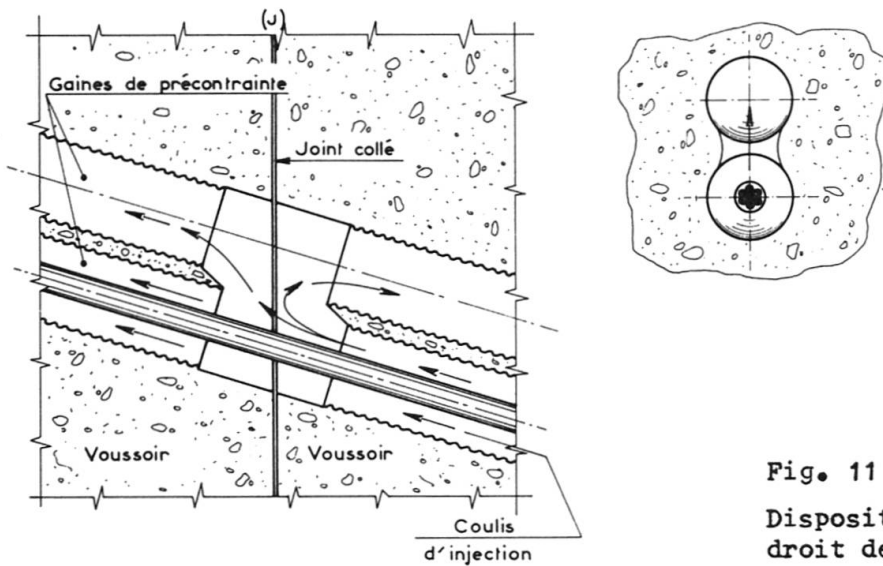


Fig. 11 -
Disposition des gaines au droit des joints

Les câbles longitudinaux seront groupés en familles transversales bien distinctes, qui peuvent être isolées les unes des autres au moyen de coupures étanches, réalisées par des réservations matées, disposées à la préfabrication au droit des joints, dans les âmes et les membrures (Fig. 12).

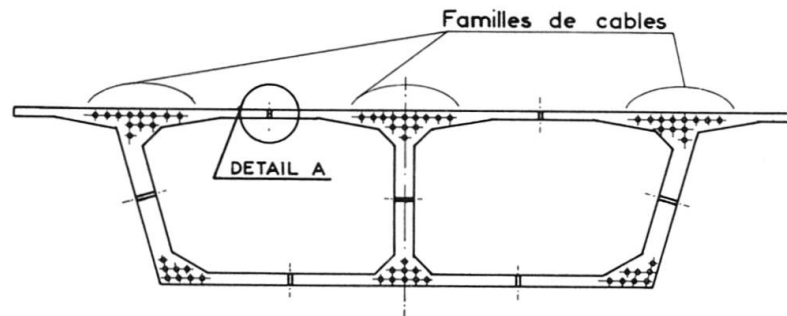
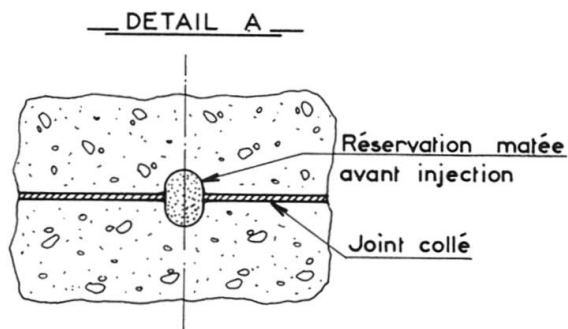


Fig. 12 -
Familles de câbles
séparées par des
coupures étanches



Malgré les mesures précédentes, l'injection des câbles demeurant une opération difficile, on a recherché comment assurer l'étanchéité des gaines au droit des joints et permettre ainsi l'injection de chaque câble séparément. Différents moyens ont été envisagés.

Des joints toriques, disposés à la jonction des gaines, ont été essayés mais cette disposition s'est révélée inefficace quand les câbles sont nombreux et voisins les uns des autres. La solution la plus satisfaisante à ce jour a été la mise en oeuvre de manchons de raccordement dilatables collés à l'époxy. Ces manchons sont constitués d'une enveloppe cylindrique plissée enfilée à l'inté-



rieur des gaines au moyen d'une perche gonflable jusqu'à ce qu'elle occupe une position à cheval sur le joint. Le dispositif d'expansion placé à l'extrémité de la perche provoque alors une dilatation plastique des manchons venant appliquer ce dernier contre les parois internes des gaines dans lesquelles il s'encastré en épousant la forme. (Fig. 13)

L'étanchéité du raccordement est complétée par l'encollage préalable du manchon à l'aide d'une résine à durcissement rapide que l'on dispose dans les dépressions longitudinales du manchon avant de l'introduire dans la gaine.

De tels manchons ont été expérimentés avec un plein succès au pont de St-André-de-Cubzac.

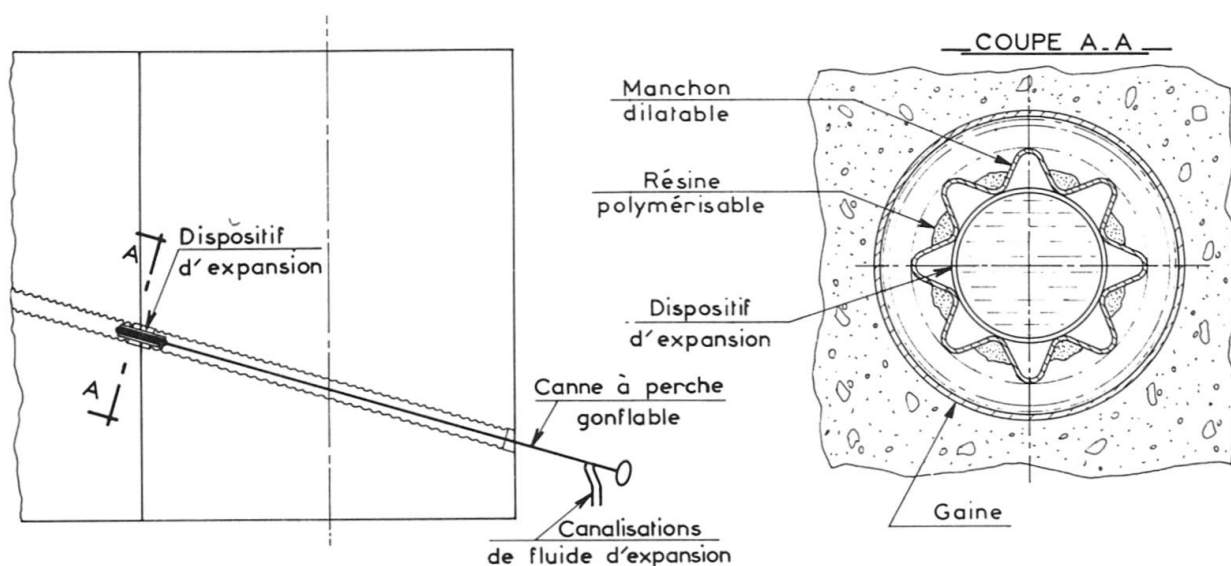


Fig. 13 - Manchon de raccordement dilatable

2- EVOLUTION DE LA SECTION TRANSVERSALE DES PONTS A VOUSOIRS PREFABRIQUES

Depuis la construction des premiers ouvrages à voussoirs préfabriqués, il s'est produit une évolution régulière de la section des voussoirs dans le sens d'une augmentation de leurs dimensions transversales et de leur poids unitaire, les problèmes liés à leur préfabrication, à leur transport et à leur pose étant progressivement résolus de façon sûre et économique.

Cette évolution apparaît clairement sur la figure 14 où ont été représentées les sections transversales de certains ouvrages caractéristiques construits en voussoirs préfabriqués.

On notera en particulier la différence entre :

- le pont de Choisy-le-Roi, construit en 1962, dont le tablier, de 14 m. de largeur, se composait de deux poutres tubulaires parallèles de 6,6 m. constituées de voussoirs de 25 t.
- le pont de St-Cloud, construit en 1972, dont le tablier, de 20,4 m. de largeur, comporte une poutre tubulaire unique à trois alvéoles, constituée de voussoirs d'un poids maximal de 130 t.

Le nombre et la forme des poutres-caissons constituant la section transversale d'un tablier dépendent avant tout de sa largeur.

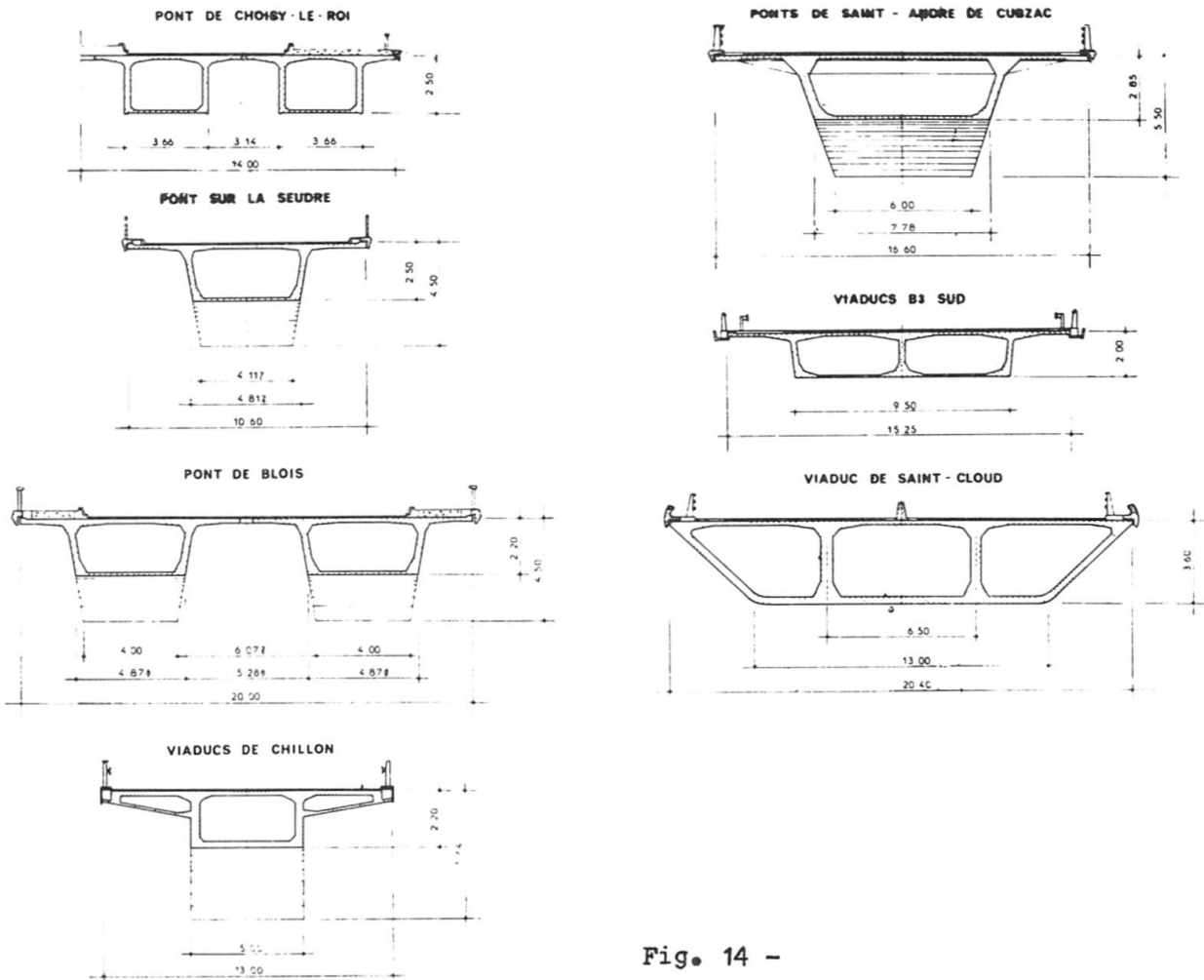


Fig. 14 -

Evolution des sections transversales

Si cette largeur ne dépasse pas 13 m., c'est la poutre-caisson unique à deux âmes de forme classique qui s'impose. Les âmes peuvent être soit verticales, soit inclinées. Cette dernière disposition améliore l'aspect architectural et réduit l'importance des fondations, au prix d'une complication de la préfabrication si la hauteur du tablier est variable puisque l'intrados est de largeur constamment évolutive.

Pour des ponts plus larges, de 18 à 24 m., on associe le plus souvent deux poutres-caissons simples reliées par le hourdis supérieur (Pont de Blois - Ponts Aval et Amont du Bd Périphérique) - Quelques ponts très larges peuvent comporter trois poutres-caissons, mais pour de tels ouvrages, le plus souvent autoroutiers, on préfère projeter généralement deux tabliers indépendants parallèles à deux caissons chacun, séparés par un vide central.

Les tabliers dont la largeur est comprise entre 13 et 18 m. posent un problème particulier. La poutre-caisson à trois âmes semble théoriquement la mieux adaptée mais ce type de section présente certains inconvénients liés, d'une part, à la complexité du coffrage et du ferrailage qu'elle entraîne et, d'autre part, à la stabilité des voussoirs en cours de manutention. Des exemples en sont cependant donnés par le pont de Deventer en Hollande, de 17 m. de largeur, et par le viaduc de l'Autoroute B3 Sud à Paris, de 15,25 m. de largeur (Fig. 15).

Une autre solution consiste à utiliser une poutre-caisson à deux âmes en faisant appel à un hourdis supérieur à section cellulaire ou nervurée. Le premier



schéma permet de réaliser des grands encorbellements latéraux caissonnés comme au Viaduc de Chillon en Suisse au bord du Lac Léman (Fig. 16).

Fig. 15

Viaduc B3 Sud
Section transversale

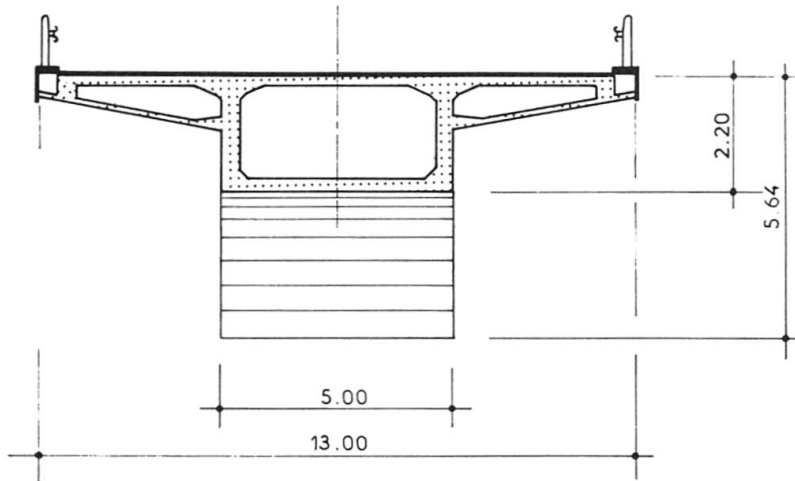
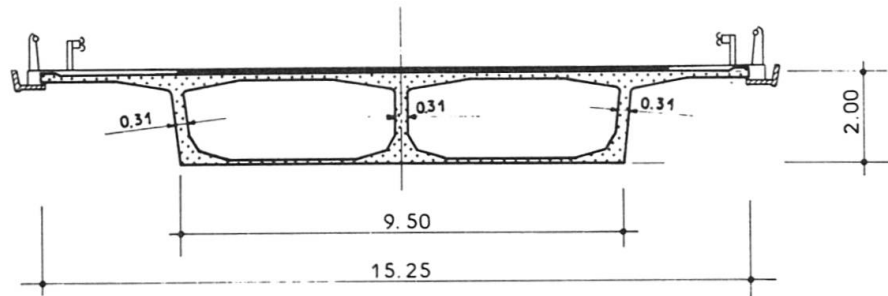


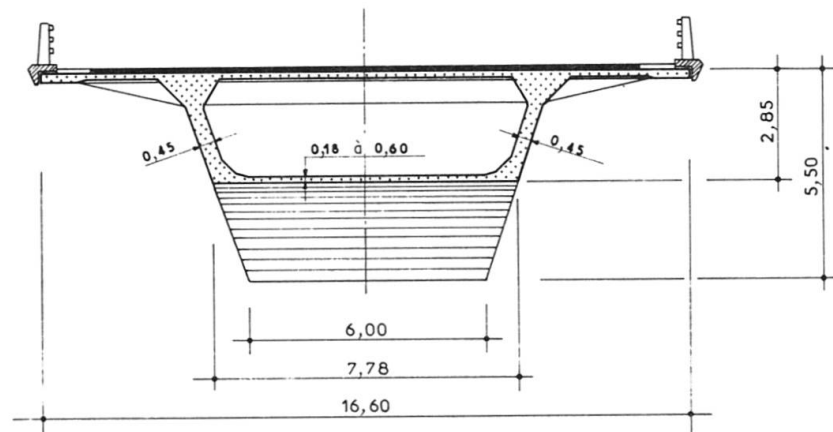
Fig. 16 -

Viaduc de Chillon
Section transversale

Le second schéma nous paraît préférable. Nous l'avons proposé pour la construction des Ponts de St-André-de-Cubzac sur la Dordogne où ce choix a été le résultat d'études comparatives portant sur différentes sections parmi lesquelles nous avons considéré successivement : deux poutres tubulaires, une poutre tubulaire à trois âmes et une poutre tubulaire à deux âmes avec hourdis supérieur nervuré (Fig. 17).

Fig. 17 -

Pont de St-André-
de-Cubzac
Section transversale



Compte tenu de la largeur courante des tabliers, égale à 16,6 m. et de la nécessité de pouvoir réduire cette largeur à 14,3 m. pour un des viaducs d'accès, cette dernière solution s'est révélée à la fois la plus pratique sur le plan constructif et la plus intéressante sur le plan économique.

Elle présente l'avantage, par rapport à la structure constituée de deux poutres-caissons, d'éviter la précontrainte transversale de liaison, de mise en oeuvre coûteuse pour de telles largeurs, et de supprimer le bétonnage du hourdis de jonction. Elle réduit d'autre part le nombre d'éléments à préfabriquer et simplifie considérablement les appuis des tabliers et leurs fondations.

Elle possède d'autre part un rendement mécanique plus élevé que la poutre-caisson à trois âmes et conduit à des cellules de préfabrication de conception classique, s'adaptant facilement à la variation de largeur des tabliers.

Ce type de structure transversale, utilisée pour la première fois pour la construction des ponts de St-André-de-Cubzac, a été adoptée depuis pour plusieurs autres ouvrages :

- le pont d'Angers, tout d'abord, dont la largeur d'ossature est plus importante et atteint 17,5 m.

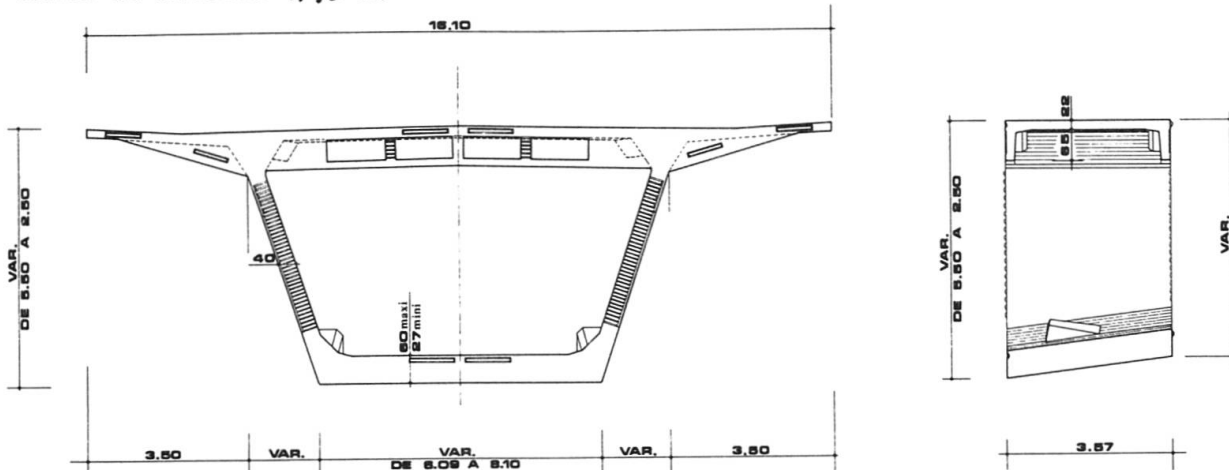


Fig. 18 - Pont de Sallingsund - Section transversale

- ensuite, le pont de Sallingsund, au Danemark, avec une largeur de 16,1 m. (Fig. 18). Cet ouvrage de 1.680 m. de longueur, comporte des travées courantes de 93 m. de portée, dont les voussoirs constitutifs sont posés avec le même portique de lancement que le pont d'Angers. A l'occasion de ce projet, une amélioration a été apportée dans la conception des joints. Les surfaces de contact des demi-nervures ont été réduites, par l'intermédiaire d'une fourrure disposée dans les cellules, de façon à obtenir, lors de l'assemblage des voussoirs, une forte compression moyenne du joint de colle, favorable à un bon encollage,
- pour un autre ouvrage devant être réalisé au Danemark, le pont de Vejle-Fjord, un tablier de 27,6 m. de largeur avec hourdis supérieur nervuré a été proposé, mais ce projet n'a pas été en définitive retenu (Fig. 19).

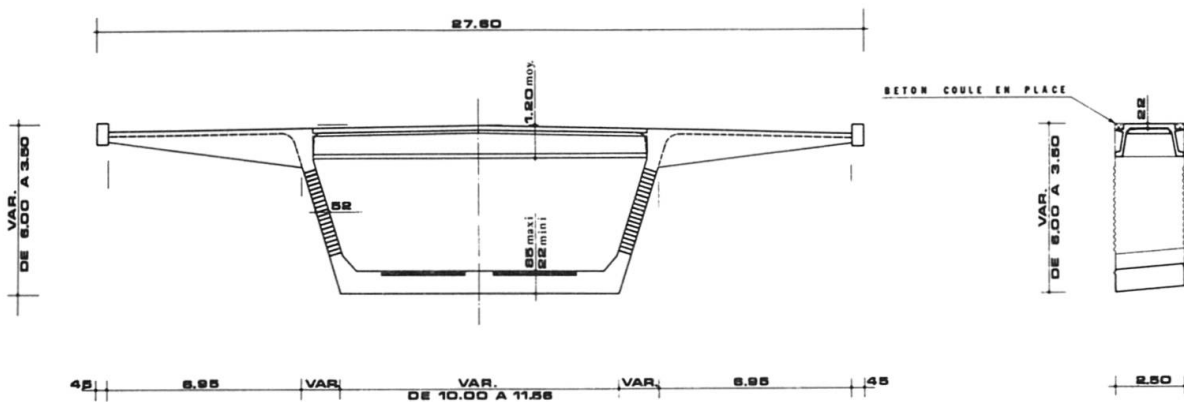


Fig. 19 - Pont de Vejle-Fjord - Section transversale

On peut enfin envisager de constituer les tabliers, d'un caisson multicellulaire à deux âmes centrales verticales et deux tympans latéraux inclinés. Une solution de ce type a été choisie pour les viaducs de la R.A.T.P. à Marne-la-Vallée dont



les tabliers ont une largeur courante de 11,0 m., portée à 16 m. au droit de la station de Neuilly-Plaisance par adjonction d'encorbellements latéraux (Fig. 20)

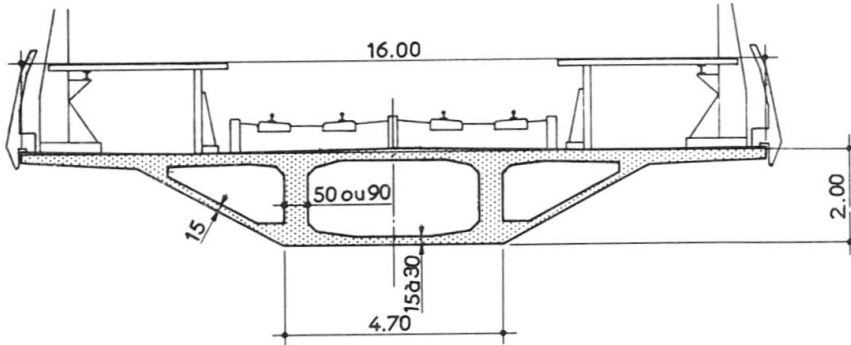
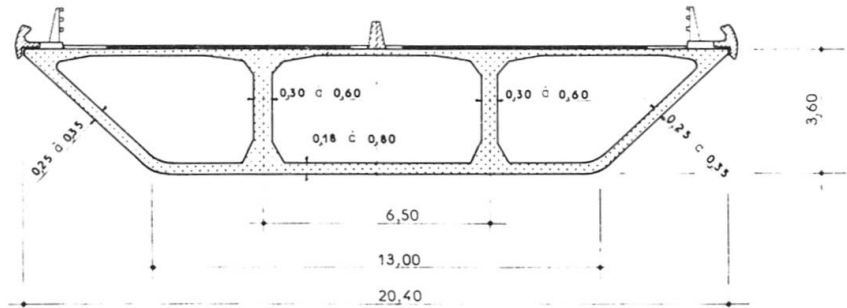


Fig. 20 -
Viaducs de Marne-la-Vallée
Section transversale

La même solution a été adoptée pour le Pont de St-Cloud sur la Seine, à la fois pour des considérations architecturales et en raison du tracé extrêmement courbe ($R = 300$ m.) de l'ouvrage qui prédisposait à rechercher, en cours de construction, une structure à forte rigidité de torsion (Fig. 21).

Fig. 21 -
Viaduc de St-Cloud
Section transversale



3- DEVELOPPEMENTS DES METHODES DE POSE DES VOUSOIRS

Les diverses méthodes actuellement utilisées pour la pose des voussoirs préfabriqués se classent en définitive en trois catégories, se différenciant par la nature de l'engin de levage :

- dispositif autonome tel que grues ou portiques indépendant du tablier
- équipage mobile de levage porté par le tablier déjà construit
- poutre de lancement.

D'intéressantes améliorations ont été apportées récemment dans chacun de ces trois domaines.

3,1- Pose à la grue - Pont de clavage - Construction de passages supérieurs autoroutiers

Dans le cas d'une pose à la grue, on rencontre souvent des difficultés pour mettre en place les voussoirs de clavage dans la partie centrale des travées, car le tablier déjà construit empêche l'évolution de l'engin et ne permet pas une pose frontale. Pour pallier cette difficulté, on a fait appel à un dispositif appelé "pont de clavage", constitué d'une poutre métallique placée au-dessus du tablier et supportant un treuil de levage mobile. Cet engin permet la pose de tous les voussoirs du demi-fléau situé à côté du tablier déjà construit, tandis que les voussoirs symétriques sont aisément mis en place à la grue. Le même dispositif peut être utilisé sans difficulté pour la réalisation du fléau en cours de pose lorsque les appuis de l'ouvrage ne présentent pas la capacité de résistance suffisante vis-à-vis des chargements dissymétriques pendant la construction. Un pont de clavage a été utilisé pour le montage d'une partie



des viaducs de l'Autoroute B3 (Fig. 22).

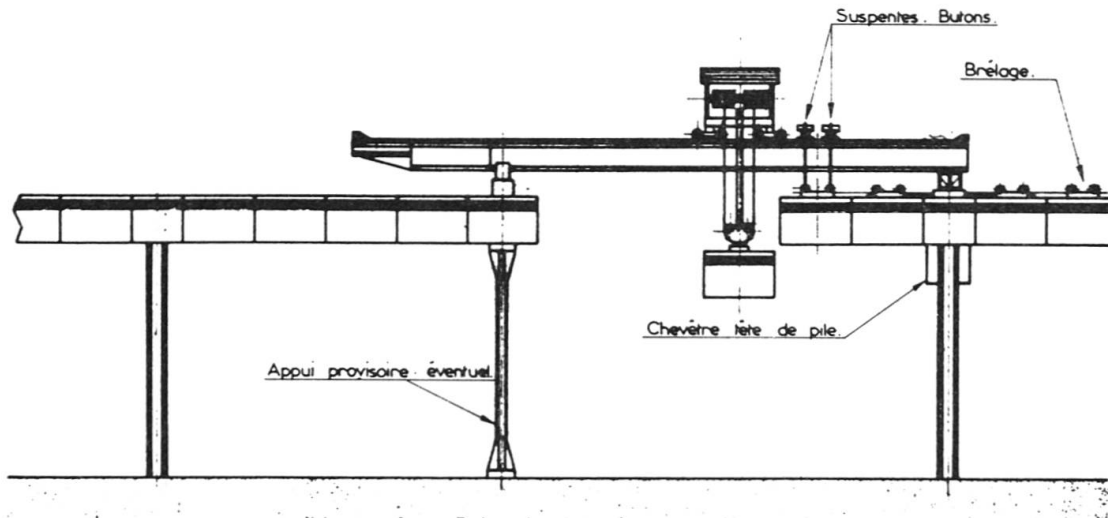


Fig. 22 - Pose au pont de clavage

La pose de voussoirs au moyen d'une grue mobile trouve une application nouvelle dans la construction d'ouvrages de faible portée, comme les passages supérieurs autoroutiers à trois travées. Les voussoirs sont assemblés suivant les dispositions représentées sur la figure 23, qui se caractérisent essentiellement par :

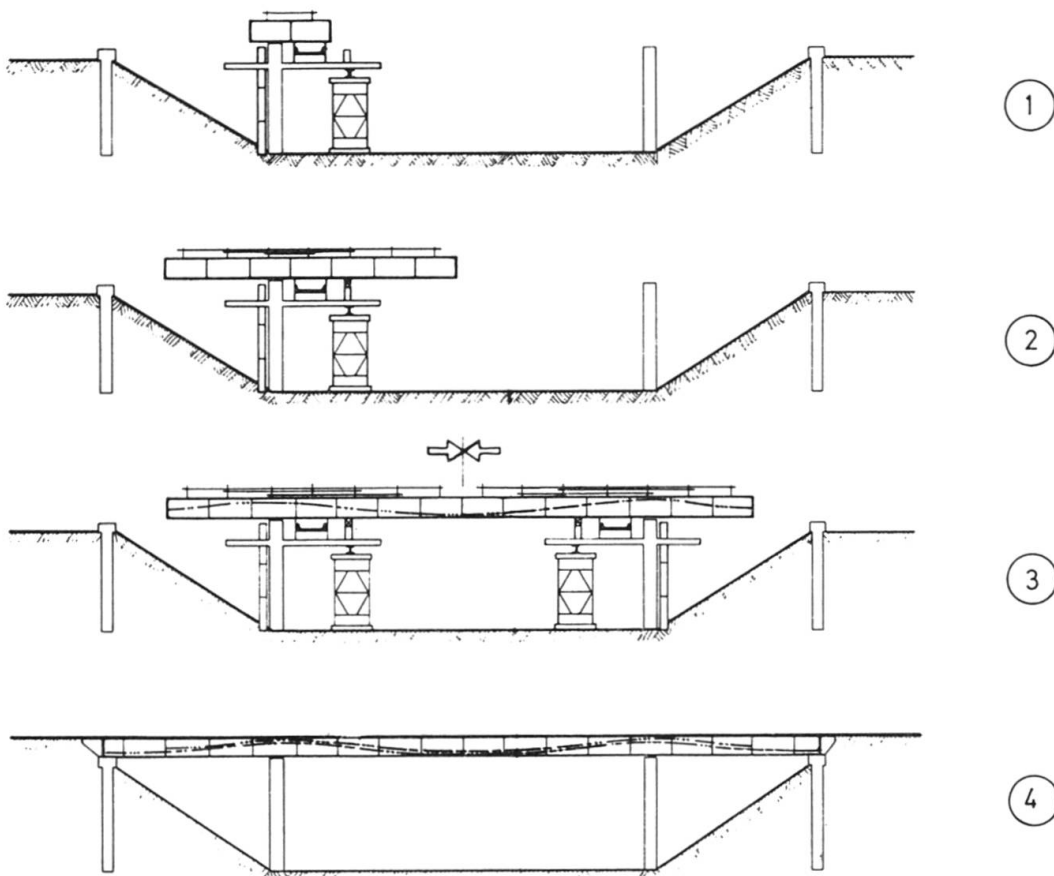


Fig. 23 - Construction d'un passage supérieur autoroutier



- la mise en oeuvre de 2 étais provisoires réglables, facilement démontables, situés au 1/4 et aux 3/4 de la travée centrale (dont la portée peut varier de 18 à 30 m.).
- des appuis provisoires avec vérins permettant la construction par encorbellement,
- l'utilisation d'une précontrainte provisoire assurant la solidarisation successive des éléments avant précontrainte définitive,
- la suppression du classique joint de clavage par la jonction directe des deux fléaux en regard,
- une précontrainte définitive réalisée par un câblage filant au lieu du câblage type en encorbellement.

Le temps de construction total d'un tel passage supérieur ne dépasse pas en général deux semaines, y compris les appuis, dont moins d'une semaine pour la pose proprement dite du tablier.

Cette méthode a été utilisée pour la construction des passages supérieurs des Autoroutes Alpines.

3,2- Equipements mobiles de levage portés par le tablier - Pose du voussoir sur pile - Construction à l'avancement

La pose des voussoirs au moyen d'équipages mobiles de levage portés par le tablier déjà construit a été imaginée à l'occasion de la construction des ponts de Pierre-Bénite sur le Rhône. Chaque voussoir, amené à l'aplomb de sa position dans l'ouvrage (ou au voisinage de la pile supportant le fléau en cours de construction) est repris et mis en place par des treuils de levage portés par une charpente ancrée sur le tablier déjà construit (Fig. 24).

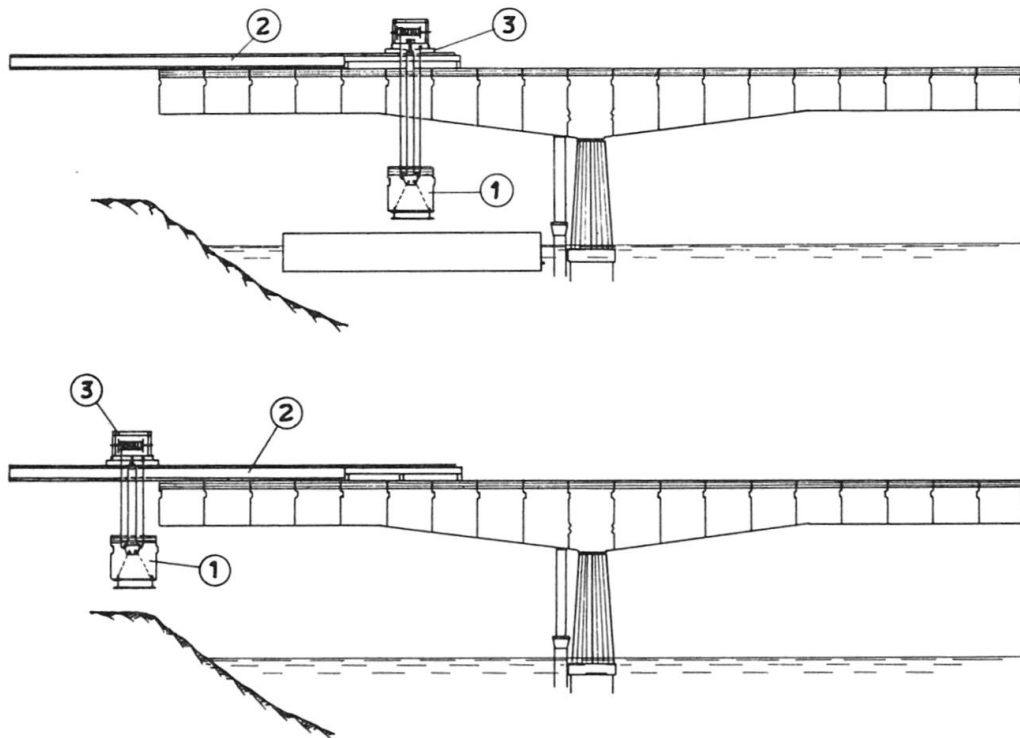


Fig. 24 - Equipages mobiles type Pierre-Bénite

- 1- Voussoir à poser
- 2- Charpente ancrée dans le tablier
- 3- Treuil de levage mobile

Dans sa forme initiale, le procédé n'est pas entièrement autonome en ce qu'il suppose la réalisation par un autre moyen de la partie de tablier située à l'aplomb des piles de l'ouvrage. Ce premier élément avait été coulé en place dans le cas des ponts de Pierre-Bénite. Il a été préfabriqué et posé par une grue terrestre au pont d'Empel en Hollande ou par une grue flottante au pont de Bayonne sur l'Adour. Cette infériorité du procédé a été éliminée aux ponts de St-André-de-Cubzac où les voussoirs de pile constituant le départ de chaque fléau ont été mis en place par les mêmes engins que les voussoirs courants. A cet effet, l'un des deux équipages mobiles est provisoirement, avec le concours de haubans, à un mât auxiliaire encastré sur un parement latéral de la pile. Le voussoir de pile est approvisionné du côté opposé, levé et mis en place par les treuils de levage de l'équipage mobile. Dans cette même configuration, on pose le voussoir suivant et on enlève le mât auxiliaire (Fig. 25).

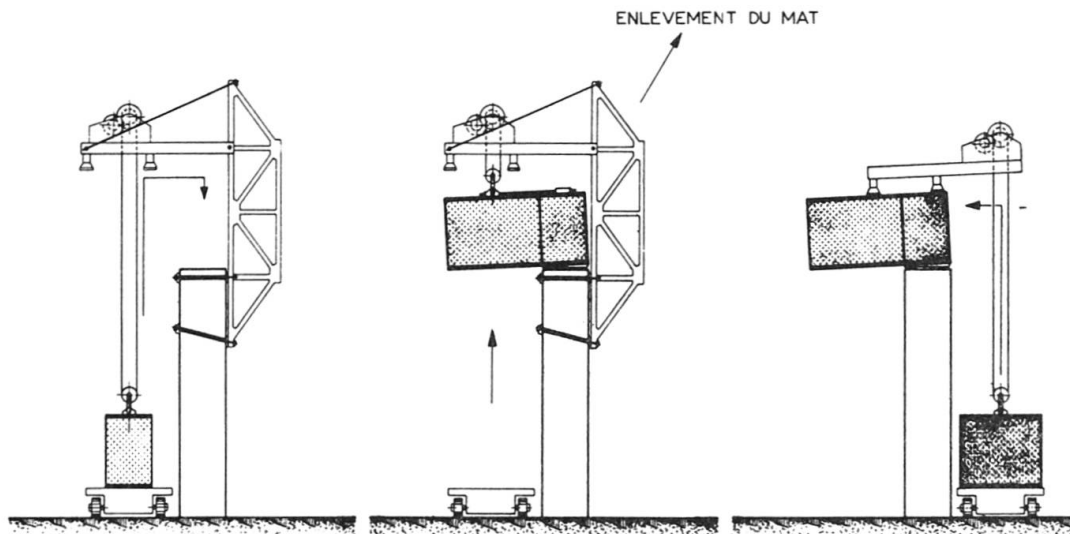


Fig. 25 - Pose du voussoir sur pile avec les équipages mobiles

Des opérations simples permettent ensuite de placer les deux équipages mobiles en position convenable pour lever les voussoirs courants.

Une autre méthode consiste à supprimer la discontinuité qui apparaît dans les opérations de pose, quand on construit par encorbellement symétriquement à partir des appuis, en effectuant le montage du tablier de manière continue d'une extrémité de l'ouvrage à l'autre. Les voussoirs sont alors posés par encorbellements successifs du même côté des diverses piles. Lorsque le tablier atteint une pile, on met en place les appareils d'appui définitifs et on continue la construction dans la travée suivante. L'appareil de pose du voussoir est constitué d'une potence orientable permettant de saisir à l'arrière le voussoir, transporté sur le tablier terminé par un chariot auxiliaire, et de le placer à sa position définitive après encollage (Fig. 26).

Déjà connue dans son principe pour des ouvrages coulés en place, cette méthode a maintenant été mise en oeuvre pour la construction au moyen de voussoirs préfabriqués du tablier du Viaduc de Rombas, dans l'Est de la France (Fig. 27). Les avantages essentiels du procédé sont les suivants :

- les opérations sont continues et sont effectuées à partir du tablier déjà construit,
- durant la construction, les piles ne sont pas soumises à des moments de flexion dissymétriques bien que leurs réactions verticales soient fortement augmentées,



- le matériel de pose : potence et chariot de transport des voussoirs, est peu coûteux et se prête fort bien à la réalisation d'ouvrages de trajectoire très évolutive.

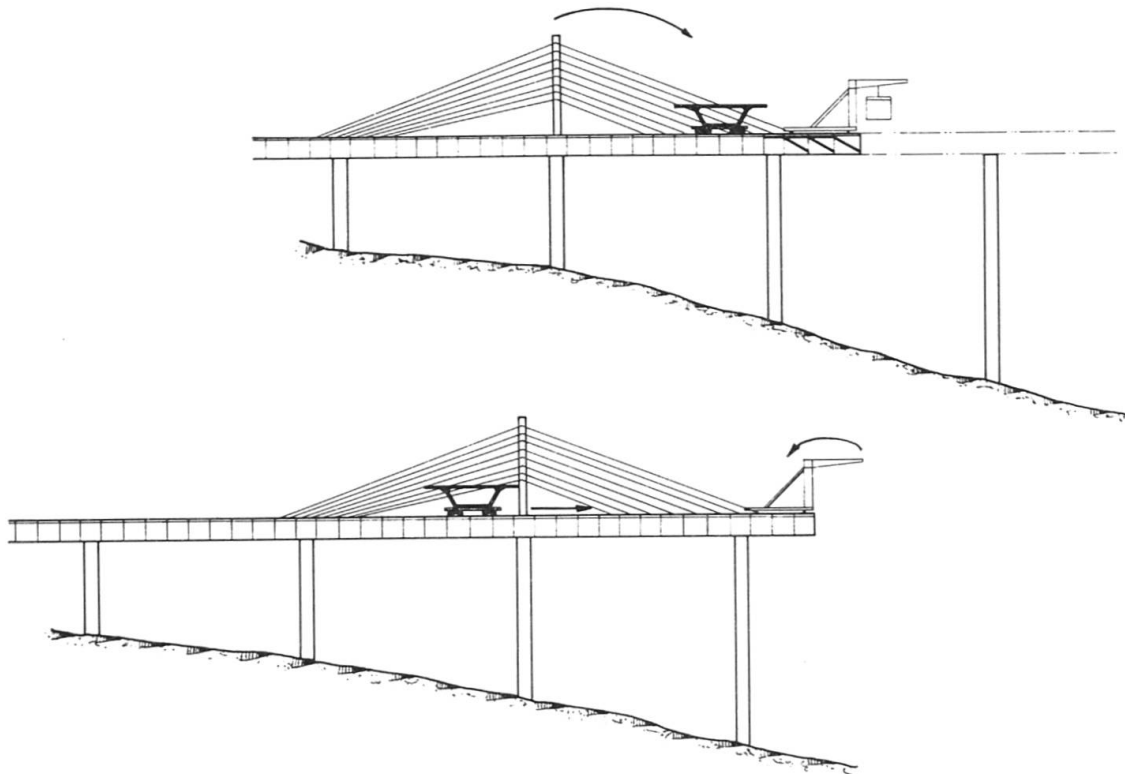


Fig. 26 - Pose à l'avancement- Principe

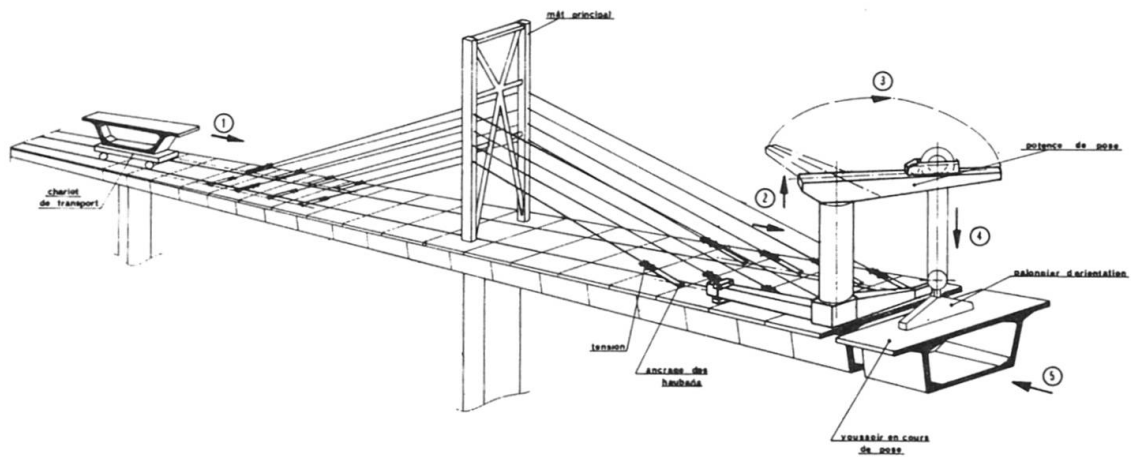


Fig. 27 - Vue perspective de la pose à l'avancement

En contrepartie, le procédé présente deux inconvénients :

- d'une part, il n'est pas directement applicable à la construction de la première travée qui pose un problème spécial (assemblage sur cintre ou montage par encorbellement à partir de la culée),
- d'autre part, les efforts imposés au tablier pendant la construction sont complètement différents de ceux qui apparaissent dans l'ouvrage en service.

En conséquence, il faut recourir à un système de stabilisation spécial pour maintenir les efforts intérieurs dans des limites raisonnables et réduire les dépenses improductives de précontrainte provisoire. La solution la plus communément adoptée est celle d'un mât supportant des haubans, déjà utilisée dans des conditions comparables pour la construction des ouvrages poussés. Dans le cas de la construction à l'avancement, on déplace le mât et les haubans d'une pile à l'autre au lieu de déplacer l'ensemble du tablier, haubanné à sa partie antérieure.

Cette méthode de construction est particulièrement intéressante dans le domaine des portées de 30 à 50 m., où la construction traditionnelle par encorbellement n'est pas toujours économique et où elle doit concurrencer la construction des tabliers par poussage.

3,3- Poutres de lancement

Enfin, dans le domaine des poutres de lancement, l'évolution s'est poursuivie dans deux directions différentes :

- augmentation des portées des ouvrages et des poids unitaires des voussoirs : pour le pont de St-Cloud, la poutre de lancement permettait le transport de voussoirs de 130 t. mis en place sur des portées dépassant 100 m. (Fig. 28)
- pour des ouvrages de portées moyennes, la réalisation d'engins universels pouvant être aisément démontés et réutilisés sur de nombreux ouvrages. Un exemple caractéristique est celui des viaducs pour les autoroutes alpines où des voussoirs d'un poids maximal de 50 t. sont mis en place sur des portées n'excédant pas 60 m., à l'aide d'une poutre légère, très facilement démontable et transportable. (Fig. 29)

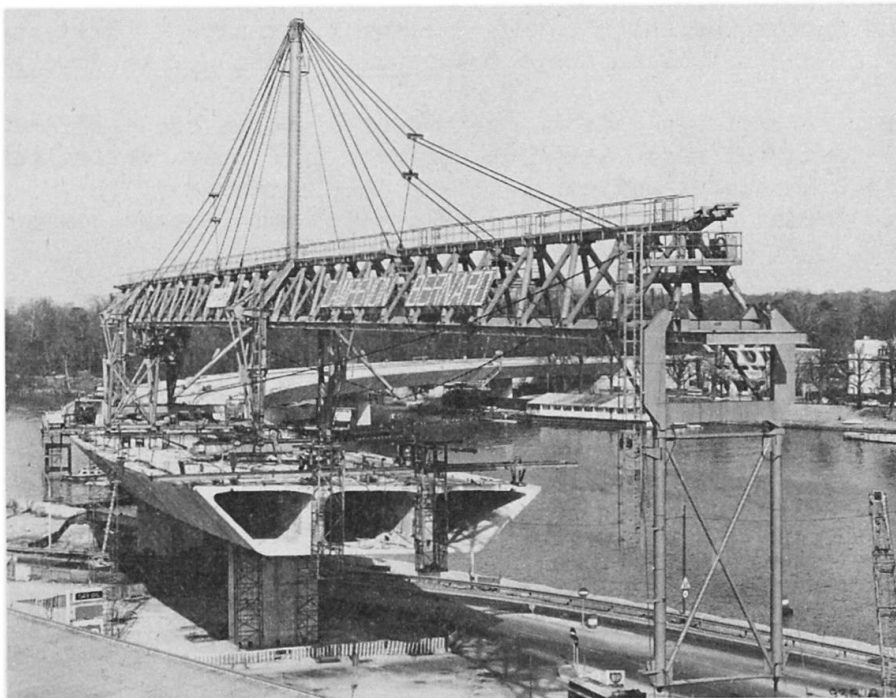


Fig. 28 - Poutre de lancement de Saint-Cloud

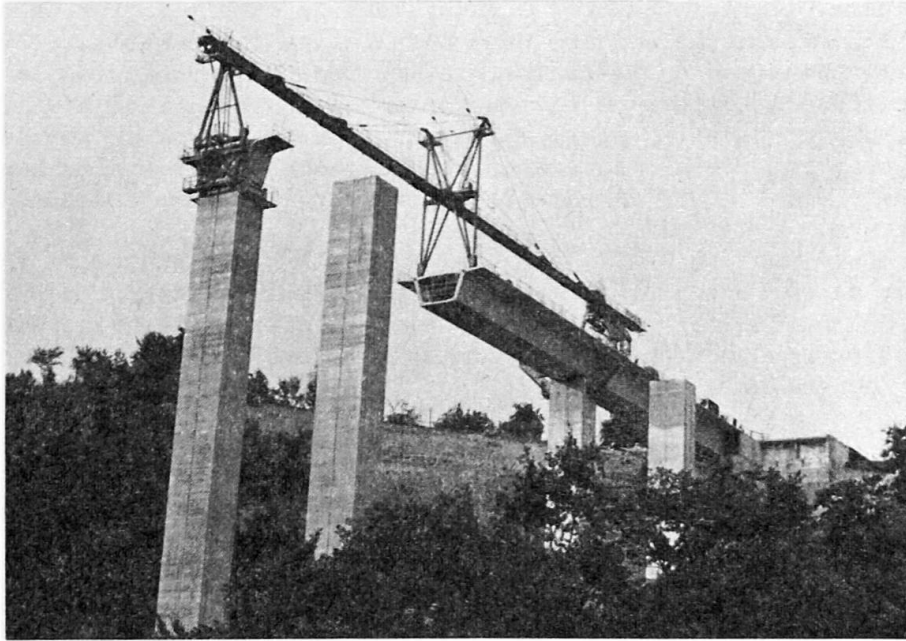


Fig. 29 - Poutre de lancement de l'AREA

4- ENTRETOISEMENT DES TABLIERS PREFABRIQUES

Lors de l'étude d'un pont construit par encorbellement au moyen d'éléments préfabriqués, les problèmes posés par l'entretoisement des tabliers revêtent une importance particulière par leur influence sur la forme et le dimensionnement des voussoirs.

Du fait de la grande rigidité de torsion des tabliers construits par encorbellement, aucun entretoisement n'est généralement envisagé à l'exception des raidisseurs intérieurs situés au droit des appuis et des joints de dilatation.

Les voussoirs préfabriqués dans lesquels sont disposés ces raidisseurs sont des éléments spéciaux, qui nécessitent un coffrage intérieur particulier et dont l'exécution est longue et coûteuse. Il est donc intéressant de chercher à simplifier leurs formes en analysant soigneusement leur fonctionnement mécanique.

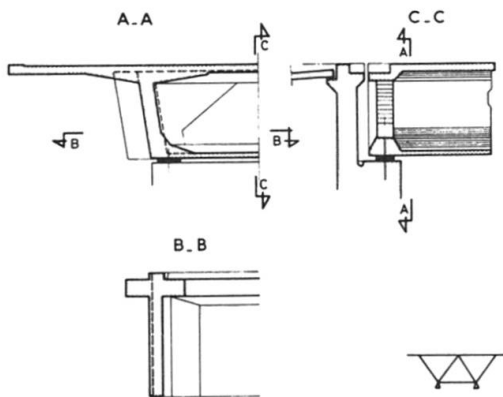


Fig. 30- Voussoir sur culée

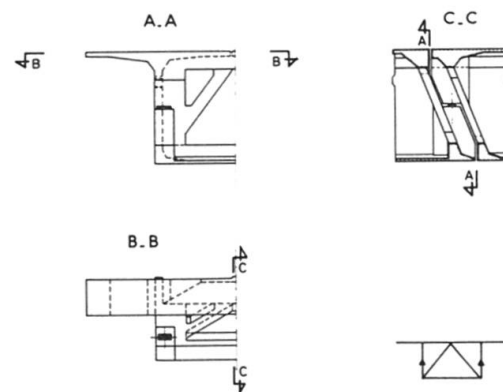


Fig. 31- Voussoir d'articulation

Les voussoirs spéciaux les plus simples sont les voussoirs sur culée, qui comportent d'ordinaire un simple diaphragme vertical (Fig. 30). Les voussoirs d'articulation sont des voussoirs compliqués, qui se composent de deux parties: un élément porteur et un élément porté, raidi chacun par un diaphragme disposé suivant un plan incliné afin de constituer une diagonale tendue équilibrant la réaction d'appui du tablier (Fig. 31). Mais les voussoirs d'articulation comme les voussoirs sur culée, sont heureusement peu nombreux.

Les voussoirs sur pile, dont le nombre peut au contraire être très élevé, sont de conception différente selon que le tablier repose simplement sur ses piles ou qu'il s'y trouve encastré. Dans le premier cas, les voussoirs sur pile sont comparables aux voussoirs sur culée, à deux détails près: d'une part, les efforts à transmettre sont plus importants et, d'autre part, si le tablier est de hauteur variable, la composante verticale due à l'inclinaison de la membrure inférieure au droit de l'appui doit être reprise par des armatures disposées dans le plan de l'entretoise (Fig. 32).

Dans le second cas, les voussoirs sur pile comportent généralement deux diaphragmes qui peuvent être soit verticaux, soit inclinés. Du point de vue théorique, les diaphragmes inclinés sont plus satisfaisants (Fig. 33).

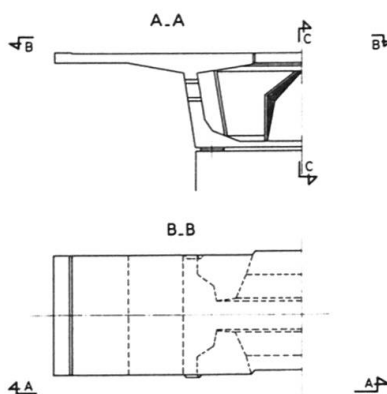


Fig. 32 - Voussoir sur pile pour tablier de hauteur constante

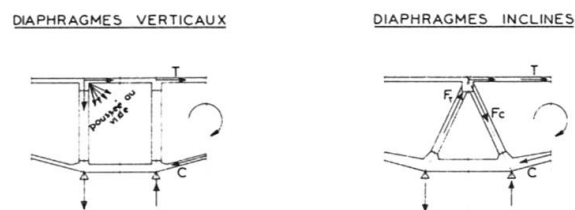


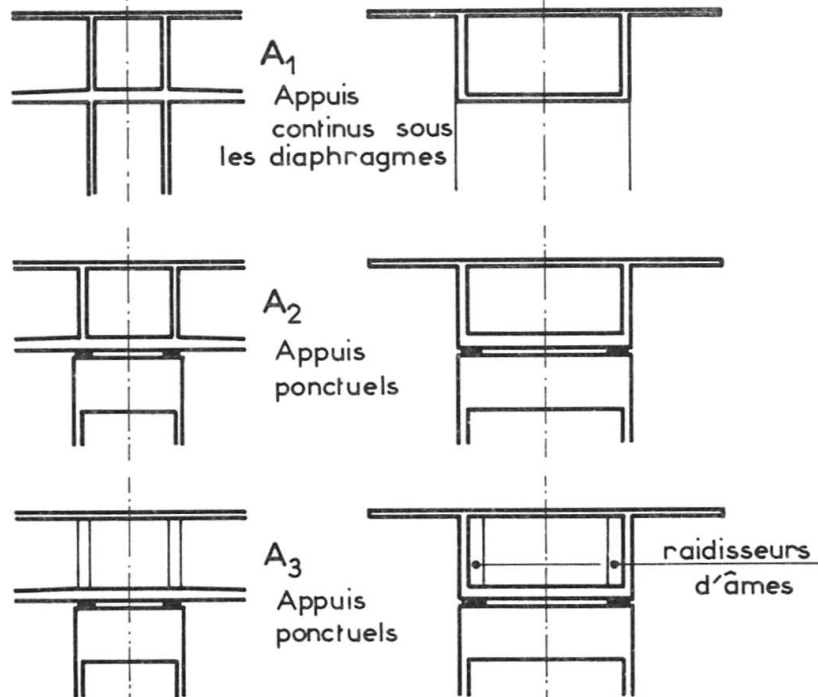
Fig. 33 - Voussoir sur pile avec appuis dédoublés

En effet, sous l'effet des chargements dissymétriques, en phase de construction comme en service, les membrures supérieure et inférieure du tablier sont soumises respectivement à un effort de traction T et à un effort de compression C . Si l'entretoisement du tablier est constitué de deux diaphragmes verticaux situés à l'aplomb de chaque file d'appuis, les âmes du tablier doivent équilibrer la poussée au vide provenant de l'effort de traction T . Si, au contraire, l'entretoisement comporte deux diaphragmes inclinés convergeant au niveau de la membrure supérieure et formant ainsi une triangulation, T se décompose en deux efforts F_C et F_T dirigés directement suivant le plan des diaphragmes et pouvant être repris par des armatures passives ou par des armatures de précontrainte.

Afin de préciser le comportement des voussoirs sur pile reposant sur des appuis dédoublés, nous avons procédé à une étude de différents types d'entretoisement, pour un tablier à hauteur constante, à l'aide d'un programme de calcul aux éléments finis établi par le Professeur GHALI à l'Université de CALGARY. Ces entretoises représentées sur la figure 34 comportaient des diaphragmes verticaux et des diaphragmes inclinés avec des appuis continus sous les diaphragmes ($A_1 - B_1$) ou ponctuels sous les âmes ($A_2 - B_2$). Le cas de raidisseurs d'âmes verticaux, remplaçant les diaphragmes a également été envisagé en A3. Certaines conclusions peuvent rapidement être tirées de cette étude.



TYPE A _ DIAPHRAGMES VERTICAUX



TYPE B _ DIAPHRAGMES INCLINES

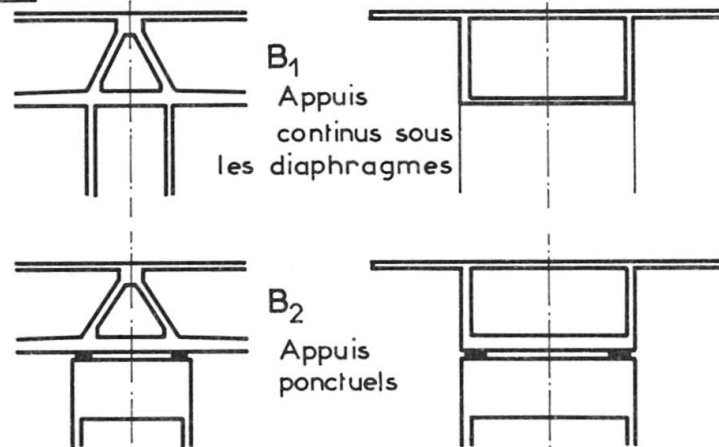
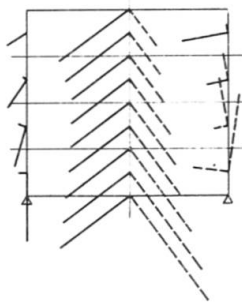


Fig. 34 - Types d'entretoisement étudiés

Il apparait tout d'abord que, dans le cas de diaphragmes verticaux reposant sur des appuis ponctuels, la quasi-totalité des efforts provenant du hourdis supérieur transite par les âmes. Ceci est confirmé par l'égalité des contraintes principales dans les âmes des entretoisements A₂ et A₃ et justifie l'évidement central des diaphragmes auquel on a souvent recours. Les raidisseurs d'âme de l'entretoisement A₃ semblent par contre nécessaires pour conduire les efforts de compression et de traction localisés dans cette zone.

On peut tirer de l'examen du diagramme des contraintes principales dans les âmes un schéma de calcul simple qui permet de déterminer de façon suffisamment précise les armatures de renfort. Dans ce schéma, représenté sur la figure 35 l'effort de traction T provenant du hourdis supérieur est divisé en quatre efforts égaux appliqués aux sommets des âmes, ceux-ci se décomposent à leur tour en des efforts verticaux F₁ disposés à l'aplomb des appuis et en des efforts inclinés F₂ dirigés suivant les diagonales des panneaux d'âmes. F₁ et F₂ sont des tractions ou des compressions selon leur position relative par rapport à T.

CONTRAINTES PRINCIPALES
DANS LES ÂMES
(Entretoisements A_2 et A_3)



SCHEMA DE CALCUL

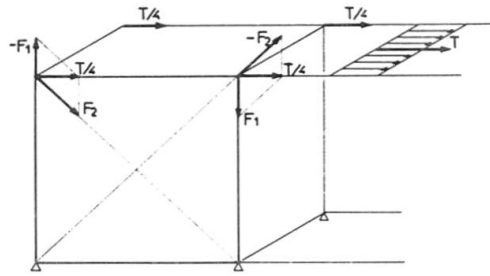


Fig. 35 -

Diaphragmes verticaux
Schéma de calcul

Ce schéma de calcul a pu être vérifié sur les voussoirs de pile du Pont de St-André-de-Cubzac qui avaient été équipés de straining. Lors de la pose des voussoirs les contraintes mesurées dans les âmes ont été très voisines de celles obtenues à partir de la méthode ci-dessus.

Si les diaphragmes verticaux reposent sur des appuis continus dans le sens transversal, les conclusions précédentes demeurent valables, les diaphragmes participant cependant de façon plus complète à la résistance de l'ensemble.

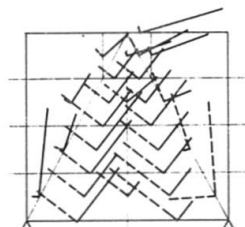
Dans le cas de diaphragmes inclinés, on constate que les efforts de compression et de traction auxquels ils sont soumis sont réduits dans de fortes proportions par rapport à ceux calculés dans la triangulation décrite précédemment. Bien que la répartition des efforts dépende étroitement de la rigidité relative des âmes et des diaphragmes, on peut admettre en première approximation que les efforts supportés par les diaphragmes inclinés sont égaux à 50 % des efforts théoriques calculés, l'autre moitié transitant directement par les âmes.

On préférera donc utiliser pour ce type d'entretènement un schéma plus réaliste consistant à partager l'effort de traction T provenant du hourdis supérieur en deux parties égales, la première conduisant directement à des efforts de traction et de compression dans les diaphragmes inclinés, la seconde étant justifiable de la même décomposition que celle proposée pour les diaphragmes verticaux (Fig. 36).

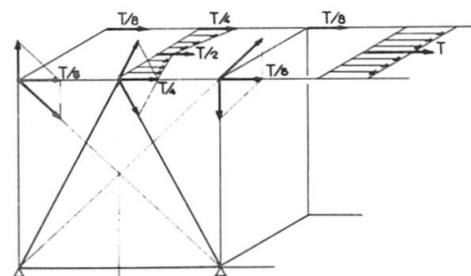
Fig. 36 -

Diaphragmes inclinés
Schéma de calcul

CONTRAINTES PRINCIPALES
DANS LES ÂMES



SCHEMA DE CALCUL



La comparaison entre les diagrammes des contraintes principales des âmes pour les entretènements à diaphragmes verticaux et inclinés montre bien que les contraintes principales des premiers sont sensiblement le double de celles des seconds.



En conclusion, les différents types d'entretènement examinés sont acceptables sous réserve, d'une part, de s'assurer de leur résistance à la torsion, d'autre part, de vérifier la transmission des efforts tranchants aux appuis et enfin de déterminer les dimensions des éléments et leurs armatures en appliquant les principes simples qui viennent d'être décrits.

Un autre point mérite d'être souligné concernant les voussoirs sur pile préfabriqués. Le dimensionnement des dispositifs d'entretènement peut conduire parfois pour ces voussoirs à des poids unitaires dépassant les capacités des moyens de levage et de pose utilisés sur le chantier. Aussi les projeteurs ont été parfois amenés à découper les voussoirs sur pile en plusieurs éléments, soit longitudinaux, comme au pont Amont du Boulevard Périphérique et au pont de Saint-André-de-Cubzac, soit horizontaux, comme au Viaduc de Calix et au Viaduc R.A.T.P. de Marne-la-Vallée, les joints entre les éléments restant cependant conjugués (Fig. 37).

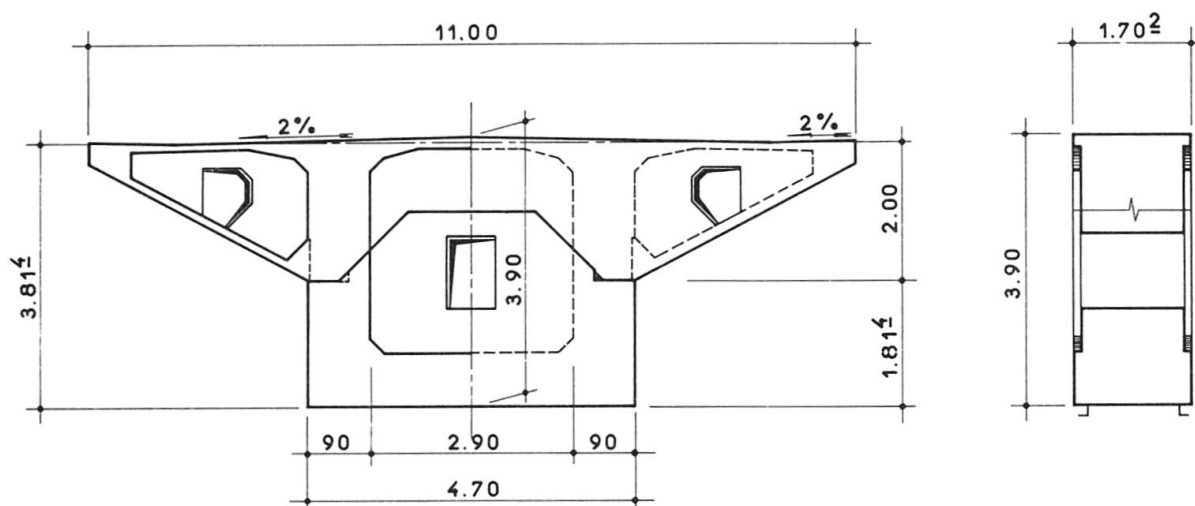


Fig. 37 - Voussoir sur pile de Marne-la-Vallée