

Ponts poussés en béton à précontrainte totalement extérieure

Autor(en): **Combault, Jacques / Leveille, Alain / Neron, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **55 (1987)**

PDF erstellt am: **02.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-42708>

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.

Ponts poussés en béton à précontrainte totalement extérieure

Taktschiebeverfahren mit äusserer Vorspannung

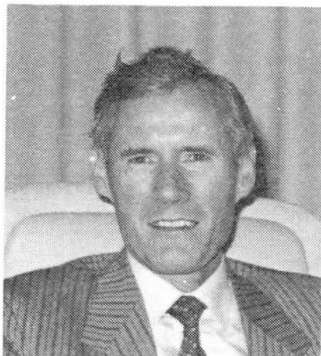
Incrementally launched bridges with total external prestressing



Jacques COMBAULT
Campenon Bernard
Clichy, France



Alain LEVEILLE
Campenon Bernard
Clichy, France



Paul NERON
D.D.E. de la Somme
France



Jean-Louis THIBONNET
Campenon Bernard
Clichy, France

RÉSUMÉ

La précontrainte extérieure au béton permet de construire aujourd'hui des ouvrages légers de très grande qualité. L'article qui suit concerne les ponts poussés modernes en béton précontraint, et le Viaduc Jules Verne, une récente et prestigieuse réalisation technique.

ZUSAMMENFASSUNG

Die äussere Vorspannung erlaubt heute leichte Brücken hoher Qualität zu bauen. Der Beitrag behandelt moderne vorgespannte Brücken, welche im Taktschiebeverfahren erstellt worden sind. Speziell wird der Jules Verne – Viadukt, eine jüngst erbaute, technisch grossartige Brücke, besprochen.

SUMMARY

Prestressing concrete externally allows the construction of light, high quality structures. This article presents a new technique for incrementally launched bridges, with total external prestressing, which has been used in the Jules Verne Viaduct, a recent construction of great technical prestige.



Depuis le début des années 1980, les innovations développées par les grandes entreprises françaises, avec le concours de la Direction des Routes et du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, ont essentiellement porté sur la recherche de structures légères et fiables dont le degré de qualité est une des caractéristiques les plus prometteuses pour les structures de l'avenir.

A cet égard, la précontrainte extérieure au béton, dont les avantages pratiques sont désormais suffisamment bien connus pour qu'il soit inutile de les rappeler ici, est non seulement un facteur commun à toutes les nouveautés structurelles mais aussi et surtout probablement l'innovation la plus marquante et déjà la mieux intégrée dans tous les domaines où la précontrainte joue un rôle déterminant.

L'expérience acquise aujourd'hui dans ce domaine permet d'optimiser les structures réalisées en fonction des procédés de construction employés grâce à des schémas de câblage simples et bien équilibrés. Elle est à l'origine de progrès considérables dans la conception des ponts poussés et elle a permis de réaliser des ouvrages remarquables par leur légèreté, qu'ils soient en béton, comme le Viaduc du Val de Durance ou le Viaduc Jules Verne (Fig. 1) à Amiens mis en place avec l'essentiel de ses superstructures, ou qu'ils soient mixtes comme le Viaduc de Maupré à Charolles.

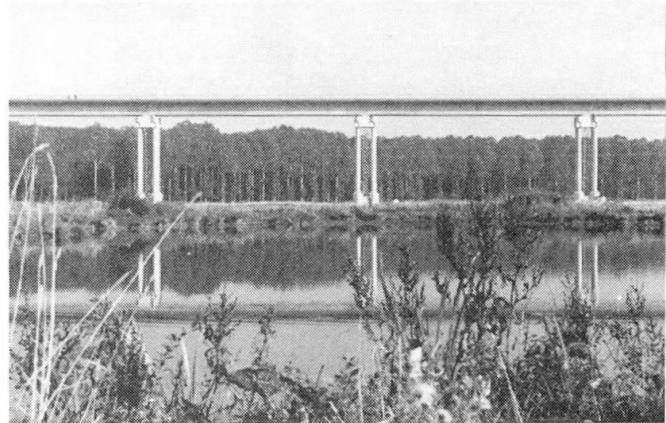


Fig. 1 Viaduc Jules Verne

1. LA MISE EN PLACE PAR POUSSAGE. UNE TECHNIQUE SIMPLE ET EPROUVÉE

La mise en place des tabliers de ponts par poussage à partir d'un banc d'assemblage ou de bétonnage, est une méthode naturelle probablement mise en pratique depuis de nombreux siècles avec des matériaux, comme le bois ou la pierre, plus anciens que l'acier et le béton.

Ce procédé d'exécution rustique mais simple et désormais éprouvé par plus de 25 ans d'expérience et de prestigieuses réalisations s'est fortement développé depuis une dizaine d'années, à tel point qu'en 1980 1,5 millions de m² de tabliers de ponts avaient été ainsi réalisés.

Il fait l'objet de multiples variantes qui le rendent accessible à un grand nombre d'entreprises avec un matériel spécial peu important et peu coûteux.

Mais il convient malgré son succès actuel de rester vigilant dans la conception et la mise en œuvre car, aussi paradoxal que cela puisse paraître, c'est un procédé qui demande beaucoup de soins et des dispositions constructives sérieuses. Il s'agit en effet d'une technique qui, contrairement à la construction par encorbellements successifs, par exemple, ne laisse aucun droit à l'erreur. Toute imprécision géométrique au niveau de la réalisation restera à jamais enfermée dans l'ouvrage et par conséquent à l'origine de sollicitations permanentes imprévues et parfois très néfastes.

1.1. Les grands principes de la réalisation d'un tablier de pont poussé

Bien que cela ne fasse pas l'objet du présent article il n'est pas inutile de rappeler brièvement le principe général du procédé.



Deux principes de poussage sont désormais devenus classiques pour les tabliers de ponts en béton précontraint

- le poussage d'ouvrages continus comportant un grand nombre de travées égales, par tronçons successifs, modulés en fonction de la longueur des travées, à partir d'une plateforme située en arrière de la culée et avec un avant-bec métallique disposé à l'avant du tablier pour en réduire les porte-à-faux plus ou moins importants suivant les phases de poussage considérées.

- le poussage d'ouvrages à 3 travées type 1.2.1 par demi-tabliers construits sur les deux rives, à partir d'appuis provisoires disposés en arrière des culées, qui permet de réaliser des ouvrages modestes dans de très bonnes conditions économiques.

Pour les grands ouvrages d'art, le premier principe se caractérise donc par la longueur des tronçons réalisés sur le banc de bétonnage qui doit être situé à une distance suffisante en arrière de la culée pour que les moments de flexion dans le tablier déplacé soient correctement amortis (ou, ce qui revient au même, pour que la rotation de la section d'extrémité soit nulle).

Quelle que soit leur longueur, les tronçons peuvent être réalisés en plusieurs phases (réalisation du hourdis inférieur et des âmes puis, réalisation du hourdis supérieur) mais alors il faut proscrire tout déplacement de la structure dont la précontrainte nécessaire ne peut être mise en oeuvre.

Dans tous les cas, le banc de bétonnage doit être très rigide, minutieusement nivelé, et régulièrement contrôlé, faute de quoi l'intrados de l'ouvrage réalisé pourrait être anormalement bombé ou, ce qui serait pire encore, torsadé.

Les tronçons réalisés ne doivent pas être trop courts car non seulement la précision de réalisation serait insuffisante mais en outre le câblage serait complexe et coûteux (câbles courts, nombreux et tourmentés).

1.2. La précontrainte de poussage

Les sections droites d'une poutre continue poussée présentent en effet cette particularité d'être toutes sollicitées de manière rigoureusement identique et continûment variable en partie courante, d'être un peu plus sollicitées dans les premières travées, les efforts extrêmes apparaissant de façon cyclique avec une période de une travée.

En restant dans un cadre très général, on peut dire que, pendant le poussage, la précontrainte mise à part, pour une section S donnée :

$$\begin{aligned} T_{\max}(S) &= - T_{\min}(S) \\ M_{\max}(S) &= - 0.5 M_{\min}(S) \end{aligned}$$

avec : $T_{\min}(S)$ = Effort tranchant minimal engendré dans S
 $T_{\max}(S)$ = Effort tranchant maximal engendré dans S
 $M_{\min}(S)$ = Moment de flexion minimal engendré dans S
 $M_{\max}(S)$ = Moment de flexion maximal engendré dans S

Or, en faisant abstraction des contraintes de diffusion des forces de précontrainte à proximité des ancrages, la ligne de précontrainte étant définie au droit de la section S par l'effort normal $N(S)$ qu'elle véhicule et son excentricité $e(x)$ (avec $e(0) = e(s)$ en prenant la section S pour origine) par rapport à la fibre moyenne de la poutre, il vient :

$$\begin{aligned} M_{\text{prec}}(S) &= N(S) \cdot e(S) \\ T_{\text{prec}}(S) &= \frac{d M_{\text{prec}}}{dx}(S) = N(S) \frac{de(x)}{dx}(x=0) \end{aligned}$$

avec : $T_{\text{prec}}(S)$ = Effort tranchant engendré dans S par la précontrainte
 $M_{\text{prec}}(S)$ = Moment de flexion engendré dans S par la précontrainte



Par conséquent, l'épaisseur des âmes de la poutre qui est conditionnée par le poussage ne pourra être optimisée que si $T_{\text{prec}}(S) = 0$, donc si $\frac{de(x)}{dx} (x = 0) = 0$, ou, ce qui revient au même si le câble moyen pendant le

poussage est rectiligne, parallèle à la fibre moyenne, et en pratique centré, $M_{\text{min}}(S)$, et par conséquent $N(S)$, étant quasiment proportionnel à la densité de poids propre, donc à l'aire B de la section courante de la poutre (en négligeant l'incidence du poids de l'avant-bec sur la répartition des efforts).

2. L'APPORT DE LA PRECONTRAINTE EXTERIEURE A LA TECHNIQUE DU POUSSAGE

Il apparait ainsi que l'on peut maîtriser les efforts de précontrainte centrés nécessaires pendant le poussage à condition de pouvoir limiter l'aire de la section type du tablier.

En 1961, le professeur F. Leonhardt envisageait déjà de recourir à des unités de précontrainte extérieures de forte puissance pour la conception et la réalisation du premier pont poussé classique en béton précontraint : le pont sur le Rio Caroni au Venezuela. Cet ouvrage, mis en place par poussage à l'aide d'un avant-bec métallique court et de palées intermédiaires après la réalisation de l'ensemble du tablier sur une rive du Rio, était provisoirement précontraint par un faisceau de fils d'acier dur parallèles et centrés tendus à l'intérieur du caisson constituant le tablier. A l'issue de la mise en place du tablier, le câblage rectiligne était transformé en un câblage parabolique idéal par un processus technologique complexe et coûteux qui ne fut jamais réutilisé.

Comme nous le verrons dans ce qui suit, cette expérience historique comportait cependant un grand nombre de dispositions prometteuses mais, pendant plus de 20 ans, la précontrainte centrée nécessaire pendant le poussage a été généralement obtenue en disposant des câbles pratiquement rectilignes noyés dans le béton et judicieusement répartis entre le hourdis supérieur et le hourdis inférieur des poutres caissons. Ces câbles étaient ancrés en se croisant dans des nervures ou des bossages compatibles avec le découpage en tronçons retenu, ou couplés au fur et à mesure de la réalisation du tablier afin d'obtenir une précontrainte apparemment filante et régulière. Ce n'était en effet qu'une apparence, car comme chacun le sait aujourd'hui les forces concentrées sous les ancrages engendrent des cisaillements non négligeables dans les âmes et, sans pour autant mettre en doute le bon fonctionnement des coupleurs, les câbles étant tendus puis couplés dans des structures différentes, les contraintes réellement engendrées dans la section concernée dépassent rarement la moitié de celles qui sont attendues.

Bien entendu, sans être néfaste, la précontrainte de poussage centrée n'est pas suffisamment efficace pour absorber toutes les contraintes de traction engendrées par la suite dans l'ouvrage en service après la mise en place des superstructures. Cette précontrainte centrée était donc, parfois partiellement détendue, parfois totalement conservée, en tout cas toujours complétée par des câbles noyés dans le béton dont le tracé ondulé s'inspirait fortement des schémas de câblage d'ouvrages entièrement coulés sur cintre. De conception classique, le câblage ainsi obtenu n'était pas particulièrement élégant.

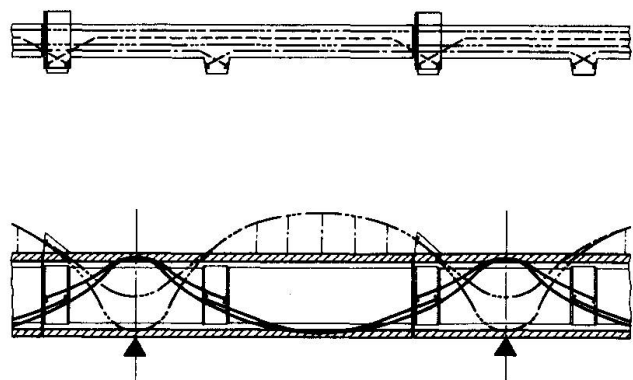


Fig. 2 Pont de Sathorn - Câblage

En 1981, l'entreprise DTP proposait de mettre en place les tabliers des viaducs

d'accès du pont de Sathorn à Bangkok, conçus pour être réalisés sur cintre, par poussage à partir des rives.

Le câblage de l'ouvrage qui avait été optimisé sans se préoccuper d'efforts anormaux pendant la construction a alors été judicieusement utilisé pour le poussage en le complétant par une batterie de câbles antagonistes extérieurs au béton, dont le tracé était obtenu par une déformation affine d'une ligne symétrique du câble moyen définitif par rapport à la ligne moyenne de la structure (Fig. 2). Ces dispositions permettaient de profiter ainsi d'un câblage centré composé des câbles définitifs et d'un minimum de câbles provisoires démontables et réutilisables mais partiellement placés au dessus de la table supérieure du tablier et nécessitant par conséquent un grand nombre de selles de déviation relativement couteuses.

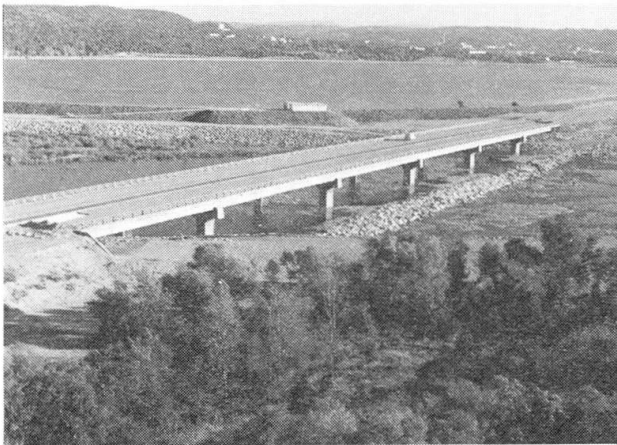


Fig. 3 Viaduc sur la Durance

Un an plus tard, les premiers développements théoriques relatifs à la précontrainte extérieure au béton allaient conduire l'entreprise Campenon Bernard à présenter un projet de pont poussé tout à fait nouveau à l'occasion de la construction des deux tabliers permettant à l'autoroute A51 de franchir la Durance (Fig. 3). La précontrainte de l'ouvrage était totalement extérieure au béton, en phases provisoires comme en service. Le tracé des câbles définitifs particulièrement simple permettait d'envisager un câblage antagoniste de poussage totalement situé dans le caisson, sans faire appel à de couteuses dispositions, en réalisant la

symétrie du tracé des câbles définitifs par rapport à l'axe median du tablier et en disposant quelques câbles rectilignes pour recentrer l'ensemble de la précontrainte (Fig. 4). Les forces de précontrainte à mettre en oeuvre (environ 3 700 t) étaient identiques en service et en poussage pour des portées de 51.26 m, un élanement des tabliers égal au 1/20e, une épaisseur moyenne courante de 47 cm et un diagramme de contraintes permanentes remarquablement régulier dans l'ouvrage terminé.

Depuis quelques années, le panachage de la précontrainte noyée définitive, de la précontrainte provisoire extérieure et de quelques câbles filants disposés à l'extérieur du béton une fois l'ouvrage terminé, est devenu traditionnel et de nombreux ouvrages ont été réalisés de cette manière.

Mais avec la précontrainte totalement extérieure au béton le concepteur ne subit plus les efforts de poussage. Il peut au contraire agir sur 3 paramètres fondamentaux :

- L'aire B de la section courante , du fait de la réduction du volume des

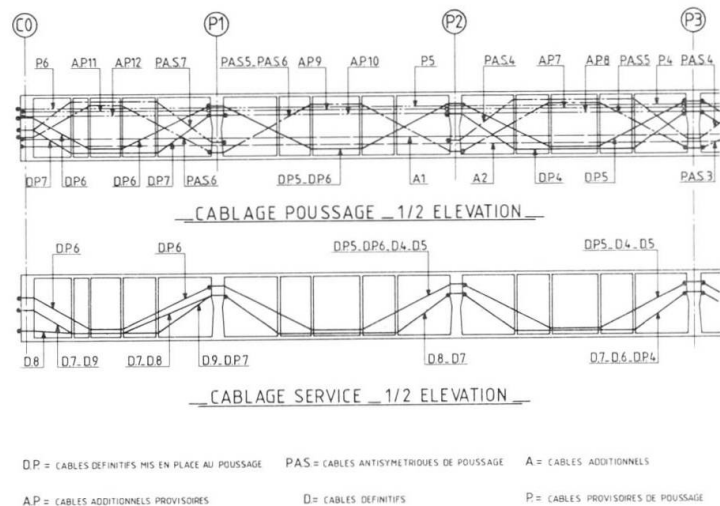


Fig. 4 Viaduc sur la Durance - Câblage



goussets et de l'épaisseur des âmes dans lesquels il n'y a plus à réserver l'espace nécessaire à la mise en place des câbles noyés, la diminution du poids de l'ouvrage conduisant à une diminution de précontrainte comme nous l'annoncions dans ce qui précède.

- Les caractéristiques de résistance à la flexion, car les contraintes totales engendrées pendant le poussage sont alors inférieures pour de multiples raisons à celles que nous aurions dans un ouvrage comparable à précontrainte noyée.

- L'efficacité de la précontrainte centrée, qui devient intéressante lorsque l'on conserve quelques câbles rectilignes dans l'ouvrage en service sans compter les multiples avantages liés à la concentration des ancrages dans des blocs entretoises particulièrement massifs, à la continuité réelle de la précontrainte, à la simplicité d'exécution et donc à la qualité de l'ouvrage réalisé.

3. LE VIADUC JULES VERNE A AMIENS - UN GRAND PONT POUSSÉ A PRECONTRAINTE TOTALEMENT EXTERIEURE AU BETON

Il est donc possible de construire ainsi des ouvrages aux propriétés tout aussi remarquables que celles des ponts construits à l'avancement, mais en conservant une partie de la précontrainte de poussage lorsqu'elle comporte des câbles rectilignes, on peut aussi adapter la structure au procédé de construction utilisé pour la réaliser, et c'est ce qui caractérise la conception du Viaduc Jules Verne.

3.1. Description de l'ouvrage

Le Viaduc Jules Verne réalisé par Campenon Bernard entre 1985 et 1987 pour le compte du Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, maître d'ouvrage, sous la surveillance de la Direction Départementale de l'Équipement de la Somme, maître d'oeuvre, avec la collaboration du S.E.T.R.A, du C.E.T.E Nord-Picardie et du Cabinet Lavigne (Architecte conseil) est constitué d'une poutre caisson continue en béton précontraint. D'une longueur totale de 943 m, il comporte 19 travées, dont 2 travées de rive de 41.50 m de portée et 17 travées courantes de 50.50 m de portée, permettant le franchissement du marais des Falises, de la Somme et d'un faisceau de 11 voies ferrées (dont les lignes Paris-Lille et Amiens-Laon) à l'extrémité de la gare de triage de Longueau.

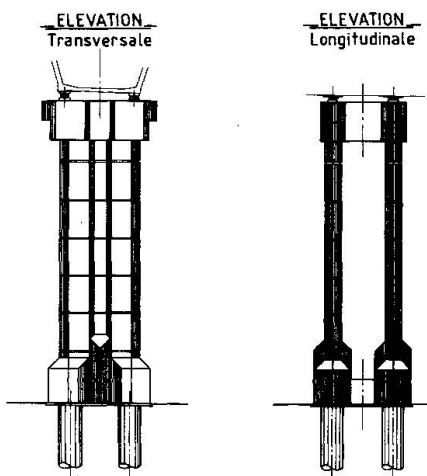


Fig. 5 Piles
Viaduc Jules Verne

Les piles en béton armé sont constituées de deux fûts jumelés de 1.00 m d'épaisseur encastrés dans un socle reposant sur 4 pieux forés de 1.30 m de diamètre et de 22.00 m de longueur dans la partie marécageuse, ou directement sur la craie au voisinage des culées, et reliés en tête par un chevêtre massif (Fig. 5).

Le tablier supporte deux voies de circulation de 3.50 m de largeur. Il est encastré sur les piles par l'intermédiaire de 2 files d'appareils d'appui espacés de 3.60 m.

Le caisson a une hauteur de 3.20 m, le hourdis supérieur et inférieur ayant respectivement 10.40 m et 4.64 m de largeur et 0.22 m et 0.18 m d'épaisseur (hors goussets).

Les âmes inclinées ont une épaisseur constante de 30 cm et la section transversale courante a ainsi une épaisseur moyenne de 50 cm pour un élanement fictif légèrement inférieur au 1/16e (Fig. 6).

La précontrainte est totalement extérieure au béton, les câbles étant ancrés

dans les voussoirs sur piles ou sur culées et pour la plupart déviés dans des selles métalliques fixées sur 3 entretoises intermédiaires. Chaque câble de précontrainte est constitué de 12 torons de 15 mm disposés dans une gaine en polyéthylène semi-translucide.

Mises à part les deux premières travées où un renfort de précontrainte est nécessaire en phase de construction, le câblage (Fig. 7) se compose de :

- 6 câbles droits, 2 câbles ondulés en trapèze (et déviés au 1/4 de la travée), 2 câbles ondulés en triangle (et déviés au milieu de la travée) et 4 câbles antagonistes mis en place et tendus sur le banc de préfabrication avant chaque poussage et régnant sur 2 travées consécutives.

- 4 câbles ondulés (2 trapézoïdaux et 2 triangulaires) ajoutés à l'issue du poussage, les câbles antagonistes étant supprimés lors de l'achèvement de l'ouvrage.

Les gaines des câbles définitifs sont injectés avec une cire pétrolière. Les ancrages sont détendables (système Freyssinet International) et l'on pourra par conséquent retendre ou remplacer n'importe quel câble à tout moment de la vie de l'ouvrage.

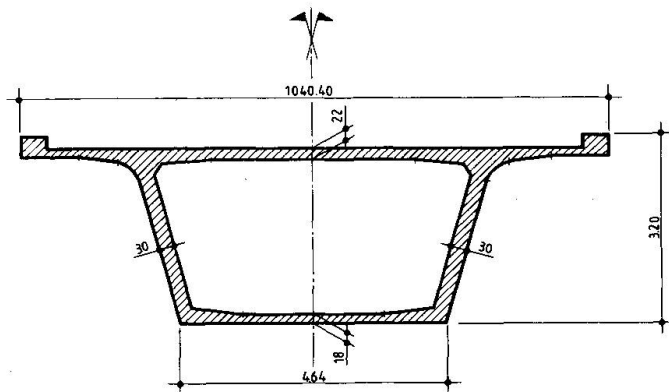


Fig. 6 Viaduc Jules Verne - Section

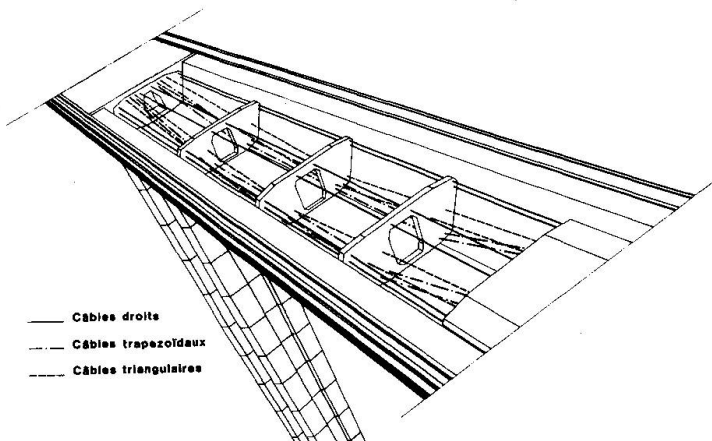


Fig. 7 Viaduc Jules Verne - Câblage

3.2. La construction de l'ouvrage

Le tablier a été construit par tronçons successifs sur un banc de poussage de 75 m de longueur totale aménagé contre la culée Nord de l'ouvrage.

Ce banc en béton précontraint est une pièce essentielle du poussage. Il a été conçu pour être rigide et géométriquement parfait. Il supporte une plateforme de travail périphérique sur laquelle les coffrages extérieurs du caisson peuvent être déplacés et réglés et une plateforme de travail centrale servant de fond de moule et capable de s'abaisser de 50 cm en basculant vers l'avant.

La réalisation de chaque travée comprenait les étapes suivantes :

- Bétonnage de 4 tronçons courants de 11.60 m de longueur (les arrêts de bétonnage étant situés avant chaque entretoise de déviation) et, de façon tout à fait indépendante, du tronçon de tablier spécial situé au droit d'une pile en phase définitive (et comportant donc un entretoisement complexe).

- Ripage du tronçon spécial et clavage de cet élément avec le dernier tronçon courant réalisé.

- Mise en tension des câbles de précontrainte de poussage ancrés dans le tronçon



spécial alors agé de plusieurs jours.

A l'issue de ces opérations, le déplacement du tablier se faisait par travées entières à l'aide de 4 câbles 19T15 ancrés sur un étrier métallique accolé au tronçon spécial et tractés par des verins hydrauliques s'appuyant sur le sommier de la culée.

Il était ainsi possible, grace à la remarquable simplicité de l'ouvrage ainsi conçu et à l'attention particulière apportée à l'enchainement des phases de bétonnage et à la technologie du poussage, de réaliser une travée en huit jours.

4. BIBLIOGRAPHIE

1. PLACIDI M., Construction d'ouvrages d'art et mise en place par déplacement. IABSE PROCEEDINGS P-62/83.
2. COMBAULT J., Evolution et développement des ponts modernes à précontrainte totalement extérieure au béton. TRAVAUX JANVIER 1986 - Supplément.