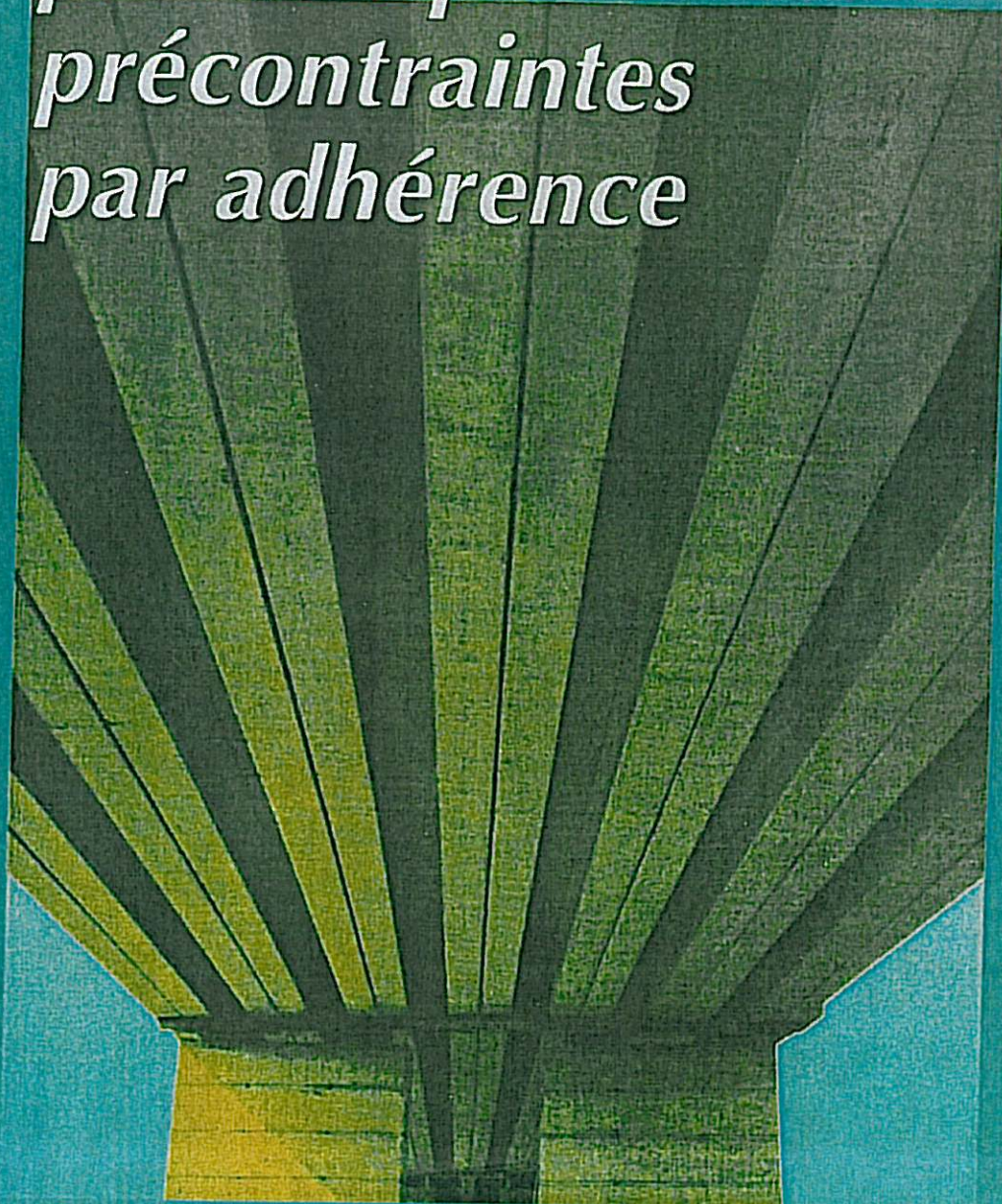


*Ponts-routes
à poutres
préfabriquées
précontraintes
par adhérence*



*P
R
A
D*



Claude SERVANT

Directeur Scientifique

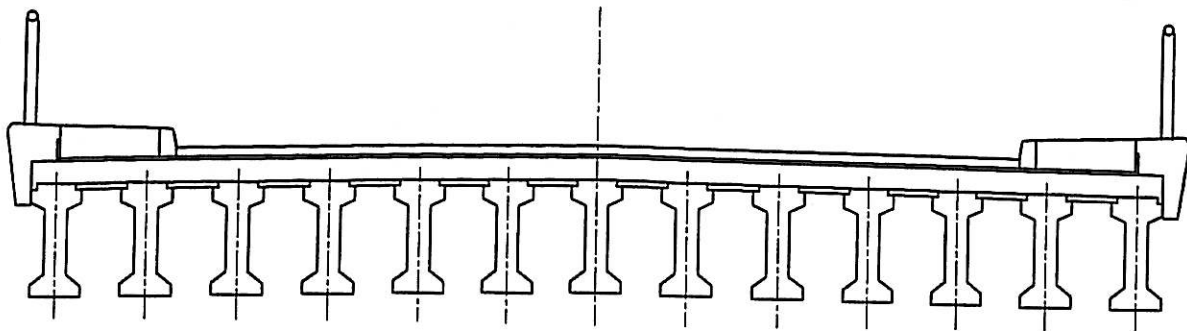
EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

1 - DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA STRUCTURE.

Les ouvrages peuvent comporter une ou plusieurs travées. Dans le cas de travées multiples, l'ouvrage peut être conçu comme une succession de travées isostatiques, ou au contraire constituer une structure hyperstatique par la réalisation d'une continuité mécanique entre les travées.

Tablier.

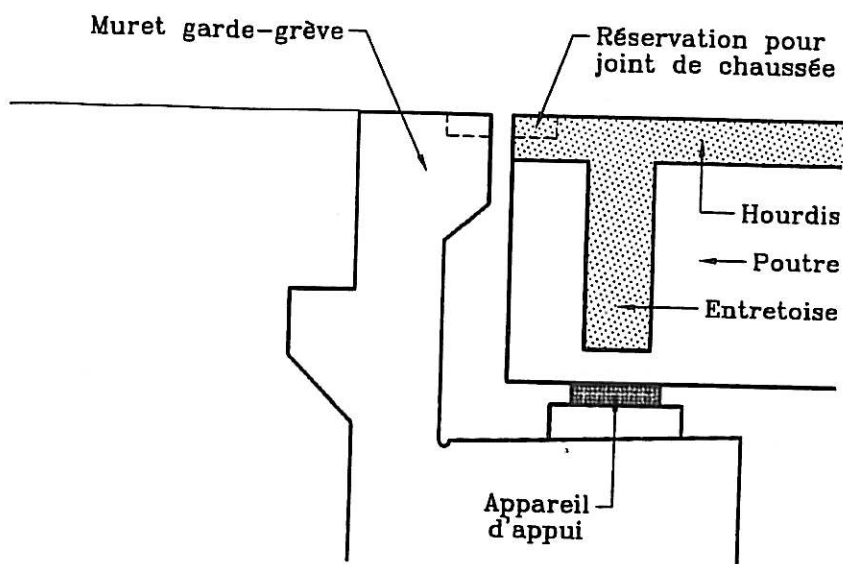
Un tablier à poutres sous chaussée est constitué d'éléments longitudinaux, le plus souvent parallèles : les *poutres*, reliés transversalement par une dalle de béton coulé en place régnant sur toute la longueur de la travée : le *hourdis*, et par des éléments localisés, notamment au niveau des lignes d'appui : les *entretoises*.



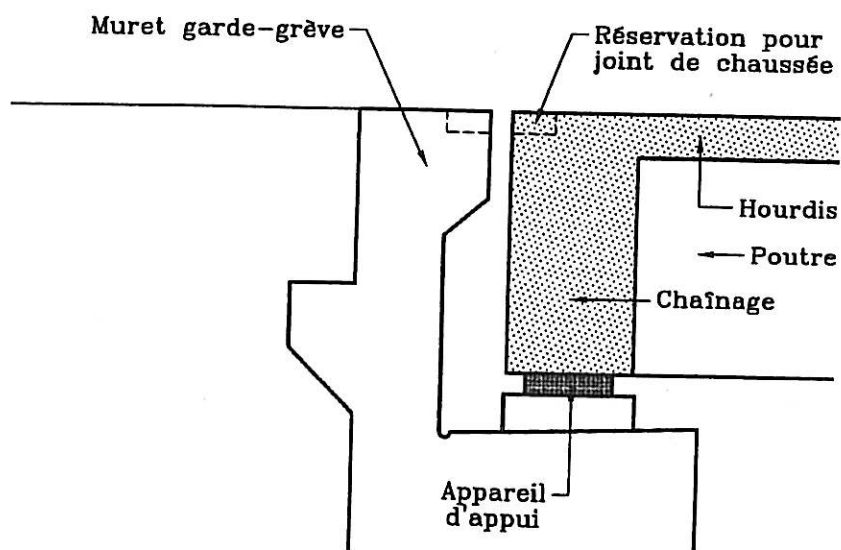
Coupe transversale du tablier.

Nous indiquons ci-après les particularités de ces éléments dans le cas des tabliers de type PRAD :

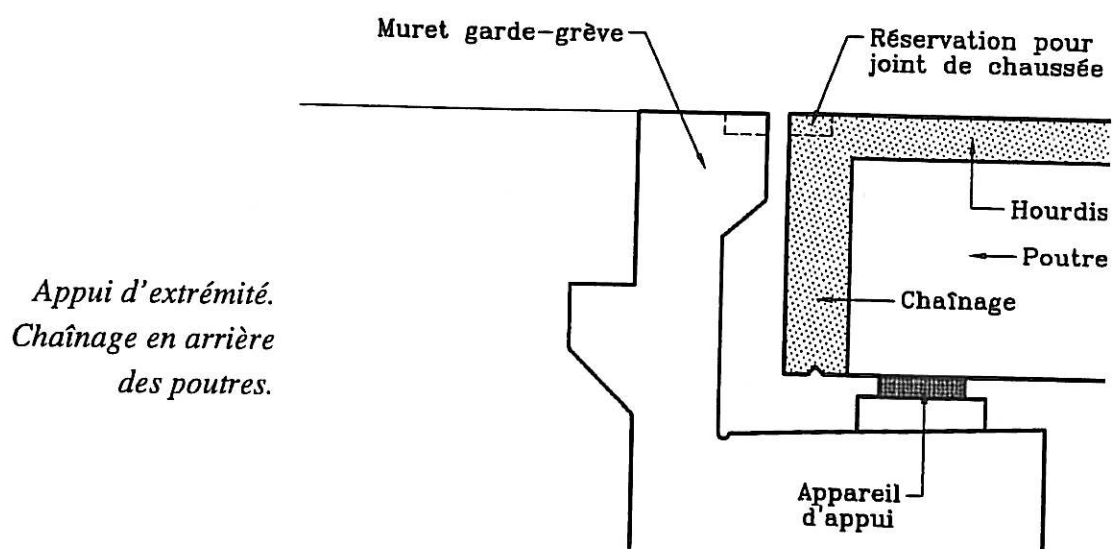
- Les poutres, de hauteur constante, sont préfabriquées en usine ; leur profil doit donc être choisi sur un catalogue de produits existants. Leur espacement est modéré, généralement de l'ordre du mètre pour les élancements courants.
- Le hourdis coulé en place est de type "général", en ce sens qu'il est bétonné au-dessus des poutres, dont le faible espacement permet l'utilisation de coffrages perdus.
- Les entretoises sont disposées uniquement aux extrémités des travées. Dans le cas des travées isostatiques, il peut s'agir soit d'entretoises classiques situées au niveau de chaque ligne d'appui, soit de chaînages transversaux assurant simplement la liaison en arrière des poutres. Pour les travées mécaniquement continues, c'est le noyau, ou chevêtre de continuité incorporé qui joue le rôle de raidissage transversal sur les appuis intermédiaires. Les entretoises et chaînages peuvent comporter une partie en saillie par rapport à la sous-poutre dont le but principal est de masquer les reprises de bétonnage en dents de scie dans le cas d'ouvrages biais.



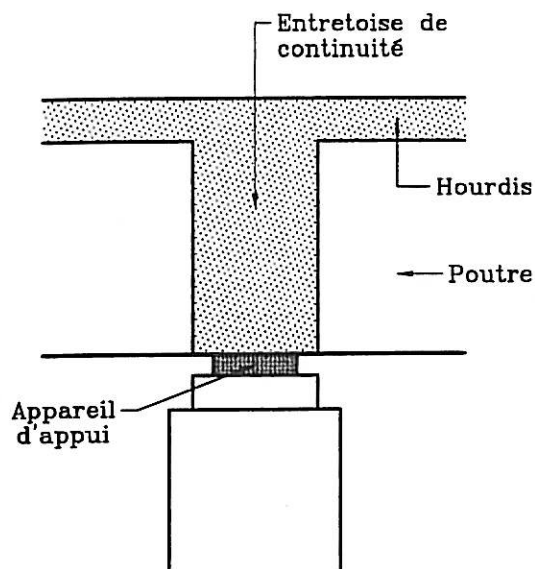
*Appui d'extrémité.
Entretoise dans
l'axe d'appui.*



*Appui d'extrémité.
Entretoise dans l'axe
d'appui (variante).*



*Appui d'extrémité.
Châfnage en arrière
des poutres.*



*Appui intermédiaire.
Noyau de continuité.*

Appuis.

Il convient de distinguer :

- les appuis intermédiaires, qui transmettent aux fondations les efforts apportés par le tablier,
- les appuis d'extrémité, qui ont eux une fonction supplémentaire : porter le tablier et assurer la jonction entre l'ouvrage et ses accès.

a) - Appuis intermédiaires.

Lorsque l'ouvrage comprend plusieurs travées, les appuis intermédiaires sont en général constitués, soit par des piles de type voile (unique ou multiple), soit par des piles de type colonne (à section circulaire ou polygonale) ou de type poteau. C'est le caractère isostatique ou hyperstatique de la structure du tablier qui conditionne les dispositions à adopter en tête de pile.

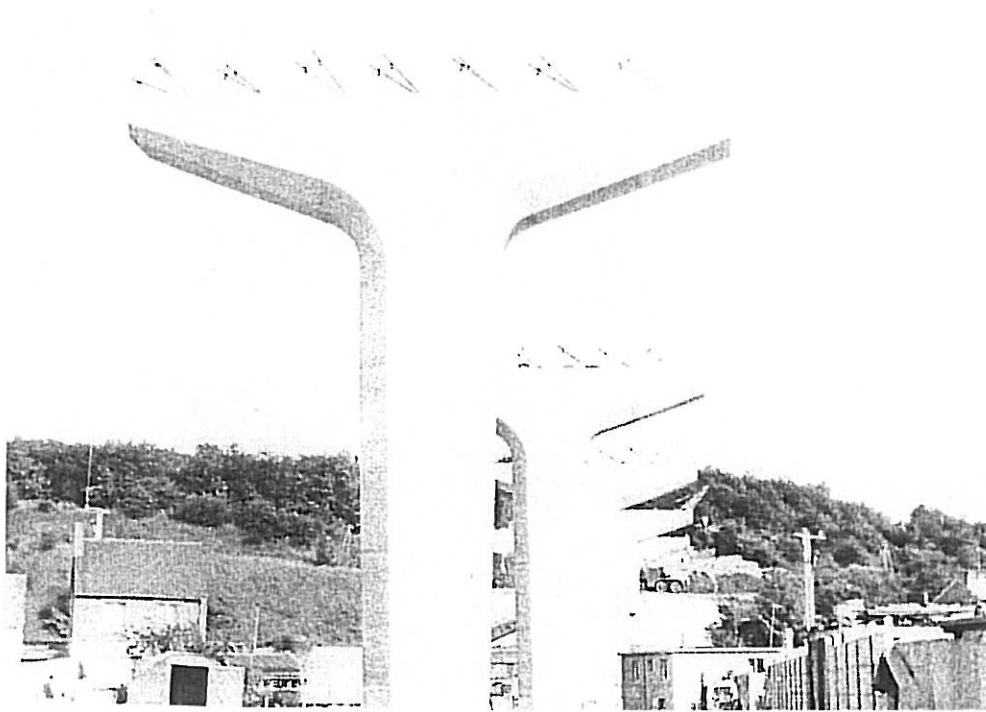
Une succession de travées indépendantes nécessite deux lignes d'appareils d'appui sur chaque appui intermédiaire. Cela implique donc la réalisation en tête de pile d'un chevêtre suffisamment large pour permettre l'implantation des appareils d'appui, ce qui constitue une forte contrainte architecturale.

En revanche, si les travées présentent une continuité mécanique, il n'existe qu'une ligne d'appareils d'appui, centrée sur chaque pile. L'encombrement est ainsi réduit et le tablier peut être directement appuyé sur le voile.

D'autres types de piles sont encore possibles :

Pour les plus grandes portées, de l'ordre de 30 mètres, on utilise aussi la pile-marteau dont l'allure peut facilement être rendue esthétique, qui présente l'avantage d'une emprise au sol très limitée et qui permet le cas échéant de s'affranchir des problèmes de biais.

Pour des tabliers particulièrement larges, des piles de type portique, constituées de deux fûts surmontés d'un chevêtre, se prêtent bien à diverses interprétations architecturales.



Pile-marteau.

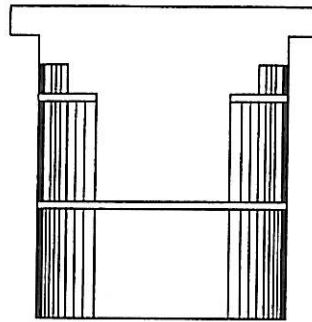
b) - Appuis d'extrémité.

Les appuis d'extrémité sont le plus souvent des piles-culées classiques, partiellement ou totalement enterrées, implantées en crête ou en flanc de talus. Elles comportent généralement des murs en retour suspendus.

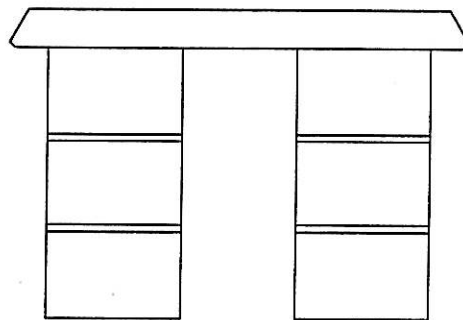
On peut également réaliser des culées massives remblayées, à mur de front apparent, implantées en pied de talus, principalement lorsqu'on souhaite limiter au strict nécessaire la longueur du tablier. Les murs latéraux associés sont soit des murs en aile, soit des murs en retour.

Dans le cas de sols médiocres, si les solutions classiques s'avèrent trop difficiles à réaliser, il est possible d'envisager de recourir à des culées en terre armée. Cette solution est toutefois déconseillée quand le tablier est rendu hyperstatique

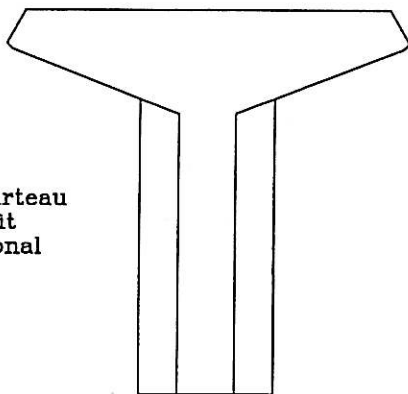
Pour des usages particuliers, tels que des passages souterrains, des tranchées couvertes, des estacades ou des couvertures de cours d'eau, ce sont des éléments filants, parois moulées, murs de soutènement ou rideaux de palplanches couronnés par un chevêtre qui jouent le rôle d'appui d'extrémité.



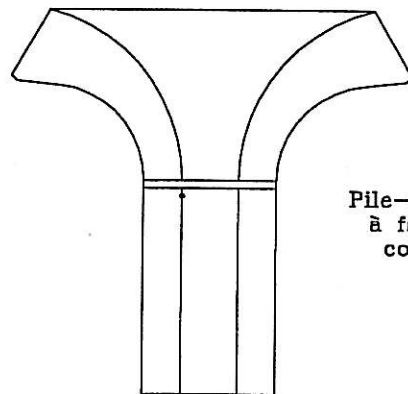
Voile unique
avec avant-becs
arrondis



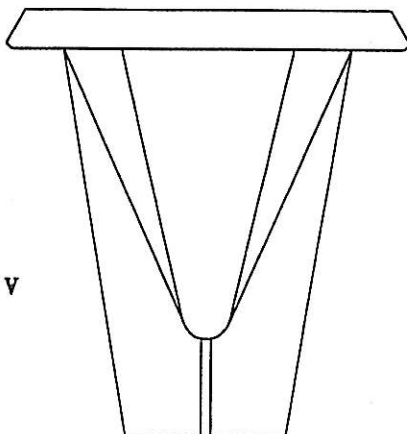
Plusieurs voiles
à parements
cannelés



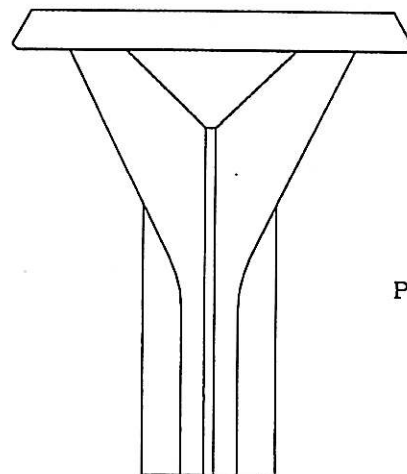
Pile-marteau
à fût
polygonal



Pile-marteau
à facettes
courbes



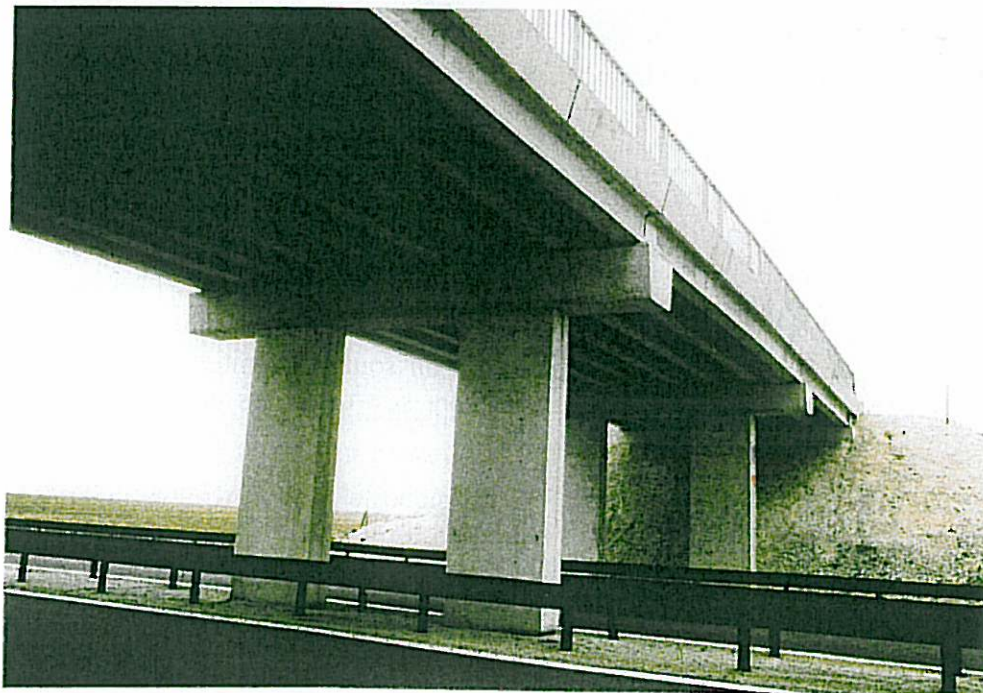
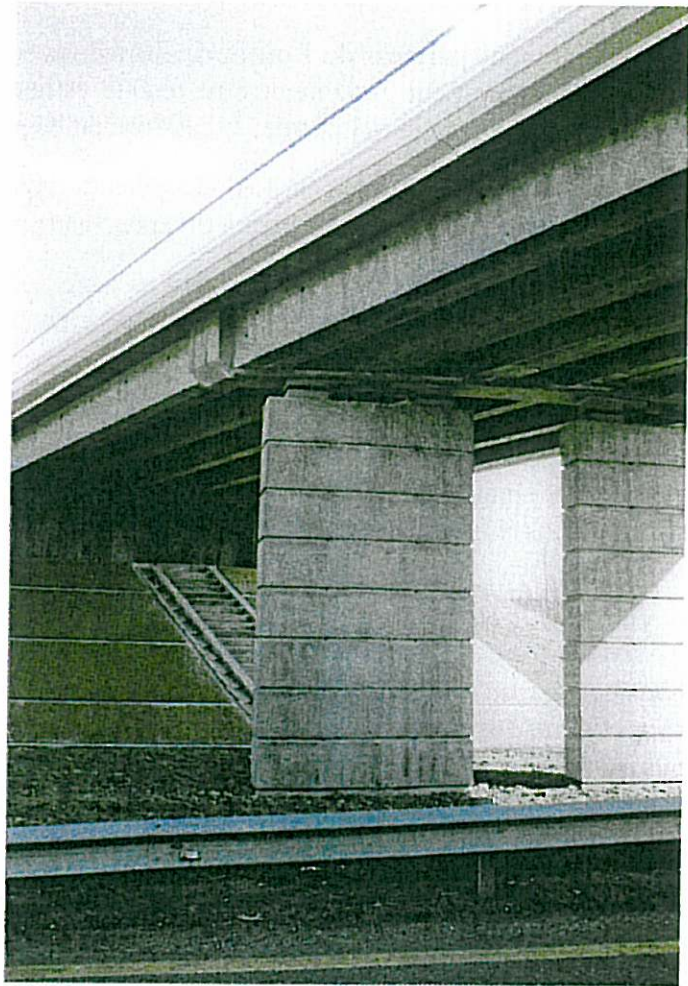
Pile en V



Pile en Y

: Quelques formes de piles.

*Voile supportant un
noyau de continuité.*



Palée à colonnes liées en tête par un chevêtre.

DOMAINE D'EMPLOI.

Ce type d'ouvrage permet indifféremment la réalisation de franchissements :

- en passage inférieur, quand l'ouvrage doit porter la voie nouvelle,
- en passage supérieur, quand l'ouvrage doit permettre un rétablissement de communications.

Les poutres sont en général disposées dans le sens "naturel", c'est-à-dire parallèlement à la circulation. Cependant, dans certains ouvrages comme les couvertures de cours d'eau ou de tranchée couverte, les poutres peuvent être disposées dans la direction perpendiculaire à la circulation.

Dans certains pays européens, Belgique et Pays-Bas notamment, l'emploi des poutres précontraintes par pré-tension connaît un large développement, dans une gamme de portées très étendue pouvant aller jusqu'au-delà de 40 mètres. On constate qu'en France, le domaine d'emploi le plus courant se situe dans une zone de portées plus restreinte.

Il serait bien sûr arbitraire de fixer des bornes précises. On peut toutefois observer que :

- Au-dessous d'une dizaine ou d'une douzaine de mètres de portée, il n'est pas indispensable d'avoir recours à la précontrainte. Si le choix d'une solution à poutres préfabriquées est déjà fait, des poutres de béton armé seraient suffisantes. Sinon, pour les travées uniques, on s'orientera plutôt vers des structures coulées en place telles que le pont-dalle, le pont-cadre ou le portique.
- Nous ne connaissons pas en France d'exemple de réalisation dépassant 36 mètres. Cette situation tient aux possibilités des usines de préfabrication, puisque les poutres sont choisies dans une gamme de produits existants. Par ailleurs, le transport de poutres de grande longueur peut présenter des difficultés en fonction des conditions locales. C'est aussi parfois la difficulté à maîtriser la déformation des poutres (cambrure), qui conduit à limiter leur longueur aux environs de cette valeur. En effet, puisque le mode de fabrication des poutres impose d'avoir un fond de moule horizontal, la cambrure ne peut pas être compensée par une flèche vers le bas du coffrage.

Le domaine d'utilisation privilégié de ce type de structure se situe ainsi dans la zone des portées comprises entre 15 et 25 mètres. L'élancement courant du tablier (poutre et hourdis associé) est de l'ordre du 1/20 pour les travées indépendantes et peut aller jusqu'au 1/25 pour des travées rendues continues.

Ces élancements correspondent à un béton traditionnel. Les progrès accomplis en France dans la technologie des bétons à hautes performances (BHP) ont permis et permettront sans doute plus largement encore d'utiliser économiquement ce matériau dans la fabrication des produits industrialisés, les poutres PRAD en particulier. Par rapport aux bétons traditionnels, l'emploi des BHP permet, toutes choses étant égales par ailleurs, soit de réduire le nombre de poutres, soit de diminuer leur hauteur de 15 à 20 %, et d'alléger ainsi leur section, ce qui présente un intérêt certain pour leur transport et leur manutention. Elle permet également d'élargir les gammes de portées des types de poutres.

Leur emploi est essentiellement conditionné par la portée, comme le montre le tableau

Portées (m)	10	12	15	20	25	30	35
Rectangle							
I constant							
I variable							

 Domaine d'emploi courant.

 Extension du domaine d'emploi.

Pour les poutres rectangulaires, l'extension à 20 mètres est possible en jumelant les poutres.

Portées des types de poutres les plus utilisés en béton traditionnel.

Ce tableau, ainsi que les dimensions de sections précisées ci-après, sont établis pour les poutres en béton traditionnel. L'emploi de bétons à hautes performances permettrait, en fixant les autres paramètres, soit d'élargir les gammes de portées de chaque type de poutres, soit de diminuer le nombre de poutres (d'environ une à deux poutres par travée) et donc d'augmenter leur espacement, soit encore de réduire leur hauteur de 15 à 20 %.

a) - Poutre rectangulaire :

Selon les usines, sa largeur peut varier de 25 à 40 centimètres. La gamme des hauteurs s'échelonne généralement entre 30 et 80 centimètres. La simplicité du coffrage permet une fabrication et une mise en place faciles pour le ferrailage passif.

b) - Poutre en I de section constante :

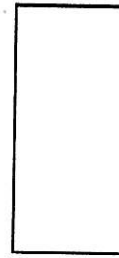
Ce type de poutres peut être utilisé lorsque le calcul des contraintes de cisaillement montre que l'épaisseur courante de l'âme est suffisante, même au voisinage des appuis. La gamme des hauteurs courantes va de 0,80 à 1,20 mètre. Les largeurs de talon sont de l'ordre de 40 à 50 centimètres. La largeur de l'âme, généralement comprise entre 15 et 20 centimètres, est choisie en fonction de l'espacement entre axes des poutres. Les épaisseurs aux extrémités des membrures inférieure et supérieure ainsi que les pentes des goussets de raccordement à l'âme ont des valeurs particulières à chaque préfabricant.

c) - Poutre en I avec épaissement rectangulaire aux abouts :

Le recours à ce type de poutres devient nécessaire si le cumul des contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant, à la torsion et à l'introduction de la précontrainte n'autorise plus le choix d'une âme d'épaisseur constante. On est amené dans ce cas à renforcer l'épaisseur de l'âme dans la zone proche des appuis. La poutre présente ainsi en partie courante une section en I à âme mince, dont l'épaisseur est de l'ordre de 15 centimètres (13 centimètres semblant constituer un strict minimum pour respecter l'enrobage des étriers) et aux extrémités, une section rectangulaire. Le raccordement entre les deux types de sections est progressif. La longueur du blochet d'extrémité résulte des calculs de cisaillement.

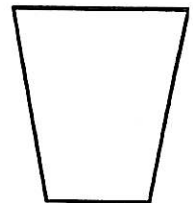
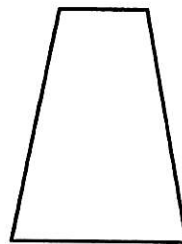
- ***Poutre rectangulaire :***

C'est bien sûr la forme la plus simple. Si le rendement géométrique de la section ($1/3$) est médiocre, le coffrage qui permet de la réaliser est le moins coûteux. Ce type de poutres est couramment utilisé jusqu'à des portées d'environ 15 à 16 mètres. Notons que l'emploi des bétons à hautes performances permet d'élargir les gammes de portées de ce type de poutres.

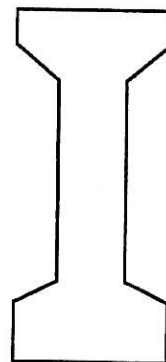


- ***Poutre trapézoïdale :***

Sa réalisation ne nécessite pas non plus de moules compliqués. La petite base peut être située soit en fibre inférieure, soit en fibre supérieure de la poutre. Le domaine d'utilisation est analogue à celui de la poutre rectangulaire.

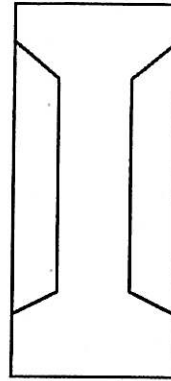


- ***Poutre en I de section constante sur toute sa longueur :***



Constituée de deux membrures (symétriques ou non) solidarisiées par une âme verticale, cette section présente un meilleur rendement, pouvant atteindre 0,45 voire 0,50. Ce type de poutres prend le relais de la poutre rectangulaire à partir d'une quinzaine de mètres jusqu'à des portées d'environ 25 mètres. Il reste néanmoins possible de les choisir pour des portées moindres. Les membrures inférieure et supérieure ont le plus souvent la même largeur, mais parfois, notamment pour réaliser une sous-face de tablier continue, on utilise des poutres à large membrure inférieure, disposées de façon jointive. Nous avons déjà indiqué que l'emploi des bétons à hautes performances permet également dans ce cas d'élargir les gammes de portées.

- *Poutre en I avec épaissement rectangulaire aux abouts (blochets) :*



Il arrive fréquemment, par exemple pour les grandes portées, ou encore quand les espacements de poutres sont importants, que l'épaisseur courante de l'âme se révèle insuffisante vis-à-vis des contraintes de cisaillement au voisinage des appuis. Un épaissement de l'âme dans cette zone est alors nécessaire. Il est obtenu par la réalisation de blocs d'about de section rectangulaire, également appelés blochets d'extrémité, qui se raccordent en sifflet (sur une vue en plan) avec la section en I courante.

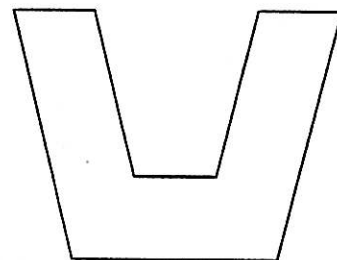
Le domaine d'emploi de ce type de poutres chevauche le précédent pour des portées comprises entre 20 et 25 mètres. Ce profil est le seul qui soit envisageable pour les très grandes portées, jusqu'aux environs de 35 mètres, ce qui constitue actuellement la portée maximale réalisée en France. L'épaissement de l'âme aux extrémités permet le cas échéant la mise en œuvre d'armatures déviées en élévation. Notons ici encore que l'emploi des bétons à hautes performances permet d'élargir les gammes de portées de ce type de poutres.

Il existe aussi d'autres types d'éléments préfabriqués, d'usage moins fréquent, caractérisés par la présence de deux ou plusieurs âmes. L'intérêt principal de ces éléments, plus larges que des poutres individuelles, étant de diminuer le nombre de manutentions, on y recourt principalement quand les surfaces à couvrir sont particulièrement importantes. On rencontre notamment les formes de sections suivantes :

- *Poutre de section en auge :*

Elle dérive de la section trapézoïdale à petite base inférieure et comme celle-ci, convient aux petites et moyennes portées.

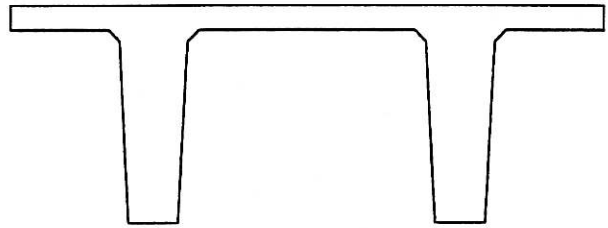
Dans ce type de poutres, ainsi que pour les caissons, il est prudent de ménager des ouvertures pour le drainage en partie inférieure, afin d'éviter les risques d'accumulation d'eau.



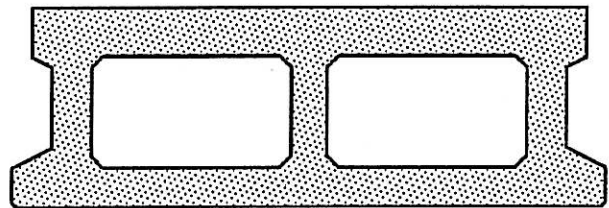
- ***Poutre de section en auge renversée, ou en pi :***

Elle peut être considérée comme le jumelage de deux poutres en T. Elle est également adaptée aux portées moyennes.

Pour les ponts-routes, elle est associée à un hourdis coulé en place.



- ***Poutre-caisson :***



Les caissons peuvent être monocellulaires ou multicellulaires ; le bon rendement géométrique de ce profil, voisin de 0,60, permet de plus la réalisation d'ouvrages particulièrement élancés. On les utilise généralement dans une gamme de portées allant de 15 à 25 mètres.

Leur particularité réside dans le fait qu'ils peuvent être utilisés sans hourdis coulé en place et peuvent ainsi recevoir directement, une fois assemblés, l'étanchéité et le revêtement de chaussée. Pour cette raison, l'assemblage transversal des caissons revêt un caractère primordial

Rien ne s'oppose toutefois à leur utilisation, comme des poutres classiques, avec un hourdis coulé in situ.

Eléments transversaux.

Entretoisement.

Pour les ponts à poutres sous chaussée, le rôle mécanique des entretoises était initialement de constituer un raidissement transversal du platelage, contribuant à la répartition des charges entre les poutres et assurant leur encastrement vis-à-vis de la torsion sur appuis, hypothèse généralement retenue par les méthodes classiques de calcul de répartition transversale.

Lorsque les poutres sont préfabriquées, la réalisation d'entretoises intermédiaires coulées en place entraînerait un ralentissement et une complication (coffrages traditionnels, armatures en attente) de l'exécution du tablier. C'est pourquoi les tabliers PRAD sont systématiquement construits sans entretoises intermédiaires. Il convient naturellement de tenir compte, par des méthodes de calcul appropriées, de l'accroissement de la souplesse transversale du tablier qui en résulte.

Incidences de la courbure et du biais.

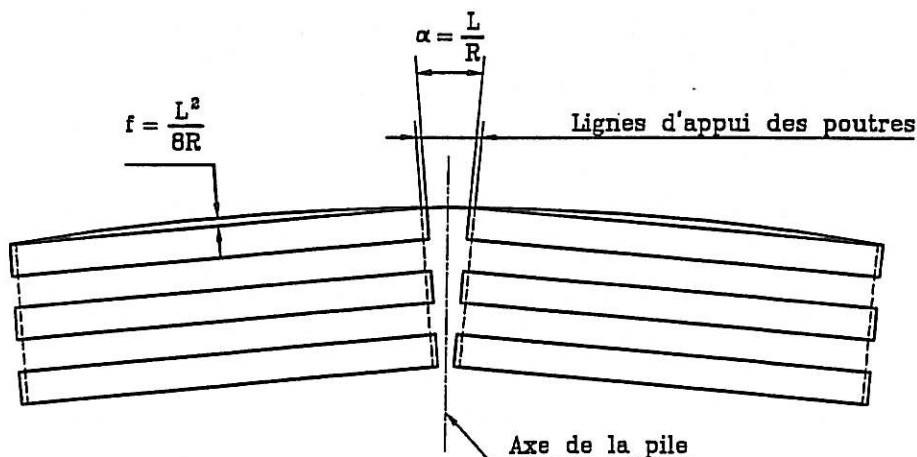
a) - Courbure.

L'utilisation naturelle des ponts à poutres sous chaussée, constitués d'éléments rectilignes, concerne en premier lieu les franchissements rectilignes. Il est toutefois possible d'adapter la structure pour réaliser des ouvrages présentant une courbure en plan.

Les poutres de rive sont disposées selon des lignes polygonales inscrites à l'intérieur du tracé et l'arrondi du tablier est obtenu en coulant le hourdis, en léger encorbellement de largeur variable, au-delà des poutres de rive. On déroge ainsi au parti habituel de simplicité d'exécution qui consiste à arrêter le hourdis au nu extérieur des poutres de rive.

En tout état de cause, la valeur maximale de ce débord reste limitée. Si le rayon de courbure descend à 15 fois la portée, ce qui est très faible compte tenu de la gamme habituelle des portées, l'encorbellement maximal atteint respectivement des valeurs de 12 et 20 cm pour des portées de 15 et 25 mètres.

Etant donné que, pour des raisons économiques, toutes les poutres d'une même travée ont en général la même longueur, les lignes d'appui de cette travée sont donc parallèles ; en revanche, sur pile intermédiaire, les lignes d'appui des travées voisines présentent une déviation angulaire égale à L/R .



Pont courbe : disposition des poutres sur un appui.

Le sommier d'appui doit alors avoir une forme trapézoïdale en plan et la dalle de continuité qui assure la liaison entre travées adjacentes est de portée variable. Pour améliorer l'aspect visuel de la zone de jonction entre deux travées, notamment du côté convexe, il paraît opportun de masquer le vide existant entre abouts de poutres par un traitement approprié de l'extrémité du chevêtre.

b) - Biais.

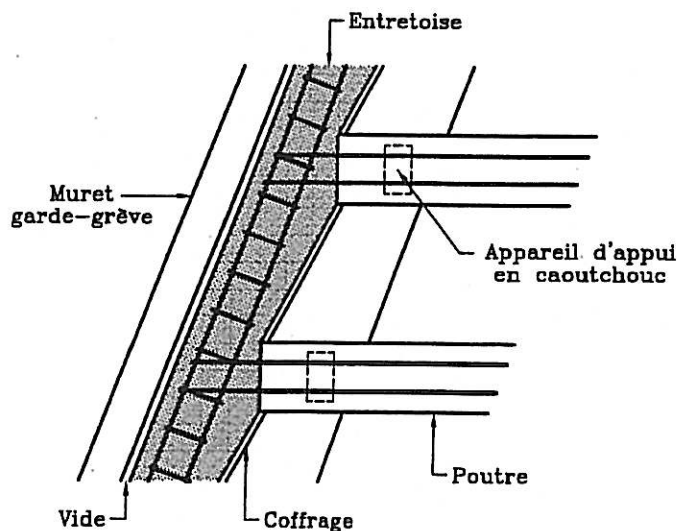
La plupart des franchissements ne se font pas à angle droit, mais présentent un certain biais géométrique.

Tant que le biais reste modéré, c'est-à-dire pour des angles de biais compris entre 70 et 100 grades, la conception de l'ouvrage, tant pour le tablier que pour les appuis, ne diffère pratiquement pas de celle d'un ouvrage droit. On choisit le plus souvent de réaliser l'ouvrage biais, ce qui permet de conserver les lignes d'appui parallèles aux voies franchies, disposition recommandée du point de vue esthétique.

Lorsque le biais est plus prononcé (angle de biais inférieur à 70 grades), la conception est plus complexe et il n'est plus acceptable de négliger son influence sur la structure. Cela concerne notamment l'accroissement des efforts de torsion dans les poutres (et donc de flexion dans les entretoises), l'évaluation des efforts de flexion transversale dans le hourdis (en particulier dans les angles), la répartition transversale des réactions d'appui ainsi que celle des efforts entre les poutres d'une même travée. Pour pouvoir prendre en compte de manière satisfaisante ces différents effets, il est nécessaire d'avoir recours à des moyens de calcul adéquats (programmes généraux de calcul de grillage de poutres ou éléments finis).

Pour que le fonctionnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté demeure satisfaisant, il convient que leur grand côté reste perpendiculaire à l'axe des poutres, ce qui a pour effet d'augmenter l'encombrement du sommier d'appui

Cependant, il est possible de limiter cette augmentation en fabriquant les poutres avec une section d'about biale.



Dispositions d'appui dans le cas d'un ouvrage biais.

(Les appareils d'appui peuvent également être disposés sous les entretoises)

Cette solution devient toutefois impraticable pour les biais très importants (angle de biais inférieur à environ 50 grades). Il est alors préférable de s'orienter :

- soit vers le choix d'une structure de tablier en dalle biale coulée en place, dans la mesure où le site le permet ;
- soit vers une rectification du biais de la structure ; la portée des poutres diminue mais la surface de tablier est alors surabondante par rapport au strict nécessaire.

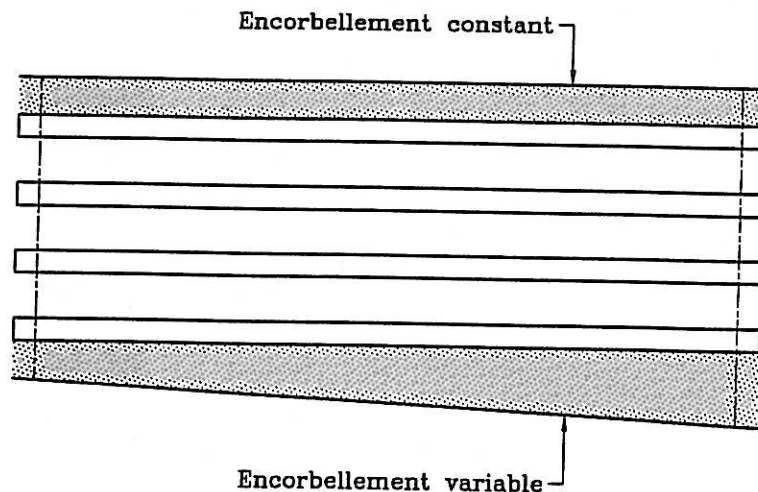
Une solution aux problèmes liés à des franchissements de biais prononcé consiste à réaliser un ouvrage droit, si les conditions de gabarit le permettent, en disposant les appuis perpendiculairement à l'axe longitudinal du pont, par l'emploi des piles-marteaux. Pour les culées, cette solution ne pose pas de problème particulier, mais elle présente néanmoins l'inconvénient d'allonger les travées de rive, d'autant que, pour des raisons de transparence de l'ouvrage, les culées ne peuvent pas se situer trop près de la voie franchie.

L'attention est enfin attirée sur l'importance de la *conception détaillée* dans le cas de ponts biaisés.

c) - *Largeur variable.*

La disposition en plan des poutres ne pose pas de problème particulier dans le cas des tabliers de largeur constante. Mais certains ouvrages peuvent présenter, sur une zone plus ou moins importante, une variation de la largeur du tablier ; c'est notamment le cas de l'insertion d'une voie supplémentaire sur l'ouvrage.

Si l'élargissement est modéré et ne règne que sur une faible longueur, il peut être simplement réalisé en faisant varier la largeur du hourdis en encorbellement au-delà des poutres de rive. L'espacement des poutres reste alors constant.



Elargissement par le hourdis en encorbellement.

Pour des élargissements plus importants, la solution précédente risquerait de conduire à des encorbellements excessifs. Il est alors préférable de répartir le supplément de largeur sur l'ensemble du tablier en disposant les poutres en éventail.

Dans cette dernière disposition, il peut être avantageux de conserver dans chaque travée une longueur constante pour toutes les poutres, ou du moins pour une grande partie d'entre elles, en adaptant, selon les cas, les dimensions des dalles ou des entretoises de continuité ; de cette façon, le nombre de prédalles de largeur variable reste limité.

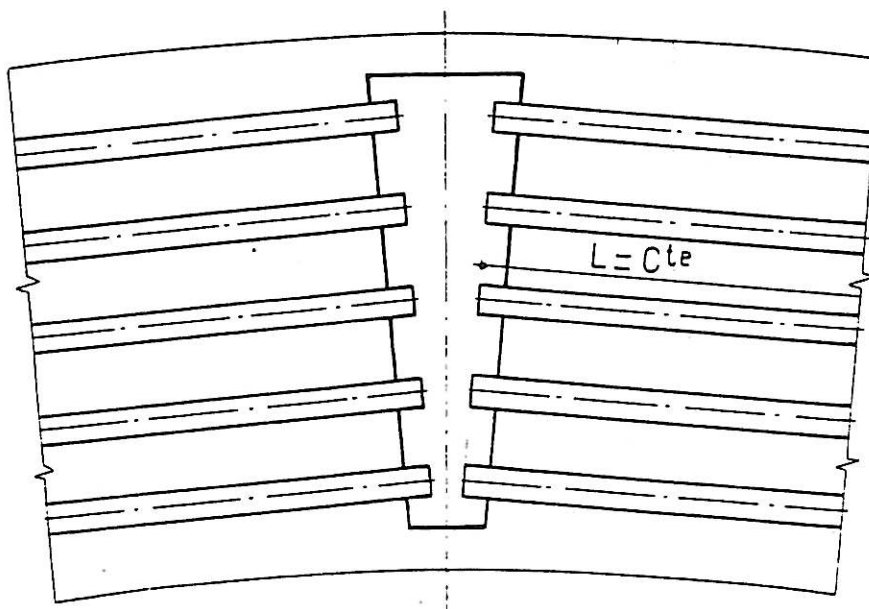
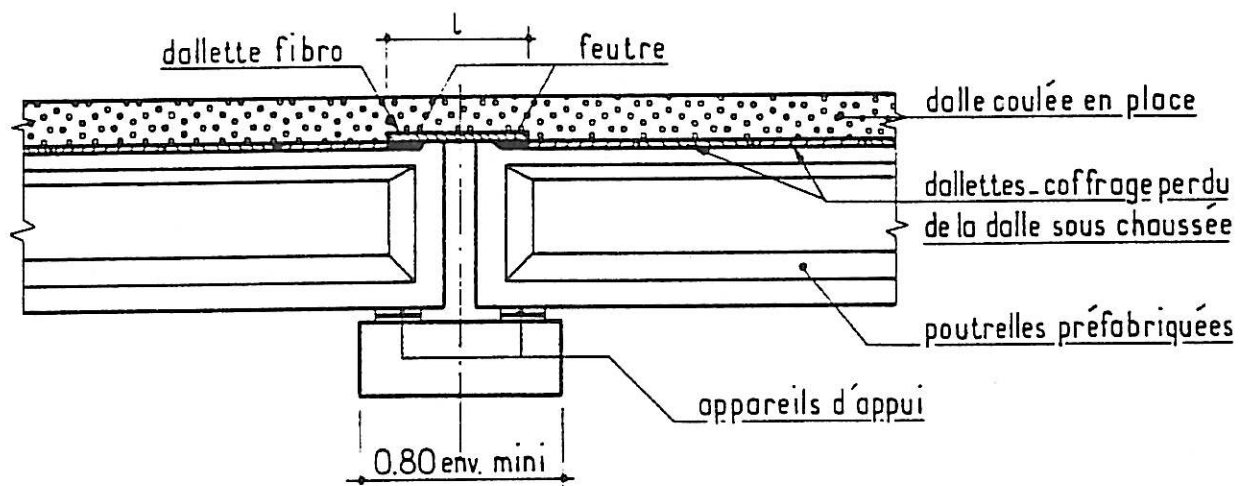
DISPOSITION SUR APPUIS

La conception des dispositions d'appui est fonction de la décision prise sur la réalisation éventuelle d'une continuité mécanique de la structure et de l'organisation du chevêtre d'appui de la pile.

Structures isostatiques

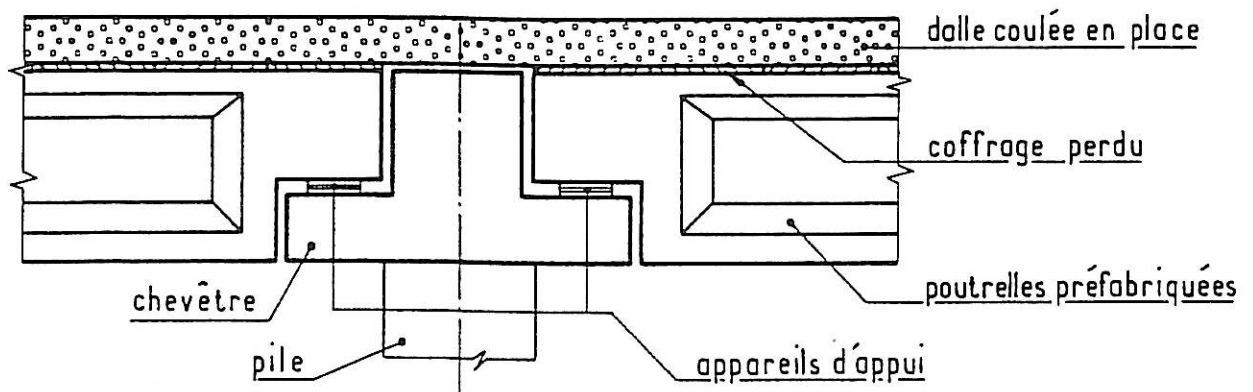
I - Le chevêtre d'appui de la pile est disposé sous le tablier

Le dédoublement des appuis des poutres des deux travées adjacentes impose une largeur minimum du chevêtre de pile d'environ 80 cm.



- Si le pont est courbe en plan, on peut éviter d'avoir à préfabriquer des poutrelles de longueur différentes en donnant au chevêtre d'appui une largeur variable
- Le maintien de la coupure totale du tablier sur pile et la mise en place de couvre joint de dilatation est pratiquement maintenant totalement abandonné au profit de la continuité de la dalle sous chaussée.
- Afin de donner à celle-ci au droit du joint, une souplesse suffisante pour s'adapter aux déformations imposées par la flexion des travées adjacentes, on dispose entre les poutrelles et le coffrage perdu de la dalle un matériau souple (feutre ou polystyrène) permettant de constituer sur une longueur l , un tronçon de dalle désolidarisé des poutrelles.

II - Le chevêtre d'appui est incorporé dans l'épaisseur totale du tablier

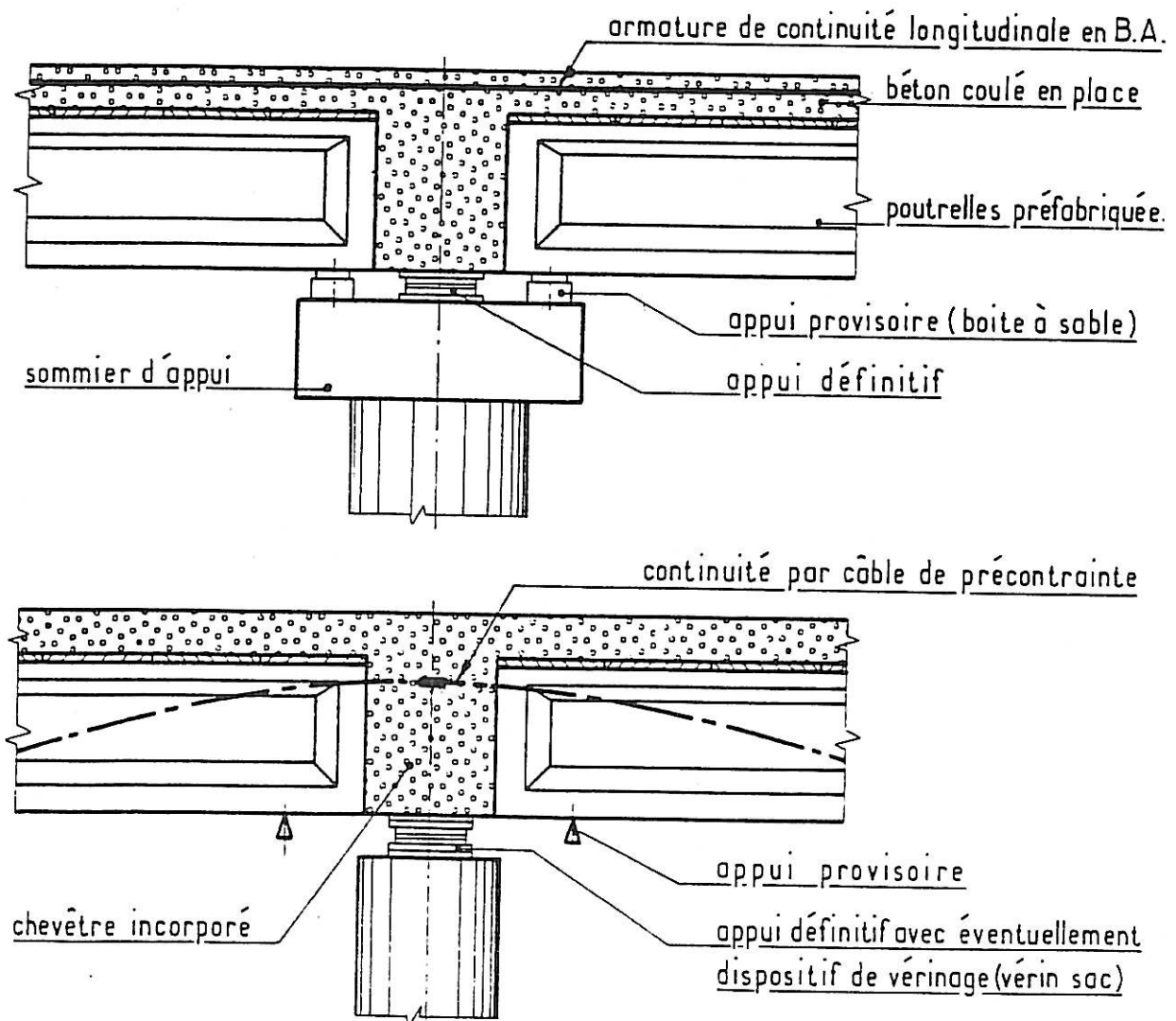


- APPUIS ISOSTATIQUES SUR CHEVETRE INCORPORE

Cette disposition retenue pour ses qualités architecturales ou pour des raisons de gabarit, impose de découper l'extrémité des poutrelles entraînant des sujétions certaines de ferrailage. La continuité de la dalle sous chaussée est réalisée en passant au-dessus du chevêtre d'appui. Si nécessaire un matériau souple est interposé sur une longueur suffisante au-delà des joints entre le dessus des poutrelles et le dessous de la dalle.

Structures rendues continues sur appuis

- . La continuité mécanique de la structure porteuse est obtenue par clavage du vide réservé entre les poutrelles et bétonnage en continu de la dalle sous chaussée.
- . En cours de travaux, les poutrelles reposent sur des appuis provisoires. Le transfert des réactions sur les appuis définitifs disposés dans l'axe s'effectue soit par déchargement des appuis provisoires réalisés avec des boîtes à sable soit par mise en charge des appuis définitifs équipés de vérin sac.

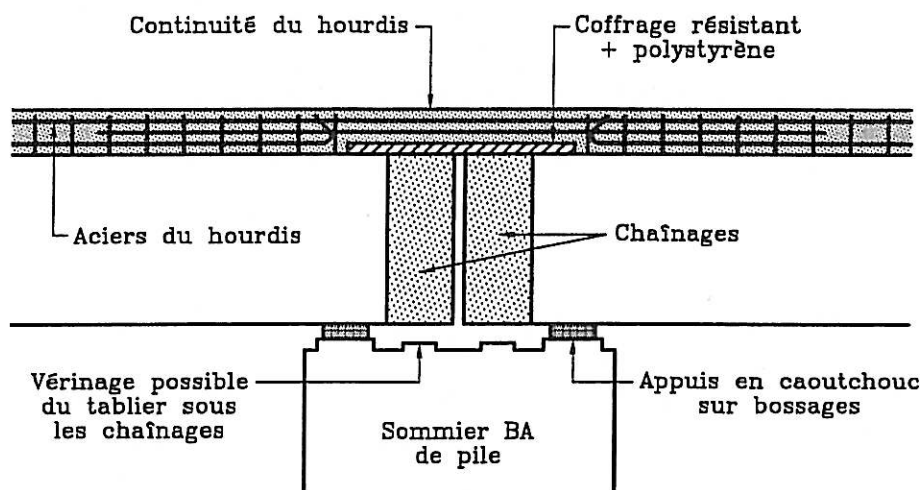


- Deux schémas sont possibles suivant la position relative du chevêtre d'appui de la pile :
 - . celui-ci est disposé sous le tablier, le clavage entre les poutrelles assure uniquement la continuité mécanique de la structure, il peut-être prolongé par une entretoise de solidarisation. Les réactions d'appui sont transmises aux piles par l'intermédiaire d'un chevêtre extérieur en béton armé.
 - . Pour des considérations de gabarit ou pour des raisons architecturales, on peut être amené à incorporer le chevêtre dans l'épaisseur du tablier. La zone coulée en place assure alors la continuité de la structure en jouant le rôle d'entretoise de solidarisation du tablier et de chevêtre de transmission aux piles des réactions d'appui.
- La continuité mécanique des poutrelles peut être obtenue :
 - . en béton armé, en disposant dans la dalle coulée en place des armatures classiques.
 - . en béton précontraint au moyen de câbles enfilés dans les poutrelles et mis en tension à l'avancement à l'extrémité des derniers éléments posés, ou par l'intermédiaire de câbles logés dans la dalle sous chaussée et mis en tension dans des niches réservées à cet effet.

DALLETTES DE CONTINUITÉ.

Les dispositions constructives rappelées ci-après ont reçu la sanction de l'expérience et doivent pouvoir convenir pour la plupart des ouvrages :

- la longueur minimale de la dalle de continuité est de l'ordre de un mètre ;
- son épaisseur est constante, longitudinalement et transversalement ;
- une épaisseur de 15 centimètres lui procure une souplesse suffisante, tout en assurant une bonne sécurité au poinçonnement ;
- l'ouvrage ne présente pas de courbure en plan prononcée, ni de biais trop important ;
- les armatures de connexion entre la poutre et le hourdis sont renforcées au niveau des extrémités de la dalle de continuité pour assurer un bon "accrochage", notamment vis-à-vis du retrait différentiel.



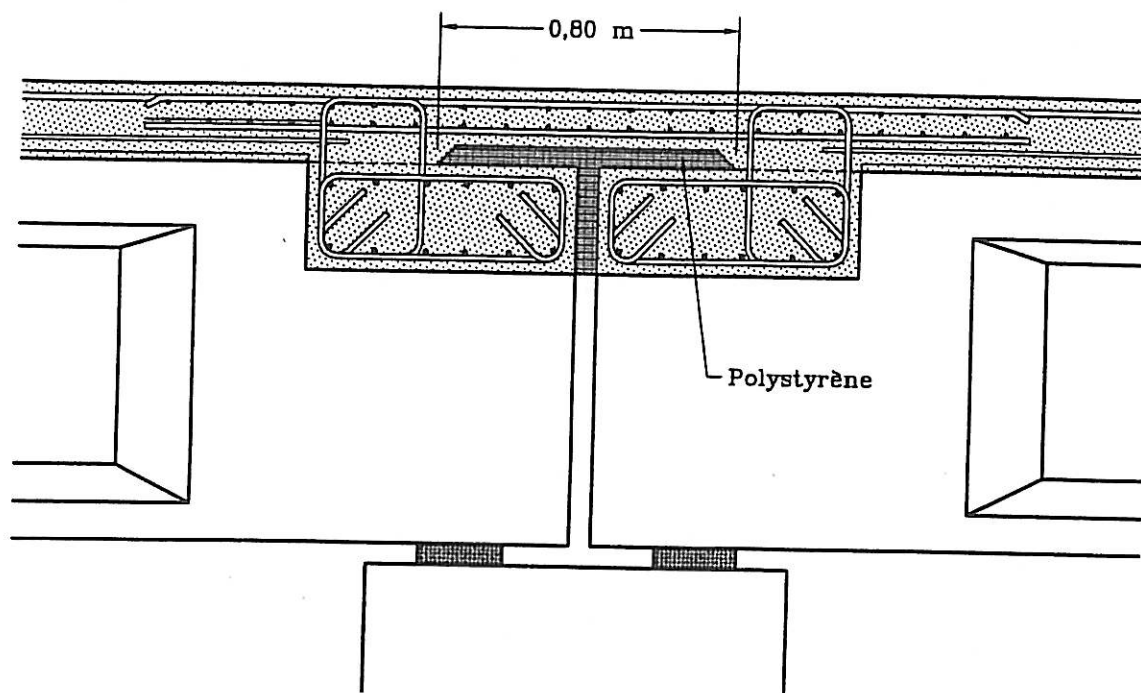
Dalle de continuité (conception classique).

La détermination par le calcul du ferrailage de la dalle de continuité peut se faire à partir des efforts résultant des charges qui lui sont directement appliquées et des déformations qui lui sont imposées (rotations sur appui des travées adjacentes). En dépit de sa souplesse, la dalle de continuité peut être le siège d'une fissuration importante. Il convient de limiter l'ouverture des fissures en les répartissant au moyen d'aciers de petit diamètre et de faible espacement.

Pour les dimensions de dalle de continuité indiquées plus haut, on pourra disposer sur chaque face des armatures longitudinales constituées de 8 HA 12 par mètre transversal de tablier, ce qui représente par face 0,6 % de la section de béton. On passera progressivement de cette section à la valeur courante en travée, en prolongeant dans le hourdis une armature sur deux au delà de leur longueur de scellement, sur une distance de l'ordre de deux mètres.

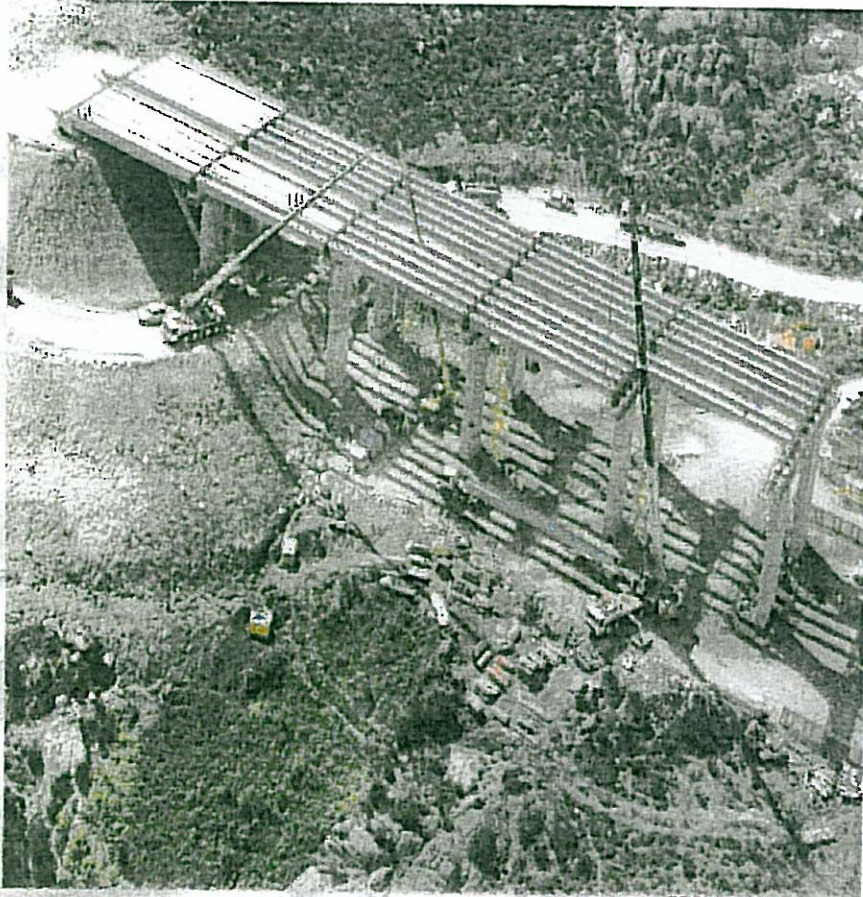
Les armatures transversales de la dalle de continuité sont elles aussi disposées en deux nappes. Sur chaque face, leur section n'est pas inférieure au tiers de la section des armatures longitudinales.

D'autres conceptions existent. Nous reproduisons sur la figure la solution couramment pratiquée en Belgique, qui semble à l'expérience donner satisfaction. Par rapport à la conception classique, l'entretoise est ici beaucoup plus souple et les moments d'encastrement de la dalle de continuité sont donc moins importants. Par ailleurs, cette solution se caractérise par un hourdis de continuité très mince (10 centimètres) et très ferrillé (10 HA 16 par mètre transversal sur chaque face).

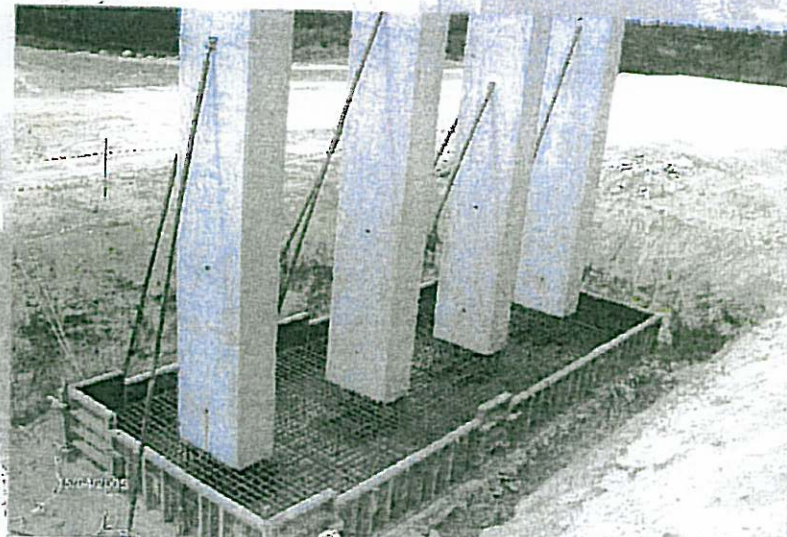
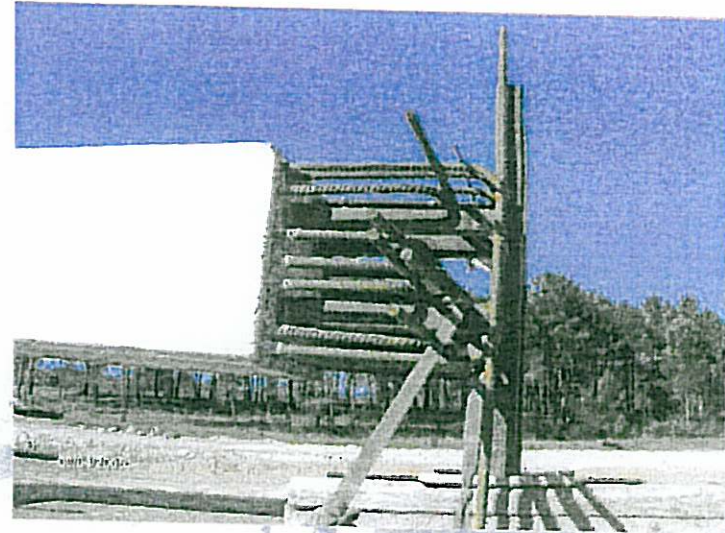
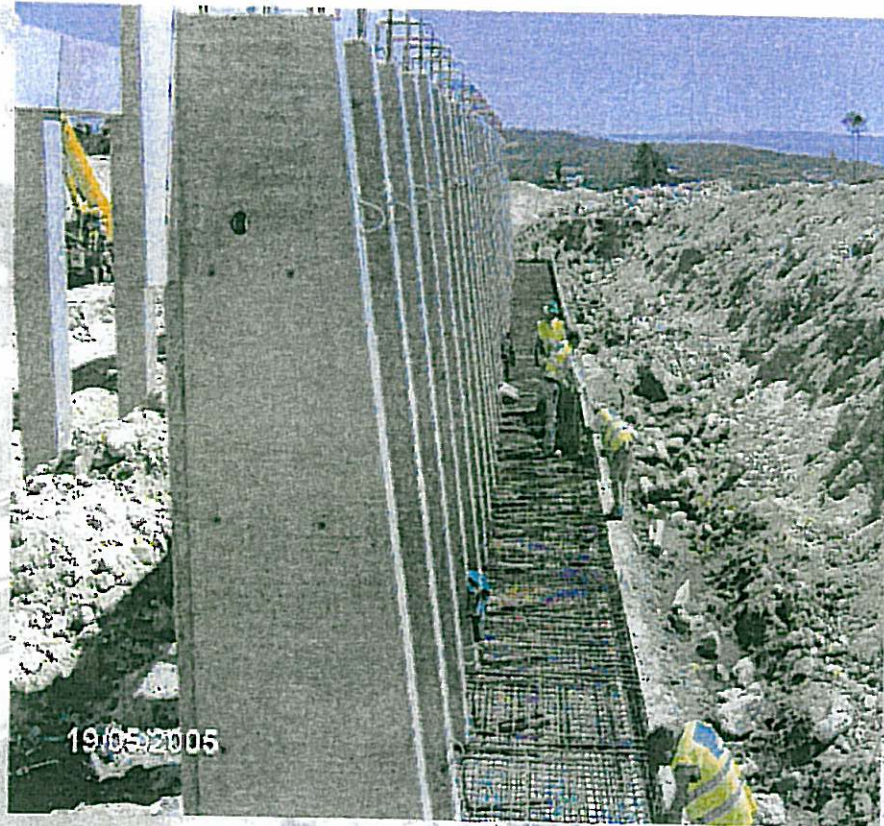


Dalle de continuité (autre conception).

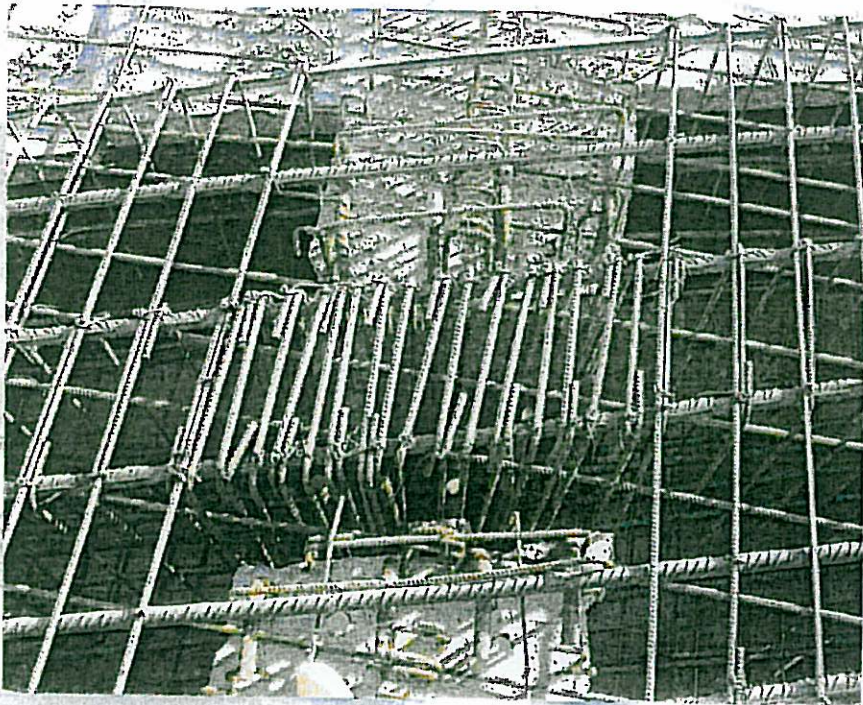
- 50 OAC et 9 viaducs / 100 000 m² de tablier
- Portées : 7 à 30 m (25m)



- Disposition retenue dans le cadre de l'A24/IP3:
 - Liaison BA entre les éléments préfabriqués et les fondations



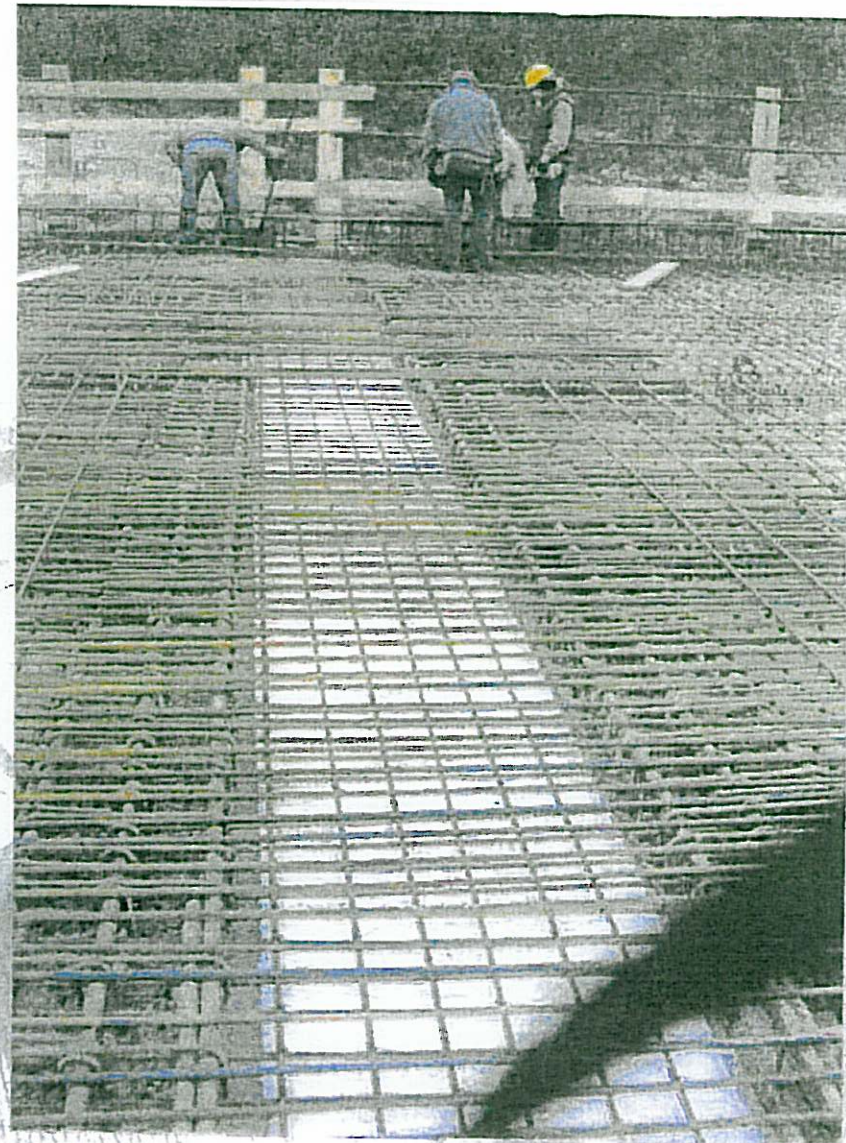
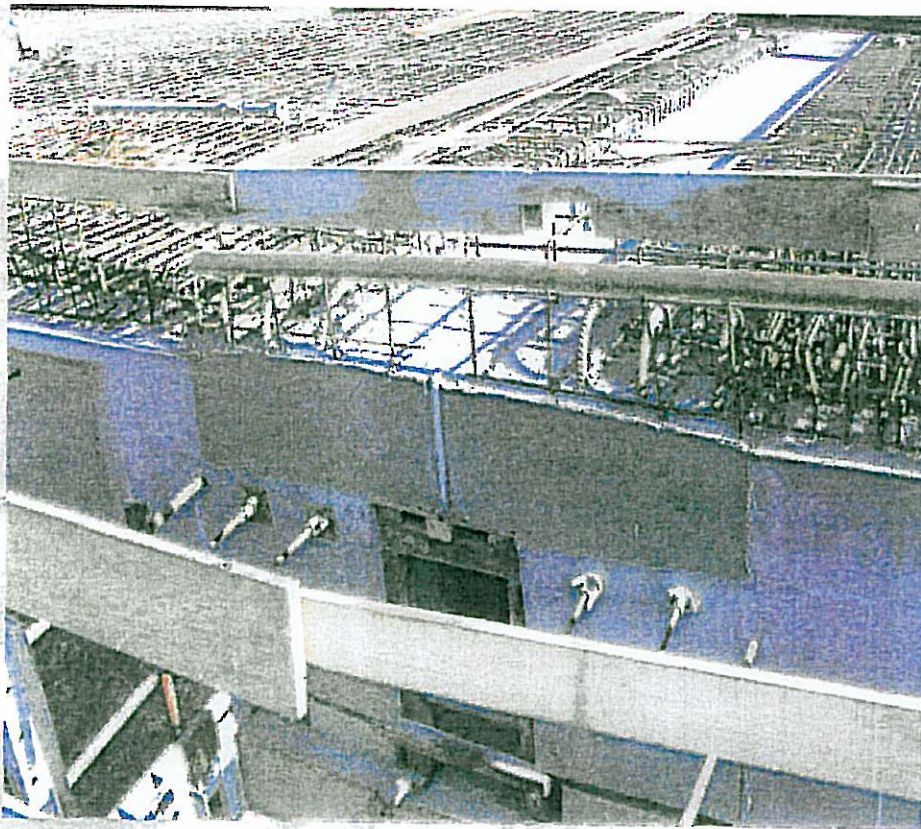
- Continuité mécanique entre les poutres préfabriquées des différentes travées par une entretoise BA
 - Attentes sur les poutres
 - Renforts de l'entretoise
 - Adaptation au biais



- Réalisation en deux phases
 - 1^{ère} phase: entretoise de liaison des poutres d'une même travée: mise en place d'un polystyrène



- 2^{ème} phase: bétonnage du hourdis et de la partie supérieure du joint belge



HOURDIS.

1 - Généralités.

Les ponts à poutres comportent en général des hourdis centraux et des hourdis en encorbellement qui sont tous des dalles appuyées sur un ou plusieurs côtés. L'une des fonctions de ces hourdis est de transmettre les charges aux poutres et aux entretoises. Cette transmission s'effectue par des déformations *locales*, notamment de flexion, des hourdis. Dans les tabliers PRAD, les plus grands moments sous cette action sont les moments transversaux, beaucoup plus importants que les moments longitudinaux. Cependant dans les zones d'encastrement du hourdis sur les entretoises, les moments longitudinaux du hourdis sont eux aussi importants et comparables aux moments transversaux d'encastrement du hourdis aux poutres.

A l'inverse, toute déformation d'une poutre induit des déformations *générales* dans les hourdis. De ce fait, ces hourdis participent aussi à la résistance des poutres.

2 - Epaisseur.

Pour un hourdis central, l'épaisseur à donner dépend directement de sa portée transversale et devrait en principe varier avec la distance entre poutres. Dans la pratique, compte tenu des espacements de poutres les plus courants, les conditions mécaniques ne sont pas déterminantes et l'épaisseur à retenir résulte de critères de bonne construction.

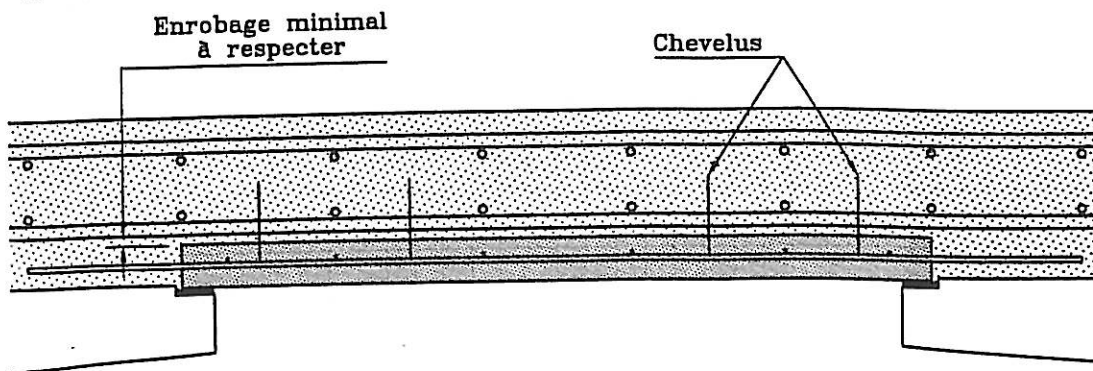
On adoptera une valeur de l'ordre de 18 à 20 centimètres si l'on a besoin de réaliser une réduction de l'épaisseur résistante dans la zone de la dalle de continuité. Dans le cas de tabliers rendus continus ou dans le cas d'emploi des bétons à hautes performances, cette épaisseur peut être réduite au minimum compatible avec les dispositions constructives relatives aux armatures longitudinales sur les appuis de continuité (dites armatures chapeaux).

La nécessité de mettre en place quatre nappes d'aciers (deux directions d'armatures sur chaque face) et d'assurer un bétonnage correct requiert dans le cas général une épaisseur *minimale* du hourdis de 15 centimètres. L'ancrage correct des dispositifs de retenue nécessite toutefois un épaissement local. Son épaisseur est ainsi portée à 22 centimètres si la BN4 est ancrée dans le hourdis en encorbellement et à 20 centimètres si elle est située au droit d'une poutre de rive.

3 - Coffrage des hourdis.

Il s'agit ici de coffrages perdus ou de prédalles utilisés pour les hourdis centraux.

a) Coffrages perdus non participants.



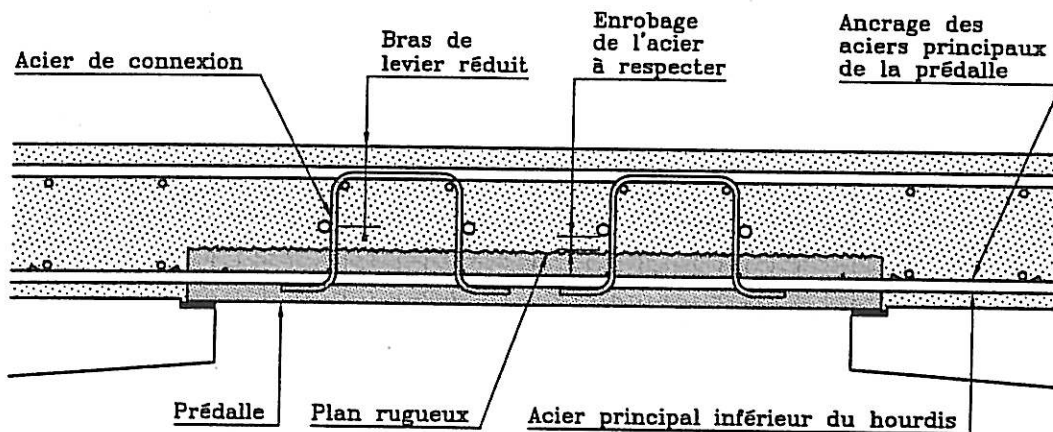
Exemple de ferrailage du hourdis sur coffrages perdus non participants.

Ces coffrages perdus sont généralement constitués de plaques minces en fibre-ciment pour les faibles entr'axes de poutres. Lorsque l'espacement des poutres est plus important, il devient indispensable de recourir à des coffrages perdus en béton armé. Leur épaisseur minimale est de 6 centimètres pour permettre un enrobage satisfaisant des armatures. En outre, il y a lieu de prévoir des chevelus destinés à l'accrochage des coffrages perdus et permettant ainsi d'éviter leur chute pendant toute la vie de l'ouvrage.

b) Prédalles participantes.

L'utilisation de prédalles dites participantes est possible. Cependant, du fait de la discontinuité des aciers longitudinaux au droit des joints entre les panneaux de prédalles, seule la participation à la résistance aux moments de flexion transversaux est envisageable. Cette participation n'est effective que dans la mesure où :

- les aciers transversaux des prédalles sont convenablement ancrés dans le béton coulé en place (au-dessus des poutres) ;
- des cadres verticaux sont prévus pour reprendre les cisaillements développés à l'interface des prédalles et du hourdis.



: Exemple de ferrailage du hourdis sur prédalles participantes.

Il est nécessaire en outre de prendre des précautions pour étancher les joints entre panneaux de prédalles, afin d'éviter les fuites de laitance au cours du bétonnage du hourdis.

.4 - Ferrailage des hourdis centraux.

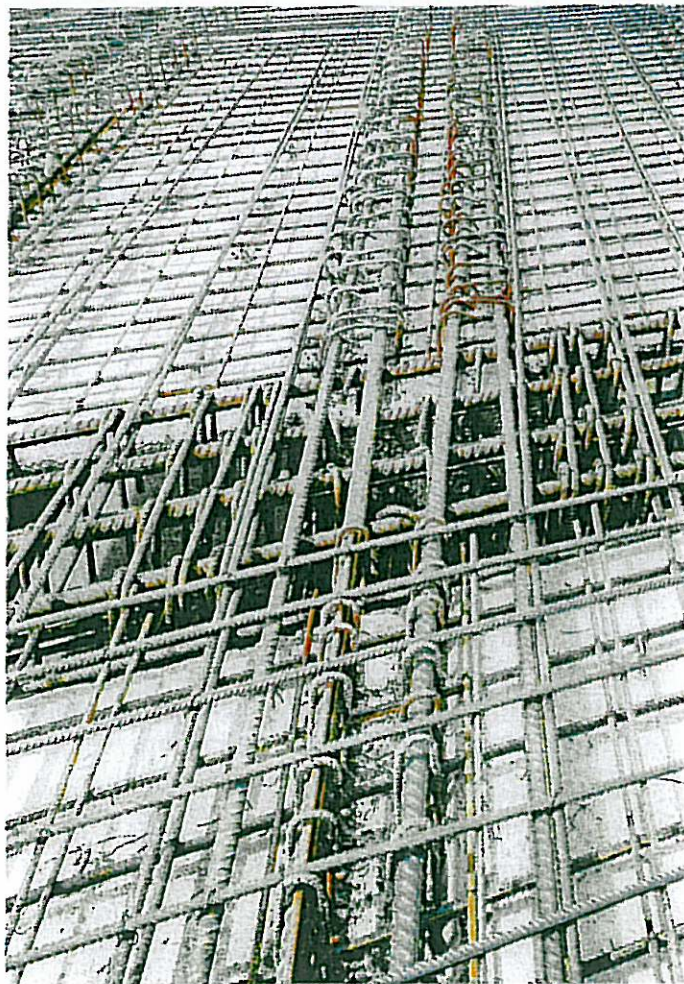
Le ferrailage du hourdis est formé par des aciers transversaux et longitudinaux, disposés sur chaque face.

Les aciers transversaux du hourdis sont parallèles aux lignes d'appui dans le cas de biais modéré ($60 \text{ grades} \leq \varphi \leq 100 \text{ grades}$), ou perpendiculaires aux poutres dans le cas de biais prononcé ($\varphi < 60 \text{ grades}$).

Les aciers longitudinaux du hourdis sont parallèles aux poutres et placés à l'intérieur des aciers transversaux.



Ferraillage du tablier - Vue générale.



Détail du ferraillage de la zone de clavage.

EXÉCUTION DU TABLIER

Comme il a déjà été dit, les tabliers de type PRAD sont constitués d'éléments préfabriqués longitudinaux, les *poutres*, reliés transversalement par des éléments de béton coulés en place, le *hourdis* et les *entretoises*.

Les principales étapes d'exécution sont :

- Mise en tension sur banc,
 - Bétonnage,
 - Etuvage (le cas échéant),
 - Relâchement des torons,
 - Décoffrage,
 - Stockage en usine,
 - Transport,
 - Stockage sur chantier,
 - Traitement des surfaces de reprise,
 - Mise en place des poutres sur appuis provisoires,
 - Coffrage et ferrailage des entretoises et du hourdis,
 - Bétonnage des entretoises et du hourdis,
 - Transfert des descentes de charges sur appuis définitifs,
 - Finitions : pose des superstructures, etc.
-] Préfabrication des poutres

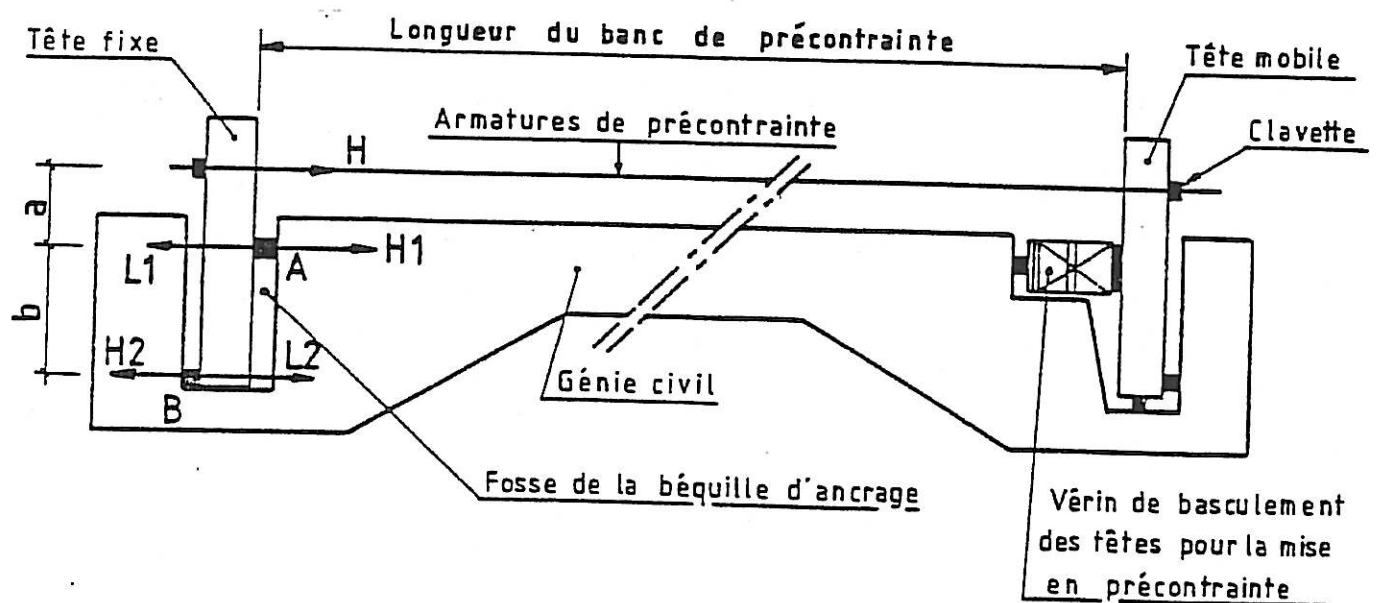
Ces étapes, naturellement échelonnées dans le temps, sont de plus effectuées en des lieux différents. Hors du chantier, la succession des différentes opérations comprend ainsi la fabrication des poutres en usine, leur stockage éventuel puis leur transport sur le site. Sur le chantier, les poutres sont posées sur leurs appuis après que les surfaces de reprise ont été traitées (sablage et nettoyage) ; il est alors possible de mettre en place les coffrages perdus et enfin de couler le hourdis et les entretoises.

Les installations de préfabrication comportent un certain nombre d'équipements

- . Le banc de préfabrication
- . Les organes d'ancrage et les vérins de mise en tension
- . Les coffrages
- . Les accessoires de mise en oeuvre des fils

LE BANC DE PRECONTRAINT

Sa fonction est essentiellement d'assurer l'équilibre des forces extérieures appliquées par la tension des fils dont la détension assurera la mise en précontrainte des pièces.



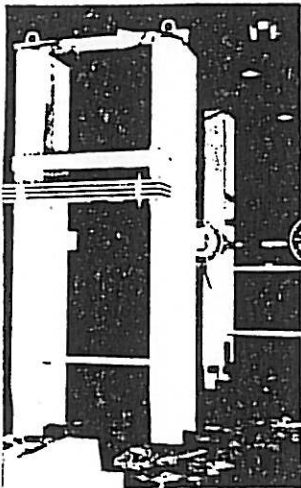
BANC DE PRECONTRAINT - PRINCIPE

D'une longueur pouvant atteindre 200m, les longueurs les plus courantes étant d'une centaine de mètres, le banc est constitué d'une structure généralement en béton armé qui assure la transmission de l'effort de compression en portant les coffrages et en jouant le rôle de fond de moule.

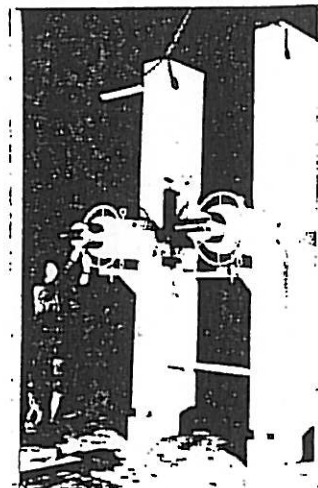
LES ORGANES D'ANCRAGE - LES VERINS DE MISE EN TENSION

La mise en tension des armatures de précontrainte entre les deux tête d'ancrage est réalisée au moyen de vérins unifilaires. Les têtes, l'une fixe l'autre, mobile, ont deux fonctions :

- . maintenir les armatures tendues pendant le cycle de fabrication
- . assurer par le basculement de la tête mobile la détension des fils et par suite la mise en précontrainte des pièces.



TETE
D'ANCRAGE FIXE

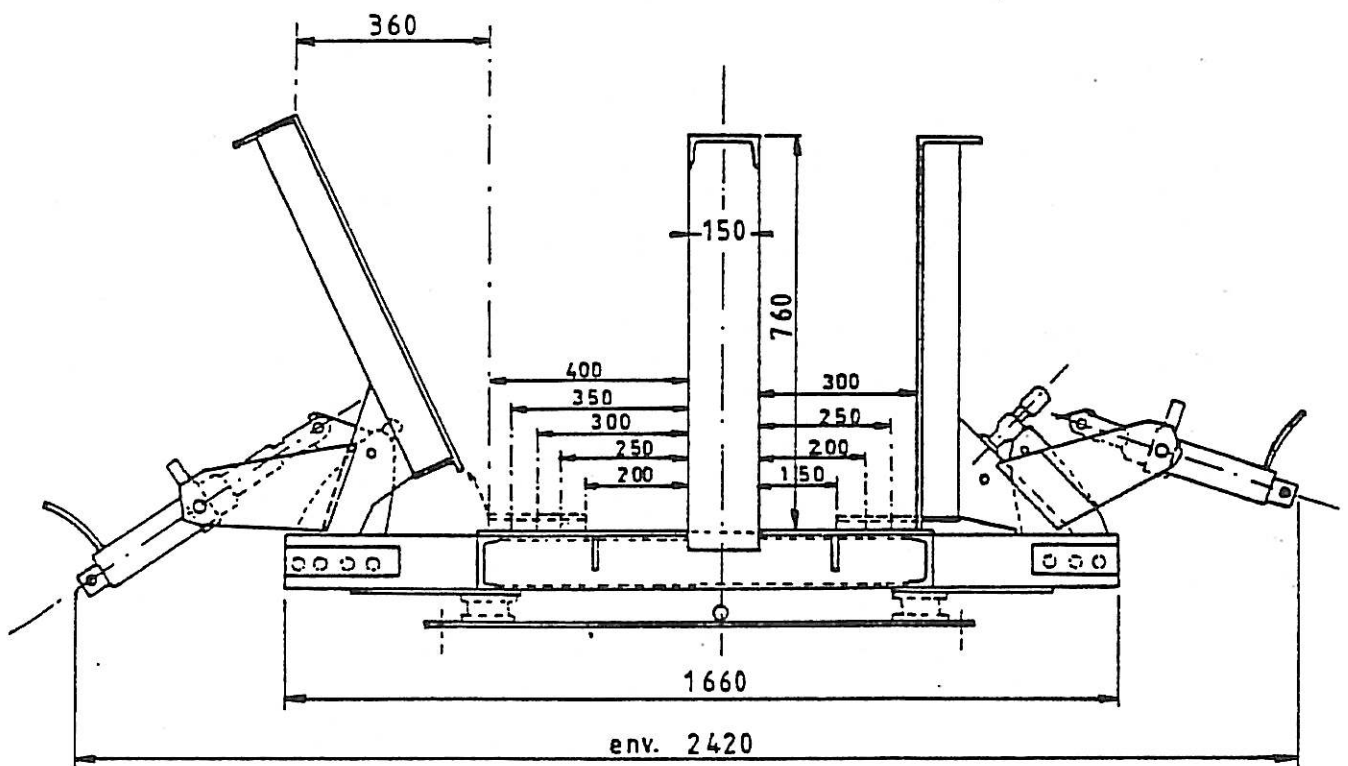


TETE
D'ANCRAGE MOBILE

LES COFFRAGES

- Les coffrages représentent une part importante des équipements ; ils peuvent être prévus pour un profil unique, le plus souvent en production industrielle ils sont polyvalents et adaptables en dimension.
- Les critères à retenir dans leur conception sont :
 - . nombre d'emplois envisagé
 - . résistance aux vibrations et aux chocs.

- Deux exemples de coffrages outils sont d'écrits ci-après.



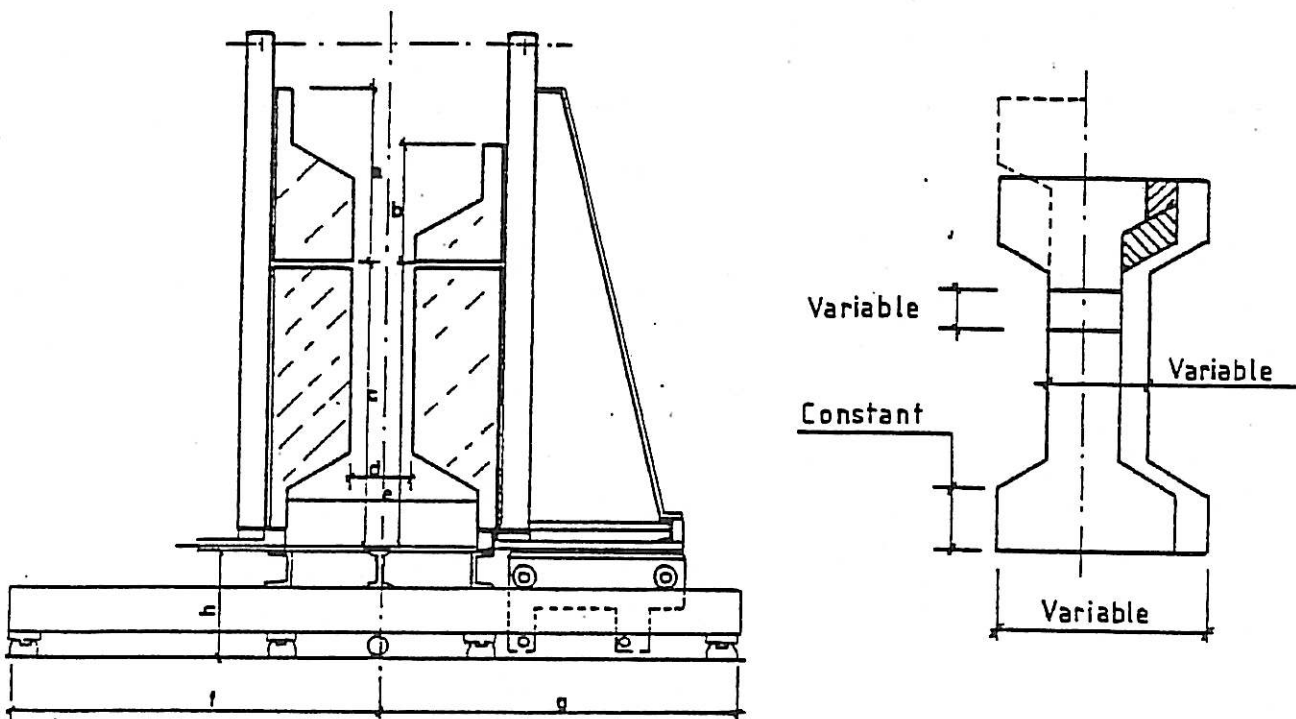
- Les appareils de vibration sont fixés sur les joues de coffrage (vibrateurs fixes ou mobiles sur un rail continu). Le coffrage est étuvant soit par rampes de vapeur disposées sous le fond de moule et éventuellement dans la joue centrale soit par résistances électriques placées dans les joues.

Les joues latérales sont ouvrantes et réglables en largeur, les joints d'étanchéité doivent être particulièrement étudiés. L'ensemble du coffrage est posé sur décélérateurs élastiques au moyen d'entretoises et de longérons. Le dispositif de réglage en largeur doit être robuste, pour assurer la bonne verticalité des joues.

II - Coffrage de poutres en I

- Les paramètres variables sont :

- . la hauteur et la largeur de la poutre
- . l'épaisseur de l'âme
- . la section de la table supérieure (hauteur et largeur)



COFFRAGE DE POUTRES EN I-PRINCIPE

- Le coffrage est vibrant et muni d'un dispositif d'étuvage. Il comprend un fond plan, raidi par des traverses et des longérons supportant la rampe de vapeur axiale et posé sur des décélérateurs en caoutchouc. Des paliers réglables reçoivent de part et d'autre les articulations des joues. Les vibrateurs sont fixés sur le fond de moule.

LES ACCESSOIRES DE MISE EN OEUVRE DES FILS DE PRECONTRAINTE

Ces accessoires conditionnent le positionnement des fils dans le coffrage, leur gainage sur la longueur prévue dans les calculs, leur mise en tension et éventuellement les dispositifs de déviation dans le cas de fils relevés sur appuis.

I. Positionnement des fils

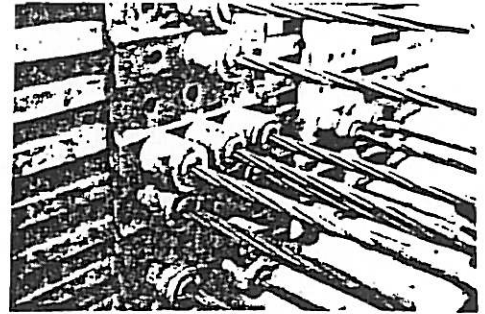
Les abouts des poutres sont coffrés par des pièces métalliques spéciales épousant la forme exacte de la section transversale. Ces pièces percées de trous forment peignes suivant une grille régulière destinée à laisser passer les armatures de toutes les poutres de la gamme de fabrication correspondante. Cette grille doit satisfaire tous les critères d'enrobage des fils, de distance minimale entre fils (compte tenu notamment du diamètre des clavettes) et de mise en oeuvre correcte des armatures transversales passives.



Peignes d'about.

II. Mise en tension des fils

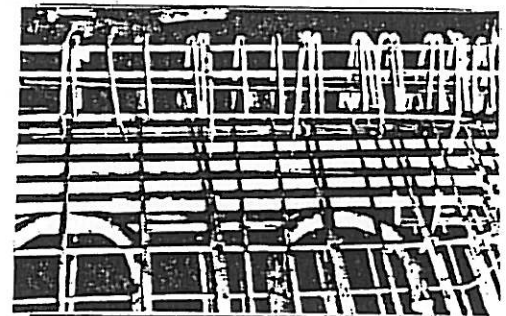
- La mise en tension sur le banc entre les têtes d'ancrage, se fait armature par armature, au moyen d'un vérin unifilaire automatique à grande course. Les armatures sont bloquées sur les chevêtre des têtes d'appui par des clavettes constituées d'une bague conique et de demi-coquilles filetées intérieurement.



CLAVETTES
D'ANCRAGE DES FILS

III. Gainage des armatures

- L'équilibre général de la zone d'about et les vérifications sous sollicitations normales et tangentes dans les sections de la zone d'établissement de la précontrainte, imposent de gainer un certain nombre d'armatures afin d'en supprimer l'adhérence et de réduire la précontrainte aux abouts. Ce gainage nécessite des précautions particulières :



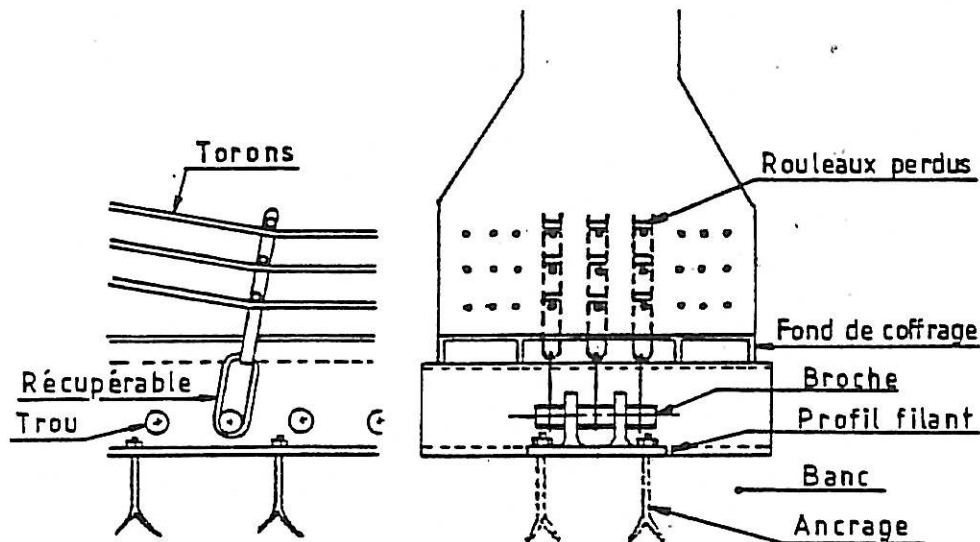
GAINAGES
DES ARMATURES

- . étanchéité parfaite ; on utilise des tubes plastiques d'une seule pièce. Pour éviter toute pénétration de laitance on laisse sortir la gaine au delà du peigne d'about et à l'autre extrémité on la bourre de graisse en la fermant par un ruban adhésif.
- . Respect rigoureux du nombre d'armatures gainées, de leur position et de la longueur gainée.

IV. Relevage des armatures

- Afin d'équilibrer une partie de l'effort tranchant, il peut être demandé de prévoir la déviation d'une partie des fils pour en assurer le relevage vers les appuis.

Cette disposition crée des sujétions très onéreuses et il convient de la réserver aux poutres de grande portée.



PRINCIPE DE RELEVAGE DES ARMATURES

- Le nombre d'armatures que l'on peut relever dépend évidemment du calcul mais aussi de la forme du coffrage ; dans une poutre en I seuls les fils situés à l'aplomb de l'âme sont relevables.
- La position des points de relevage est fonction de la conception du fond de coffrage et du banc lui-même.
- La déviation des armatures peut se faire avant ou après la mise en tension. Dans le premier cas les fils sont tendus déviés, dans le deuxième ils sont rectilignes puis déviés.
- La détension des armatures déviées nécessite des précautions particulières, la libération des dispositifs de déviation doit en effet précéder la détension proprement dite.

FABRICATION DES POUTRES

Les différentes étapes de la fabrication d'une poutre sont les suivantes :

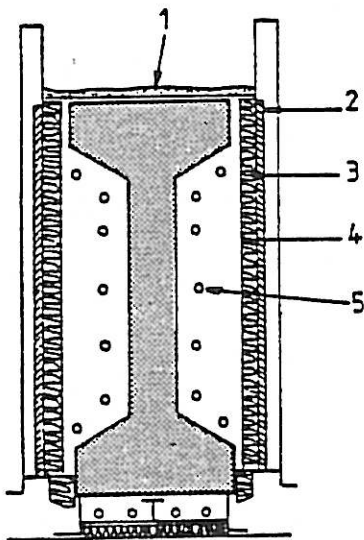
1. Nettoyage du coffrage et des peignes
2. Mise en place des armatures actives et passives
3. Mise en tension des armatures de précontraintes
4. Réglage des longueurs des poutres
5. Réglage définitif des armatures passives
6. Fermeture du coffrage
7. Bétonnage et vibration
8. Mise en place des bâches d'étuvage et étuvage
9. Essai des éprouvettes de contrôle
10. Décoffrage
11. Mise en précontrainte
12. Contrôle des produits finis
13. Evacuation des produits sur le parc

TRAITEMENT THERMIQUE

MODES DE TRAITEMENT

Les pièces en béton précontraint par pré-tension fabriquées industriellement subissent à la mise en précontrainte des contraintes élevées qui peuvent d'ailleurs être supérieures à celles imposées en service. L'utilisation optimale des installations nécessite une rotation rapide des équipements, donc une mise en précontrainte précoce des éléments. Le béton doit alors avoir la résistance voulue tout en respectant les résistances contractuelles prescrites à 28 jours.

Le traitement thermique a donc pour objectif principal d'obtenir une résistance à la compression élevée le plus tôt possible sans compromettre les caractéristiques ultérieures.



Coffrage électrique type

1. Bâche d'étuvage
2. Protection de l'isolant
3. Isolant
4. Clinquant
5. Résistances électriques

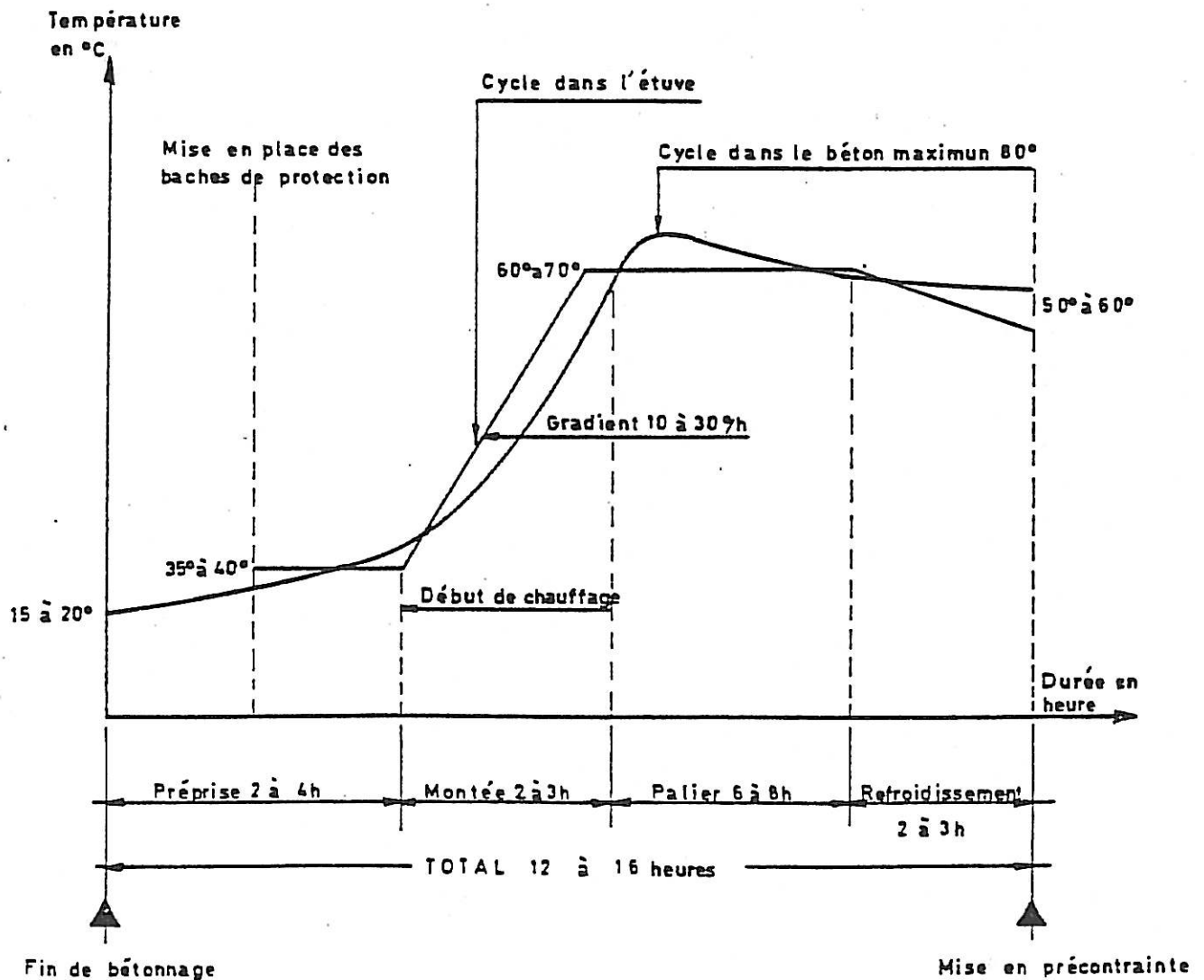
SCHEMA TYPE DE TRAITEMENT ELECTRIQUE

Un cycle de traitement thermique comporte essentiellement quatre étapes successives :

- la préprise
- la montée en température
- le palier ou maintien à température constante
- le refroidissement

Dans le traitement thermique d'un béton on constate toujours un décalage entre la température enregistrée dans l'enceinte d'étuvage et la température réelle existant dans la masse du béton. Cela est dû notamment à la faible conductivité thermique du matériau et à l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment.

Il convient de préciser que toute spécification de réglage de la température d'un cycle concerne la température du béton et non pas celle de l'enceinte. On utilise des appareils de programmation dont le cycle est déterminé par l'expérience. La figure présente un cycle type dont la durée entre la fin du bétonnage et la mise en précontrainte peut varier entre 12 et 18 heures.



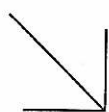
CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE

Béton Fibré à Ultra hautes Performances



La poutre ITE®

BFUP

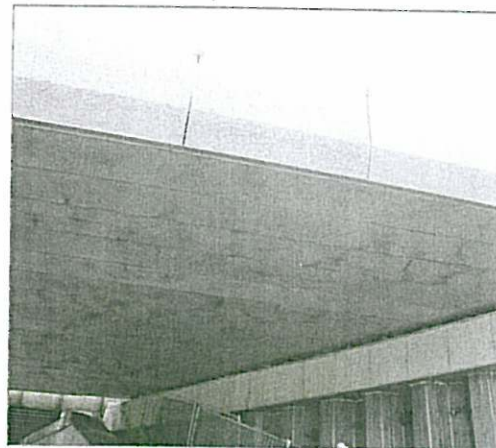
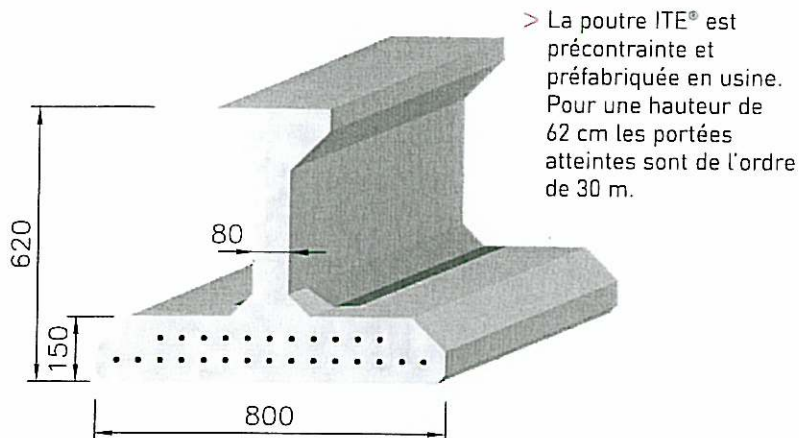


Une solution en BSI® pour
une alternative aux ouvrages
en poutrelles enrobées.

Le Béton Fibré à Ultra hautes Performances (BFUP) offre des perspectives pérennes pour la construction et la maintenance d'ouvrages. La poutre ITE® (poutre en I à Talon Elargi) est la solution BFUP alternative au métal et s'applique particulièrement aux élancements de type poutrelles enrobées. Elle permet de surcroît d'offrir une sous face de hourdis pleine et aux équipes de chantier de travailler, de jour, en toute sécurité.

Béton Fibré à Ultra hautes Performances

La poutre ITE®



> Les poutres ITE® se posent à « touche-touche » formant ainsi une dalle uniforme continue.



> Les poutres ITE® ne nécessitent de liaison transversale autre que le hourdis. Elles permettent une économie de 70 % du béton coulé en place. Ferrailage et bétonnage sont effectués de jour.



> Les poutres ITE®, par la largeur importante de leur talon inférieur, permettent la circulation en sécurité du personnel lors des phases constructives du tablier.

Contacts
R.G. Sale - Tél.: 01 49 44 90 31
rgsale@travauxpublics.eiffage.fr
S. Chanut - Tél.: 01 49 44 93 02
schanut@travauxpublics.eiffage.fr

www.bsieiffage.com

LA SOLUTION POUTRE ITE® EN BFUP PERMET :

Pour l'entreprise :

- De supprimer tout assemblage sur le site,
- De supprimer tout entretoisement provisoire,
- De s'affranchir de tout enfilage d'aciers transversaux,
- D'économiser 70 % du béton coulé en place,
- De réduire le ferrailage qu'au seul hourdis,
- De supprimer les plaques coffrantes inférieures,
- De s'affranchir de tout risque de chute,
- D'effectuer les tâches de ferrailage et de bétonnage du hourdis, de jour,
- De réduire le nombre de nuits travaillées.

Et pour le client :

- De supprimer tout entretien des poutres,
- De permettre l'exploitation des voies de circulation pendant les travaux.











BIBLIOGRAPHIE

CONCEPTION

- PRAD 73 : Dossier-pilote relatif aux ponts à poutres précontraintes par adhérence, conforme à l'instruction provisoire IP2 de 1973, SETRA.
- ICTAAL : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison.
- ICTAVRU : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines.
- ICTARN : Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes nationales.
- GUEST : Guide d'esthétique pour ouvrages d'art courants, SETRA.
- Leonhardt F. : Bridges - Aesthetics and design, Deutsche Verlags-Anstalt.
- Ciolina F. : Continuité des hourdis des structures préfabriquées. Annales de l'ITBTP, Supplément au n° 278 de février 1971.
- Kavyrchine M. et al. : Comportement de jonctions d'éléments préfabriqués - Etude de la liaison sur appuis de poutrelles précontraintes par torons adhérents. Rapports de recherche (phase A - décembre 1978 ; phases B et C - novembre 1979), Service d'Etude des Structures du CEBTP.
- Guide de conception des ponts dalles, SETRA.
- Guide de conception des ponts-cadres et portiques, SETRA.
- PP 73 : Piles et palées, SETRA.
- Calgaro J. A. : Projet et conception des ponts. Généralités - Fondations - Appuis - Ouvrages courants. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991, 2^e édition.
- Bernard-Gély A., Calgaro J. A. : Conception des ponts. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- Malier Y. et al. : Les bétons à hautes performances. Caractérisation - Durabilité - Applications. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, 2^e édition.

ÉQUIPEMENTS

- Fascicule 67, Titre I du CCTG : Etanchéité des ponts-routes à support en béton.
- STER 81 : Surfaçage, étanchéité, couches de roulement des tabliers, SETRA.
- Circulaire n° 88-49 du 9 mai 1988 relative à l'agrément et aux conditions d'emploi des dispositifs de retenue des véhicules.
- Collection du guide technique GC : Equipements latéraux des tabliers, garde-corps, dispositifs de retenue, etc., SETRA.
- Bulletin technique n° 4 relatif aux appareils d'appui de ponts, SETRA.
- Environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté, SETRA-LCPC.

- Assainissement des ponts routes, SETRA.
- Joints de chaussée - Avis techniques, SETRA.
- Dalles de transition pour ponts routes, SETRA.
- Note d'information Ouvrages d'art N° 14 du SETRA en date de février 1991, sur les éléments coffrants en béton armé utilisés comme coffrages perdus.

EXÉCUTION

- Fascicule 65-A du CCTG relatif à l'exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint par post-tension.
- Additif au fascicule 65-A.
- Note d'information Ouvrages d'art N° 18 du SETRA en date de janvier 1995, sur l'incidence de l'évolution de la normalisation et de la réglementation sur le fascicule 65-A, son additif et les CCTP.
- Guide de chantier GGOA, niveau 3, SETRA, 1970.

CALCUL

- Fascicule 62, Titre I, Section I du CCTG (Règles BAEL 91).
- Fascicule 62, Titre I, Section II du CCTG (Règles BPEL 91).
- Eurocode 2, partie 2 (ENV 1992-2, octobre 1995, norme européenne relative au calcul et à la justification des ponts en béton armé ou précontraint).
- Chaussin R., Fuentes A., Lacroix R., Perchat J. : La précontrainte. Ecole française du béton. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- Lebel P. : Stabilité élastique des poutres en béton précontraint à l'égard du déversement latéral. Annales de l'ITBTP, n° 141 de septembre 1959.
- de Larrard F. et al. : Proposition d'annexe "Bétons à hautes performances" aux règles BAEL et BPEL, février 1995. Association française de recherche sur les matériaux et les structures (AFREM/BHP/Règlement).
- Millan A. L. : Paquetage de calcul des efforts dans les platelages orthotropes (généralisation et amélioration de la méthode Guyon-Massonnet-Bares), SETRA.
- PRP : Conseils pour l'utilisation des programmes de réseaux de poutres, SETRA.

SURVEILLANCE, ENTRETIEN ET PATHOLOGIE

- IQOA : Image de la qualité des ouvrages d'art.
- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, 19 octobre 1979, Direction des routes, Ministère de l'Équipement.
- Gulyas R. J. et al. : Evaluation of keyway grout test methods for precast concrete bridges. PCI Journal, numéros de janvier-février 95, pages 44 à 57, et de juillet-août 95, pages 98 à 103 (articles portant sur le comportement et la durabilité des clés de cisaillement en micro-béton à hautes performances).