

PRECONTRAINTE EXTERIEURE



PRECONTRAINTE EXTERIEURE

Février 1990

Document réalisé et diffusé par le



SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art
46, avenue Aristide Briand - B.P. 100 - 92223 Bagneux Cedex - FRANCE
Tél. : (1) 42 31 31 31 - Télécopieur : (1) 42 31 31 69 - Telex 260763 F



Préambule

Jusqu'à présent essentiellement utilisée pour le renforcement des structures traditionnelles, la précontrainte extérieure a connu en France depuis 1980 un développement spectaculaire dans la réalisation d'ouvrages neufs, notamment de ponts.

Elle ouvre en effet des possibilités de remplacement des câbles moyennant dispositions adéquates, ainsi que de recours à des solutions innovantes (âmes métalliques planes, ondulées ou triangulées, âmes en béton ajourées ou triangulées ...). Elle n'en constitue pas pour autant une panacée car elle pose des problèmes d'encombrement à l'intérieur des tabliers et ne prend tout son intérêt que pour des structures importantes.

Jusqu'à présent, la réglementation la concernant était demeurée assez embryonnaire (on peut toutefois mentionner l'annexe 7 aux règles BPEL 83 et la circulaire ministérielle n° 86-64 du 4 septembre 1986, partiellement reproduite en annexe 1 du présent document). Pour combler cette lacune, la Commission Interministérielle de la Précontrainte (CIP) a décidé la constitution d'un groupe de travail chargé d'étudier les problèmes de précontrainte extérieure et de haubans.

C'est ce groupe qui, après avoir proposé à la CIP des règles spécifiques d'agrément pour les ancrages destinés à la précontrainte extérieure, a élaboré le présent texte. Celui-ci est essentiellement orienté vers les tabliers de ponts, mais la plupart des indications qu'il contient se transposent sans difficulté à d'autres structures pour lesquelles une précontrainte extérieure pourrait présenter de l'intérêt (réservoirs, couvertures ...).

Il suppose par ailleurs que le tracé des câbles sort peu de la hauteur des sections dont ils assurent la précontrainte, ce qui exclut le cas des haubans qui sont soumis, de la part des charges d'exploitation et surtout du vent, à des sollicitations de fatigue importantes.

Le présent document comporte deux grandes parties :

– la première constitue un point des connaissances accumulées depuis plus de dix ans. Elle fait le tour des différentes solutions mises en oeuvre, dégage les principales conclusions qui ont pu en être tirées et propose des recommandations pour la conception tant du câblage que des ouvrages dans leur ensemble de façon à préserver les possibilités de démontage qu'on attend généralement d'une précontrainte extérieure. (Beaucoup de dispositions générales préconisées à cet égard sont applicables à des structures plus traditionnelles pour en faciliter l'entretien) ;

– la deuxième partie définit un ensemble de prescriptions et de spécifications pour les conduits, les déviateurs, les zones d'ancrage et les études d'exécution. Ecrite sous forme de textes et de commentaires, elle représente un complément à la réglementation actuelle (fascicules 65 et 65 A du CCTG notamment) et peut être directement visée dans les CCTP.

Complété par différentes annexes, le texte en question rassemble un maximum d'éléments utiles aux concepteurs et aux maîtres d'oeuvre. Il a été approuvé par la Commission Interministérielle de la Précontrainte.



▲ Viaduc du Vallon de Maupré à Charolles - Vue générale (photo Campenon Bernard)



▲ Viaduc du Vallon de Maupré à Charolles - Intérieur du tablier (photo SETRA)

Composition du Groupe de Travail chargé d'étudier les problèmes de précontrainte extérieure et de haubans

Président : M. Chaussin R.M.E. (SETRA)

Membres : MM. Arnous J.-P. (ETIC)
Augoyard J.-P. (GTM)
Beghi R. (KLEYFRANCE)
Boutonnet L. (VSL FRANCE)
Bruel R. (SPIE-BATIGNOLLES)
Causse G. (SCETAURROUTE)
Chabert A. (LCPC)
Chauvin A. (SOGELERG)
Combault J. (CAMPENON BERNARD)
Creton B. (LCPC)
Ivanoff M. (SFP)
Jartoux P. (FREYSSINET INTERNATIONAL)
Le Gall D. (PCB)
Mathivat J. (SECOA)
Néant C. (ETIC)
Pedretti D. (CIPEC)
Petit B. (SFP)
Placidi M. (RAZEL)
Pousse M. (Ingénieur-Conseil)
Salmon P. (CIPEC)
Tran P. (SFP)
Villette P. (SPIE-BATIGNOLLES)
Virlogeux M. (SETRA)

Secrétaire : Mlle Mahut B. (SETRA)

SOMMAIRE

Pages

Première partie - Point des connaissances

1	Généralités	3
2	Technologie et protection contre la corrosion	11
3	Conception et dispositions constructives	23
4	Mise en oeuvre de la précontrainte extérieure au béton	29
5	Remplacement d'un câble de précontrainte extérieure démontable	35

Deuxième partie - Prescriptions et spécifications

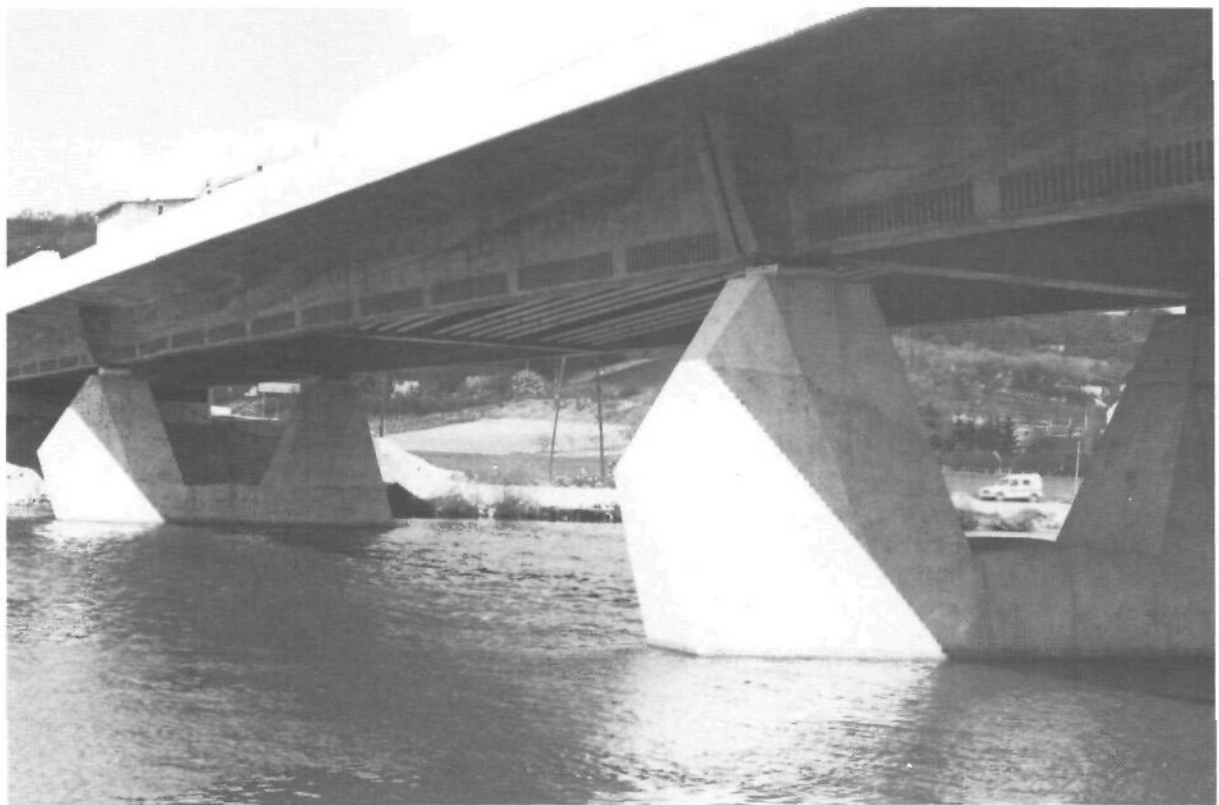
1	Conduits	55
2	Déviateurs	65
3	Zones d'ancrage	77
4	Études d'exécution	83

Annexes

1	Éléments de la réglementation concernant la précontrainte extérieure	91
2	Essais complémentaires à fournir pour l'agrément d'un système de précontrainte extérieure au béton	95
3	Dessins d'ancrages de précontrainte extérieure démontable	101
4	Références d'ouvrages à précontrainte extérieure	113
5	Bibliographie	117

Première partie

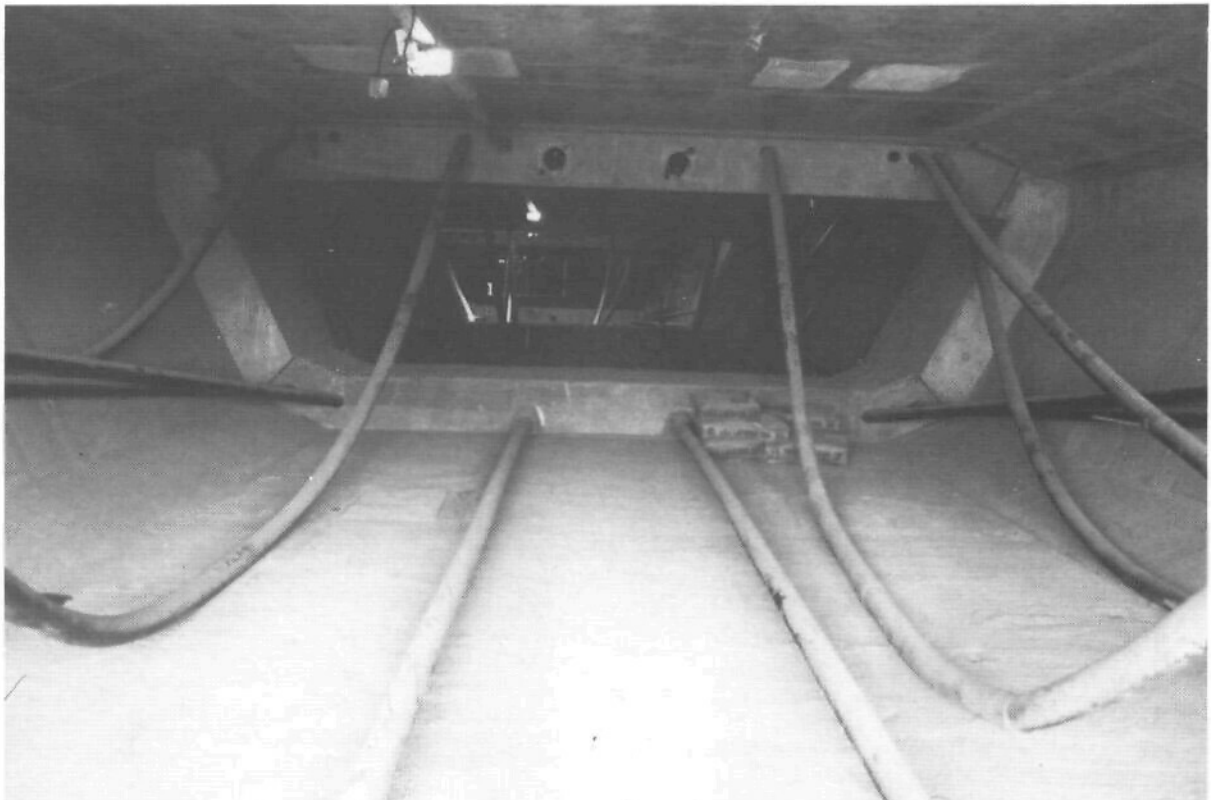
POINT DES CONNAISSANCES



▲ Pont de Joigny (photo VSL)



▲ OA 33 à Marseille - Poussage du tablier (photo Dragages et Travaux Publics)



▲ OA 33 à Marseille - Intérieur du tablier, les câbles provisoires de poussage sont détendus (photo M. Virlogeux)

1

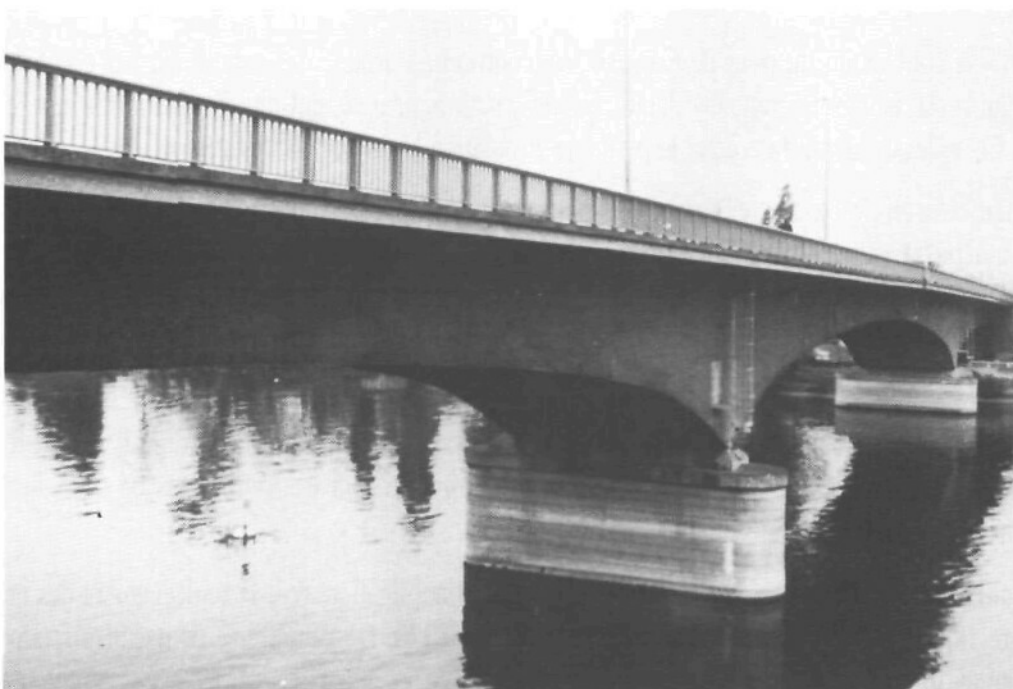
Généralités

1.1 Historique

Les premiers ponts qui ont été construits en béton précontraint l'ont été à l'aide de câbles extérieurs au béton. Il s'agit des ponts sur la Saale à Alsleben, en 1928, et d'Aue en 1936, tous les deux construits par Karl Dischinger.

Du fait de la diffusion internationale des idées d'Eugène Freyssinet, la précontrainte extérieure n'a pas eu un grand développement. On peut signaler cependant plusieurs constructions importantes :

- en Belgique, notamment sous l'impulsion du Professeur Magnel : pont de Sclayn en 1950, et toute une série de passages supérieurs autoroutiers construits entre 1960 et 1970,
- en France entre 1950 et 1952, pour contourner les brevets de Freyssinet : ponts de Villeneuve-Saint-Georges, de Vaux-sur-Seine, de Port à Binson et de Can Bia.



▲ Pont de Villeneuve-Saint-Georges (photo J. Chatelain)

– en Angleterre plus récemment : pont de Bournemouth à la fin des années 1960, et viaducs d'Exe et d'Exminster.

Des problèmes de corrosion des câbles de précontrainte extérieure se sont manifestés sur plusieurs de ces ouvrages.

Cela fût le cas pour le pont de Bournemouth dont il fallut remplacer les câbles très rapidement. Il s'agissait de câbles monotorons de gros diamètre, placés sous une gaine en PVC fragile et protégés par un produit dont il est possible qu'il ait favorisé la corrosion.

Ce fût aussi le cas pour les passages supérieurs construits en Belgique entre 1960 et 1970. Les câbles étaient protégés par un cylindre de béton mis en place après mise en tension des câbles ; ce cylindre de béton, fissuré par le retrait, favorisa la corrosion de l'acier.

L'analyse des ponts français est intéressante.

Le pont de Villeneuve-Saint-Georges a été construit par Henri Lossier en prévoyant la possibilité de remplacer les câbles de précontrainte, laissés nus avec une simple protection de peinture au bitume. Ce qui a permis de remplacer un câble, corrodé par l'eau ruisselant d'un tampon de visite dans le hourdis supérieur. Les autres câbles sont en parfait état, grâce à la très bonne étanchéité de l'ouvrage et à un entretien régulier. Mais les déviations des câbles étaient assurées par les balanciers en béton armé ou en acier, très coûteux, qui ont dissuadé les ingénieurs de poursuivre des recherches dans cette voie.

Les dispositions des autres ouvrages français étaient plus économiques, avec de simples entretoises de déviation en béton. Dans certains cas, la protection des câbles par une peinture au bitume s'est avérée suffisante, grâce à une bonne conception des ouvrages empêchant toute arrivée d'eau sur les câbles. C'est le cas notamment pour le pont de Port à Binson, construit par l'entreprise Coignet. Cela aurait aussi été le cas pour le pont de Vaux-sur-Seine si des oiseaux n'avaient pu nicher dans le pont, déposant une fiente acide sur les câbles qui, faute d'entretien approprié, ont ainsi été corrodés. Le pont a dû être renforcé en 1983 par des câbles additionnels et extérieurs.

La mauvaise conception du pont de Can Bia, au contraire, a amené des ruissellements d'eau le long des câbles, qui n'ont jamais été repeints depuis la construction, provoquant une corrosion majeure et des ruptures de fils telles qu'il a fallu couper le pont à la circulation et prévoir sa démolition.

De la même façon, les câbles extérieurs du pont d'Aue ont été corrodés par la fumée des locomotives à vapeur qui passaient dessous : à la différence des autres ouvrages cités, le pont d'Aue est un pont à poutres, et les câbles extérieurs ne sont pas placés à l'intérieur d'un caisson qui les isole des agressions extérieures. L'ouvrage a dû être remis en état au début des années 1960, et tous les câbles extérieurs ont été remplacés.

Ces expériences ont donné une mauvaise réputation à la précontrainte extérieure dont il a été difficile de se dégager, alors que les seuls problèmes qui se sont manifestés sont des problèmes de corrosion, mais en aucun cas de comportement mécanique.

La précontrainte extérieure a trouvé un nouveau champ d'application avec le renforcement des ouvrages en béton précontraint, essentiellement à partir des années 1970. De nombreux ponts, insuffisamment précontraints au moment de leur construction, ont dû être renforcés par des câbles nécessairement extérieurs au béton.

Ce sont les progrès technologiques rendus nécessaires par ces applications dans le domaine de la réparation qui ont permis de relancer l'idée de la précontrainte extérieure pour les ouvrages neufs.

La précontrainte extérieure s'est ainsi largement développée aux Etats-Unis à partir de 1978-1979 sous l'impulsion de Jean Muller, et en France, à partir de 1980-1981, notamment sous l'action du SETRA.

1.2 Avantages de la précontrainte extérieure

La précontrainte extérieure, qu'elle soit **totalem**ent extérieure au béton ou **mixte**, présente de nombreux avantages.

a) Amélioration des conditions de bétonnage

Dans la **première hypothèse**, la suppression totale des câbles intérieurs au béton améliore considérablement le bétonnage, en facilitant la descente du béton qui ne rencontre plus l'obstacle des conduits.

Dans le **cas d'une précontrainte mixte**, le nombre de câbles intérieurs est évidemment réduit par rapport à un câblage classique. Si aucun câble ne descend dans les âmes, le bétonnage de ces dernières devient particulièrement aisé.

Cette amélioration des conditions de bétonnage donne toutes les garanties d'obtenir des résistances élevées dans l'ouvrage, et permet d'en diminuer les épaisseurs.

b) Amélioration des conditions de mise en oeuvre des câbles de précontrainte

Les conditions de mise en oeuvre de la précontrainte sont nettement améliorées par la précontrainte extérieure :

- on supprime les problèmes de mise en place des conduits pour tous les câbles qui passent à l'extérieur du béton (sauf dans les pièces d'ancrage et de déviation) ;
- on facilite la mise en place des gaines des câbles qui restent dans le béton, grâce à la réduction de leur nombre et à la simplification de leur tracé (ils sont en général rectilignes).

De plus, le recours à une précontrainte extérieure au béton limite les **pertes par frottement**, et aussi les risques d'augmentation de ces pertes par des **déviations angulaires parasites** dues au mauvais réglage des conduits ou à leur déplacement lors du bétonnage et de la vibration :

- les **câbles extérieurs** ne subissent des pertes par frottement qu'à leur passage dans le béton (dans les pièces d'ancrage et de déviation), où sont localisées les seules déviations parasites qu'ils peuvent présenter ;
- les **câbles** qui restent **intérieurs** au béton, ayant un tracé très simplifié (généralement rectiligne), ont moins de pertes que des câbles de tracé classique.

Corrélativement, les difficultés d'enfilage se trouvent sensiblement réduites.

c) Amélioration des conditions d'injection

La grande accessibilité des câbles extérieurs au béton facilite les opérations d'injection et leur contrôle. Toutes les réservations d'injection dans le béton disparaissent par la même occasion.

La simplification du tracé des câbles qui restent intérieurs au béton améliore aussi les conditions de leur injection.

d) Possibilité de remplacement des câbles extérieurs

La précontrainte extérieure peut être conçue pour permettre le **remplacement** de l'un quelconque des câbles extérieurs au béton. Un tel remplacement, qui n'a d'intérêt que si le câble en question présente des signes de désordre, implique généralement la destruction de ses armatures constitutives et de leur conduit, l'important étant d'éviter toute opération traumatisante sur la structure elle-même.

Cet avantage ne dispense pas de se réserver la possibilité de mettre en place ultérieurement quelques **câbles additionnels** extérieurs au béton, destinés à renforcer l'ouvrage en cas de besoin.

e) Allègement des structures et amélioration de leur résistance

L'ensemble de ces facteurs – et en particulier l'absence de tout conduit dans les âmes – permet d'alléger les structures à précontrainte extérieure, tout en améliorant leur résistance réelle par la suppression ou la limitation du nombre des « trous » que représentent les câbles intérieurs au béton, qui sont autant de points faibles de la section.

f) Recours à une précontrainte partielle

Pour des câbles extérieurs, le risque de corrosion se dissocie complètement du risque de fissuration du béton adjacent.

Par ailleurs, les variations de tension qui affectent de tels câbles demeurent très faibles dans la mesure où leur tracé ne sort pas de la hauteur des sections (voir 1.3, d, ci-après).

Les réserves traditionnelles que d'aucuns formulent à l'égard de la précontrainte partielle s'évanouissent donc lorsqu'elle est totalement extérieure et appliquée à des ouvrages monolithiques ou ne comportant que des joints à travers lesquels il est possible d'assurer la continuité des armatures passives de façon à bien maîtriser partout la fissuration. On peut alors considérer qu'il s'agit de structures en béton armé sur lesquelles s'exercent, outre les actions extérieures habituelles, celles, à caractère permanent, développées par les câbles. Même dans ce cas, il est toutefois conseillé de respecter, dans leur esprit, les conditions de la classe III du BPEL, en s'interdisant notamment toute traction du béton au niveau des câbles sous combinaisons quasi-permanentes et tout dépassement des contraintes limites dans les armatures passives tant sous combinaisons rares que sous combinaisons fréquentes.

1.3 Sujétions de la précontrainte extérieure

a) Vulnérabilité de la précontrainte extérieure

Les câbles extérieurs sont beaucoup plus exposés aux agressions de toute nature que les câbles intérieurs au béton :

- ils sont particulièrement sensibles au **feu**, comme en témoigne un incident de chantier révélateur : une lampe à souder, abandonnée à proximité, a provoqué la combustion lente d'une gaine en polyéthylène dans laquelle venait d'être tendu un câble 27 T 15. Lorsque l'alerte a été donnée, la gaine s'était consumée sur plus d'un mètre de longueur et l'un des torons était rompu. C'est ce qui explique que la précontrainte extérieure soit peu utilisée dans le bâtiment,
- des **agressions d'origine animale** (fiente particulièrement corrosive de certains oiseaux ; rongeurs) ou **humaine** sont également à envisager.

A l'intérieur de nombreux ponts on a pu relever des traces d'occupation humaine temporaire ou durable. Les pensionnaires occasionnels de ces ouvrages ont parfois un rôle utile mais certaines de leurs pratiques (notamment celles consistant à allumer des feux pour leurs besoins domestiques) peuvent s'avérer dangereuses pour la durabilité des câbles extérieurs.

Par ailleurs l'existence de réseaux à l'intérieur des tabliers pose des problèmes de sécurité : la simple intervention d'un personnel de maintenance, sauf s'il a reçu des consignes précises de la part du gestionnaire de l'ouvrage, n'est pas sans danger pour les câbles.

Dans chaque cas, il importe donc **d'analyser les risques** correspondants et de prendre toute mesure susceptible de les limiter à un niveau acceptable. Pour les ponts, une section fermée, en caisson, est bien évidemment préférable à une section ouverte. Encore convient-il, lorsque la technologie retenue rend les câbles particulièrement vulnérables, d'en interdire l'accès aux indésirables.

b) Difficultés de réglage des tubes de passage dans le béton

Si la précontrainte extérieure permet de simplifier considérablement la mise en place des conduits, puisqu'il suffit de les disposer aux rares passages du câble dans le béton (dans les pièces d'ancrage et de déviation), ces conduits doivent, dans les zones délicates en question, être rigides et placés avec une très bonne précision. Le câble extérieur ne pouvant être que rectiligne entre deux traversées du béton, toute erreur d'orientation du tube cintré se traduirait en effet par des cassures angulaires à ses extrémités, augmentant les pertes par frottement, et générant des contraintes parasites tant dans le câble que dans le béton adjacent.



◀ Pour éliminer les difficultés de réglage, on peut utiliser des déviateurs provisoirement mobiles.
Après mise en tension, les réservations sont scellées au mortier (photo GTM)

c) Difficultés de manutention des vérins de mise en tension

Le recours à une précontrainte extérieure au béton conduit logiquement à l'emploi de câbles de précontrainte de forte puissance pour en limiter le nombre et l'encombrement : on utilise couramment des câbles 19 T 15, et des câbles plus puissants pour les grandes portées.

Mais le poids des vérins de mise en tension rend leur manipulation délicate. Le projet doit prévoir toutes les dispositions nécessaires à un déplacement et à une mise en position faciles de ces vérins.

Un cas particulièrement favorable sur ce plan est celui de la construction des ponts travée par travée à l'avancement : les ancrages arrière du côté déjà construit de la travée sont alors passifs, et les ancrages avant actifs ; les vérins peuvent donc être mis en position par une chèvre à l'avant de l'ouvrage, sans jamais devoir pénétrer dans le tablier.



▲ Viaduc du Vallon des Fleurs construit à l'avancement (voussoirs préfabriqués) (photo Campenon Bernard)

d) Possibilités limitées de surtension des câbles extérieurs

Pour des câbles extérieurs l'allongement de l'acier de précontrainte est le même tout au long du tracé, ou du moins entre deux points d'attache successifs (ancrage ou déviateur) si les déviations angulaires y sont suffisamment importantes pour que les frottements bloquent les déplacements.

Un câble extérieur restant rectiligne entre ses points d'attache, son allongement est plus faible que la variation moyenne de déformation du béton à son niveau ; cette différence est d'autant plus nette que les points d'attache sont plus espacés. La mobilisation de surtensions importantes, pour les justifications vis-à-vis des **états-limites ultimes**, impliquerait donc des déformations considérables tant pour le béton que pour les matériaux qui lui sont incorporés (câbles intérieurs notamment).

Comme, à l'inverse, ces déformations doivent être limitées à des valeurs raisonnables, les surtensions possibles pour un câble extérieur dont le tracé s'inscrit sur la hauteur du béton dont il assure la précontrainte demeurent très réduites.

1.4 Considérations économiques

Pour un ouvrage pris dans son ensemble, il est très délicat d'établir une comparaison économique entre une solution à précontrainte traditionnelle et une solution faisant appel à des câbles extérieurs. En effet, plusieurs facteurs agissent de façon contradictoire tant sur les quantités de matériaux que sur les prix unitaires :

- Tout d'abord, le recours à une précontrainte extérieure permet généralement de réduire les sections de béton en partie courante, donc d'alléger la structure et par là-même de diminuer les sollicitations de poids propre. Ces gains sont toutefois partiellement contrebalancés par l'existence d'entretoises de déviation et d'ancrage.
- A tension utile égale, un câble extérieur est souvent un peu moins efficace qu'un câble intérieur au béton compte tenu :
 - de son tracé polygonal assez rustique,
 - de la moindre excentricité qu'on peut lui donner au droit des sections critiques (dans la mesure toutefois où l'on souhaite confiner son tracé aux vides ménagés à l'intérieur de la structure),
 - de ses possibilités réduites de surtension lorsqu'on examine le comportement de la construction vis-à-vis des états-limites ultimes (voir 1.3, d, ci-dessus).
- En contrepartie, un câble extérieur présente toujours une force utile plus importante qu'un câble intérieur de tracé comparable du fait des moindres frottements.
- Enfin, à consommation égale en acier dur, la précontrainte extérieure coûte plus cher qu'une précontrainte traditionnelle à cause :
 - de la nature des matériaux et des matériels spécifiques utilisés (conduits, dispositions spéciales au niveau des ancrages notamment) qui font l'objet d'exigences particulières (voir 2^e partie),
 - des difficultés de réglage des tubes de passage dans le béton,
 - des problèmes que pose la manutention des vérins de mise en tension.

Compte tenu de ces éléments antagonistes, les seules conclusions globales qui s'imposent sont les suivantes :

- En termes de **coût initial**, la précontrainte extérieure n'est intéressante que si l'allègement de la structure est important et si sa construction peut être industrialisée. Lorsque l'industrialisation du chantier est trop limitée (la réalisation des entretoises déviateuses constitue un obstacle sérieux à cet égard) l'avantage économique immédiat est pratiquement nul.
- La précontrainte extérieure n'en conserve pas moins des atouts importants car elle permet :
 - d'**améliorer** sensiblement la **qualité**, donc la **durabilité** des ouvrages,
 - d'en **faciliter la surveillance** et par là même de **réduire les coûts d'exploitation**.

Technologie et protection contre la corrosion

La technologie est différente selon que les câbles sont ou non conçus pour être remplaçables.

Plusieurs solutions technologiques permettent de remplacer les câbles extérieurs en cas de besoin :

- on peut maintenir le principe d'une injection au coulis de ciment, à condition de prévoir une double enveloppe aux ancrages et dans les zones de déviation pour permettre le démontage ;
- on peut injecter avec un produit souple, graisse ou cire pétrolière ;
- certains projeteurs ont envisagé d'utiliser des câbles galvanisés laissés nus, ou placés sous tubes non injectés ;
- différents distributeurs de précontrainte ont développé des systèmes à base de monotorons gainés-protégés groupés en faisceaux.

2.1 Câbles non remplaçables

Lorsqu'il n'est pas prévu de permettre le remplacement éventuel des câbles, la meilleure protection, et la plus économique, consiste à injecter les câbles extérieurs au coulis de ciment.

Les conduits sont alors généralement des tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD) dans les parties où le câble est libre ; ils sont directement raccordés à des tubes métalliques rigides, cintrés, qui assurent le passage dans le béton.

Les conduits en PEHD peuvent être remplacés par d'autres types de conduits dans les parties libres :

- on a utilisé en quelques occasions des tubes en polypropylène plus performants mécaniquement mais malheureusement plus sensibles aux ultra-violets,
- on pourrait employer des tubes métalliques rigides (de type tube de chauffage), mais il semble que cela soit nettement plus coûteux.

Les gaines classiques en feillard sont à exclure car insuffisamment étanches. Il est enfin déconseillé d'utiliser des conduits en PVC, dont on peut craindre l'excessive fragilité.

Le raccordement entre un tube en PEHD et un tube de réservation métallique est délicat. Deux solutions ont été utilisées :

- un raccord en caoutchouc est placé entre les deux conduits, avec des serre-joints ; ce raccord doit être protégé par des coquilles métalliques lors de l'injection, car il ne peut pas résister par lui-même à la pression d'injection ;
- on peut enfiler sur les extrémités du tube de réservation métallique de courts tronçons de tubes en PEHD, partiellement intégrés dans le béton de la pièce d'ancrage ou de déviation, pour permettre le raccordement direct par thermo-fusion avec le conduit courant.

Pour contourner cette difficulté une autre solution consiste, au droit des déviateurs courants, à utiliser le système de la double enveloppe décrit en 2.2 ci-après.

Il est indispensable que le diamètre intérieur du conduit soit au moins celui que définit l'agrément traditionnel du système de précontrainte, notamment dans les zones de passage dans le béton où se concentrent les pertes par frottement.

Les gaines en PEHD doivent être capables de résister sans déformation à la pression d'injection. Il est conseillé de choisir une épaisseur de gaine garantissant sa résistance sous une pression nominale d'au moins 0,4 MPa (la définition de cette pression nominale est donnée au chapitre 1 de la 2^e partie).

2.2 Câbles remplaçables injectés au coulis de ciment sous double tubage

a) Principe de la double enveloppe

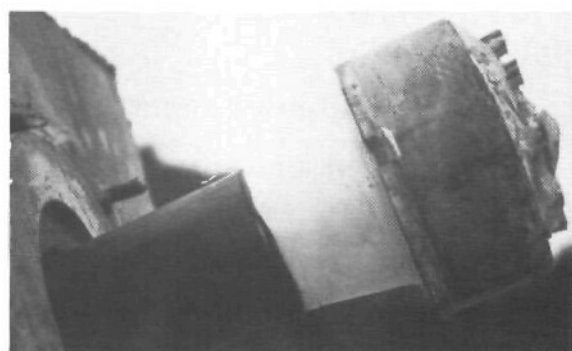
Pour permettre le démontage aisé d'une précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment, il faut mettre en oeuvre une **double enveloppe** dans les parties où le câble traverse le béton :

- le **conduit** est alors un tube continu, par exemple en polyéthylène à haute densité (PEHD),
- il passe à l'intérieur d'une **enveloppe métallique** dans les pièces d'ancrage et de déviation, enveloppe métallique qui joue presque toujours le rôle de coffrage.

Il faut, pour que le démontage soit facile, que le câble puisse se déplacer sur lui-même dans les zones où il traverse le béton. Son tracé doit donc être rectiligne ou circulaire dans chacune de ces zones.



▲ Double enveloppe à la traversée d'un déviateur
(photo GTM)



▲ Double enveloppe à la traversée d'un ancrage
(photo Freyssinet)

Il faut aussi prendre des dispositions à l'ancrage pour que la double enveloppe permette l'extraction par l'arrière de la tête d'ancrage et du câble. On peut par exemple prolonger le tube continu qui protège le câble par un cône lié à la tête d'ancrage, logé à l'intérieur de la trompette ou de la tromplaque d'ancrage. Dans certains systèmes de précontrainte extérieure, le cône intérieur est une trompette d'épanouissement en polyéthylène à haute densité thermosoudée sur le conduit courant. On peut aussi disposer un système de deux cylindres co-axiaux, le cylindre intérieur étant lié au conduit courant et le cylindre extérieur, qui constitue la trompette d'ancrage, au tube de réservation.

La principale difficulté consiste à assurer une parfaite étanchéité entre la tête d'ancrage et le conduit prolongé par sa trompette d'épanouissement où est logé le câble, de façon à ce que le coulis d'injection ne puisse pas pénétrer entre les deux enveloppes rendant l'extraction difficile ou impossible.

b) Choix du type de conduit

En ce qui concerne le choix du type de conduit, la solution la plus courante consiste à utiliser des tubes en PEHD thermosoudés au miroir, ou raccordés par manchons électro-soudables. Le raccord de ces tubes à des trompettes d'épanouissement est :

- facile si ces trompettes sont en PEHD,
- beaucoup plus délicat si elles sont métalliques.

On a intérêt à adopter des tubes en PEHD un peu plus épais que dans le cas d'une précontrainte extérieure non démontable, car le conduit passe dans les zones de déviation et subit la pression de courbure du câble qui tend à s'y enfoncer. L'expérience a montré que les torons plastifient le polyéthylène, mais sans le couper dans la mesure où les rayons de courbure ne sont pas trop petits (voir les valeurs minimales définies en 2.3 de la 2^e partie) et où l'épaisseur du conduit est suffisante. Une bonne épaisseur des gaines assure aussi une protection de l'acier du câble à la sortie du tube de réservation lorsqu'il existe des déviations parasites : l'écrasement local du polyéthylène permet une relative répartition de la cassure angulaire.

Dans ces conditions, il est recommandé de choisir une épaisseur de tube qui garantit sa résistance sous une pression nominale d'au moins 0,6 MPa.

D'autres types de matière plastique ont été utilisés, mais beaucoup moins largement, en particulier du polypropylène.

Dans quelques cas, enfin, on a eu recours à des conduits métalliques.

Le raccordement des conduits métalliques peut être effectué par soudure, mais il est alors prudent de ne pas accepter de tubes d'épaisseur inférieure à 3 millimètres qui sont difficiles à souder (perçage de l'acier). Il faut aussi noter les grandes difficultés pratiques d'une soudure à proximité des parois. La soudure est facilitée par un tulipage des tubes, qui assure leur emboîtement.

Dans le cas d'un assemblage par tulipage et emboîtement, il est envisageable d'assurer l'étanchéité par collage ou par le moyen de manchons thermdurcissables ; par contre, les tentatives de sertissage ont donné des résultats médiocres faute de place pour réaliser correctement cette opération.

D'une façon générale, les conduits métalliques paraissent plus coûteux que les conduits en PEHD.

c) Problèmes posés par l'opération de démontage

L'opération de démontage d'un câble extérieur injecté au coulis de ciment ne doit pas être menée sans précautions : il faut éviter que la coupure du câble ne soit brutale et mette en danger le personnel qui procède à cette opération (voir chapitre 5 de la 1^{re} partie).

2.3 Câbles remplaçables injectés avec un produit souple

Une autre solution pour permettre le remplacement des câbles extérieurs au béton consiste à les injecter à l'aide d'un produit souple, qui ménage la possibilité de les surtendre, de les détendre, et de les enlever. Un simple tubage suffit alors.

a) Nature du produit d'injection

Les premières expériences ont été faites en injectant dans les conduits une graisse classique, mélange d'huile et de savon.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour injecter une graisse qui ait à température ambiante une viscosité élevée, lui permettant de rester figée dans les gaines en limitant les risques de fuite.

La première consiste à injecter la graisse à faible température (de l'ordre de 40 °C). Il faut alors une pression d'injection relativement élevée (1,5 à 2,0 MPa par exemple), des points d'injection assez rapprochés, et surtout des conduits capables de résister à une pression importante (conduits étanches du type plomberie).

La seconde solution consiste à injecter la graisse à une température suffisamment élevée (de 80 à 90 °C) pour qu'elle soit très fluide. Dans ce cas les conduits doivent être étanches et résister à la température, mais ils n'ont à supporter qu'une faible pression d'injection (de l'ordre de 0,2 MPa si l'injection est bien conduite).

Les premières injections à la graisse qui ont été faites n'ont pas donné des résultats totalement satisfaisants faute d'un matériel approprié et par manque de stabilité du produit utilisé :

- de nombreuses fuites sont apparues dans le cas d'injections à faible température faites dans des conduits insuffisamment résistants ; la séparation de l'huile et du savon (ressuage) a provoqué des fuites d'huile abondantes ;
- les conduits capables de résister à une injection à froid s'avèrent très coûteux ;
- le chauffage et l'injection de la graisse à chaud sur chantier pose de nombreux problèmes : importance des moyens à mobiliser, saleté du chantier, danger dû à des produits toxiques contenus dans certaines graisses, risques de séparation des huiles et du savon.

La plupart des fournisseurs de précontrainte s'orientent aujourd'hui de préférence vers des cires pétrolières plutôt que vers des graisses. Les cires présentent en effet l'avantage d'une grande stabilité du fait de leur structure cristalline.

Pour simplifier la mise en oeuvre, et faire disparaître l'aspect de saleté des injections par produits souples, certains pétroliers ont fabriqué des camions citernes isothermes équipés de pompes, capables d'injecter directement la cire chaude dans les conduits, à une température de l'ordre de 90 °C.

b) Nature des conduits

La solution de la **simple enveloppe**, toujours suffisante, est la plus souvent retenue.

Dans les zones de traversée du béton, aux ancrages et dans les déviateurs, les conduits qui jouent en même temps le rôle de tube de réservation dans le béton doivent être des tubes métalliques cintrés. D'une part parce qu'ils sont beaucoup plus faciles à cintrer avec précision que des tubes en plastique, et d'autre part parce qu'on peut craindre que la pression de courbure des fils ou des torons, exercée pendant toute la vie de l'ouvrage, ne finisse par couper des conduits en polyéthylène à haute densité.

En partie courante, les conduits doivent être par ailleurs capables de résister aux températures et aux pressions d'injection. C'est la raison pour laquelle, dans les premiers ouvrages injectés à la graisse, on a utilisé des tubes métalliques soudés raccordés par tulipage et emboîtement.

On a aussi employé des conduits en fibre de verre, très résistants mais coûteux.



◀ Conduit en fibre de verre injecté à la cire
(photo A. Chabert)



▲ Collier pour piquage d'injection
(photo A. Chabert)

Plus récemment, on a commencé à injecter de la graisse ou de la cire pétrolière à 80 ou 90 °C dans des tubes en polyéthylène à haute densité. Si l'on utilise des tubes épais en PEHD (résistant à une pression nominale de 0,6 MPa), il semble que cela ne pose pas de problème : l'inertie thermique du tube limite son échauffement au moins à sa périphérie. On retrouve, par contre, les difficultés de raccordement avec les tubes métalliques de réservation, mais on peut les éluder, au droit des déviateurs, grâce au système déjà évoqué de la **double enveloppe**. Dans ce cas, un renforcement local du tube en PEHD par une gaine métallique annelée placée à son intérieur permet d'éviter tout risque de perforation du plastique par le câble, dans la zone de courbure.

c) Dilatation du produit souple

La graisse et la cire pétrolière ont un coefficient de dilatation thermique près de dix fois supérieur à ceux de l'acier et du béton. Si la graisse ou la cire remplissent complètement les conduits à température normale, une augmentation importante de la température provoque inévitablement une mise en pression du produit souple et favorise les fuites.

Il est donc indispensable, dans le cas d'une injection à faible température (de l'ordre de 40 °C), de prévoir des vases d'expansion du produit souple, graisse ou cire pétrolière, dont le volume est calculé en fonction des températures extrêmes prévisibles au cours de la vie de l'ouvrage. L'oubli de cette disposition est en partie à l'origine des fuites constatées sur certains ouvrages.

Au contraire, si l'on injecte la cire pétrolière ou la graisse à forte température, elle va se rétracter dans les gaines en refroidissant, et elle disposera de tout le volume nécessaire pour se dilater lors des périodes chaudes. Sauf si, dans une zone de l'ouvrage, les pertes calorifiques lors de l'injection ont abaissé la température du produit d'injection en dessous des températures qu'il subira dans l'avenir.

d) Possibilités de contrôle et de réglage de la tension

En plus de la démontabilité, l'injection au moyen d'un produit souple offre différentes possibilités :

- de contrôle et de réglage de la tension en utilisant par exemple des ancrages à tête filetée,
- de détension complète non destructive des torons moyennant recours à des clavettes spéciales et sous réserve de ne pas recéper les armatures qu'il convient alors de protéger, en arrière des ancrages, au moyen de capots longs.

Ces avantages complémentaires sont toutefois d'un intérêt limité :

- La repesée n'est envisageable que sur quelques ouvrages expérimentaux faisant l'objet d'un suivi à long terme en vue d'améliorer la connaissance de leur comportement,
- Un rattrapage ultérieur de tension, destiné à compenser partiellement les pertes par retrait, fluage et relaxation, s'avère relativement peu efficace pour une structure neuve dans laquelle les câbles ont été initialement tendus à leur maximum. Une telle manoeuvre serait plus intéressante dans l'hypothèse d'un renforcement pour lequel il subsisterait une incertitude sur la précontrainte nécessaire. On pourrait alors se réserver une marge substantielle de remontée en tension sur des armatures volontairement sous-tendues au départ. Mais même dans ce cas, il serait certainement plus économique de prendre, dans le doute, les dispositions habituelles permettant la mise en oeuvre de câbles additionnels,
- Pour un remplacement éventuel, enfin, il n'est pas évident qu'une détension non destructive des armatures, même si elle permet de conserver l'intégrité de la gaine, soit moins onéreuse qu'un tronçonnage du câble, inévitable lorsqu'il a été injecté au coulis de ciment. Car se posent alors les problèmes d'extraction du câble enduit de cire et éventuellement de nettoyage du conduit, avant enfilage du nouveau câble.

Globalement, les solutions d'injection par produits souples s'avèrent, à l'heure actuelle, plus coûteuses que les solutions d'injection au coulis de ciment. C'est pourquoi elles ne sont guère employées que dans les cas où les avantages complémentaires précédemment évoqués sont exigés par le marché.



▲ Injection à la cire - Capots longs pour conservation des surlongueurs des torons en vue d'une détension éventuelle (photo A. Chabert)



▲ Capots longs - Injection en cours (photo A. Chabert)

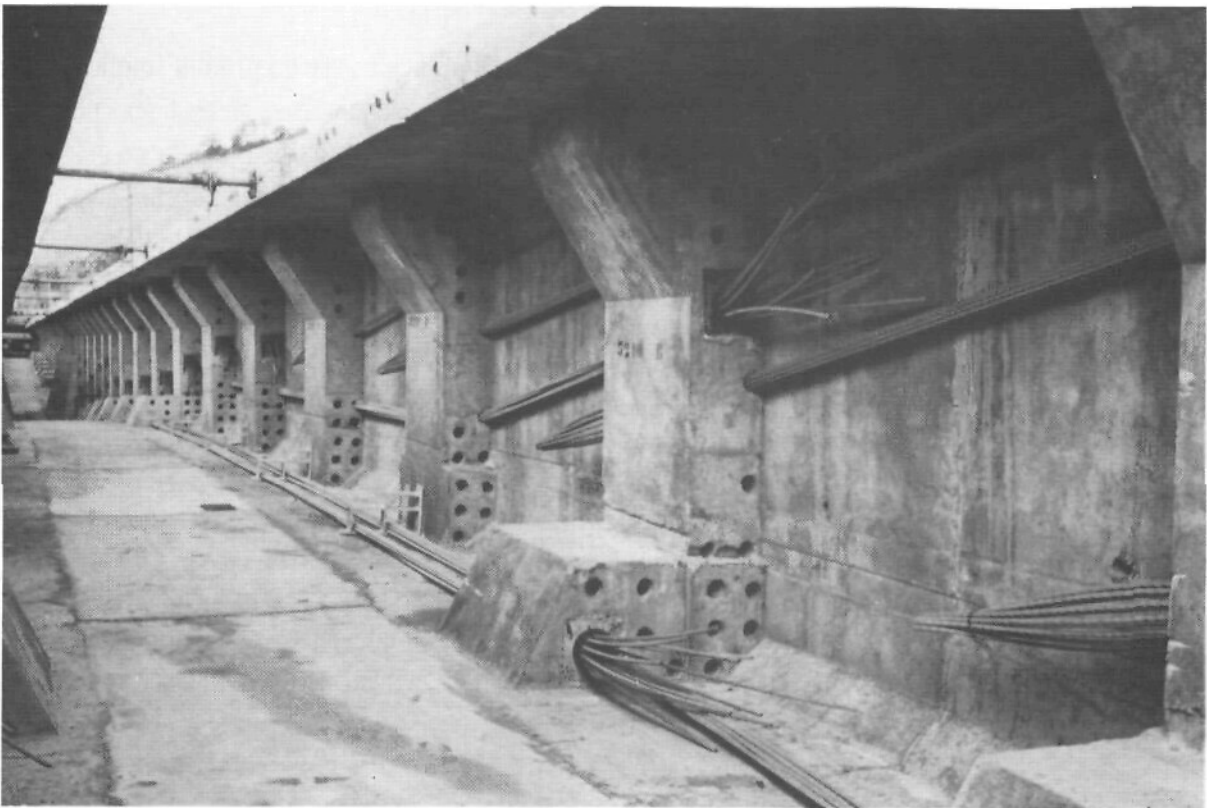
2.4 Câbles galvanisés

a) Principe d'emploi des câbles galvanisés

Plusieurs projeteurs ont proposé d'utiliser des câbles galvanisés, en comptant sur la seule galvanisation pour assurer la protection de l'acier de précontrainte contre la corrosion (Il convient de remarquer qu'aucun toron galvanisé n'est à l'heure actuelle agréé pour un usage en précontrainte).

Une surveillance visuelle des câbles est alors indispensable pour permettre le remplacement des câbles corrodés, ou leur protection par peinture en cas de besoin.

Mais il est interdit de laisser des câbles nus et non maintenus, qu'ils soient provisoires ou définitifs, pour des raisons de sécurité du personnel de construction et de visite (risque de rupture d'un toron).



▲ Viaduc de Sermenaz - Câbles galvanisés (photo M. Virlogeux)

Plusieurs solutions sont envisageables :

- laisser les câbles galvanisés nus, mais en les maintenant à intervalles rapprochés par de simples bagues enserrant tous les fils ou les torons ; ou en les tenant et en les accrochant au béton par des pièces de maintien (tous ces éléments doivent être munis de protections adéquates pour éviter d'endommager la galvanisation) ;
- placer les câbles galvanisés dans des tubes à lumières, ou dans des tubes télescopiques permettant leur inspection régulière ; cette seconde solution paraît cependant nettement plus coûteuse, et complique l'inspection.

b) Protection des ancrages

Bien entendu, il faut aussi assurer une protection des pièces d'ancrage : tête d'ancrage, plaque d'ancrage, trompette et clavettes. Il a été envisagé d'utiliser des **clavettes en acier chromé dur**, et de **galvaniser** toutes les autres pièces.

Il importe également de « drainer » l'ancrage pour éviter toute accumulation d'eau contre la plaque d'ancrage si elle est en point bas.

Mais ces principes ont conduit à quelques déboires. Les tolérances sur l'épaisseur de la galvanisation (qui aurait dû être de l'ordre de 50 microns) n'ont pas toujours été respectées, et cette épaisseur a parfois atteint 100 microns, tandis que la tête d'ancrage recevait une couche de zinc trop épaisse, irrégulière, avec des coulures. Le coincement conique n'a pu alors se faire dans de bonnes conditions, les clavettes n'ayant pas pénétré dans la tête d'ancrage autant qu'elles auraient dû.

Ces incidents ont conduit à une certaine réserve sur l'avenir de cette technique.

Un autre type de protection des ancrages est possible, **par injection locale avec un produit souple**, graisse ou cire pétrolière. Mais cette solution n'est simple que si l'ancrage est en point bas : on peut alors placer un capot étanche, vissé ou soudé sur la plaque d'ancrage, et injecter par le bas, jusqu'à remplir de graisse ou de cire la totalité du tube de réservation, dont il est souhaitable qu'il sorte légèrement du béton pour éviter toute entrée d'eau.

c) Problèmes particuliers de mise en oeuvre

Des dispositions spéciales doivent être prises pour limiter les risques de blessure des câbles galvanisés lors de leur manipulation et de leur mise en place.

d) Efficacité de la protection contre la corrosion

Rappelons que certains spécialistes doutent de la durée de la protection contre la corrosion qu'assure la galvanisation, et qu'il paraît donc raisonnable de n'utiliser cette solution que dans des zones à climat sec et sain, et de l'éviter dans des atmosphères agressives (particulièrement dans des ambiances acides) et humides.

2.5 Câbles constitués de monotorons gainés-protégés

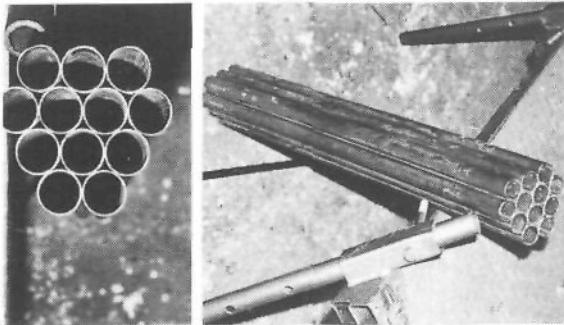
L'utilisation de monotorons gainés-protégés pour constituer des câbles présente des avantages certains :

- faible valeur des coefficients de frottement,
- possibilité d'effectuer la mise en tension à l'aide d'un vérin monotoron léger, maniable et de faible encombrement.

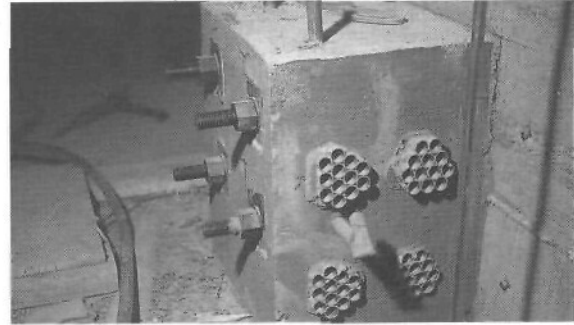
Elle se heurte malheureusement à une difficulté importante : dans les zones de courbure, au sein du paquet d'armatures, la pression des couches supérieures provoque la déchirure des gaines individuelles en PEHD trop minces pour résister aux efforts correspondants.

Deux familles de solutions ont été mises au point pour pallier cet inconvénient :

a) Séparation physique des monotorons tout au long de leur tracé

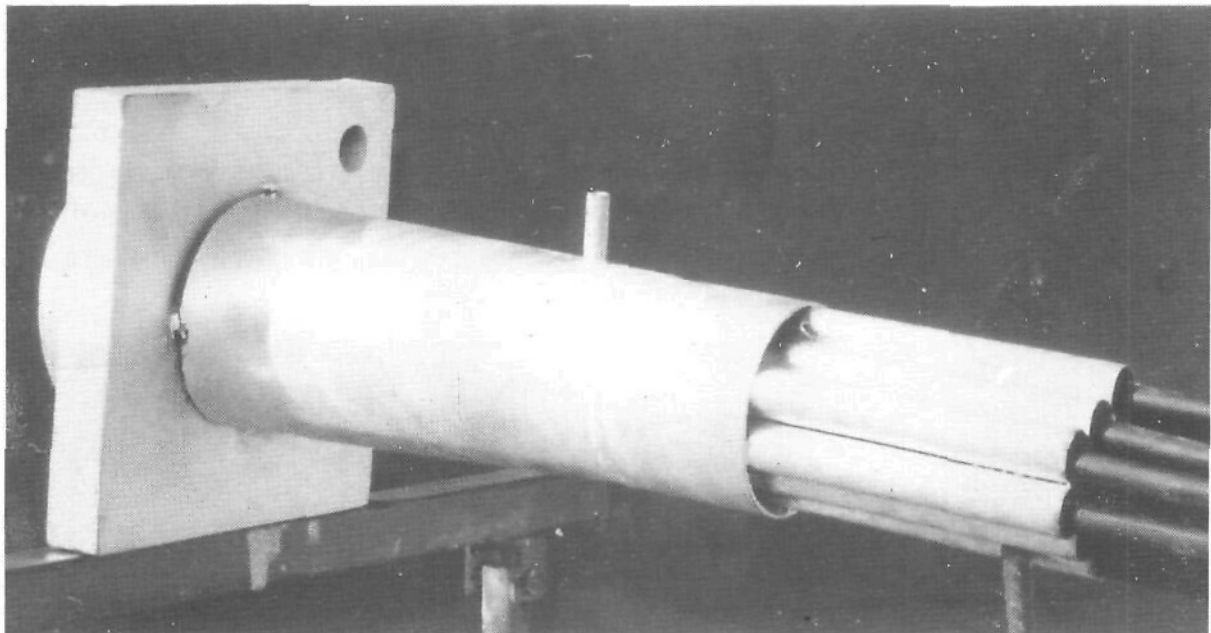


▲ Monotorons séparés - Barillet de tubes de réservation
(photo A. Chabert)



▲ Barillets de tubes de réservation
au niveau d'un déviateur (photo A.Chabert)

Dans ce cas, les déviateurs sont constitués de barillets de tubes métalliques cintrés, isolant les armatures les unes des autres et définissant pour elles des tracés rigoureusement parallèles en dehors du béton. Le raccordement aux trompettes d'extrémité se fait de même par un jeu de tubes plus ou moins complexe, la protection de la zone d'ancrage étant réalisée par une injection ultérieure à l'aide du même produit souple que celui qui enrobe les torons en partie courante.



▲ Monotorons séparés - Dispositions au niveau d'un ancrage (photo A. Chabert)

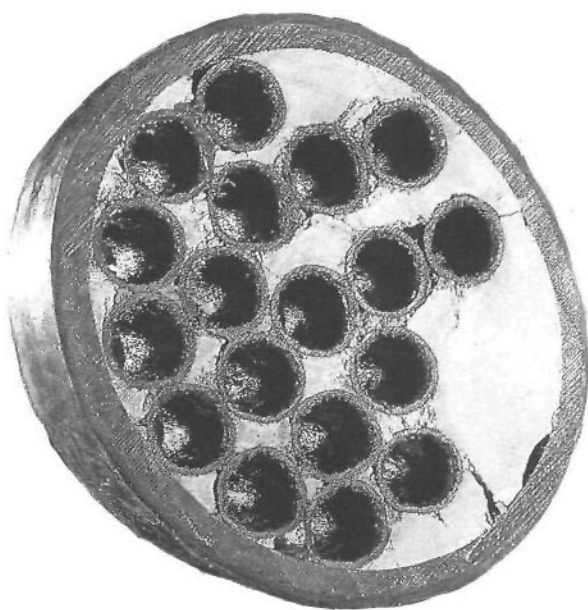
L'enfilage des torons constitue le point délicat du procédé. Les risques de blessure de la gaine doivent incontestablement faire préférer, pour ce type d'application, le toron gainé ciré au toron gainé graissé.

Il n'en demeure pas moins que ces armatures présentent une sensibilité particulière aux agressions animales et surtout humaines.

b) Groupement des monotorons à l'intérieur d'un tube en PEHD

Le diamètre intérieur de ce tube logeant l'ensemble des monotorons gainés-graissés doit être légèrement supérieur au diamètre du conduit utilisé pour un câble de précontrainte traditionnel de même puissance.

Une fois l'ensemble des monotorons gainés-graissés en place, le tube est injecté au coulis de ciment, sauf aux ancrages pour permettre ultérieurement la mise en tension des armatures. Le coulis durci évite le report sur les torons des couches inférieures des pressions de courbure concentrées des couches supérieures.

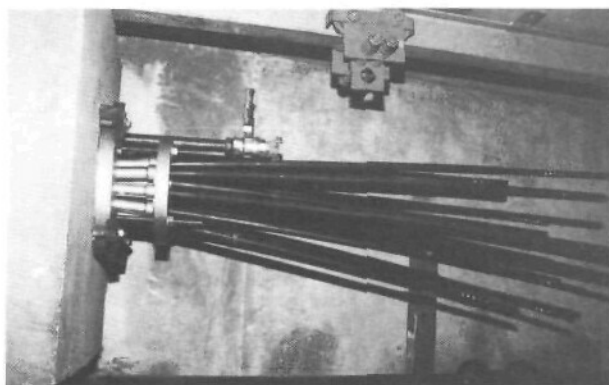


▲ Groupement de monotorons gainés dans un conduit en PEHD injecté au coulis de ciment (photo A. Chabert)

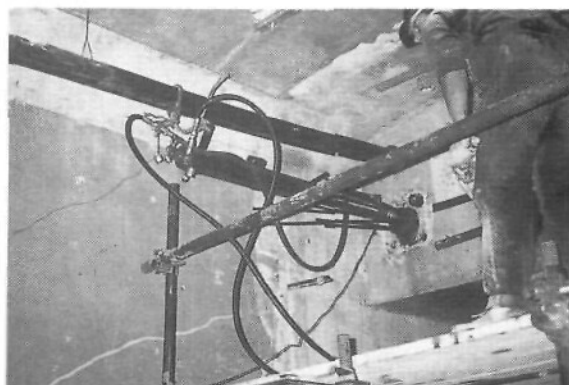
On peut alors tendre le câble dans son ensemble ou toron par toron, en prenant soin d'équilibrer les efforts sur les plaques d'ancrage au fur et à mesure de la mise en tension des torons successifs.

La protection contre la corrosion est achevée par une injection locale des ancrages. Si l'on souhaite assurer la pénétration des clavettes dans la tête d'ancrage sous l'effet des surtensions (voir 4.3, 1^{re} partie), le plus simple est de faire cette injection locale à la graisse ou à la cire pétrolière, en disposant un capot étanche soudé ou vissé sur la plaque d'ancrage. Il est évidemment nécessaire d'utiliser le même produit que pour la protection courante des monotorons gainés-graissés.

Il est préférable de maintenir le système de double enveloppe aux ancrages et dans les déviateurs pour permettre le remplacement éventuel des câbles. Mais certains ingénieurs considèrent qu'il est possible de démonter de tels câbles en l'absence de double enveloppe puisqu'il est facile d'enlever les torons un à un. Il ne resterait ensuite qu'à éliminer le coulis à l'eau sous pression.



▲ Système presse-étoupe Freyssinet pour éviter la contamination de la tête d'ancrage par le coulis d'injection (photo Freyssinet)



▲ Mise en tension au moyen d'un vérin monotoron (photo A. Chabert)

2.6 Câbles provisoires non injectés

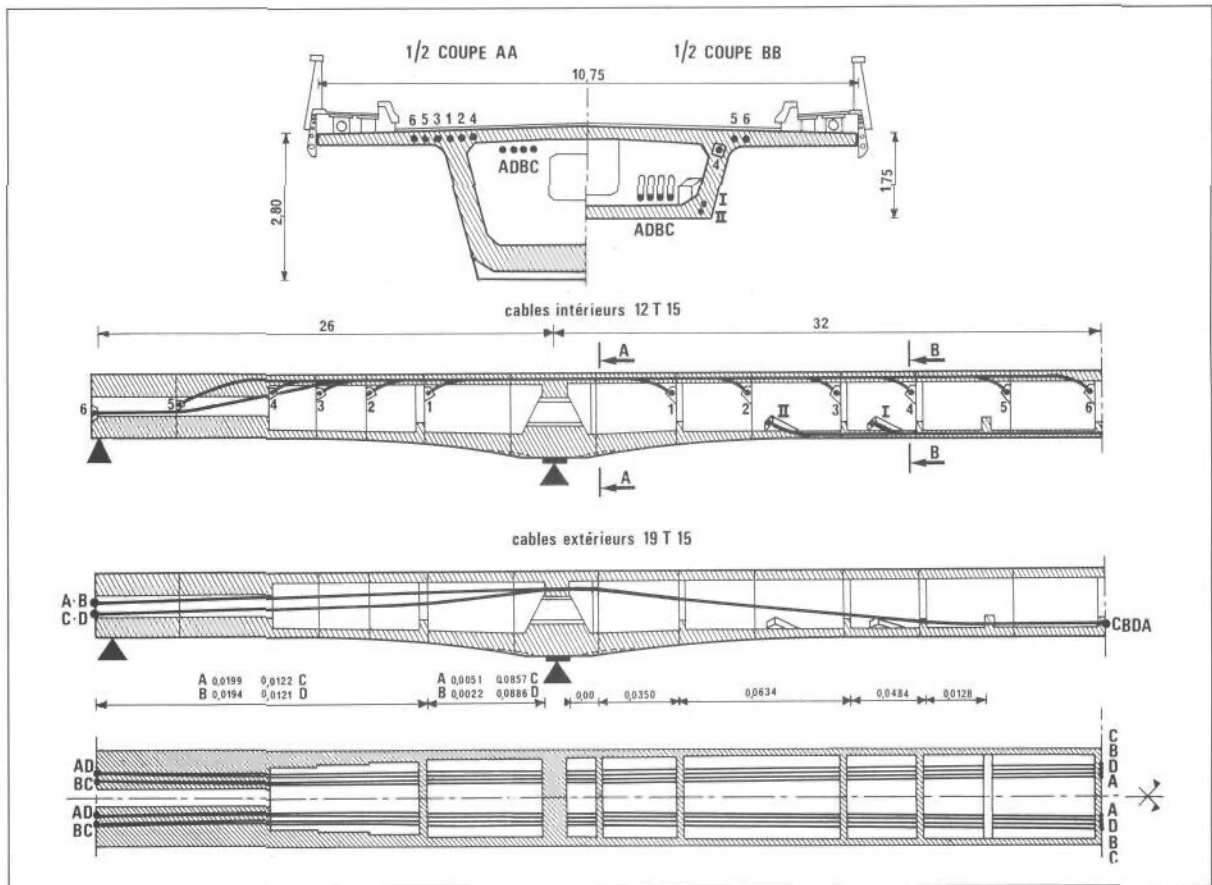
Lorsque les câbles extérieurs n'ont qu'un rôle provisoire pendant la construction de l'ouvrage, la qualité de la protection anti-corrosion est à moduler en fonction de leur durée d'utilisation. Si les câbles provisoires doivent être laissés en place et en tension pendant de nombreux mois, et s'ils sont employés dans des conditions qui peuvent être agressives sur le plan de la corrosion on a intérêt à choisir des aciers galvanisés. Mais si la précontrainte provisoire n'est laissée en place que quelques semaines, voire quelques mois, et si les conditions sont bonnes, des câbles clairs non injectés suffisent. Une protection à l'huile soluble est alors nécessaire.

Comme l'emploi de câbles nus et non maintenus est interdit pour des raisons de sécurité du personnel, la meilleure solution consiste à placer les câbles provisoires dans des gaines continues, qui sont en général des gaines en plastique de plus faible épaisseur que celles utilisées comme conduits définitifs, par exemple en polyéthylène à haute densité, ou en polypropylène.

Mais on peut aussi laisser les câbles nus, à condition de les attacher au béton de loin en loin, et de les lier à intervalles rapprochés par des bagues qui empêchent une armature rompue de fouetter dans l'ouvrage.

2.7 Tendances actuelles

Des différentes technologies précédemment évoquées et qui toutes ont fait l'objet de réalisations depuis 1980, la plus répandue, à l'heure actuelle, est celle de la **double enveloppe avec injection au coulis de ciment**. Les conduits continus sont des **tubes en PEHD** se raccordant, sous ancrages, à des **trompettes d'épanouissement** le plus souvent en polyéthylène à haute densité, spécialement mises au point par les sociétés distributrices de précontrainte de façon à satisfaire aux exigences fondamentales d'étanchéité pour permettre un éventuel démontage des unités sans opération traumatisante pour la structure. Les dispositifs correspondants, maintenant produits industriellement, sont soumis à une **procédure spécifique d'autorisation ou d'agrément** (voir chapitre 3 de la 2^e partie).



▲ Principe du câblage du pont de la Flèche



▲ Viaduc de Poncin - Intérieur du tablier (photo C. Servant)

Conception et dispositions constructives

3.1 Localisation des ancrages

A la différence de ce qui se passe avec une précontrainte classique intérieure au béton, les forces de précontrainte extérieure ne vont pas vers la masse du béton, mais vers le vide. Il est donc indispensable d'ancrer les câbles sur les pièces massives.

L'ancrage de câbles extérieurs sur des bossages d'ancrage placés sur les âmes, les hourdis ou à la liaison des deux est notablement plus difficile que celui de câbles intérieurs : il apparaît un important effort de cisaillement à la liaison entre le bossage et le reste de la structure.



▲ Pont de l'Île-de-Ré - Entretoise d'ancrage (photo G. Forquet)

C'est ce qui explique que dans la plupart des ponts précontraints au moyen de câbles extérieurs au béton les câbles soient ancrés sur de **robustes entretoises placées à la verticale des appuis**, là où leur poids n'induit aucun effet gênant pour la structure.

3.2 Diffusion des efforts aux ancrages

Généralement, un grand nombre de câbles extérieurs sont ancrés aux abouts de l'ouvrage. En outre, pendant la construction, un nombre important de câbles extérieurs sont ancrés sur certaines entretoises sur piles, sans que les efforts qu'ils développent soient équilibrés par les câbles ancrés sur l'autre face de l'entretoise, comme ils le seront à la fin de la construction.

Il apparaît alors de très importants efforts de diffusion de cette précontrainte dans le béton. Le souci d'éviter l'ouverture de fissures dont la direction et l'ouverture sont difficiles à contrôler, conduit à recommander d'équilibrer une grande partie des efforts de diffusion par une **précontrainte transversale**, ou à la fois transversale et verticale.

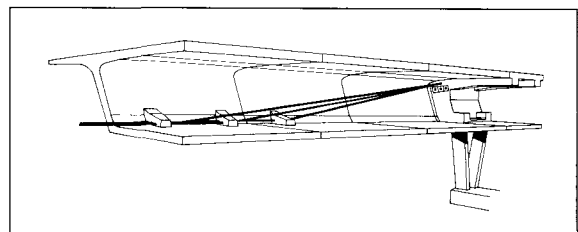
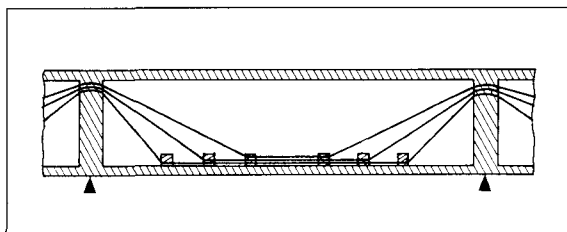
3.3 Déviation des câbles

Pour que les câbles extérieurs soient efficaces en flexion et à l'effort tranchant, il faut qu'ils passent en fibre supérieure sur pile, et en fibre inférieure dans la zone centrale des travées. Ce tracé est réalisé à l'aide des pièces de déviation qui donnent aux câbles un tracé en ligne brisée.

Un câblage mécaniquement optimal est obtenu en multipliant les déviateurs ce qui permet :

- soit de dévier les câbles un à un,
- soit de leur donner à tous le même tracé, proche du tracé théorique que présenterait une précontrainte traditionnelle intérieure au béton.

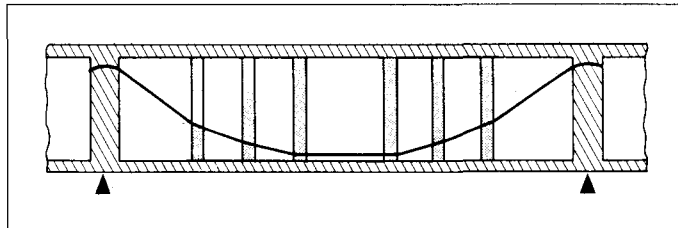
Dans le premier cas, les pièces de déviation peuvent être des blocs en béton (ou des pièces métalliques de déviation ancrées au béton de la structure) placés à la limite entre le hourdis inférieur et les âmes des poutres en caisson. La position des ancrages doit être choisie de façon à ce que les efforts de déviation se décomposent sans flexion secondaire sur l'âme et le hourdis inférieur.



▲ Déviations échelonnées - Exemple du pont de Long Key ▲

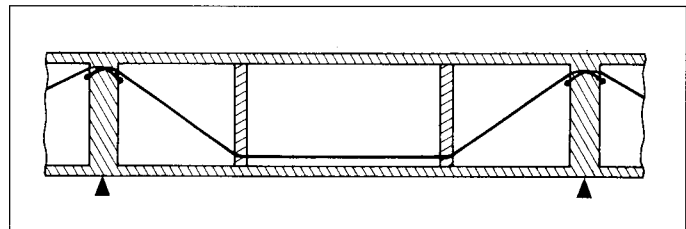
Dans le second cas, ce sont de véritables entretoises qui permettent de dévier simultanément tous les câbles. Il est alors intéressant de placer chacun d'entre eux dans un plan vertical (ou faiblement incliné sur la verticale) avec quelques corrections aux ancrages pour des raisons d'encombrement géométrique. Multiplier ces entretoises présente toutefois des inconvénients :

- bien que beaucoup plus légères que les entretoises d'ancrage (placées à la verticale des appuis) elles génèrent par leur poids des efforts additionnels dans la structure,
- elles compliquent la réalisation.



◀ Déviations multiples (tracé quasi-parabolique)

C'est pourquoi on préfère souvent se limiter à **deux entretoises déviateur** en travée ce qui réduit l'efficacité du câblage notamment vis-à-vis de l'effort tranchant et impose parfois d'augmenter un peu l'épaisseur des âmes. Le choix d'un tel parti peut être légèrement pénalisant en ce qui concerne les quantités de matériaux, mais il s'avère presque toujours payant quant à l'économie du projet car il simplifie notablement l'exécution.



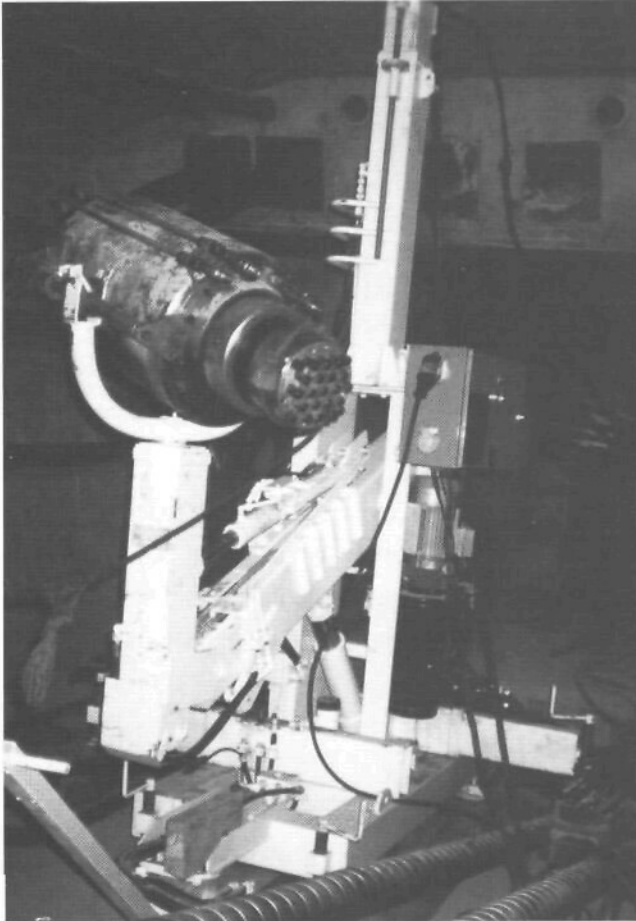
Tracé polygonal simplifié ▶

3.4 Conditions permettant le remplacement des câbles

Lorsque la précontrainte extérieure doit être démontable, il est indispensable de prendre des précautions particulières lors de la conception de la structure :

- il faut évidemment que les ancrages des câbles démontables soient en permanence accessibles ;
- il faut prévoir l'encombrement des vérins nécessaires à la mise en tension des éventuels câbles de remplacement, ce qui peut conduire, par exemple, à disposer des chambres de tirage sur les culées ;
- il faut prévoir les dispositions nécessaires pour permettre la mise en place des câbles de remplacement ; ces câbles peuvent être enfilés par une trappe dans le hourdis inférieur d'une travée (généralement de rive), ou par une porte dans un des murs des chambres de tirage placées sur les culées ; on peut aussi amener les câbles aux chambres de tirage sur culées par des conduits de diamètre suffisant qui ont été enterrés dans ce but dans les remblais d'accès ;

- il faut enfin prévoir les dispositions permettant d'amener les vérins de mise en tension dans l'ouvrage, de les déplacer, et de les mettre en position (points de levage des vérins au niveau des ancrages; accès et cheminement pour les vérins, soit sur chariot, soit par suspension à un rail continu dans l'ouvrage).



◀ Engin automoteur de manutention des vérins
(à noter les câbles provisoires sous gaines en feuillard)
(photo Spie-Batignolles)

3.5 Vibrations des câbles extérieurs au béton

Les mouvements de la structure, par exemple sous l'effet du trafic pour les ponts, peuvent engendrer des vibrations des câbles extérieurs, qui sont en général libres sur une grande longueur.

Il faut éviter que la période propre fondamentale de vibration des câbles ne soit trop proche d'une période propre de la structure elle-même. L'analyse doit être limitée aux premiers modes.

La rigidité de flexion des câbles extérieurs, particulièrement pour les câbles injectés au coulis de ciment, et l'encastrement partiel des câbles dans les entretoises d'ancrage et dans les pièces de déviation, ont un effet très favorable qui est négligé dans la formule classique des cordes vibrantes.

L'expérience a montré que les câbles d'une quinzaine de mètres de longueur ne subissaient que des vibrations très faibles dans le cas des ponts routiers. Dans le cas de ponts ferroviaires, qui sont soumis à des excitations plus violentes, il semble prudent de limiter les longueurs libres à 10 ou 12 mètres.

Lorsque les organes d'ancrage et de déviation sont plus espacés, il est souhaitable de disposer des pièces intermédiaires de maintien des câbles. Ces pièces ne subissent que des efforts très faibles, mais il est utile que le câble soit tenu par l'intermédiaire d'un dispositif légèrement amortisseur, comme par exemple un patin d'élastomère. Lorsque les câbles passent près du béton, il peut suffire de placer en force une petite cale en élastomère entre le câble et le béton.

Si par ailleurs, des sollicitations dynamiques accidentelles (résultant par exemple de séismes ou de chocs violents sur la structure) sont prises en considération dans le dimensionnement, il convient de s'assurer du bon comportement de l'ensemble de l'ancrage utilisé sous ce type de sollicitations.

3.6 Réseaux à l'intérieur des ouvrages

Il est extrêmement fréquent que les ouvrages contiennent des réseaux de différents types : électricité, téléphone, adduction d'eau... Tous ces réseaux limitent la place disponible pour les câbles de précontrainte extérieurs au béton. Il est donc indispensable que le projet tienne compte, dès le départ, de la place nécessaire à ces réseaux et de leur position, faute de quoi des conflits géométriques insolubles risquent de survenir, dont une des moindres conséquences peut être d'interdire l'éventuel remplacement des câbles extérieurs.

4

Mise en oeuvre de la précontrainte extérieure au béton

4.1 Mise en place des gaines en section courante

La mise en place des gaines en section courante, où elles sont libres, ne pose que peu de problèmes si elle est bien organisée.

De façon générale, il faut prévoir des supports permettant de poser les gaines et de les régler à peu près avant mise en place et en tension des câbles extérieurs. Mais le bon réglage des gaines dans leur partie libre n'est en fait réellement très important que lorsqu'on utilise des tubes métalliques, du fait de leur rigidité. Lorsqu'on utilise des tubes plastiques, en PEHD notamment, la mise en tension assure la rectitude du câble et du tube souple qui le protège, sauf si ce dernier a été livré en couronnes et s'il est resté trop longtemps enroulé. Alors, le vieillissement du plastique y induit des déformations permanentes qui se traduisent par des ondulations irréversibles du conduit. Dans ce cas, une bonne mesure préventive consiste à dérouler les conduits dès qu'ils arrivent sur le chantier, à les couper à la longueur et à les stocker dépliés.



◀ Supports de conduits (photo Y. Blond)

D'une façon générale, lorsqu'on utilise des tubes en plastique, il faut ménager quelques coupures au long de leur tracé pour permettre le rattrapage du mou lors de la mise en tension.

Ces coupures sont occultées avant injection par mise en place de raccords et de manchons électrosoudables. Il est préférable de placer des coupures au voisinage des ancrages, pour que le tronçon de gaine voisin de l'ancrage subisse le moins de mouvements possible.

4.2 Mise en place des déviateurs

La géométrie et le positionnement des déviateurs définissent complètement le tracé d'un câble. Il est donc important de les mettre en place avec une bonne précision de façon à éviter, à leurs extrémités, toute cassure angulaire notable.

Pour un déviateur, le problème des tolérances concerne non pas tant l'implantation de ses points de sortie (du fait des grandes longueurs libres entre passages successifs dans le béton) que l'orientation du tracé qu'il matérialise autour de l'axe joignant les points en question.

Il est bien évident qu'il ne faut pas compter uniquement sur une implantation parfaite et que la conception des organes de déviation doit leur permettre, à l'intérieur de certaines limites de tolérance, d'éviter les points anguleux à leur raccordement avec les parties droites.

Différentes solutions sont utilisées pour ce faire :

a) Tubes simples

Une première possibilité consiste à les laisser sortir du béton.

Leur déformabilité à l'extérieur du béton permet d'amortir les cassures angulaires éventuelles. On peut, au besoin, les fendre sur une partie de leur longueur pour augmenter leur souplesse.

Il est prudent, en outre, de les isoler du béton sur quelques centimètres au voisinage des parements, à l'aide d'un produit mou, de façon à reporter à coeur, là où les frettages sont efficaces, les efforts parasites éventuels.

Si l'on veut éviter d'avoir à percer les coffrages, il est également possible d'arrêter les tubes au droit des parements en les gainant, à leurs extrémités, au moyen de fourreaux en produit mou suffisamment longs et épais pour assurer sur leur longueur une régularisation convenable des imperfections angulaires.

b) Surcintrage

Le tube est alors cintré selon un rayon plus faible que celui qui assurerait la tangence au strict droit des parements du béton avec les tronçons rectilignes du tracé. Une imprécision du positionnement, dans son plan, du tube de réservation n'entraîne ainsi qu'un déplacement de la zone de contact du câble.

Un jeu suffisant entre le tube et le câble permet dès lors de s'accommoder d'une erreur angulaire de mise en place, pourvu qu'elle soit essentiellement concentrée dans le plan théorique de déviation.

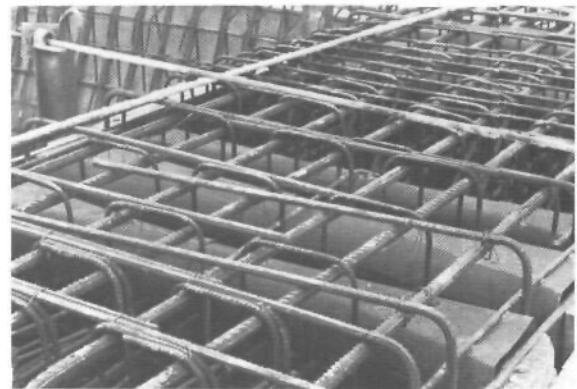
c) Diabolos

Ce sont des coques en tôle mince emboutie présentant une surface torique dont la courbure est adaptée à la déviation angulaire prévue et à l'incertitude dont on veut se prémunir.

Ces coques peuvent rester en place dans l'ouvrage ou au contraire n'être utilisées qu'à titre provisoire comme coffrages, le conduit prenant alors directement appui sur le béton dans la zone de déviation.



◀ Diabolos - Métro de Lille (photo Techniport)



▲ Diabolos tronqués - Métro de Lille (photo Techniport)

d) Tubes munis d'extrémités évasées

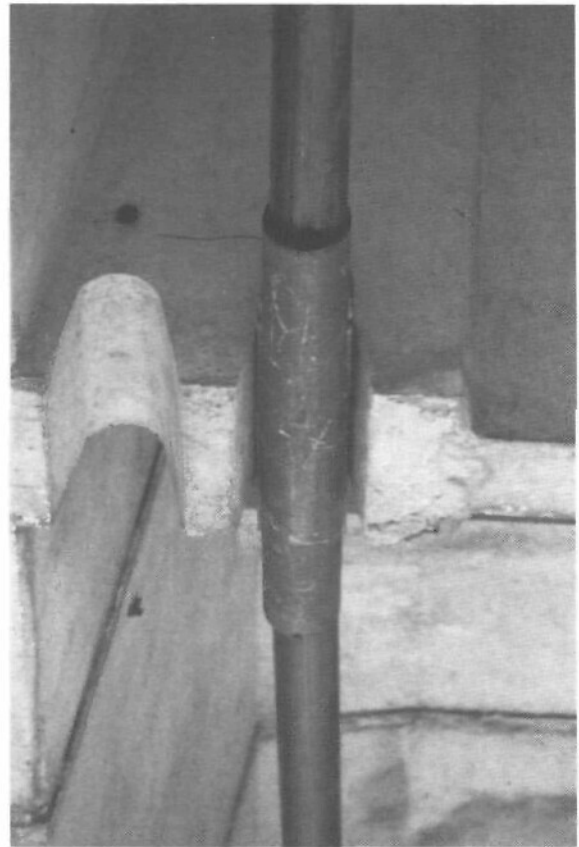
L'idée est la même que dans le cas précédent, à ceci près que la déviation théorique est réalisée par cintrage du tube, les évasements d'extrémité ne correspondant qu'aux erreurs possibles de mise en place.

e) Selles de déviation mobiles

Certaines entreprises ont conçu des selles métalliques ayant, au moins à titre provisoire, des possibilités de jeu à l'intérieur de réservations ménagées dans les entretoises de déviation. Ces selles prennent une orientation naturelle optimale lors de la mise en tension des câbles.



▲ Déviateurs mobiles - Viaduc de Saint-Agnant
(photo Freyssinet)



▲ Déviateur mobile - Détail
(photo Freyssinet)

4.3 Processus particuliers d'injection

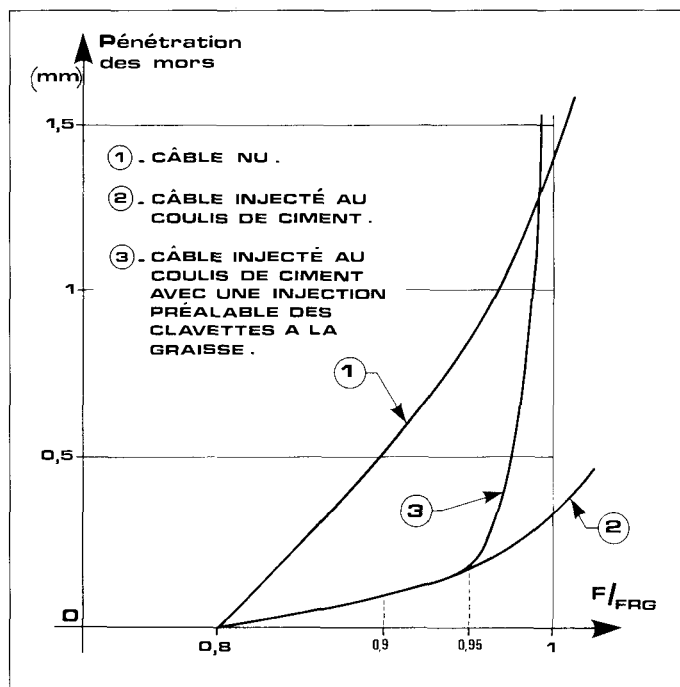
Différents distributeurs de précontrainte ont mis au point, pour leurs procédés à torons faisant appel au coincement par le moyen de mors constitués de deux ou trois clavettes, des dispositifs et des modes opératoires permettant une injection mixte des unités : coulis de ciment en partie courante et produit souple au voisinage des clavettes.

Ces dispositions correspondent aux préoccupations suivantes :

La réalisation du coincement conique, lorsqu'on relâche la pression dans le vérin, implique un déplacement longitudinal de quelques millimètres du toron et des clavettes bien connu des praticiens sous le nom de rentrée d'ancrage. De même, toute surtension ultérieure des armatures s'accompagne d'un mouvement additionnel de même nature. Lorsque, après mise en tension, on injecte au coulis de ciment, celui-ci vient remplir les interstices entre clavettes constitutives du mors, transformant ce dernier en un ensemble monolithique. Les clavettes ne peuvent plus se resserrer librement en progressant dans leur logement conique. Les seules possibilités de déplacement qui subsistent proviennent des déformations plastiques et l'on peut craindre qu'au-delà d'un certain seuil, des glissements ne se produisent faute d'une étreinte suffisante sur le toron.

Divers essais comparatifs entre environnements différents des clavettes (pas d'injection, injection à la graisse, injection au coulis de ciment) mis en place après application d'une tension initiale non négligeable (à plus de 50 % de la force de rupture) ont montré que :

- la rentrée additionnelle des clavettes jusqu'à rupture était fortement réduite par rapport aux autres cas lorsqu'on injectait au coulis de ciment,
- ce phénomène n'avait pas d'incidence importante sur les forces et allongements à rupture lorsqu'on opérait dans les conditions de propreté convenables,
- par contre lorsque les logements coniques des mors présentaient une rugosité à la limite de la tolérance et étaient, de surcroît, soumis à une légère oxydation, des glissements prématurés pouvaient se produire avec certains procédés.



◀ Courbes de rentrée des clavettes

De telles conditions ne devraient certes pas se rencontrer sur les chantiers. Il n'en demeure pas moins que le fait d'interdire la pénétration du coulis entre les clavettes apporte une garantie supplémentaire appréciable.

Pour atteindre cet objectif on peut remplir de cire ou de graisse :

- soit l'ensemble du capot et des évidements coniques de la tête d'ancrage en confinant, sous cette dernière, le produit souple au moyen d'un système presse-étoupe efficace,
- soit les seuls logements des clavettes à l'aide d'une pompe doseuse, sous réserve de ménager au coulis des circulations suffisantes pour lui permettre de remplir le capot.

Dans ce cas comme dans l'autre, l'injection au coulis n'est effectuée qu'après mise en place du produit souple.

Des dispositions particulières et une procédure stricte doivent interdire la pénétration d'une quantité significative d'eau dans le capot.

Remplacement d'un câble de précontrainte extérieure démontable

5.1 Généralités

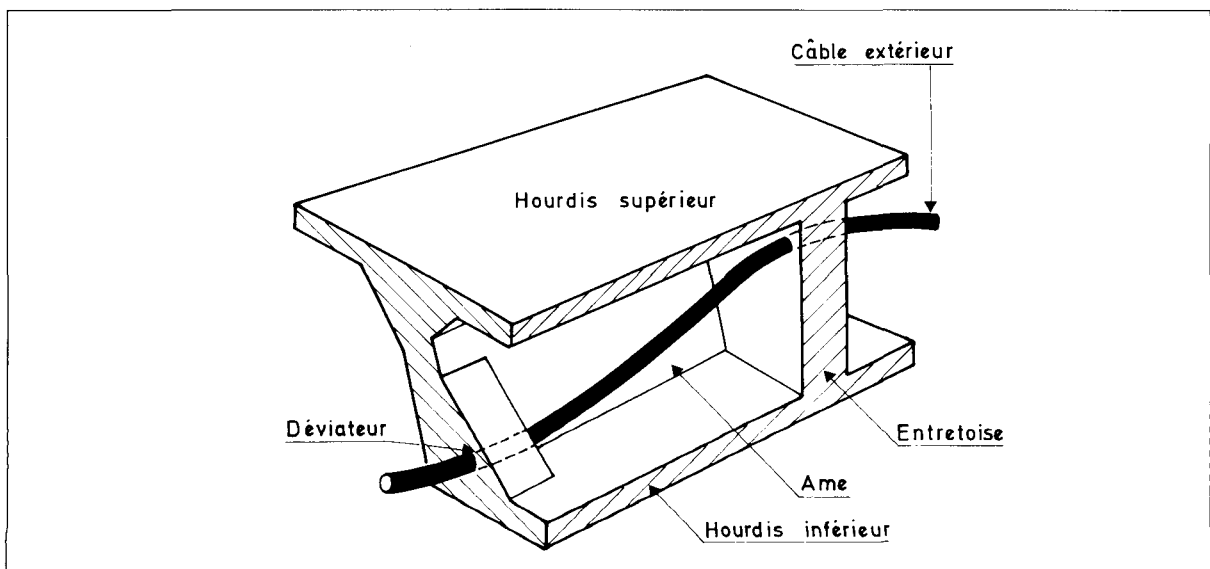
Ce chapitre concerne la conception générale des ouvrages neufs de façon à permettre le remplacement de la précontrainte extérieure.

Il définit des conditions liées à la démontabilité du câble, c'est-à-dire à la dépose du câble à remplacer et à la pose du câble de remplacement.

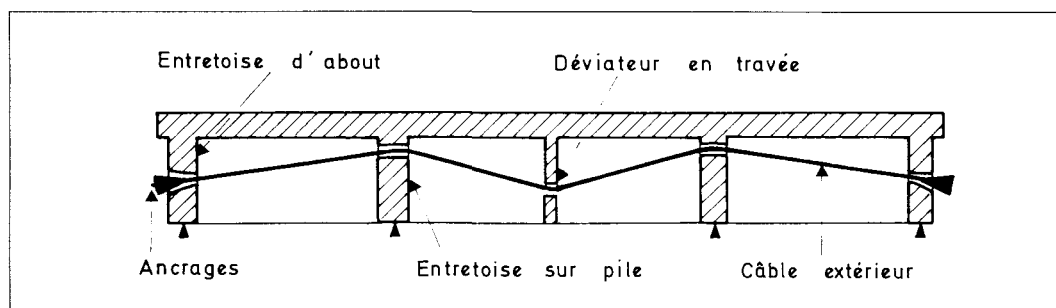
L'adoption de dispositions satisfaisant ces conditions rend souvent plus faciles, plus précises et moins coûteuses les opérations de pose de la précontrainte extérieure initiale.

L'avant-projet d'un ouvrage neuf doit définir des dispositions d'ensemble et de détails s'inspirant de ces conditions en vue de faciliter la démontabilité du câble.

Pour le renforcement d'un ouvrage ancien par précontrainte extérieure une vérification de faisabilité doit être effectuée à partir de ces mêmes conditions ; certaines conditions non satisfaites peuvent conduire à reconsidérer la conception du renforcement.



▲ Figure 1



◀ Figure 2

Par hypothèse, le remplacement décrit ci-après concerne un câble extérieur conçu à l'origine pour être démontable ; les figures 1 et 2 rappellent qu'un câble extérieur a habituellement un tracé en ligne brisée dont les points singuliers sont les ancrages et les passages dans les entretoises sur piles ou sur culées et dans les déviateurs en travée : des dispositions particulières doivent être prises dans les ancrages et au franchissement des entretoises et des déviateurs pour assurer la démontabilité.

5.2 Types de structures

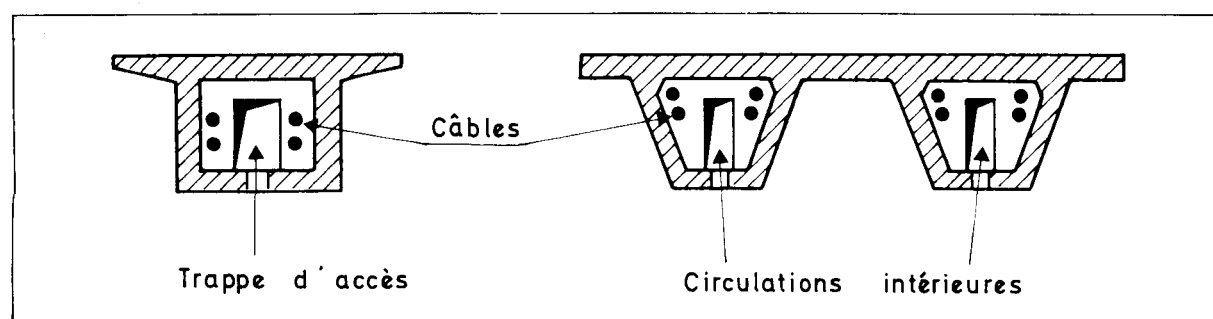
5.21 Structures fermées de type caisson

Ces structures schématisées sur les figures 3 et 4 offrent un ou plusieurs volumes internes avec un plafond, des voiles latéraux, verticaux ou inclinés, et un plancher sur lequel on peut circuler.

Les câbles extérieurs démontables sont habituellement situés à l'intérieur de ces volumes internes où il est possible de travailler dans de bonnes conditions.

Les conditions principales à satisfaire pour assurer convenablement la démontabilité consistent à :

- réserver **des accès permanents** à ces volumes intérieurs ;
- permettre **une circulation commode** à l'intérieur de ces volumes pour le personnel d'exécution, les matériaux, les matériels et le personnel de visite et d'entretien ;
- prévoir **un équipement minimum permanent de ces volumes** (éclairage, possibilité de ventilation et de fixation de monorails ...).



▲ Figure 3

▲ Figure 4

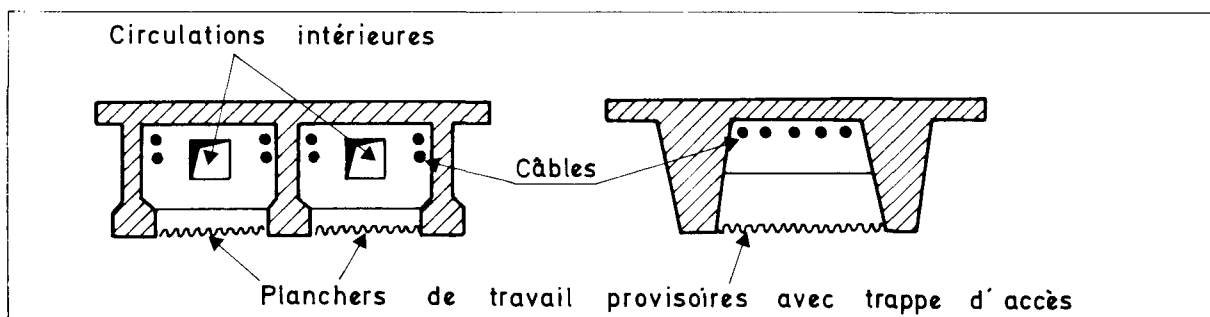
5.22 Structures ouvertes par en dessous

Ces structures schématisées sur les figures 5 et 6 sont du type ponts à poutres ou à nervures. Les volumes disponibles entre les poutres ou les nervures ne comportent pas de hourdis inférieur constituant un plancher de travail.

L'absence de hourdis inférieur assure une bonne accessibilité par le dessous aux câbles extérieurs démontables qui sont logés entre les poutres ou les nervures.

Les conditions principales à satisfaire pour assurer la démontabilité des câbles de manière convenable et économique consistent à :

- prévoir des dispositions permanentes dans la structure **pour installer des planchers de travail provisoires** entre poutres ou nervures et assurer **l'accès à ces planchers** ;
- assurer par rapport à ces planchers **une circulation commode** des personnels, matériaux et matériels, en particulier au droit des entretoises sur piles et des déviateurs en travée ;
- inclure dans l'ouvrage, entre les poutres ou nervures, **des dispositifs permanents minimums** (rails scellés, possibilités de fixation de monorails, de points de hissage ...).



▲ Figure 5

▲ Figure 6

5.23 Autres structures rencontrées

D'autres structures peuvent se rencontrer, par exemple celles schématisées aux figures 7 (type Charolles) et 8 (type Sylans ou Arbois).

Parmi les conditions de choix de ces structures, le Maître d'Œuvre doit analyser la faisabilité de la mise en place de la précontrainte extérieure initiale et du remplacement de celle-ci, compte tenu des conditions propres à chaque structure.

5.231 Structures fermées de section triangulaire à âmes pleines (figure 7)

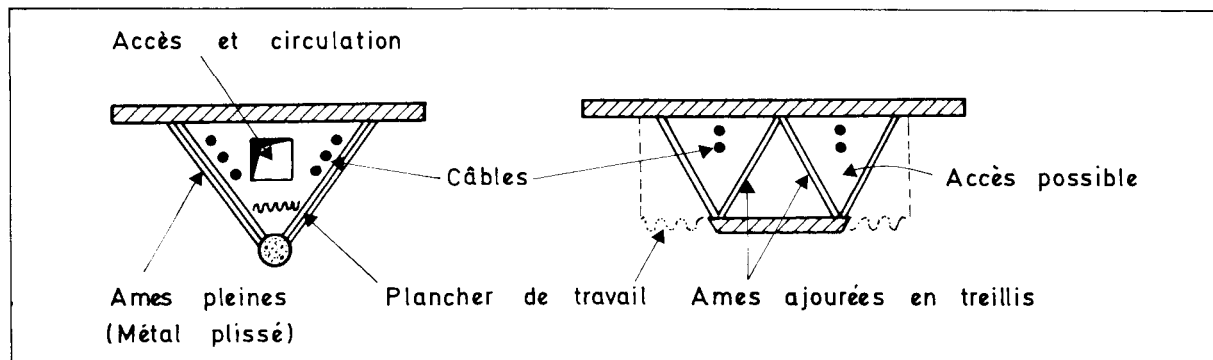
La caractéristique principale est l'absence de hourdis inférieur entraînant d'une part l'absence d'accès par le dessous au travers de trémies, et d'autre part, l'absence de plancher de travail. Les deux conditions principales se réduisent alors à :

- définir des accès et des passages suffisants dans les entretoises d'about, les entretoises sur piles et les déviateurs,
- prévoir un plancher de travail inférieur satisfaisant.

5.232 Structures fermées de type caisson à âmes en treillis (figure 8)

Leur caractéristique principale est d'avoir des âmes ajourées, habituellement inclinées, entre lesquelles circulent les câbles de précontrainte extérieure.

Si les accès des personnels, des matériaux et des matériels se font par l'extérieur de ces âmes ajourées, il y a lieu de prévoir à l'extérieur des caissons des points de fixation de suspentes permettant la mise en place des moyens d'accès correspondants.



▲ Figure 7

▲ Figure 8

5.3 Incidences des opérations de remplacement d'un câble extérieur

5.31 Phasage des opérations de remplacement

Le remplacement d'un câble de précontrainte extérieure démontable comprend les phases principales successives suivantes :

- P1 amenée à pied d'oeuvre des matériels nécessaires à la détension et l'évacuation du câble à remplacer
- P2 détension du câble à remplacer (figures 9, 10 et 11)
- P3 dépose et évacuation du câble détendu et de ses conduits (figures 12 et 13)
- P4 dégagement des parties remplaçables des ancrages démontables et des franchissements d'entretoises et de déviateurs (figure 14)
- P5 pose et réglage des nouvelles parties remplaçables des ancrages démontables et des franchissements d'entretoises et de déviateurs
- P6 amenée, pose et réglage des nouveaux conduits, y compris les étanchéités aux différents raccords et les dispositifs particuliers pour l'injection
- P7 amenée près des ancrages des câbles de remplacement et des matériels pour l'enfilage et la mise en tension
- P8 enfilage, mise en tension et injection des câbles de remplacement
- P9 évacuation des matériels
- P10 aux endroits nécessaires, éventuel nettoyage de l'ouvrage

Les différentes phases ci-dessus peuvent être regroupées dans les trois natures d'opérations suivantes :

- **Opérations délicates** : détension et dépose - Phases P2 et P3 (voir 5.33).
- **Opérations spécifiques** à la démontabilité - Phases P4 et P5 (voir 5.34).
- **Opérations traditionnelles** de précontrainte extérieure - Phases P1 et P6 à P 10 (voir 5.35).

5.32 PAQ et PHS du remplacement d'un câble

L'ensemble des phases décrites sommairement en 5.31 – en particulier les opérations « délicates » – imposent un certain nombre de précautions pour garantir la pérennité de l'ouvrage et la sécurité du personnel de mise en oeuvre.

D'autre part, elles font appel à des technologies spécifiques qui ne peuvent être fournies que par des spécialistes de travaux de précontrainte.

En conséquence, le marché des travaux de remplacement des câbles doit préciser la Société Distributrice du Procédé de Précontrainte retenu, à qui les opérations délicates et spécifiques ont été confiées par l'Entreprise ; il doit également comporter un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) et un Plan d'Hygiène et Sécurité (PHS) fournis par l'Entreprise dans lesquels sont définis :

- les moyens propres à assurer la pérennité de l'ouvrage (PAQ),
- les moyens propres à assurer la sécurité du personnel (PHS).

Les articles suivants 5.33, 5.34 et 5.35 donnent à titre indicatif une description sommaire des principales difficultés entraînées par les opérations définies en 5.31 ; ils ne sont pas exhaustifs et ne dispensent pas pour chaque affaire d'une analyse la plus approfondie possible. Ces articles décrivent des opérations liées aux ancrages courants actuels utilisant des pièces de coincement individuelles, de type clavettes. L'emploi éventuel d'autres types d'ancrages, par exemple mécaniquement démontables, peut être proposé par les Sociétés Distributrices des Procédés de Précontrainte.

5.33 Opérations délicates : détension et dépose

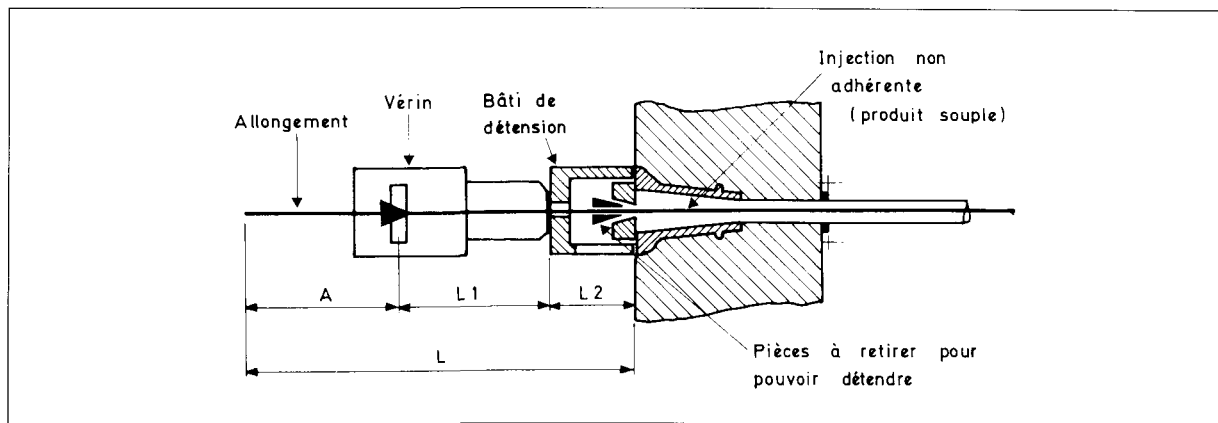
5.331 Détension des câbles (phase P2)

La phase P2 est celle qui représente le plus de risques : il faut en effet enlever l'effort d'un câble avant de l'extraire ou de le débiter.

a) Câble avec injection non adhérente (figure 9)

La détension se fait de préférence aux ancrages. On peut distinguer deux types d'ancrages :

– Ancrage actif détendable



▲ Figure 9

La surlongueur L de câble a été conservée et protégée dans un capot : on peut détendre avec un vérin ordinaire de mise en tension et un bâti de détension si on a :

$$L \geq A + L1 + L2$$

avec :

A = Allongement du câble à récupérer lors de la détension sur l'ancrage considéré (allongement défini dans l'étude de faisabilité visée en 5.41)

L1 = longueur de câble nécessaire à l'accrochage du mécanisme de traction du vérin

L2 = longueur du bâti de détension.

L'opération délicate consiste à enlever les pièces ayant réalisé l'ancrage initial (clavettes ...) à l'intérieur du bâti de détension alors que le câble subit momentanément une tension plus forte.

La détension toron par toron est également possible à l'aide d'un vérin monotoron et d'un dispositif approprié placé entre ce vérin et la tête d'ancrage.

– Ancrage recépé :

Il n'a pas été possible de conserver de surlongueur de câble derrière l'ancrage.

L'opération délicate consiste à libérer l'effort ancré.

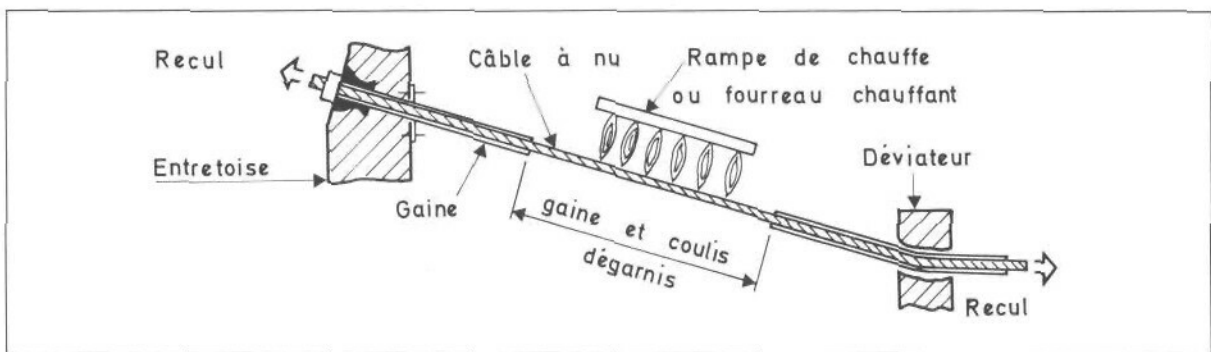
Il demeure possible d'effectuer une chauffe localisée successivement sur chacune des pièces de coincement de la tête d'ancrage : alors le câble glisse dans son ancrage et se détend.

Le risque principal est celui d'un recul brutal des pièces d'ancrage.

b) Câble avec injection adhérente (figure 10)

La détension se fait habituellement dans les parties courantes du câble dont il faut au préalable dégarnir la gaine et le coulis périphérique sur une longueur suffisante.

Une des méthodes possibles consiste à réchauffer localement le câble dans sa partie dégarnie jusqu'à ce qu'il se détende.

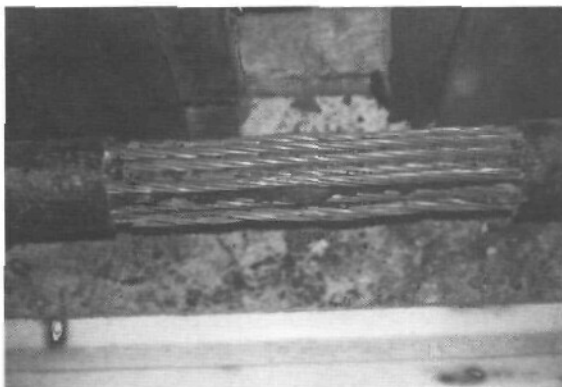


▲ Figure 10

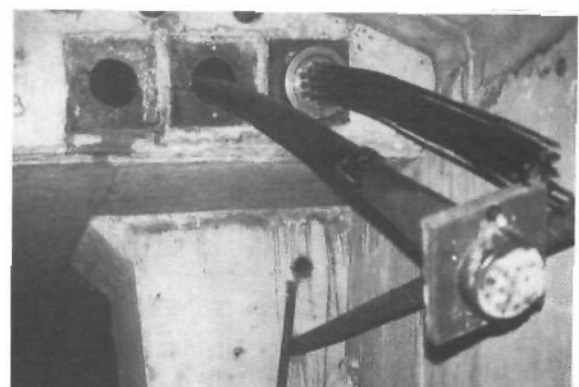
Une telle méthode exclut la détension simultanée de 2 câbles : son emploi implique donc que la structure ait été conçue pour supporter une dissymétrie transversale correspondant à un câble.

Les principales difficultés de cette opération délicate sont :

- les projections ou l'émanation de produits gazeux lors du dégarnissage de la gaine et du coulis périphérique,
- une gêne au glissement du câble le long de son tracé,
- un éventuel blocage du câble aux franchissements des déviateurs ou des entretoises et aux ancrages,
- une libération trop brutale de l'énergie emmagasinée dans le câble,
- un fouettement du câble ou de ses armatures constitutives,
- un recul important des pièces mâles des ancrages démontables.



▲ Dégarnissage de la gaine et du coulis périphérique avant coupe (photo J.-Y. L.)



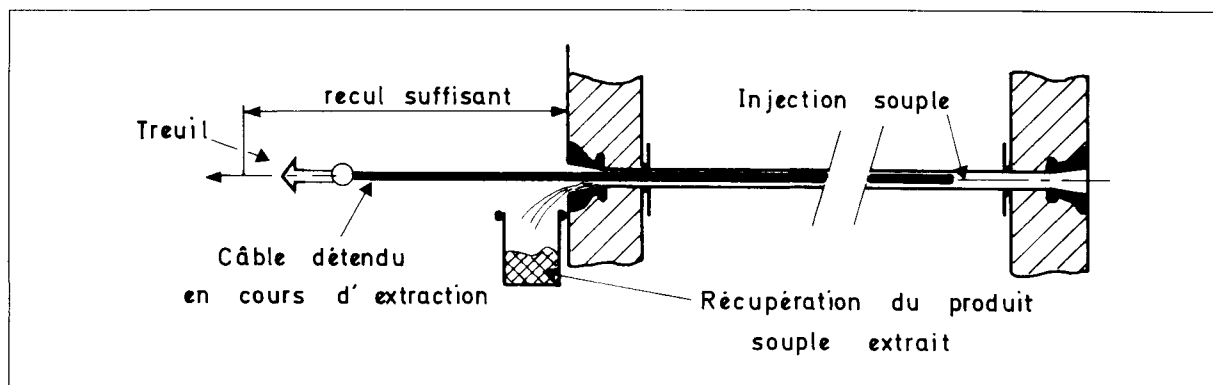
▲ Recul de la tête d'ancrage à la rupture du câble (photo J.-Y. L.)

5.332 Dépose et évacuation des câbles (phase P3)

La phase P3 présente moins de difficulté que la phase P2 mais nécessite néanmoins l'intervention de spécialistes pour que les pièces laissées dans le béton lors de la dépose ne soient pas endommagées et puissent assurer leurs fonctions ultérieures pour le câble de remplacement (en particulier jonctions aux nouveaux conduits extérieurs et étanchéité).

On peut distinguer deux types de dépose d'un câble détendu :

a) Extraction d'un câble non adhérent détendu (figure 11)



▲ Figure 11

Si le recul est suffisant à une extrémité du câble, on peut tirer avec un treuil la totalité du câble hors de son conduit en le sectionnant au fur et à mesure.

Cette opération risque d'entraîner hors des conduits du produit souple d'injection dont il faut protéger le personnel et les faces exposées de béton et dont il importe de prévoir la récupération et l'évacuation.

Normalement, les conduits initiaux ne sont pas à utiliser pour les câbles de remplacement. Cependant, si le maître d'oeuvre autorise la conservation et le réemploi de ces conduits laissés en place après extraction d'un câble, il faut vérifier que :

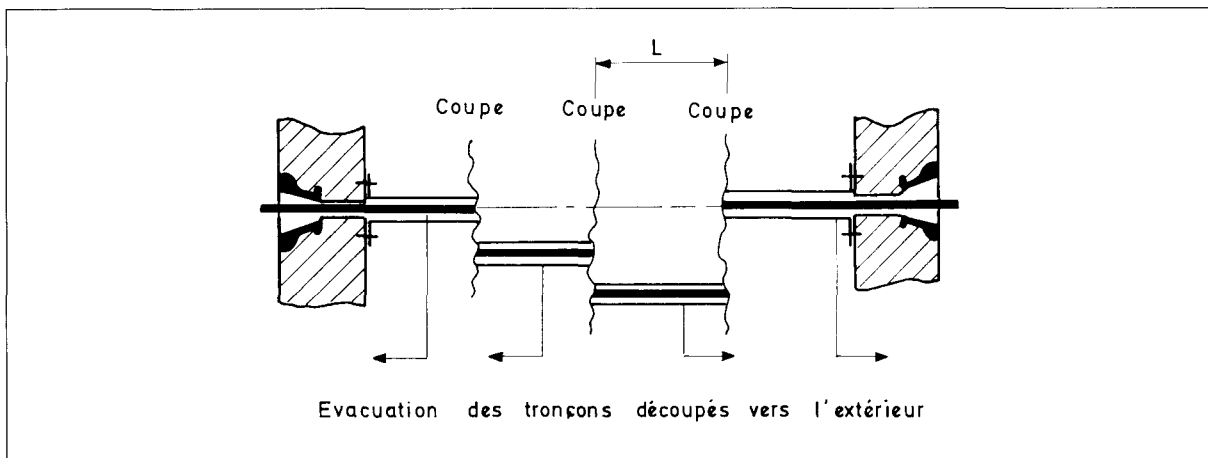
- leur tracé respecte le tracé théorique requis,
- ils ne sont pas endommagés,
- leur intérieur a été débarrassé des résidus de produit souple,
- les étanchéités sont satisfaisantes à tous les raccordements.

b) Tronçonnage d'un câble détendu (figure 12)

On sectionne en place le câble et son conduit en tronçons de longueur L compatible avec les poids pouvant être manutentionnés et les singularités du parcours d'évacuation jusqu'à l'extérieur de l'ouvrage.

Cette opération entraîne des projections, des dégagements de poussière et de gaz divers ...: il est donc nécessaire de prévoir une ventilation adaptée.

Dans le cas d'une injection au produit souple, il convient évidemment de prendre les mêmes précautions qu'en a).

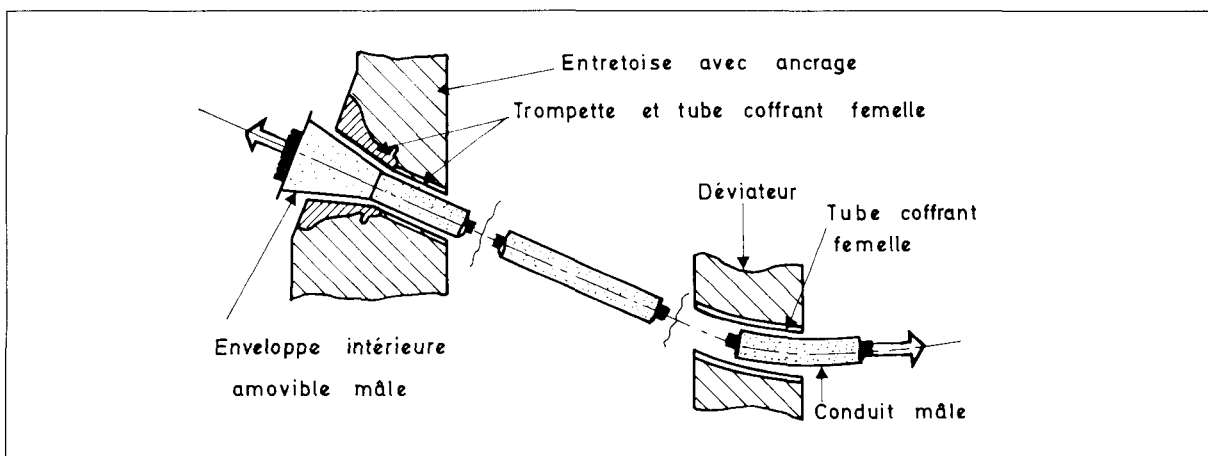


▲ Figure 12

5.34 Opérations spécifiques à la démontabilité des câbles injectés au coulis

Les phases P4 et P5 concernent des câbles injectés au coulis de ciment et dont la démontabilité requiert à chaque franchissement de pièces en béton une partie femelle laissée dans le béton et une partie mâle, contenant le câble et le coulis, qui puisse être enlevée et remplacée.

La figure 13 ci-dessous schématise le principe du dégagement des parties remplaçables des ancrages et des déviateurs :



▲ Figure 13

Les ancrages démontables sont définis par la **Notice Technique de Précontrainte Extérieure du Procédé utilisé** : le PAQ s'y réfère pour préciser la partie mâle remplaçable des ancrages de façon à assurer une parfaite compatibilité avec la partie femelle mise en place lors de la précontrainte initiale.

Les franchissements sans ancrage d'entretoises ou de déviateurs sont définis par le **Bureau d'Etudes de l'Entreprise** en vue de la mise en oeuvre de la précontrainte initiale : celui-ci doit **fournir un document** décrivant le démontage et la partie mâle de remplacement.

5.35 Opérations traditionnelles de précontrainte extérieure

Les phases P1 puis P6 à P10 sont sensiblement analogues à celles de l'installation de la précontrainte extérieure initiale.

La différence essentielle est que les câbles de remplacement sont à mettre en oeuvre dans un ouvrage totalement terminé et habituellement en service alors que la précontrainte initiale a été installée en cours de construction et parfois à l'avancement.

Ces opérations sont grandement facilitées par le maintien dans l'ouvrage des dispositions principales d'accès et de fixation utilisées lors de la précontrainte initiale (voir les recommandations diverses de l'article 5.4).

Elles impliquent :

- la définition d'un programme de mise en tension des câbles de remplacement respectant une symétrie suffisante pour l'ouvrage, quitte à prévoir des précontraintes partielles provisoires avec des dispositions particulières adaptées,
- la mise au point d'un programme d'injection des câbles tenant compte des difficultés d'accès aux ancrages (on peut en particulier prévoir des piquages aux points bas des conduits en travée à partir desquels est réalisée l'injection).

5.4 Recommandations pour la conception générale d'un ouvrage

5.41 Documents à établir pour le remplacement de la précontrainte extérieure

Le dossier de récolement d'un ouvrage comportant des câbles extérieurs démontables doit comporter :

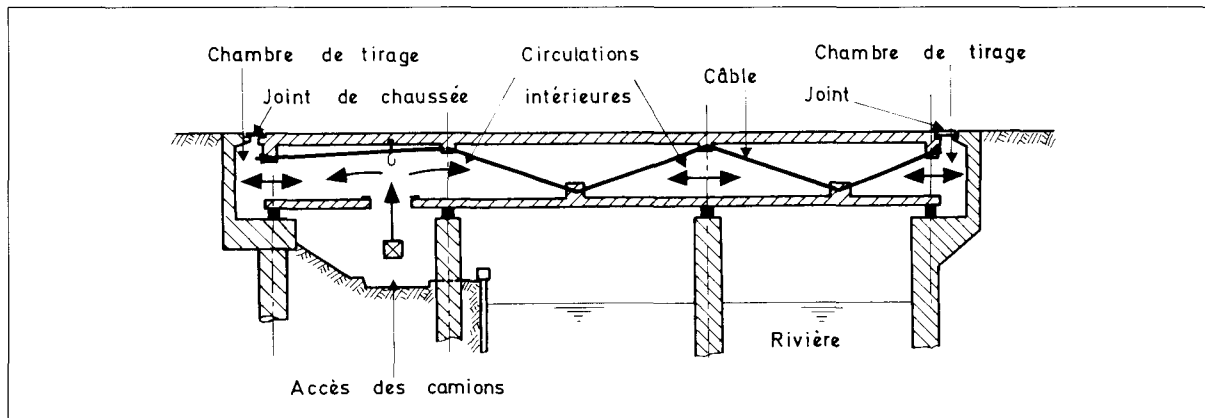
- un plan d'accès à la précontrainte extérieure,
- une étude de faisabilité du remplacement des câbles extérieurs.

a) Plan d'accès à la précontrainte extérieure (figure 14)

Il doit indiquer :

- les voies permettant d'amener jusqu'à l'ouvrage des engins de capacité suffisante pour approvisionner les matériaux et le matériel nécessaires à la surveillance ou au remplacement des câbles,
- les points d'entrée dans la structure avec les portes ou trappes à ouvrir, la procédure pour se procurer les clés, les points d'accrochage de palans ou de treuils (avec la charge utile en chaque point),

- les trajets internes jusqu'aux câbles et aux ancrages en précisant :
 - les équipements disponibles (éclairage, électricité ...) et leur mode d'emploi,
 - les dispositifs de différentes natures laissés en place dans l'ouvrage pour faciliter la manutention
 - les espaces utilisables compte tenu de la présence d'éventuelles canalisations de concessionnaires.



▲ Figure 14

b) Étude de faisabilité du remplacement

Cette étude qui fait partie du dossier d'exécution d'origine doit définir :

- le procédé de précontrainte et les unités utilisées,
- le tracé de principe de chaque câble,
- la position des entretoises et des déviateurs,
- la position des ancrages fixes et des ancrages actifs avant et après remplacement éventuel (la nature d'un ancrage pouvant changer lors du remplacement),
- les gabarits à réserver impérativement (au voisinage des ancrages et des points d'accès notamment)
- la position des chambres de tirage,
- le principe de démontabilité des ancrages et des traversées d'entretoises et de déviateurs.

L'étude de ces éléments, à effectuer le plus tôt possible lors de l'établissement du projet d'exécution d'un ouvrage, permet d'éviter des dispositions malheureuses qui risqueraient de rendre impossible le remplacement ultérieur d'un câble.

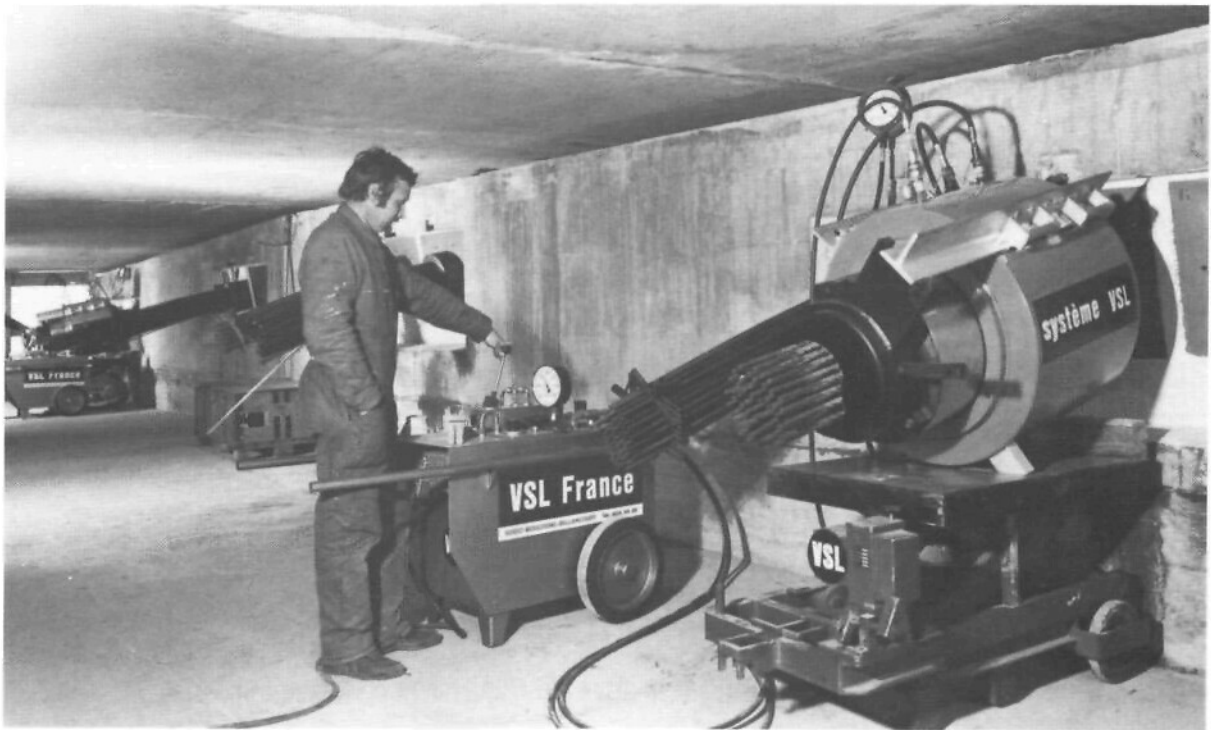
5.42 Aménagement des culées

La conception des culées doit réserver un espace libre appelé « **chambre de tirage** » entre les faces en regard de la murette garde grève de la culée et de l'entretoise d'extrémité du tablier (figure 15).

La longueur minimale de cet espace libre, comptée sur l'axe longitudinal de l'ouvrage, est de :

- **1 mètre**, si les ancrages sur l'entretoise sont des ancrages fixes ;
- **2 à 3 mètres**, si les ancrages sur l'entretoise sont des ancrages actifs : cette longueur doit tenir compte de l'unité de précontrainte, des dimensions du vérin de tension et de son dispositif de détension ainsi que de l'allongement du câble (figure 9).

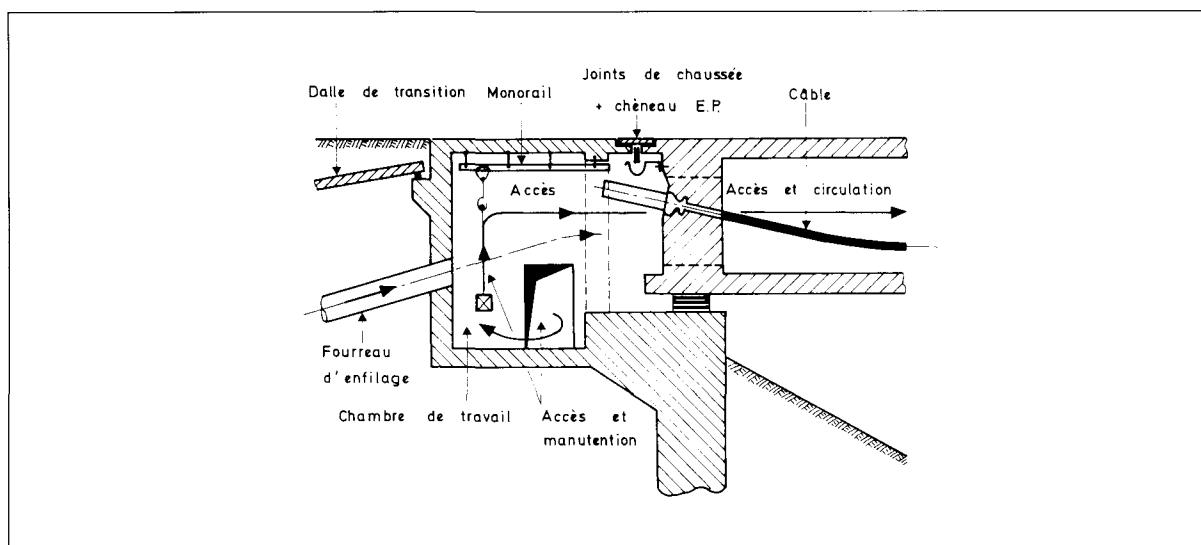
Quand c'est possible, dans au moins une des culées, il est judicieux de prolonger cette chambre de tirage entre les murs en retour et l'ensemble murette garde grève/mur de front. Cette chambre de tirage devient alors une véritable chambre de travail. Une porte d'accès de dimensions suffisantes permet d'évacuer les câbles à remplacer et d'introduire les matériaux et les matériels nécessaires aux câbles de remplacement, l'ensemble des opérations se faisant alors dans l'axe longitudinal de l'ouvrage.



▲ Chambre de travail (photo VSL)

Cet aménagement de culée n'est à prévoir que si l'importance de l'ouvrage et de la circulation sur la voie portée le justifient.

La présence sur culée de joints de chaussée et de dispositifs de récupération et d'évacuation des eaux pluviales doit être prise en compte dans le choix de la position des ancrages les plus hauts de l'entretoise sur culée.

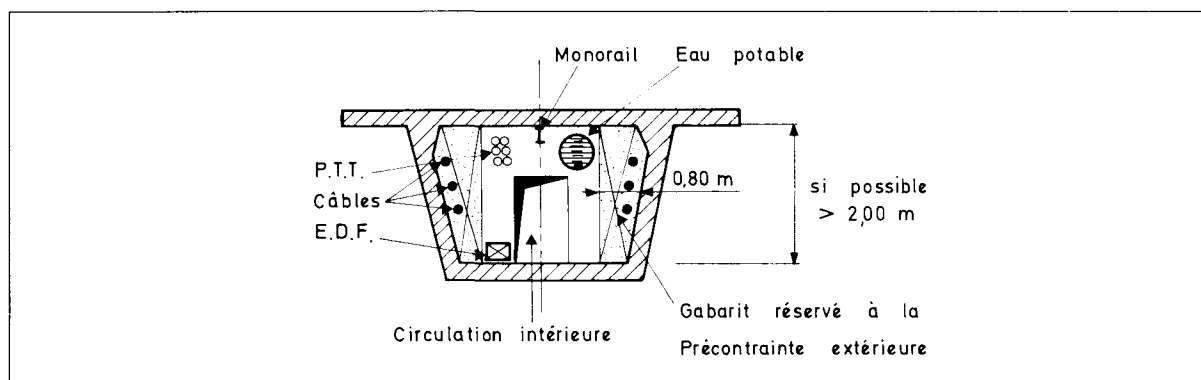


▲ Figure 15

5.43 Coupes transversale et longitudinale de la structure

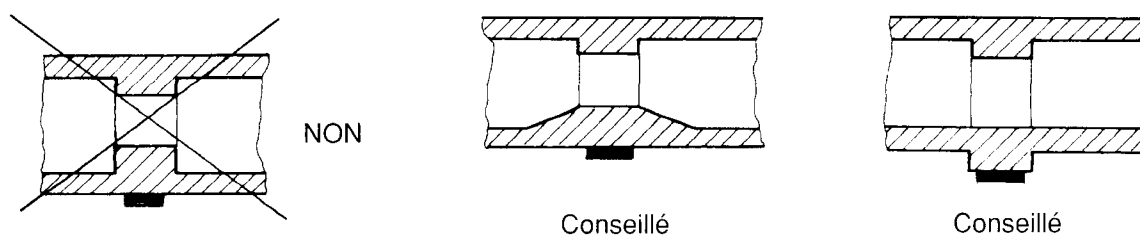
Il convient notamment de :

- **définir des gabarits** de circulation des matériaux et des matériels permettant le travail du personnel et la maintenance du câblage (figure 16). La conception et l'emplacement des conduits des services concessionnaires éventuels ou d'autres équipements doivent tenir compte de ces gabarits ;



▲ Figure 16

- pour les structures fermées, **se limiter à des variations de niveaux modérées et continues du dessus du hourdis inférieur** en particulier au droit des entretoises sur appuis ; quand c'est possible, une poutre en retombée sous extrados est préférable à une poutre en saillie sur l'intrados (figure 17).



▲ Figure 17

5.44 Plan du câblage extérieur

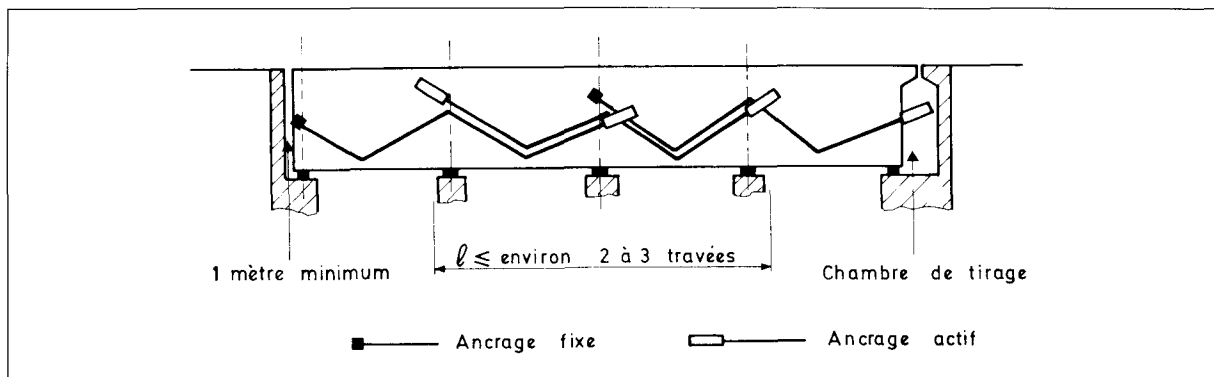
Le dégagement derrière les ancrages actifs, en particulier ceux situés les plus près des parois en béton (âmes, hourdis...), doit permettre la mise en place et le fonctionnement du vérin de tension. Pour chaque unité de précontrainte utilisée, il faut tenir compte des données fournies sur une fiche « Dégagement derrière un ancrage de précontrainte extérieure » dont les éléments principaux sont schématisés sur la figure 19.

Quand il est prévu des ancrages actifs sur l'entretoise d'about, il faut ménager une chambre de tirage suffisante sur culée.

En l'absence d'une telle chambre, il convient de disposer des ancrages fixes sur l'entretoise d'about et des ancrages actifs demeurant accessibles au vérin sur les entretoises intermédiaires (figure 18).

La limitation de la longueur d'un câble à 2 ou 3 travées facilite les opérations de dépose et de remplacement : on peut alors réaliser un câblage filant en plusieurs câbles successifs avec croisement et ancrages sur les entretoises intermédiaires (figure 18).

Un choix judicieux de la force unitaire des câbles permet d'obtenir un programme de remplacement des câbles le plus souple et le plus symétrique possible.



▲ Figure 18

1. Unité de précontrainte :

2. Vérin de mise en tension :

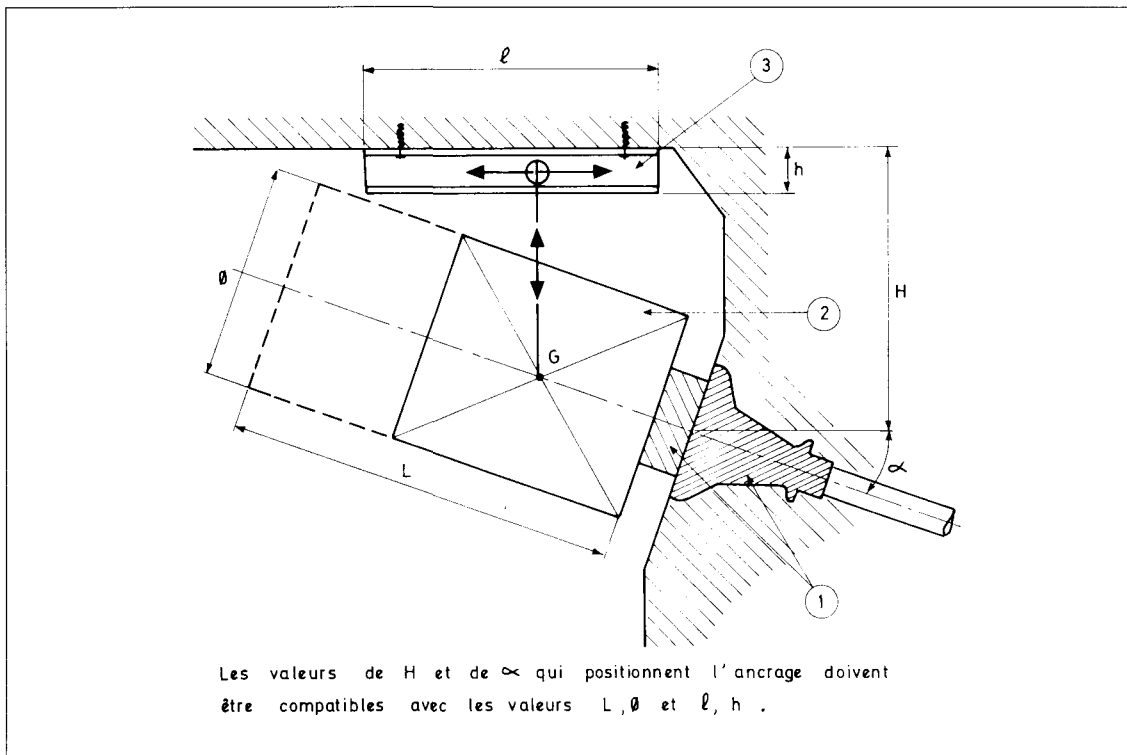
Type : _____

Masse : _____

Gabarit de passage L x Ø _____

3. Système de suspension :

Dimensions l x h _____



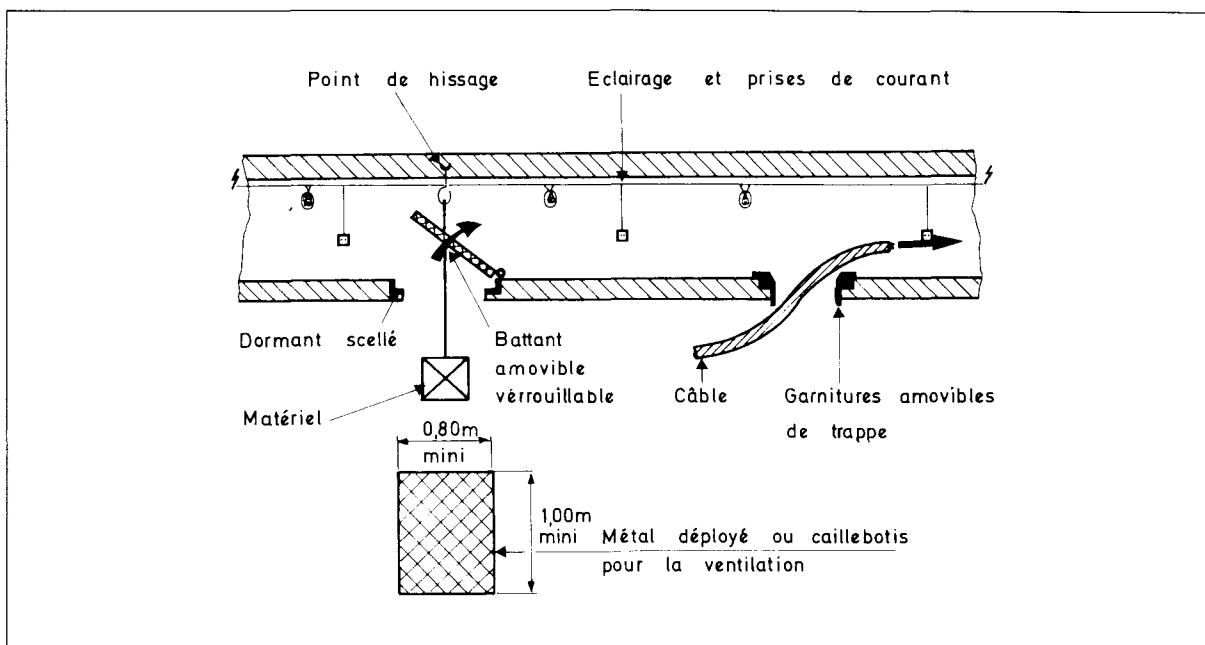
▲ Figure 19 - Dégagement derrière un ancrage de précontrainte extérieure

Les valeurs de H et de α qui positionnent l'ancrage doivent être compatibles avec les valeurs L, \varnothing et l, h.
 Dans le cas d'ancrage détachable, le couple L, \varnothing doit tenir compte de l'encombrement du bâti de détension.

5.45 Accès aux câbles des structures fermées

Si l'accès à la précontrainte extérieure défini en 5.41 nécessite la réalisation de trappes dans le hourdis inférieur des structures fermées, les dispositions suivantes (figure 20) sont à retenir :

- les trappes de préférence carrées ou rectangulaires (pour faciliter l'introduction et l'évacuation des matériaux et des matériels) doivent dégager un gabarit minimum de 1,00 m x 0,80 m.
- elles sont équipées d'un dormant scellé dans le béton et d'un battant articulé amovible verrouillable ;
- pour assurer une bonne ventilation de la structure fermée, le battant de la trappe est ajouré.



▲ Figure 20

Il est conseillé par ailleurs de prévoir dès la construction :

- l'éclairage intérieur des caissons et une alimentation électrique (fournissant une puissance comprise entre 5 kVA et 10 kVA) permettant, de part en part, l'utilisation de petits outillages électriques. La mise sous tension de l'installation s'effectue par une armoire-interrupteur général, verrouillable et accessible en permanence par le représentant du Maître d'Ouvrage,
- des points d'ancrage, en sous-face du hourdis supérieur, pour fixer des palans ou des treuils de capacité adéquate (minimum 20 kN) au droit des trappes d'approvisionnement.

Pendant les travaux, il y a lieu, en outre :

- lorsque des câbles transitent par une trappe, de garnir le périmètre du dormant de protections provisoires adéquates pour éviter de blesser les armatures,
- si le tirage naturel ne suffit pas, de prévoir une ventilation mécanique forcée (notamment lors de l'emploi d'un chalumeau ou d'une meule) de façon à respecter les règles d'hygiène et de sécurité.

5.46 Accès aux câbles des structures ouvertes

Des dispositifs spéciaux sont à sceller dans la structure de l'ouvrage pour permettre la fixation des éléments porteurs principaux des planchers de travail amovibles.

Les planchers de travail provisoires montés sur ces éléments porteurs doivent :

- être **capables de porter les matériaux** avant leur mise en oeuvre ainsi que les **matériels et le personnel** nécessaires à cette mise en oeuvre.
- réserver des **passages libres** pour hisser les matériaux et les matériels approvisionnés sous l'ouvrage aux emplacements définis au plan d'accès.

Au droit de ces passages, il convient de disposer en sous face de la dalle du tablier **des points d'ancrage pour fixer des palans ou des treuils** ayant la capacité adéquate (**minimum 20 kN**).

5.47 Dispositifs de fixation à inclure dans l'ouvrage

Les pièces écrites du Dossier de Consultation des Entreprises doivent prévoir les différents dispositifs à incorporer dans le béton de l'ouvrage pour faciliter la démontabilité de la précontrainte extérieure. **Un document annexé au plan d'accès à la précontrainte extérieure indique de manière détaillée :**

- la nature des dispositifs : douilles, chevilles, fourreaux, traversant les âmes ou les hourdis, rails de fixation ...
- les diamètres, les espacements, les implantations, etc..., de ces dispositifs,
- les capacités de ces dispositifs (force portante ...).

Il est rappelé que ces dispositifs ont à remplir les fonctions suivantes :

- ancrage des palans ou des treuils au droit des trappes dans le hourdis inférieur ou des passages dans le plancher de travail,
- fixation des éléments porteurs principaux des planchers de travail des structures ouvertes,
- fixation du ou des monorails de desserte,
- ancrage des supports des matériels de précontrainte près des ancrages actifs (détendables ou non).

Deuxième partie

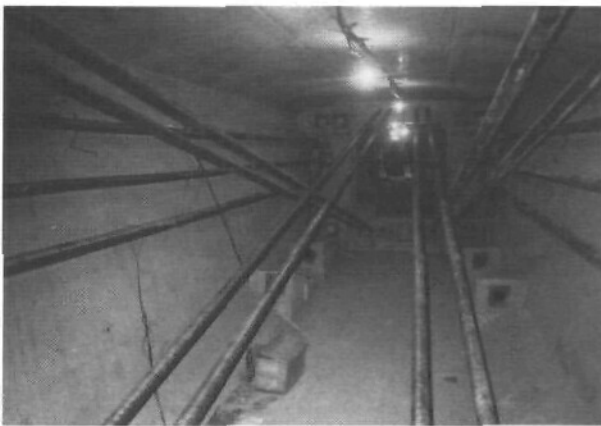
PRESCRIPTIONS ET SPÉCIFICATIONS



▲ Cintreuse (photo Techniport)

* Les conduits pour câbles provisoires ne sont pas injectés. Leur rôle consiste à :

- faciliter la mise en place des câbles,
- les protéger contre d'éventuelles agressions mécaniques,
- empêcher le fouettement d'une armature en cas de rupture accidentelle.



◀ Intérieur du tablier de Charix en cours de poussage.
Câbles définitifs sous conduits en PEHD,
câbles antagonistes provisoires sous gaines en feuillard.
(photo R. Chaussin)

** Dans le cas d'une injection au coulis de ciment, le coulis une fois durci exerce un effet répartiteur très favorable à la tenue à long terme du conduit.

1.1 Matériaux et type de tube

* D'autres matériaux peuvent être utilisés, dans certains cas, après avis du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, par exemple :

- une matière plastique (autre que le PEHD), à l'exclusion de celles qui sont susceptibles de libérer des radicaux chimiques agressifs vis-à-vis des produits d'injection ou des aciers à haute résistance,
- un matériau composite (résine armée de fibres de verre, par exemple).

Ces matériaux doivent permettre de satisfaire aux exigences générales sur les conduits.

1

Conduits

Les prescriptions et spécifications qui suivent concernent les conduits pour câbles extérieurs au béton assurant la précontrainte définitive des ouvrages, quelle que soit la nature du produit d'injection utilisé (coulis de ciment, graisse, cire ...). Elles ne s'appliquent pas aux conduits des câbles employés à titre provisoire, pendant la construction.*

Les caractéristiques des conduits en cause doivent permettre de satisfaire aux exigences suivantes :

- mise en oeuvre dans de bonnes conditions,
- propreté avant enfilage des câbles,
- absence d'agressivité des matériaux constitutifs vis-à-vis des produits d'injection et des câbles,
- résistance à la pression d'injection maximum proposée par l'entrepreneur dans le cadre du PAQ, compte tenu de la température maximale du produit injecté définie par ce même document,
- résistance à la pression de contact exercée par les câbles dans les zones courbes lors de la mise en tension,
- résistance à long terme à la pression de contact exercée par le câble dans les zones courbes, dans le cas d'une injection par produit souple,**
- bonne tenue au vieillissement (notamment vis-à-vis des ultra-violets pour les conduits exposés à la lumière).

1.1 Matériaux et type de tube

Sauf disposition contraire du marché, les tubes sont en polyéthylène à haute densité ou en acier.

** En pratique, pour les unités et les conduits les plus couramment employés (voir 1.11 et 1.12), les diamètres extérieurs minimaux utilisables sont donnés dans le tableau ci-après :

Unités	Tubes en acier	Tubes en polyéthylène série S8
7 T 15	76.1	75
12 T 15	80	90
19 T 15	101.6	110
27 T 15	114.3	125
37 T 15	139.7	140

1.11 Tubes en polyéthylène à haute densité

* La série S8 est la plus couramment utilisée.

La série S 12.5 n'est envisageable qu'en partie droite, à moins que le câble soit constitué de torons gainés-protégés, le tube étant injecté au coulis de ciment avant leur mise en tension.

La série S5 ne se justifie que lorsque le tracé du câble implique une pression d'injection importante (supérieure à 1 MPa).

Dans chacune de ces séries, à un diamètre extérieur donné correspond une épaisseur de tube bien définie.

** La pression nominale est la pression d'eau maintenue constante que le tube doit supporter sans défaillance et avec une sécurité convenable pendant 50 ans à la température de 20 °C. En fait dans un essai de courte durée à 20 °C, les tubes sont capables de résister à une pression de l'ordre du triple de leur pression nominale.

1.12 Tubes en acier

Le diamètre intérieur d'un conduit doit être au moins égal à $1,7 \sqrt{A_p}$, A_p représentant la section nominale de l'ensemble des armatures constituant l'unité.**

1.11 Tubes en polyéthylène à haute densité

Il s'agit de tubes conformes à la norme NF T 54-072 obtenus à partir de matière de base conforme à la norme NF T 54-044.

Le matériau est un polyéthylène PE 5-3 de catégorie B (résistant aux U.V.), présentant une teneur en anti-oxydants supérieure à 1000 p.p.m (mesure effectuée selon la méthode d'essai n° 32 du LCPC).

Le tube appartient à l'une des classes de pression de la série* suivante :

- Série S 12,5, pression nominale ** 0,4 MPa - PN 4,
- Série S 8, pression nominale 0,6 MPa - PN 6,
- Série S 5, pression nominale 1,0 MPa - PN 10.

Si les tubes sont livrés en couronnes (voir 1.21 ci-après) dont le diamètre est inférieur à 30 fois leur diamètre, ils doivent présenter une aptitude particulière de résistance à la fissuration sous contrainte. Celle-ci est appréciée par un essai effectué selon la méthode d'essai n° 32 du LCPC. L'essai est considéré comme satisfaisant si aucune fissuration n'est constatée après 72 heures d'immersion dans un liquide tensio-actif.

1.12 Tubes en acier

Les aciers utilisés sont de nuance et qualité minimale E 235-2.

Les tubes sont des tubes ronds soudés formés à froid à partir de produits laminés à chaud, conformes aux normes NF A 49-642, ou NF A 49-643 ; ou encore des profils creux circulaires conformes aux normes NF A 49-501 ou NF A 49-541.

* Si, pour des raisons particulières, un rayon $R < 20 \varnothing$ est prévu dans l'ouvrage, un essai de cintrage selon un rayon $R' = 0,8 R$ est à effectuer.

Pour de faibles rayons, on peut utiliser des tubes étirés. L'attention est attirée sur le fait que, dans ce cas, les coefficients de frottement sont sensiblement majorés.

1.2 - Conditionnement

1.2.2 Tubes en acier

* De bonnes précautions, pour éviter une telle oxydation consistent à huiler les tubes et à obturer leurs extrémités.

1.3 Stockage

* Une telle dérogation peut se trouver justifiée par des délais de transport importants. Il convient alors de protéger les tubes de la lumière solaire pendant tout le temps du transport et du stockage, étant entendu que, même dans le cas où le délai d'un mois est respecté, une telle précaution est fortement recommandée.

L'épaisseur du tube doit respecter les conditions suivantes :

$$e \geq \begin{cases} \frac{\varnothing}{50} \\ 1,5 \text{ mm} \end{cases}$$

où \varnothing désigne son diamètre extérieur. Si, en outre, il est prévu d'assembler des tronçons de tubes par soudage, il faut :

$$e \geq 3 \text{ mm}$$

Le tube doit être cintrable à froid sur un rayon de $20 \varnothing$.*

1.2 Conditionnement

1.21 Tubes en polyéthylène

Seuls les tubes dont le diamètre extérieur est inférieur à 70 mm peuvent être livrés en couronnes. Pour des diamètres plus importants, la présentation requise est l'élément droit.

Le marquage des tubes est conforme aux prescriptions de la norme NF T 54 -072.

1.22 Tubes en acier

Ils sont livrés en longueurs droites et accompagnés d'un certificat de matière.

Tout tube présentant une oxydation adhérente généralisée est refusé.*

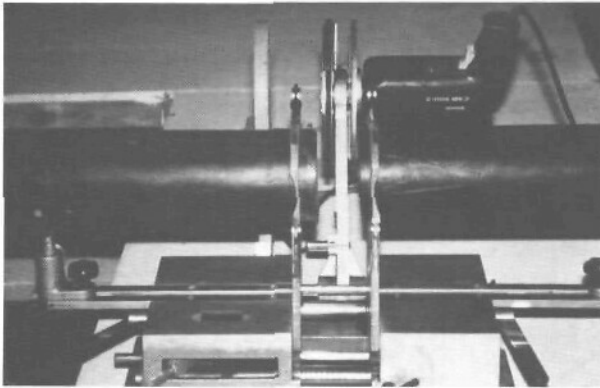
1.3 Stockage

Les prescriptions du fascicule 65 A du CCTG relatives au stockage des conduits s'appliquent.

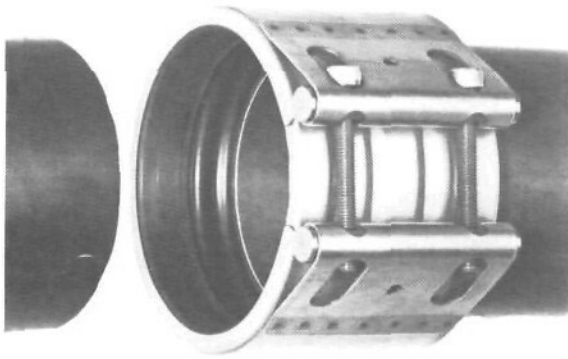
En ce qui concerne les tubes en polyéthylène, les conditions supplémentaires suivantes doivent être respectées :

- pour les tronçons droits, la distance entre points d'appuis est limitée à 3 mètres et la hauteur de gerbage à 1,50 m,
- sauf dérogation accordée par le Maître d'Œuvre*, les tubes livrés en couronnes sont déroulés au maximum un mois après la date de leur fabrication.

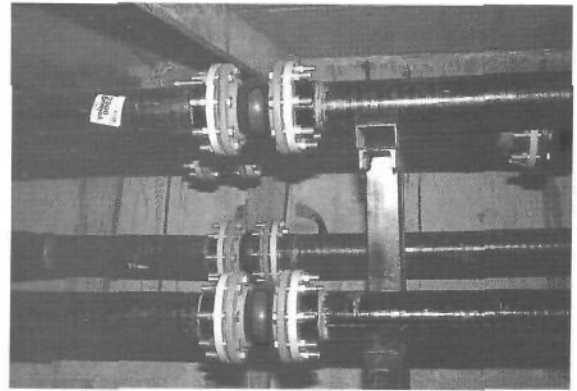
1.4 Assemblages, raccords et joints de déplacement



◀ Soudage au miroir d'un conduit en PEHD
(photo Freyssinet)



▲ Raccord étanche Straub-Flex (photo Straub)



▲ Raccords mécaniques pour conduits en fibre de verre
(photo A. Chabert)

1.42 Tubes métalliques

* Une épaisseur minimale de 3 mm s'impose alors pour le tube (voir 1.12).

1.4 Assemblages, raccords et joints de déplacement

Un assemblage ne doit pas constituer un point faible. Il est donc nécessaire que deux tronçons assemblés satisfassent aux mêmes critères qu'un tronçon unique en ce qui concerne l'étanchéité, la tenue à une pression interne et, si besoin, la résistance à la traction.

D'une façon générale, la démonstration de l'efficacité d'un type d'assemblage ou de raccord mécanique (notamment s'il s'agit du raccordement de deux matériaux de natures différentes) est à la charge de l'entrepreneur. Elle peut résulter soit d'essais de convenance, soit de références antérieures ayant fait l'objet de procès verbaux établis par un organisme officiel. Dans un cas comme dans l'autre, les conditions de mise en oeuvre, particulièrement en ce qui concerne les problèmes d'encombrement et de place disponible pour réaliser les opérations de raccordement doivent être représentatives de celles que permettent les dispositions retenues pour le chantier en cause.

Pour les tubes en polyéthylène, des joints de déplacement, destinés à rattraper le mou du conduit, sont à prévoir dès que la longueur du câble dépasse 100 m.

1.41 Tubes en polyéthylène

L'assemblage est fait par thermofusion, soit par soudage au miroir soit par utilisation d'un raccord électrosoudable.

Les coupes des tronçons à assembler doivent être d'équerre.

1.42 Tubes métalliques

L'assemblage peut être réalisé :

- par soudage bout à bout,*
- par manchonnage et étanchéité,
- par tulipage complété soit par une étanchéité soit par un collage.

1.5 Protection anticorrosion des tubes métalliques

Les tubes métalliques doivent être protégés extérieurement par une peinture donnant une garantie d'anticorrosion de 4 ans au degré Ri 3.

1.6 Piquages pour événements et injections

1.61 Tubes en polyéthylène

* Il est toutefois recommandé, dans la mesure du possible, de réaliser les perçages avant la mise en place des câbles.

1.7 Vases d'expansion

* Le volume d'expansion à prévoir est au moins :

$$\Delta V = V (\alpha_3 - 2 \alpha) (T_{max} - T_0)$$

où V représente le volume du conduit, α_3 le coefficient de dilatation cubique du produit d'injection et α le coefficient de dilatation linéaire du matériau constitutif du conduit.

1.6 Piquages pour événements et injections

Les diamètres des perçages et des tubes événements sont conformes aux valeurs indiquées à l'article 9.2.2.3 du fascicule 65 A du CCTG.

Les événements sont raccordés aux tubes par des dispositifs capables de résister à une pression au moins égale à celle définie dans le cadre du PAQ de l'Entreprise. La démonstration de leur efficacité, à la charge de l'entrepreneur, peut résulter soit d'essais de convenance soit de références antérieures.

1.61 Tubes en polyéthylène

Lorsque les armatures sont enfilées dans le tube*, tout perçage au moyen d'outils durs non munis d'une butée de fin de course ainsi que tout perçage par fusion est interdit.

1.62 Tubes en acier

Les perçages doivent être effectués avant l'enfilage des armatures de précontrainte.

1.7 Vases d'expansion

Dans les cas d'injection au moyen d'un produit souple, ils sont nécessaires lorsque la température ambiante maximale T_{\max} est susceptible de dépasser la température minimale T_0 que le produit présente, dans la zone la plus défavorable, lors de sa mise en oeuvre.

Ils doivent être dimensionnés de façon à absorber l'excès de volume du contenu par rapport à son enveloppe lorsque la température ambiante atteint T_{\max} . Dans les conditions climatiques de la France métropolitaine, $T_{\max} = 40\text{ °C}$.

En l'absence d'essais spécifiques probants, les coefficients de dilatation des matériaux couramment utilisés sont pris égaux aux valeurs suivantes :

- acier $\alpha = 10^{-5} / \text{°C}$
- matériau composite $\alpha = 1,25 \times 10^{-5} / \text{°C}$
- polyéthylène $\alpha = 20 \times 10^{-5} / \text{°C}$
- polypropylène $\alpha = 15 \times 10^{-5} / \text{°C}$
- graisse ou cire $\alpha_3 = 60 \times 10^{-5} / \text{°C}$

Pour les produits d'injection souples (graisses ou cires), α_3 représente le coefficient de dilatation cubique.*

** Dans le présent texte, cet élément structural du déviateur est supposé constitué de béton (mais la plupart des prescriptions qui suivent sont extrapolables au cas où il serait métallique). Il fait partie intégrante de la structure. Son dimensionnement relève des textes généraux en vigueur.*

*** La circulaire n° 86-64 du 4 septembre 1986 prévoit, en son article 3.4 reproduit en Annexe 1 au présent document, trois niveaux d'exigences sur la précontrainte extérieure. Sauf indication particulière du marché, c'est le niveau B (précontrainte remplaçable moyennant destruction du câble) qui est à retenir.*

2.1 Organes de déviation - Classification

** Au niveau de la consultation des entreprises, le RPAO peut utilement demander des propositions techniques à cet égard.*

*** La démontabilité suppose alors que le conduit est injecté à l'aide d'un produit souple.*

**** Les deux parois en cause sont :*

- la paroi déviatrice, extérieure au conduit,*
- la paroi du conduit.*

L'expression communément utilisée de « double tubage » est parfois impropre car la paroi déviatrice peut ne pas avoir une forme tubulaire.

Il importe de prendre toute disposition adéquate pour éviter une éventuelle accumulation d'eau entre les deux parois qui pourrait, en cas de gel, provoquer une désorganisation du béton adjacent.

2

Déviateurs

Un déviateur comprend :

- un élément structural capable de reprendre les efforts exercés par le câble dans la zone de déviation,*
- un organe assurant la géométrie de la déviation.

Globalement, un déviateur doit satisfaire aux exigences suivantes :

- résister aux forces tant longitudinales que transversales que le câble lui applique et transmettre ces forces à l'ensemble de la structure,
- réaliser sans cassure angulaire inacceptable le raccordement entre deux tronçons droits théoriquement coplanaires,
- sauf indication contraire du marché, permettre la démontabilité du câble sans intervention traumatisante pour les éléments structuraux.**

2.1 Organes de déviation - Classification

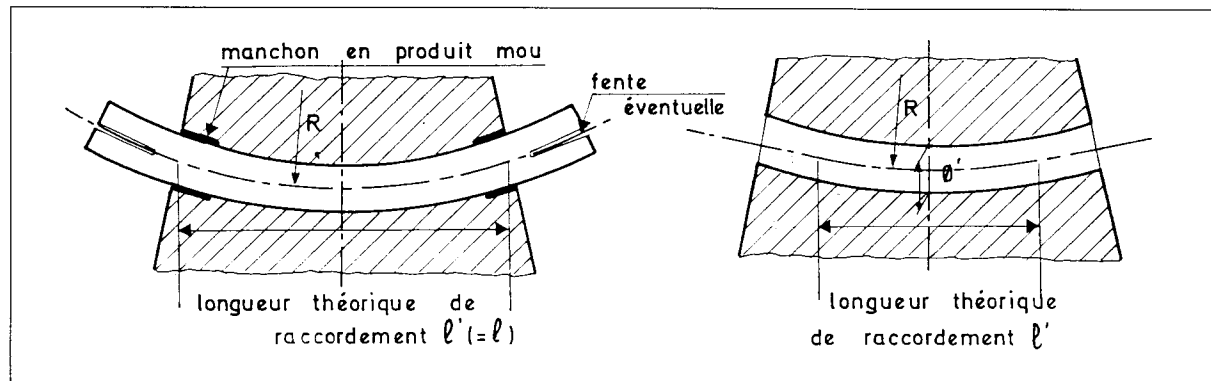
Le marché précise à quel type se rattache l'organe courant de déviation* qui peut être :

- a) Un tronçon du conduit** ; il s'agit alors d'un tube cintré scellé d'emblée dans le béton du déviateur. Cette solution est dite « **déviation par le conduit** ».
- b) Un élément indépendant du conduit lié rigidement ou non à la structure du déviateur lors de la mise en tension du câble. Ce type de solution est appelé, par la suite « **déviation à double paroi** »***. Selon la forme et les possibilités de jeu de la paroi déviateur, on distingue les cas suivants :

PRESCRIPTIONS ET SPÉCIFICATIONS

*** Un prééclage au moyen d'un fil guide entre déviateurs successifs est fortement conseillé dans ce cas.

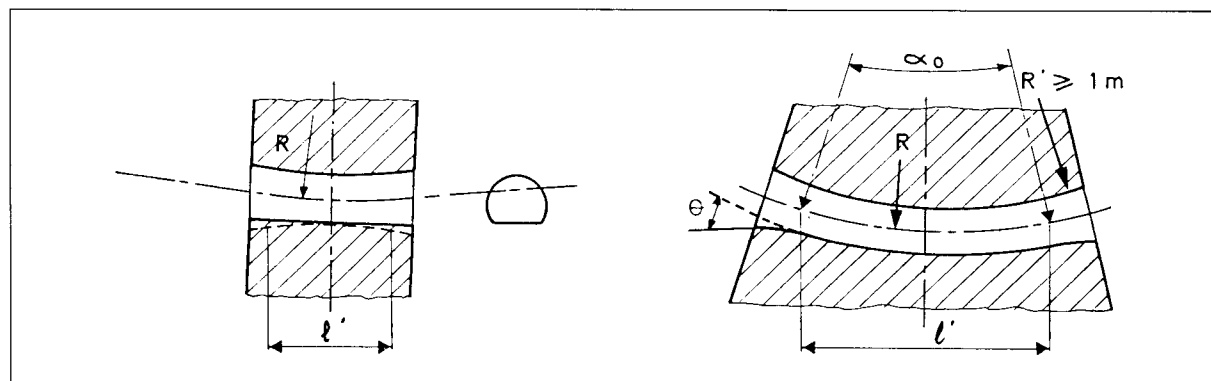
Solutions de type b1 aménagées



Tubes sortant du béton

Surcintrage

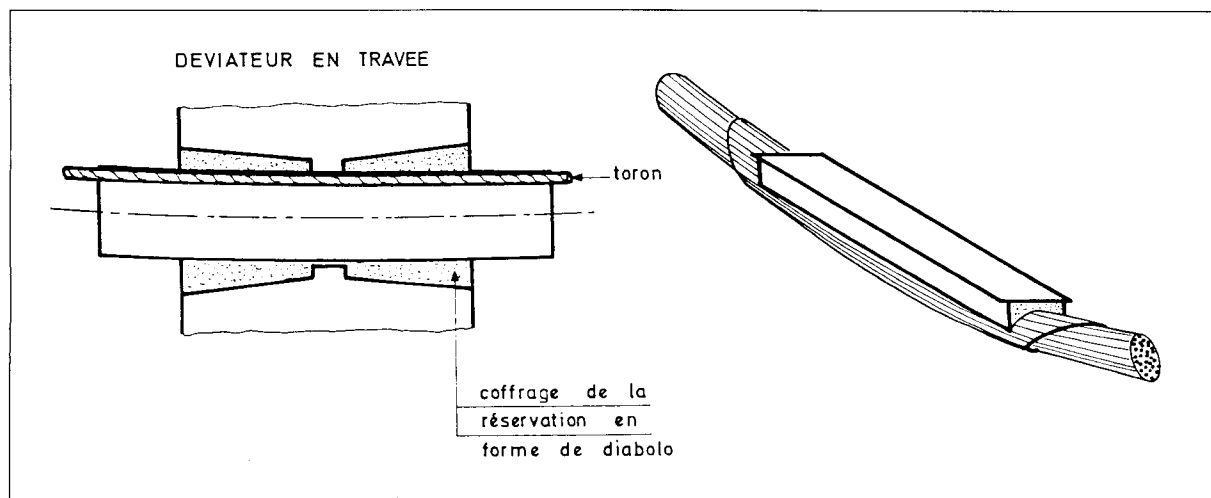
***** Exemples de solutions de type b2



Diabolo

Tube évasé

***** Exemples de solutions de type b3



PRESCRIPTIONS ET SPÉCIFICATIONS

b1) Paroi déviatrice fixe de forme tubulaire simple, exigeant, tout comme la déviation par le conduit, une mise en place rigoureuse****.

Différents aménagements permettent toutefois d'absorber certaines imprécisions angulaires dans la mesure où elles sont localisées dans le plan de déviation.

b2) Paroi déviatrice fixe, de forme élaborée,***** pouvant tolérer des défauts de mise en place dans une plage assez étendue.

b3) Paroi déviatrice mobile présentant, au moins provisoirement, des degrés de liberté cinématique suffisants pour permettre un réglage automatique de son orientation au début de la mise en tension*****.

Les solutions de type b2 et b3 s'accrochent, à l'intérieur de certaines limites, d'imprécisions de positionnement grâce à :

- leur seule géométrie dans le cas b2,
- leur géométrie combinée à leurs possibilités de déplacement et de déformation dans le cas b3.

2.2 Organes de déviation - Nature

** En cas d'utilisation de matériaux différents, il convient de s'assurer que lesdits matériaux :*

- se prêtent à un cintrage précis,*
- présentent une résistance acceptable aux pressions de contact qu'exercent les câbles tant lors des mises en tension qu'à long terme.*

2.2 Organes de déviation - Nature

Dans le cas d'une déviation par le conduit, le tube cintré constitutif de ce conduit au droit de la déviation est, sauf disposition particulière du marché,* en acier.

Dans le cas d'une déviation à double paroi, la paroi déviatrice peut être :

- soit une coque en acier de forme adéquate,
- soit la paroi coffrée d'une réservation à l'intérieur de l'élément structural du déviateur.

Dans tous les cas, il appartient à l'entrepreneur de démontrer, soit par des essais de convenance, soit par des références antérieures, que la géométrie intrinsèque théorique de la paroi peut être obtenue, à l'intérieur de certaines limites de tolérance définies au PAQ, par les moyens précisés dans ce même document.

2.3 Géométrie de la déviation

Le tracé théorique du câble, dans sa zone de déviation, est un arc de cercle de rayon au moins égal à R_{\min} ; R_{\min} est défini ci-après pour les unités les plus courantes.

Unité	R_{\min} (m)
7 T 15	2,0
12 T 15	2,5
19 T 15	3,0
27 T 15	3,5
37 T 15	4,0

2.31 Déviation par le conduit

Le rayon de cintrage du tube respecte alors :

$$R \geq R_{\min}$$

Le diamètre du tube satisfait, par ailleurs, aux conditions définies au chapitre 1.

2.32 Déviation à double paroi

** L'absence d'arêtes n'est impérative que dans les zones où un contact entre paroi déviatrice et conduit est possible compte tenu des imprécisions de positionnement des déviateurs.*

*** La valeur de 10 mm constitue un minimum absolu pour la marge à réserver entre le diamètre extérieur du conduit et le diamètre intérieur du tube déviateur. La marge à retenir effectivement doit tenir compte de différentes conditions pratiques, entre autres :*

- la longueur de la déviation,*
- l'existence éventuelle de joints sur cette longueur,*
- la géométrie du surcintrage lorsque la paroi déviatrice est un tube surcintré.*

2.4 Positionnement des déviateurs

** Les désignations conventionnelles des axes supposent l'axe longitudinal de la structure sensiblement horizontal et le plan de déviation du câble sensiblement vertical.*

2.32 Déviation à double paroi

La paroi déviatrice est constituée d'un assemblage sans arête* d'éléments de surfaces toriques pour chacun desquels le plus grand des rayons de courbure principaux est en tout point au moins égal à :

- R_{\min} précédemment défini, dans les zones théoriques de contact,
- 1,0 m dans les zones de compensation des incertitudes de positionnement (voir 2.33 ci-après).

La paroi déviatrice doit assurer le libre passage à un tube fictif dont le diamètre est au moins :

$$\emptyset' \geq \emptyset + 10 \text{ mm}$$

où \emptyset représente le diamètre extérieur du conduit.**

2.33 Compensation des incertitudes sur le positionnement des déviateurs

Dans les cas de déviation à double paroi visés en b2 et b3 de l'article 2.1, la paroi déviatrice doit être conçue pour reprendre, à chacune de ses extrémités, une imprécision angulaire de direction arbitraire au moins égale à Θ_{\min} .

Sauf spécification plus sévère du marché :

$$\Theta_{\min} = 5/100 \text{ rd.}$$

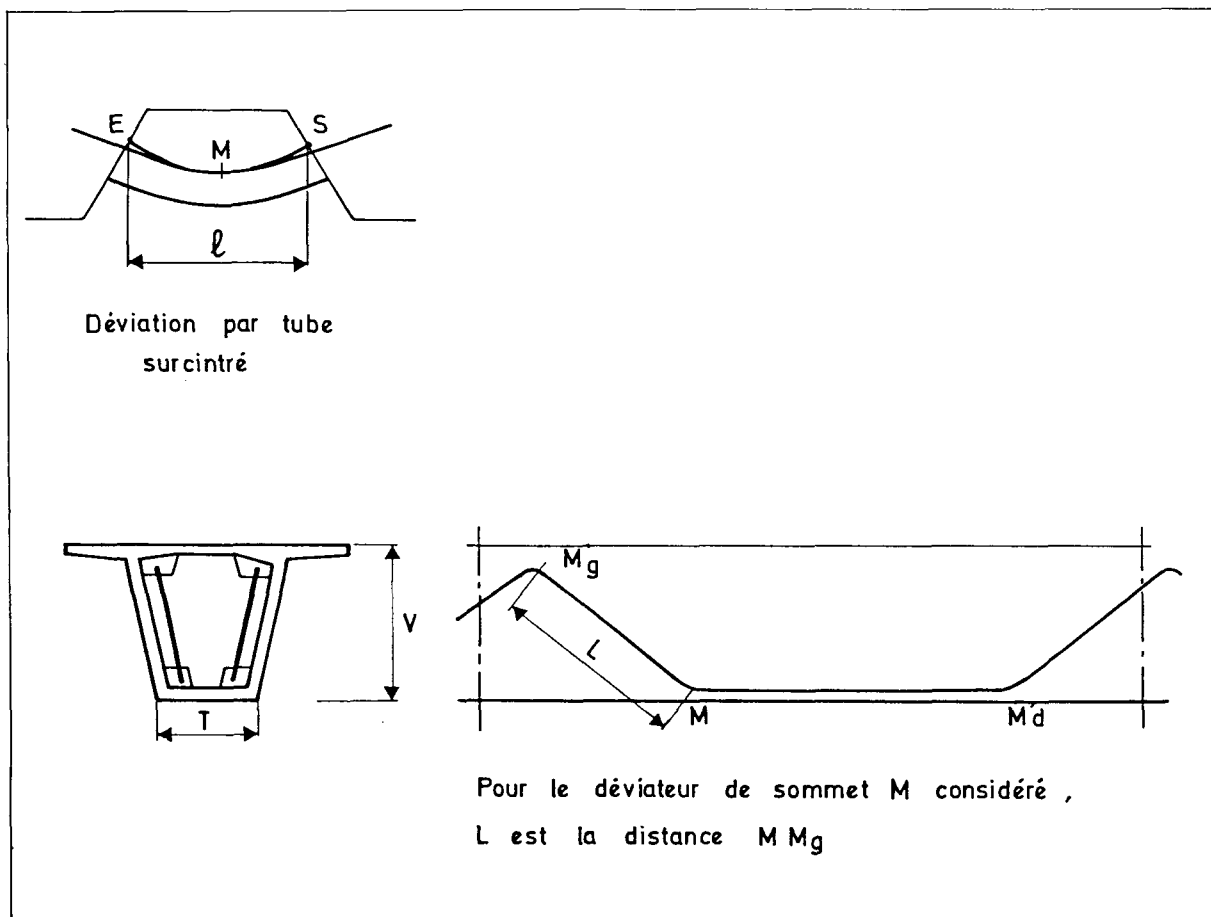
La valeur Θ_{\min} ainsi fixée doit couvrir tous les écarts angulaires résultant des tolérances tant sur la forme intrinsèque des déviateurs que sur leur positionnement (voir 2.4 ci-après). Il appartient à l'entrepreneur de démontrer que cette condition est bien remplie.

2.4 Positionnement des déviateurs

Les tolérances définies ci-après concernent 3 points caractéristiques E,S,M situés respectivement à l'entrée, à la sortie et au milieu de la paroi déviatrice sur la ligne théorique de contact entre ladite paroi et le câble ou éventuellement, en ce qui concerne les points E et S, sur son prolongement direct. Elles sont repérées sur des axes de direction fixe sensiblement parallèles à l'axe longitudinal de la structure, à son axe transversal horizontal et à la verticale.*

2.41 Tolérances sur la position absolue des points E, S et M

* Les notations sont définies sur les figures qui suivent.



2.41 Tolérances sur la position absolue des points E,S et M

Si l'on désigne par V et T les dimensions caractéristiques de la pièce selon ses axes vertical et transversal et par L la distance théorique entre le déviateur considéré et son voisin le plus proche,* l'écart entre position théorique et position réelle du point M est, dans tous les cas, limité à :

- longitudinalement $L/200$,
- verticalement $\min [L/200 ; V/80 ; 30 \text{ mm}]$,
- transversalement $\min [L/200 ; T/80 ; 30 \text{ mm}]$.

Ces conditions s'appliquent également aux points E et S lorsque la paroi déviateur est fixe (cas a, b1 et b2 de 2.1).

2.42 Tolérances sur la position relative des points E,S et M

Lorsque la paroi déviateur est rigidement liée dès le départ à la structure du déviateur, l'écart entre positions relatives théoriques et positions relatives réelles des points E et S est limité à :

- $k_v \cdot l$ dans le sens vertical,
- $k_t \cdot l$ dans le sens transversal,

l désignant la longueur de la paroi déviateur.

Sauf indication contraire du marché, k_v et k_t sont fixés comme suit :

- dans les cas a et b1 de 2.1 $k_v = k_t = 10^{-2}$
- dans le cas b2 de 2.1 $k_v = k_t = 2 \times 10^{-2}$

En outre, l'écart angulaire ω (résultant d'une incertitude de positionnement de la paroi déviateur autour de l'axe ES) entre position théorique et position réelle du plan EMS est borné à ω_{\max} . Si la paroi déviateur est de forme tubulaire simple (cas a et b1 de 2.1) ω_{\max} vaut :

$$\omega_{\max} = 5 \times 10^{-2}$$

Il incombe à l'entrepreneur de préciser dans le PAQ, les mesures à prendre pour assurer le respect de ces tolérances et de démontrer, soit par un essai de convenance, soit par des références antérieures, l'efficacité de ces mesures.

2.5 Protection anticorrosion des parties métalliques des organes de déviation

Les parties métalliques des organes de déviation doivent être protégées :

- soit par peinture donnant une garantie d'anticorrosion de 5 ans au degré Ri2 ,
- soit par métallisation donnant une garantie d'anticorrosion de 5 ans au sens de l'article 4.2.1 du fascicule n° 56 du C.C.T.G. ,
- soit par galvanisation à chaud donnant une garantie d'anticorrosion de 11 ans au sens de l'article 4.2.1 du fascicule n° 56 du C.C.T.G.

** A cet égard, le dimensionnement de l'entretoise relève des textes généraux en vigueur. Il est précisé toutefois que, dans le cas où une précontrainte secondaire transversale est utilisée pour améliorer le comportement de l'entretoise, les conditions de non décompression de la section d'enrobage sous combinaisons quasi-permanentes ne sont pas à appliquer.*

3.1 Enveloppe du câble sur la longueur de l'entretoise

** La démontabilité suppose alors que l'injection est réalisée à l'aide d'un produit souple. Cette disposition est corrélative de la « déviation par le conduit » définie au chapitre « Déviateurs ».*

*** Cette disposition est associée à la « déviation à double paroi » définie dans le chapitre « Déviateurs ».*

Il importe de prendre toute disposition adéquate pour éviter une éventuelle accumulation d'eau entre les deux enveloppes qui pourrait, en cas de gel, provoquer une désorganisation du béton adjacent.

3

Zones d'ancrage

Les câbles sont ancrés dans des entretoises massives à travers lesquelles ils sont généralement déviés.

Comme les déviateurs en partie courante, ces entretoises doivent satisfaire aux exigences suivantes :

- résister aux forces longitudinales et transversales que leur appliquent les câbles et transmettre ces forces à l'ensemble de la structure*,
- réaliser sans cassure angulaire inacceptable le raccordement avec les tronçons rectilignes constituant les tracés des câbles à leur sortie,
- sauf indication contraire du marché, permettre la démontabilité des câbles sans intervention traumatisante pour les éléments structuraux.

3.1 Enveloppe du câble sur la longueur de l'entretoise

Cette enveloppe peut être **simple*** ou **double**.

Dans le premier cas, elle est constituée d'un dispositif d'épanouissement (désigné dans ce qui suit par trompette) et d'un tube cintré assurant le raccordement au conduit.

Dans le second cas, cet ensemble, ou enveloppe interne, destiné à confiner le produit d'injection, est complété par une enveloppe externe résultant de l'assemblage d'une trompette coffrante et d'un tube de réservation.**

Ces dispositifs, au même titre que les organes d'ancrage à proprement parler, doivent faire l'objet d'un agrément, d'une autorisation de distribution ou d'une autorisation d'emploi spécifiques à une utilisation en précontrainte extérieure.

3.2 Géométrie du tracé dans l'entretoise

Tolérances d'implantation

** Les conditions plus sévères définies dans le présent article résultent des éléments suivants :*

- un épanouissement convenable des armatures individuelles à proximité de la tête d'ancrage n'est pas conciliable avec un rayon de courbure trop faible du tracé à l'extrémité de la trompette,*
- la tension des armatures est plus élevée à la sortie des organes d'ancrage qu'au droit d'un déviateur courant,*
- la traversée d'une entretoise d'ancrage est nettement plus longue que celle d'un déviateur courant.*

3.2 Géométrie du tracé dans l'entretoise

Tolérances d'implantation

Les principes généraux définis aux articles 2.3 et 2.4 du chapitre « Déviateurs » sont applicables moyennant les adaptations ci-après.*

3.21 Tracé du câble hors trompette

C'est un cercle de rayon au moins égal à R'_{min} . R'_{min} est défini par le tableau suivant pour les unités les plus courantes :

Unité	R'_{min} (m)
7 T 15	3,0
12 T 15	3,5
19 T 15	4,0
27 T 15	4,5
37 T 15	5,0

Lorsque l'enveloppe est double, le tube de réservation peut être évasé à sa sortie de l'entretoise de façon à compenser une imprécision angulaire Θ de direction arbitraire. Les conditions à respecter sur Θ sont celles de l'article 2.33 du chapitre « Déviateurs ».

L'évasement torique en question doit, par ailleurs, présenter un rayon de courbure principal au moins égal à 1 m.

3.22 Jeux entre parois dans le cas d'une double enveloppe

Hors trompette, le jeu minimum à réserver entre le diamètre intérieur du tube coffrant et le diamètre extérieur du tube-conduit est de 10 mm.

Au niveau des trompettes, le jeu minimum résulte des dispositions de la notice technique annexée à l'agrément ou à l'autorisation du système de précontrainte extérieure utilisé.

3.3 Dispositifs d'ancrage

Les organes d'ancrage ainsi que les trompettes et leurs raccordements aux tubes, tant pour l'enveloppe interne que pour l'enveloppe externe (s'il en est prévu) doivent faire l'objet d'un agrément, d'une autorisation de distribution ou d'une autorisation d'emploi spécifiques à une utilisation en précontrainte extérieure et octroyés, sur avis de la Commission Interministérielle de Précontrainte, dans les conditions prévues par son règlement de l'agrément.

3.4 Protection des têtes d'ancrage

La protection des têtes d'ancrage est assurée par un capot étanche définitif fixé mécaniquement. Ce capot reçoit lui-même une protection anti-corrosion efficace.

4.1 Consistance des études d'exécution

** Ce plan d'accès à la précontrainte extérieure complète les documents prévus en 3.2.4 du fascicule 65 A du CCTG (dispositions pour la visite et l'entretien).*

4.11 Plan d'accès à la précontrainte extérieure

** Il peut s'agir, en particulier, de la mise en oeuvre d'une précontrainte additionnelle lorsque les câbles extérieurs d'origine n'ont pas été conçus comme remplaçables.*

4.12 Étude de faisabilité du remplacement des câbles

** Au moins.*

*** Voir à cet égard l'article 5.41 b de la première partie.*

**** Il s'agit de préciser les volumes interdits à toute implantation ultérieure de canalisations ou d'équipements.*

4

Études d'exécution

4.1 Consistance des études d'exécution

Outre les documents prévus par l'article 3.2 du fascicule 65 A du CCTG, l'entrepreneur doit fournir :

- un plan d'accès à la précontrainte extérieure*,
- lorsque la précontrainte est conçue comme remplaçable, une étude de faisabilité du remplacement,
- une étude des imperfections d'implantation des déviateurs.

4.11 Plan d'accès à la précontrainte extérieure

Il est constitué d'un ensemble de documents indiquant :

- les voies permettant d'amener jusqu'à l'ouvrage des engins de capacité suffisante pour approvisionner le matériel nécessaire à la surveillance, à l'entretien et au renforcement éventuel de la structure*,
- les points d'entrée dans le tablier,
- les cheminements internes,
- les équipements disponibles (éclairage, électricité ...),
- les points de levage et leur capacité portante.

4.12 Étude de faisabilité du remplacement des câbles

Cette étude doit mettre en évidence les conditions dans lesquelles la structure est apte à supporter la suppression provisoire de l'un* quelconque de ses câbles extérieurs remplaçables.

Elle doit également définir tous les éléments** nécessaires au remplacement des câbles en question, notamment :

- la position des ancrages fixes et des ancrages actifs tant pour les câbles d'origine que pour les câbles de substitution éventuels,
- les gabarits à réserver impérativement.***

4.13 Étude des imperfections d'implantation des déviateurs

* Ces tolérances sont soumises à certains plafonnements (voir 2.4).

4.2 Tension à l'origine des câbles extérieurs au béton

* Pour des câbles sortant sensiblement de la hauteur des poutres dont ils assurent la précontrainte, la limitation à $0,60 F_{prg}$ n'est suffisante que lorsque les conditions suivantes sont réalisées :

- ils ne sont pas soumis à l'action directe du vent,
- l'étendue de variation de leur tension sous combinaisons fréquentes ne dépasse pas 50 MPa.

Si tel n'est pas le cas, il convient de les considérer non plus comme de simples câbles de précontrainte, mais comme des haubans.

A ce titre, ils doivent être munis d'ancrages spéciaux pour cet usage et astreints aux limitations de tension correspondantes.

4.3 Frottements des câbles dans leurs conduits

* Cette indication n'est pas valable, toutefois, lorsque le câble est constitué de torons gainés-graissés logés dans un tube injecté au coulis de ciment avant leur mise en tension. Dans ce cas, les déviations parasites qui résultent de l'enchevêtrement des torons se répartissent tout au long du tracé et l'expérience montre que l'on obtient une bonne estimation de la tension par la formule habituelle :

$$\sigma_{po}(x) = \sigma_{po} e^{-f\alpha_0(x) - \varphi x} \quad (3)$$

dans laquelle les coefficients f et φ prennent les valeurs couramment admises pour les torons gainés-graissés (valeurs rappelées en 4.32* ci-après).

4.31 Déviation angulaire

* Dans le cas b2 de 2.1, cette déviation parasite :

- existe pour un tube évasé bien que l'évasement supprime le risque d'une cassure angulaire aux extrémités de la déviation,
- est négligeable pour un diabololo.

4.13 Étude des imperfections d'implantation des déviateurs

Ce document a pour objet de préciser, en liaison avec le PAQ, les tolérances d'implantation des déviateurs* et d'analyser leurs conséquences sur les déviations angulaires parasites à prendre en compte.

4.2 Tension à l'origine des câbles extérieurs au béton

Lorsque le tracé des câbles extérieurs s'inscrit dans la hauteur des poutres intéressées, la tension à l'origine est simplement soumise aux limitations de l'annexe 7 du BPEL.

Dans les autres cas, elle est bornée à $0,60 F_{rg}$ sauf indication différente du marché.*

4.3 Frottements des câbles dans leurs conduits

Pour les câbles extérieurs au béton constitués de fils ou de torons parallèles, on adopte $\varphi = 0$.*

La tension $\sigma_{po}(x)$ d'une armature de précontrainte, dans une section donnée, lors de sa mise en tension, s'obtient donc, compte tenu des frottements dans les déviateurs, à partir de la tension σ_{po} à l'ancrage actif le plus proche, par la formule :

$$\sigma_{po}(x) = \sigma_{po} e^{-f\alpha(x)} \quad (1)$$

dans laquelle :

f est le coefficient de frottement en courbe défini ci-après,

x est la distance de la section considérée à la sortie des organes d'épanouissement de l'ancrage actif en cause,

$\alpha(x)$ est la déviation angulaire totale sur la distance x .

4.31 Déviation angulaire

La déviation angulaire $\alpha(x)$ est la somme de la déviation angulaire théorique $\alpha_0(x)$ et, dans les cas a, b1 et b2 définis en 2.1, de déviations parasites aux extrémités des déviateurs rencontrés sur la distance x .*

** Dans le cas a, la déviation parasite γ à chaque extrémité d'un déviateur vaut :

$$\gamma = \cos \frac{\alpha_0}{2} \sqrt{k_v^2 + k_f^2} + \omega_{\max} \sin \frac{\alpha_0}{2} \quad \text{si } \alpha_0 \leq 2 \operatorname{Arctg} \frac{\omega_{\max}}{\sqrt{k_v^2 + k_f^2}}$$

$$\gamma = \sqrt{k_v^2 + k_f^2} + \omega_{\max}^2 \quad \text{dans le cas contraire}$$

Dans ces formules α_0 représente la déviation théorique à la traversée du déviateur considéré.

Dans le cas b1 la valeur précédente se trouve réduite par le jeu entre le conduit et la paroi déviateur.

4.32 Coefficients de frottement

* Ces valeurs supposent que les déviations parasites sont comptées dans la déviation totale selon la formule (1).

Au niveau d'un avant-projet, lorsque le détail des déviateurs n'est pas connu, il suffit, pour évaluer forfaitairement les pertes par frottement, de tabler sur les seules déviations théoriques selon la formulation (2) en choisissant pour f' des valeurs prudentes dans la gamme :

$0,20 \leq f' \leq 0,30$ lorsqu'il s'agit de tubes en acier,

$0,12 \leq f' \leq 0,15$ lorsqu'il s'agit de tubes en PEHD.

Si un autre matériau est employé, il convient d'apprécier f avec prudence sur la base d'essais de convenance ou de références antérieures.

Dans le cas de torons gainés-graissés logés dans un conduit injecté au coulis de ciment avant leur mise en tension, la formulation (3) de 4.3* peut être utilisée avec :

$$f = 0,05 ; \varphi = 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

** Pour l'évaluation des flèches et des déplacements en cours de construction, il est possible, lorsque la valeur de la précontrainte a une incidence sensible sur ces éléments, d'ajuster les valeurs de f aux résultats des mesures des coefficients de transmission effectuées sur le chantier.

Ces déviations parasites doivent faire l'objet d'une estimation** et être prises en compte dans les calculs de tension.

Dans le cas b3, on peut admettre qu'elles sont nulles sous réserve que les conditions de 2.33 soient satisfaites.

Par commodité, il est loisible de substituer à la formule (1) la suivante :

$$\sigma_{po}(x) = \sigma_{po} e^{-f' \alpha_o(x)} \quad (2)$$

où f' représente le produit de f par un majorant du rapport :

$$\frac{\alpha(x)}{\alpha_o(x)}$$

4.32 Coefficients de frottement

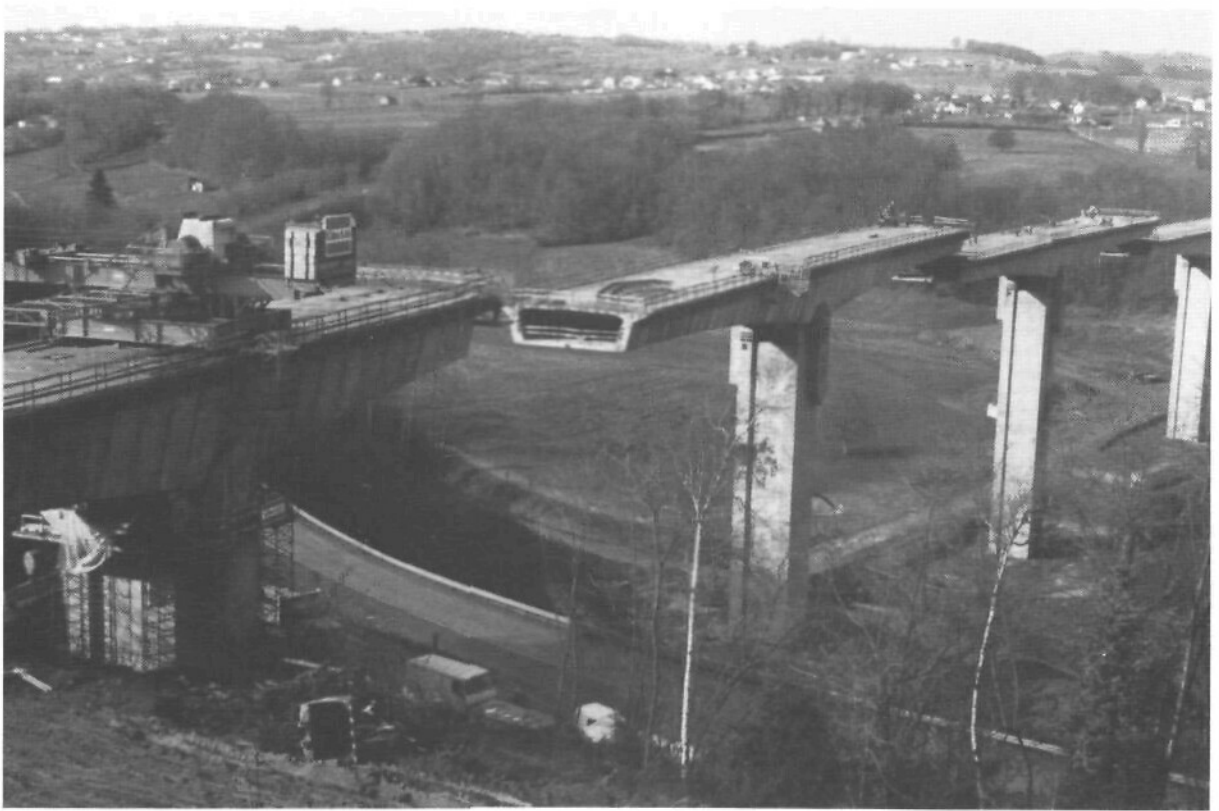
Selon la nature du conduit, les valeurs de f à prendre en compte* pour le calcul des sollicitations** sont les suivantes :

- tube en acier $f = 0,20$, à condition qu'il soit intérieurement propre et lubrifié.
- tube en PEHD $f = 0,12$.

Annexes



▲ Viaduc de Sylans (photo SETRA)



▲ Viaduc de l'Arrêt-Darré (photo DDE 65)

Éléments de la réglementation concernant la précontrainte extérieure

Un certain nombre de textes réglementaires définissent des prescriptions concernant la précontrainte extérieure, en particulier :

- l'annexe 7 du BPEL qui fixe les règles de calcul spécifiques aux ouvrages à précontrainte extérieure au béton,
- la circulaire n° 86-64 du 4 septembre 1986 qui apporte des compléments à la réglementation sur les armatures et procédés de précontrainte et dont l'article 3.4 est reproduit ci-après.

3.4 Précontrainte extérieure

3.4.1 La précontrainte extérieure peut faire l'objet des trois niveaux d'exigences particulières suivants :

- A. Précontrainte non remplaçable (sans opérations traumatisantes pour la structure).
- B. Précontrainte remplaçable moyennant destruction du câble (et de son conduit éventuel).
- C. Précontrainte repesable, ajustable et remplaçable sans dommage ni pour le câble ni pour le conduit.

Plusieurs technologies sont, par ailleurs, utilisées actuellement pour assurer la protection des câbles extérieurs au béton :

- a) Tubes injectés au coulis de ciment.
- b) Tubes injectés au moyen d'un produit souple (cire ou graisse).
- c) Galvanisation des armatures.

3.4.2 La technologie (a) convient non seulement pour les exigences A mais aussi pour les exigences B à condition de prévoir, en ce dernier cas, un double gainage tant au niveau des trompettes qu'au niveau des déviateurs. Le seul problème qui subsiste, dans le cas B, lorsque l'ancrage est réalisé par coince-ment conique est celui de sa tenue vis-à-vis d'éventuelles surtensions ultérieures (problème s'apparentant à celui déjà évoqué en 3.2 pour ce qui est des coupleurs). Ces surtensions faibles et donc peu préoccupantes sous charges de service peuvent, dans certains cas, constituer un risque réel sous charges ultimes.

Différentes solutions existent à ce problème : introduction, dans l'environnement immédiat des clavettes, d'un produit souple interdisant la pénétration du coulis, ancrage des torons par adhérence en amont ou en aval des clavettes ...

3.4.3 Les technologies (b) et (c) sont compatibles avec les trois niveaux d'exigences, mais la galvanisation, outre les problèmes de diverses natures qu'elle peut poser n'offre qu'une garantie limitée quant à la durabilité de la protection qu'elle assure et implique donc, entre autres mesures, une surveillance régulière de l'état de l'ouvrage.

Il est souvent indispensable, pour satisfaire aux exigences B et C, d'apporter aux ancrages ou à leur environnement immédiat des aménagements non couverts par les agréments actuels. Le tableau suivant, sans prétendre à l'exhaustivité, récapitule ceux qu'on rencontre le plus souvent.

Niveau d'exigences	Protection	Aménagements
B	(a)	Double trompette. Étanchéité. Dispositions pour assurer la sécurité vis-à-vis des surtensions.
B	(c)	Galvanisation des têtes d'ancrage. Chromage des clavettes.
C	(b)	Filetage des têtes d'ancrage pour ajustement de la précontrainte. Plaques d'appui spéciales pour vérins de réglage. Clavettes spéciales pour détension.

3.4.4 La précontrainte extérieure nécessite d'autre part certains choix technologiques concernant, selon les cas, les armatures galvanisées, les gaines et les graisses et cires pour lesquels on trouvera des indications respectivement en 4.2, 4.3 et 4.6.

3.4.5 Dans ce contexte technologique en pleine évolution, le maître d'œuvre doit suivre une ligne de conduite rigoureuse. Il lui appartient ainsi :

1. De fixer expressément au départ ses exigences particulières sur la précontrainte de son ouvrage. Son choix peut être guidé par les considérations suivantes :

- la précontrainte extérieure implique un haut niveau de qualité, tant sur le plan de la conception que sur celui de l'exécution, mais cette qualité est facile à contrôler puisqu'un simple examen visuel permet de déceler les principaux défauts pouvant affecter le tracé des câbles, l'étanchéité des conduits ou le confinement des armatures et de leurs ancrages ;

S'il est légitime dans ces conditions de considérer comme réduits les risques de corrosion des armatures, tout au moins dans le cas des protections (a) et (b), il convient, par contre, de remarquer que les câbles extérieurs sont plus exposés aux agressions accidentelles de toutes origines (résultant directement d'activités humaines – volontairement ou non –, d'incendies ...) que les câbles intérieurs au béton. Les décisions de recours à la précontrainte extérieure doivent donc être accompagnées d'une appréciation des risques correspondants et, le cas échéant, de la définition d'une stratégie permettant de les limiter à un niveau acceptable ;

- l'un des avantages essentiels de la précontrainte extérieure étant de ménager une possibilité de remplacement des armatures au cas où elles seraient affectées par un phénomène de corrosion, le niveau A est généralement à éviter pour la réalisation d'ouvrages neufs, tout au moins dans le cas des ponts ;

- les exigences C, sous leur aspect « possibilité de repesée » ne sont guère intéressantes que pour quelques ouvrages expérimentaux sur lesquels serait prévu un suivi à long terme pour faire progresser les connaissances.

Dans le cas des structures neuves, la latitude assez étroite d'ajustement de la précontrainte ne saurait dispenser des dispositions habituelles permettant la mise en œuvre de câbles additionnels.

En matière de renforcements, lorsque subsiste une incertitude sur la précontrainte nécessaire, la réservation d'une marge substantielle de remontée en tension sur des armatures volontairement sous-tendues au départ présenterait des aspects séduisants mais, là encore, le procédé pourrait se trouver concurrencé par la mise en place de points d'ancrage et de déviation pour d'éventuels câbles supplémentaires.

Enfin, dans tous les cas, les possibilités de détension totale sans destruction de la gaine, pour séduisantes qu'elles soient lorsqu'on utilise une protection par produit souple, n'en impliquent pas moins un certain nombre de dispositions particulières (conservation de surlongueurs notamment) et d'opérations délicates (extraction du câble enduit de cire ou de graisse, nettoyage du conduit pour permettre l'enfilage du nouveau câble ...) dont le coût est à mettre en balance avec celui du découpage du câble, préalable indispensable à son remplacement lorsqu'a été retenu le niveau d'exigences B avec injection au coulis de ciment.

2. Dans le cadre de la procédure usuelle en matière de travaux publics, **de demander aux entreprises de détailler** dans leurs offres la technologie qu'elles souhaitent mettre en œuvre, puis de **reporter dans les pièces du marché les options technologiques retenues** sur la base des propositions techniques de l'entreprise après avoir vérifié qu'elles répondent bien aux exigences fixées.

3. **De faire exécuter**, si besoin en est, des essais de convenance sur les dispositions de détail.
4. **De demander**, le cas échéant, **les autorisations d'emploi** nécessaires.
5. **De s'assurer que s'est établie entre les différents intervenants** (entreprise générale et entreprise distributrice de précontrainte notamment) **une bonne coordination**, fondée sur un partage clair des responsabilités.
6. **De s'en tenir, enfin, fermement aux dispositions ainsi établies** en raison des risques d'incompatibilité d'une variante insuffisamment étudiée avec la technologie de détail préalablement mise au point.

Outre ces précisions sur les conditions d'emploi de la précontrainte extérieure, cette circulaire donne des indications sur la nature des conduits les plus couramment utilisés et la valeur des coefficients de frottement correspondants.

Mais, il convient de noter qu'à cet égard la deuxième partie du présent document fournit des renseignements beaucoup plus complets.

2

Essais complémentaires à fournir pour l'agrément d'un système de précontrainte extérieure au béton

1 Essais de comportement des organes d'ancrages sous charge soutenue

Chaque famille d'ancrages doit faire l'objet d'au moins un essai de ce type.

L'ancrage testé, conforme à la définition déposée, doit répondre à l'une des deux conditions suivantes :

- être le plus puissant de la famille,
- présenter un effort nominal de rupture F_N supérieur à 5000 kN.

1.1 Principe général de l'essai

Il s'agit de montrer que sous charge maintenue constante pendant au moins deux heures, les déformations de la tête d'ancrage cessent d'évoluer avec le temps.

1.2 Dispositions d'essai

Un ensemble comportant au moins une tête d'ancrage et **toutes** les armatures de précontrainte associées est placé sur un bâti muni d'un dispositif capable d'assurer sa mise en tension par étapes et le maintien de la force appliquée au droit de la tête pendant au moins deux heures à un niveau constant de $0,8 F_N \pm 2\%$. Il est admis que l'invariance de l'effort pendant le palier peut être obtenue par ajustement manuel.

La tête d'ancrage essayée prend appui sur un élément suffisamment rigide. Dans le cas le plus fréquent où cette tête présente une assise plane, l'élément en question comporte une plaque d'appui en acier répondant aux spécifications suivantes :

- les défauts de planéité n'excèdent pas 0,5 mm sur le diamètre de la tête,
- la dureté de la plaque est au moins égale à celle de la tête,
- l'épaisseur de la plaque n'est pas inférieure à 1,5 fois l'épaisseur de la plaque d'appui standard associée à l'ancrage testé.

Dans les autres cas, les conditions d'appui envisagées sont soumises au rapporteur de la Commission au moins quinze jours avant le début de l'essai.

Les armatures utilisées ont un tracé rectiligne, sauf si la géométrie de la tête ou le montage de l'essai nécessitent une déviation. Dans ce cas, les éventuels frottements induits par les dispositifs de déviation entre le point d'application de la force et la tête d'ancrage doivent faire l'objet d'une estimation et d'une compensation de façon à ce que les paliers d'efforts définis, avec leurs tolérances, en 1.4 ci-après soient bien réalisés au niveau de la tête d'ancrage.

1.3 Mesures

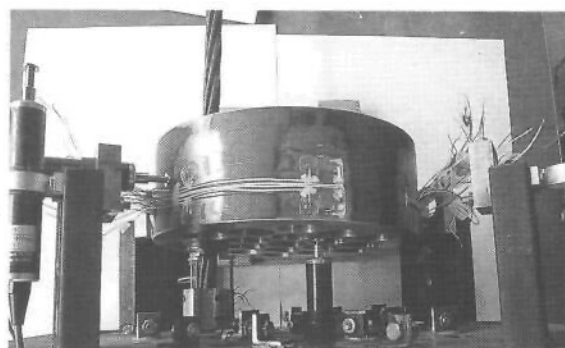
Chaque série de mesures comporte le relevé des déplacements relatifs transversaux sur deux diamètres sensiblement perpendiculaires et ceci à trois niveaux de la tête d'ancrage (à moins que la géométrie de la tête ne l'interdise, auquel cas le nombre de niveaux peut être réduit après accord du rapporteur).

Sont également relevés les déplacements relatifs longitudinaux, par rapport au plan d'assise, de trois points alignés sur un diamètre de la face vue de la tête : deux à proximité des bords, un à proximité du centre.

Les capteurs utilisés doivent permettre de mesurer les déplacements à 0,01 mm près.



(photo R. Chaussin)



(photo M. Dauvilliers)

▲ Essai d'ancrage sous charge soutenue - Mesure de déformations ▲

1.4 Processus opératoire

- a) Égalisation des tensions et mise en charge à $0,2 F_N \pm 4 \%$. Première série de mesures.
- b) Mise en charge à $0,4 F_N \pm 3 \%$. Deuxième série de mesures.
- c) Mise en charge à $0,8 F_N \pm 2 \%$. Cette force, atteinte à l'instant t_0 est maintenue constante jusqu'à $t_0 + 130$ mn.
 - Troisième série de mesures entre t_0 et $t_0 + 10$ mn.
 - Quatrième série de mesures entre $t_0 + 30$ mn et $t_0 + 40$ mn.
 - Cinquième série de mesures entre $t_0 + 60$ mn et $t_0 + 70$ mn.
 - Sixième série de mesures entre $t_0 + 120$ mn et $t_0 + 130$ mn.
- d) Détension jusqu'à $0,2 F_N \pm 4 \%$
 - Septième série de mesures.

1.5 Présentation des résultats

Le compte rendu de l'essai doit faire apparaître clairement :

- le résultat d'un contrôle de conformité effectué sur la tête d'ancrage avant l'essai,
- le schéma de montage,
- la position des points de mesure,
- la sensibilité des instruments de mesure,
- les résultats des différentes séries de mesures,
- les résultats d'un examen visuel de la tête après démontage.

1.6 Jugement de l'essai

La convenance des résultats est appréciée par la Commission.

2 Essais de dépose pour les unités injectées au coulis de ciment

Pour chaque famille d'ancrages, un essai au moins de ce type est effectué sur une unité répondant à l'une des conditions suivantes :

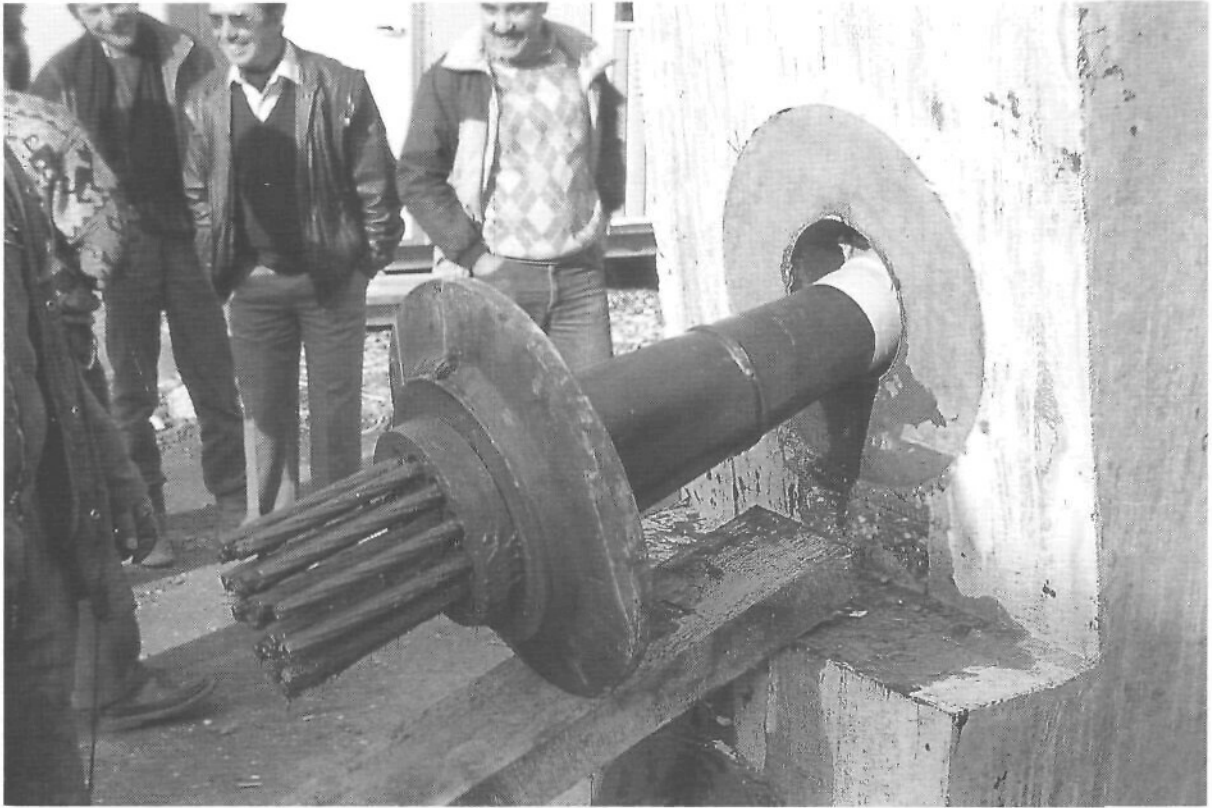
- c'est la plus puissante de la famille,
- sa force nominale est supérieure à 5000 kN.

2.1 Principe général de l'essai

Il s'agit de montrer qu'aucune fuite de coulis ne se produit entre l'enveloppe étanche et l'enveloppe coffrante et que le démontage est possible sans difficultés particulières.

2.2 Dispositions d'essai

L'unité est montée sur un bâti comportant à ses deux extrémités des blocs d'ancrage en béton dans lesquels sont incorporés tous les dispositifs prévus pour une utilisation sur chantier (enveloppe coffrante et enveloppe étanche notamment, y compris tous les accessoires assurant le raccordement entre les différents éléments dont elles peuvent être constituées). Ces blocs d'ancrage ont au moins les dimensions minimales prescrites pour les essais de bloc d'about, leur longueur ne pouvant, en outre être inférieure à un mètre.



▲ Essai de démontabilité au viaduc du Champ du Comte (photo R. Chaussin)

La distance entre têtes d'ancrage est supérieure à 4 m.

Entre les deux blocs d'ancrage, le tube assurant la protection des armatures en partie courante doit être accessible pour permettre la coupe de l'unité.

Aucune géométrie particulière n'est imposée au tracé en dehors des zones d'ancrage et d'épanouissement des armatures.

2.3 Processus opératoire

L'unité est montée puis mise en tension à $0,8 F_N$ dans les conditions et avec les moyens de chantier. Elle est alors injectée au coulis de ciment sous une pression au moins égale à 0,6 MPa. Après un délai minimal de 7 jours, elle est tronçonnée dans sa partie médiane puis démontée.



▲ Essai de démontabilité - Étape 1 : tronçonnage du câble (photo R. Chaussin)



▲ Essai de démontabilité - Étape 2 : extraction du câble (photo R. Chaussin)

2.4 Présentation des résultats

Le compte rendu de l'essai doit faire apparaître clairement :

- la conformité à la définition déposée,
- le schéma de montage,
- la suite et la chronologie des opérations de mise en place, de mise en tension, d'injection, de démontage,
- la composition et les caractéristiques du coulis d'injection,
- la pression d'injection,
- les moyens mis en oeuvre pour assurer l'extraction des têtes d'ancrage,
- les difficultés éventuelles rencontrées pour le démontage,
- les résultats de l'examen visuel des différents éléments après démontage.



▲ Essai de démontabilité - Étape 3 : extraction du câble
(photo R. Chaussin)



▲ Essai de démontabilité - Étape 4 : câble après extraction
(il a conservé sa courbure) (photo R. Chaussin)

2.5 Jugement de l'essai

La convenance des résultats est appréciée par la Commission.

3 Essais de traction des ancrages à clavettes après injection

Trois essais au moins sont à effectuer. Les unités testées peuvent ne comporter qu'une armature.

3.1 Principe général de l'essai

Il s'agit de montrer qu'un ancrage bloqué sous un effort modéré ($0,5 F_N$) puis injecté conformément au mode opératoire déposé par l'entreprise distributrice présente un comportement ductile : la force à rupture et l'allongement correspondant ne doivent pas être sensiblement affectés par la présence du coulis.

3.2 Dispositions d'essais

Une tête d'ancrage et les armatures associées sont montées sur un bâti muni d'un dispositif capable d'assurer la mise en tension jusqu'à rupture de l'ensemble.

3.3 Processus opératoire

Les armatures sont tendues à $0,5 F_N$. Puis elles sont recépées à moins de deux centimètres derrière l'ancrage. Ce dernier est alors coiffé d'un capot étanche et injecté dans les conditions préconisées par l'entreprise distributrice.

Après 7 jours au moins de durcissement du coulis, la charge est montée progressivement jusqu'à rupture. Pendant cette montée en charge, la longueur injectée au coulis de ciment devant l'ancrage (côté armature) ne doit pas dépasser 10 cm.

3.4 Présentation des résultats

Le compte rendu de l'essai doit faire apparaître clairement :

- le schéma de montage,
- les dispositions de détail prises pour l'injection,
- la chronologie des opérations,
- la composition et les caractéristiques des produits d'injection (coulis de ciment et, le cas échéant, produits souples au contact de la tête d'ancrage),
- la courbe force-allongement au cours de l'essai,
- la force maximale F_{\max} obtenue,
- la variation d'allongement ΔA entre la reprise de tension à $0,5 F_N$ et le moment où F_{\max} est atteinte,
- la description de la rupture (ruptures successives des brins, glissements à l'ancrage ...),
- les résultats d'une expertise des différents éléments après rupture : examen notamment du remplissage du capot et des interstices entre brins de clavettes.

3.5 Jugement des essais

Les trois conditions suivantes doivent être satisfaites :

$$\frac{F_{\max}}{F_N} \geq 0,98 \qquad \frac{F_{\max}}{F_{RV}} \geq 0,92 \qquad \Delta A \geq 1,2 \%$$

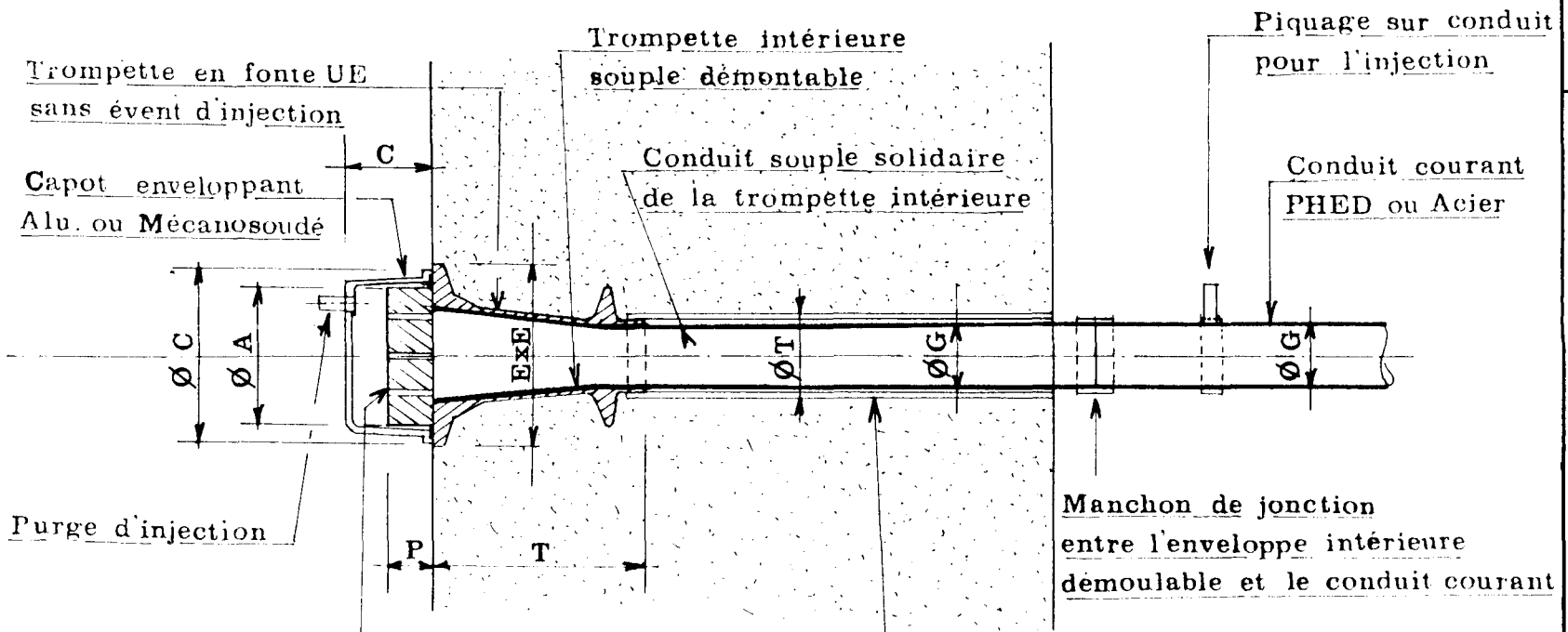
Dessins d'ancrages de précontrainte extérieure démontable

Les dessins ci-après ne sont donnés qu'à titre d'exemple. Il est rappelé que les dispositifs correspondants sont soumis à une procédure spécifique d'agrément ou d'autorisation.

Nom du procédé		N° du dessin
C C L	– ancrage pour précontrainte injectée avec un coulis de ciment	1
	– ancrage pour précontrainte injectée avec un produit souple	2
FREYSSINET	– modèle d'ancrage	3
	– ancrage pour torons gainés-protégés	4
F U C	– dessin de principe	5
L H	– ancrage - protection au coulis de ciment	6
	– ancrage - protection mixte	7
	– capot provisoire de protection des surlongueurs pour câbles injectés à la graisse ou à la cire	8
P A C	– plan de principe	9
V S L	– principe des ancres	10
	– ancrage - injection rigide	11

ANCRAGE DE TYPE R.C. AVEC TROMPETTE UED (= UE Double)

R.C. = précontrainte Remplacable injectée avec un Coulis de ciment



Tête d'ancrage de type U complétée de perçages pour le passage du coulis

Tube coffrant en acier réalisant la double enveloppe (soit rectiligne, soit circulaire)

CCL-UE.90

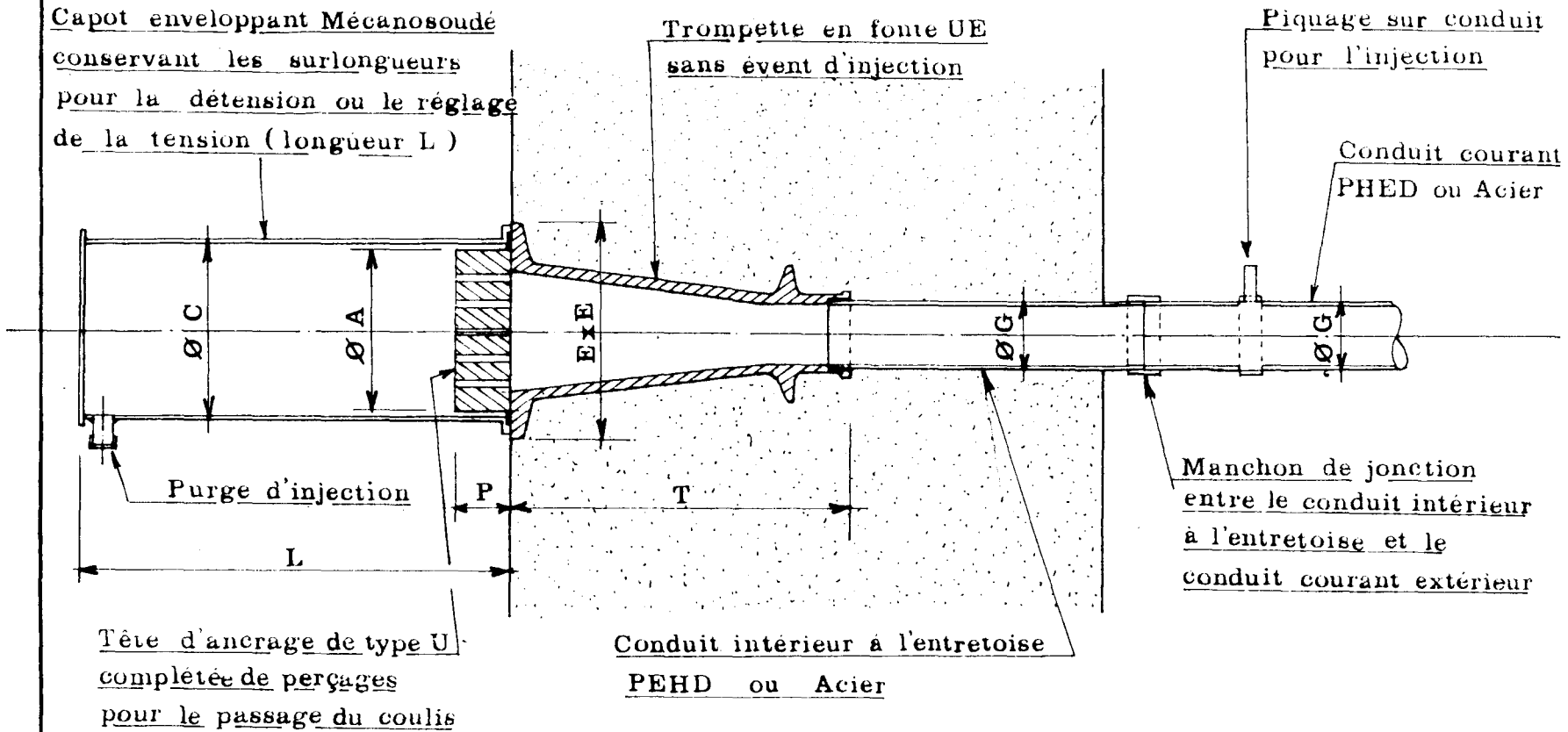
DESSIN DE PRINCIPE

N:1.102

ANNEXE 3

ANCRAGE DE TYPE R.S. AVEC TROMPETTE UE

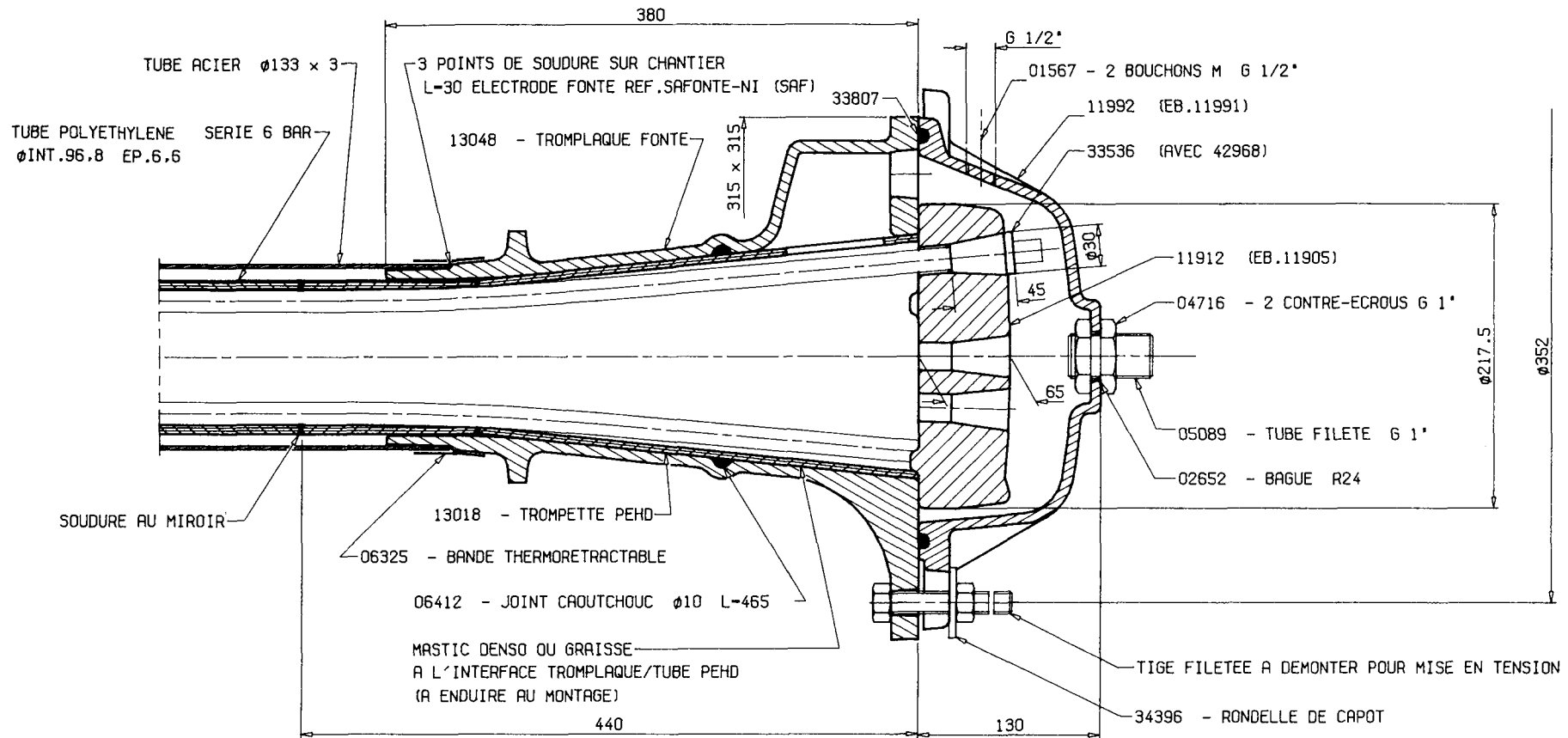
R.S. = précontrainte Remplacable injectée avec un produit Souple



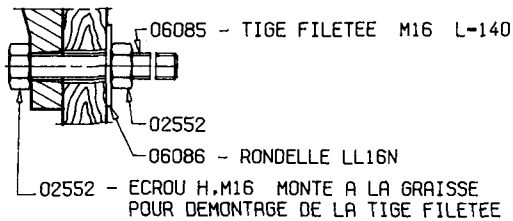
CCL-UE.90

DESSIN DE PRINCIPE N:1.103

ANNEXE 3

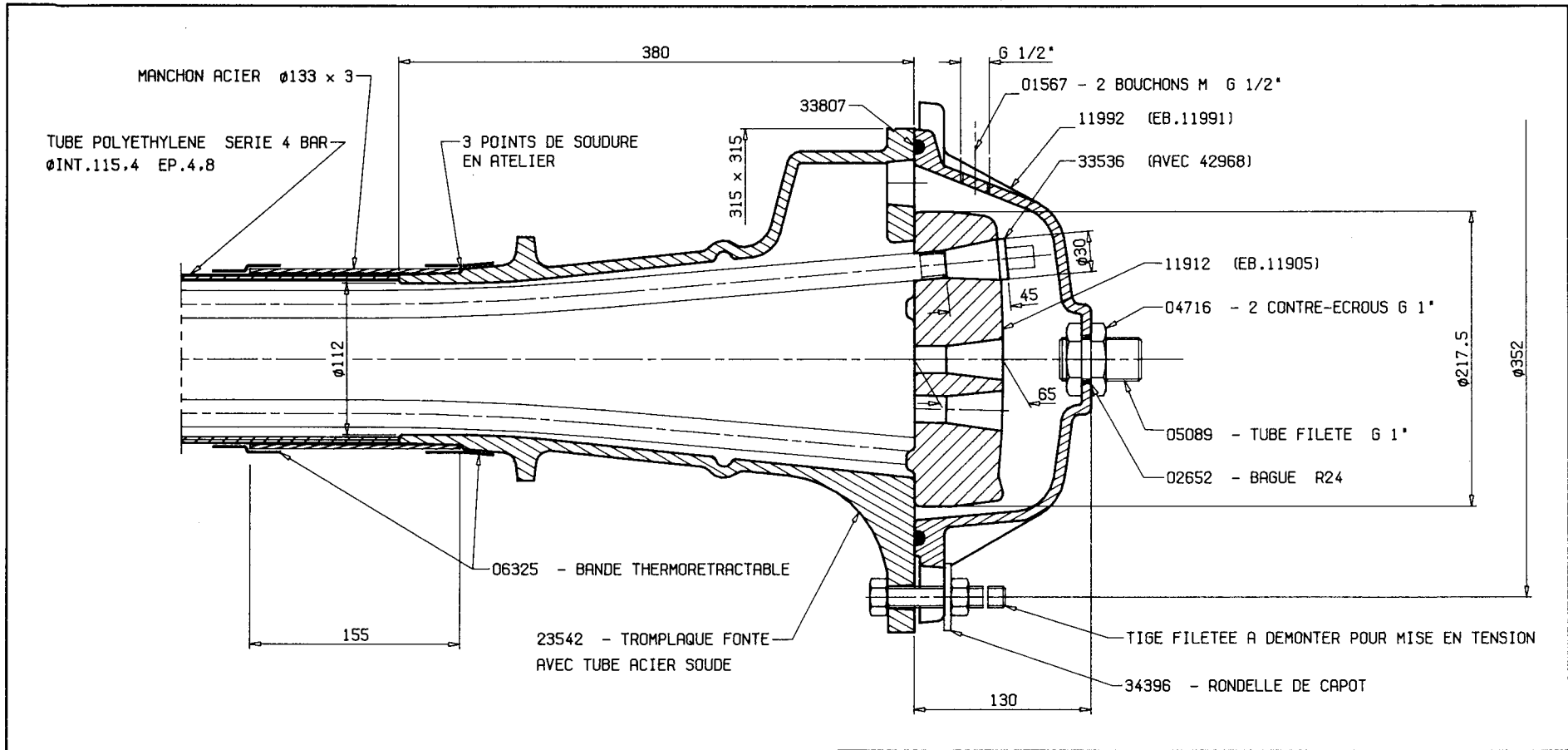


FIXATION SUR COFFRAGE

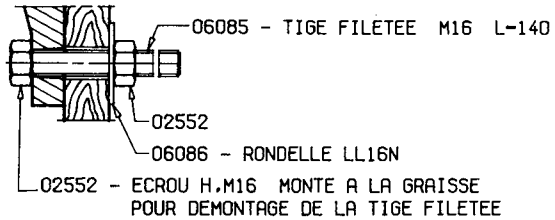


PRECONTRAINTE EXTERIEURE 19K15 - MODELE AVEC TROMPLAQUE FONTE
 SYSTEME 1 : TORONS ORDINAIRES

52-54 rue de la Belle Feuille. 92100 BOULOGNE-BILLANCOURT. FRANCE TELEPHONE : (33.1) 48 84 39 45 - TELEFAX : (33.1) 48 84 39 90 - TELEX : FRESI A 633683 F				
	FORMAT SIZE A1	ECHELLE SCALE /	PLAN / DRAWING N° 13086	IND/REV A
	CREATION FREYSSINET-REPRODUCTION INTERDITE / DESIGNED BY FREYSSINET-COPYRIGHT RESERVED			



FIXATION SUR COFFRAGE

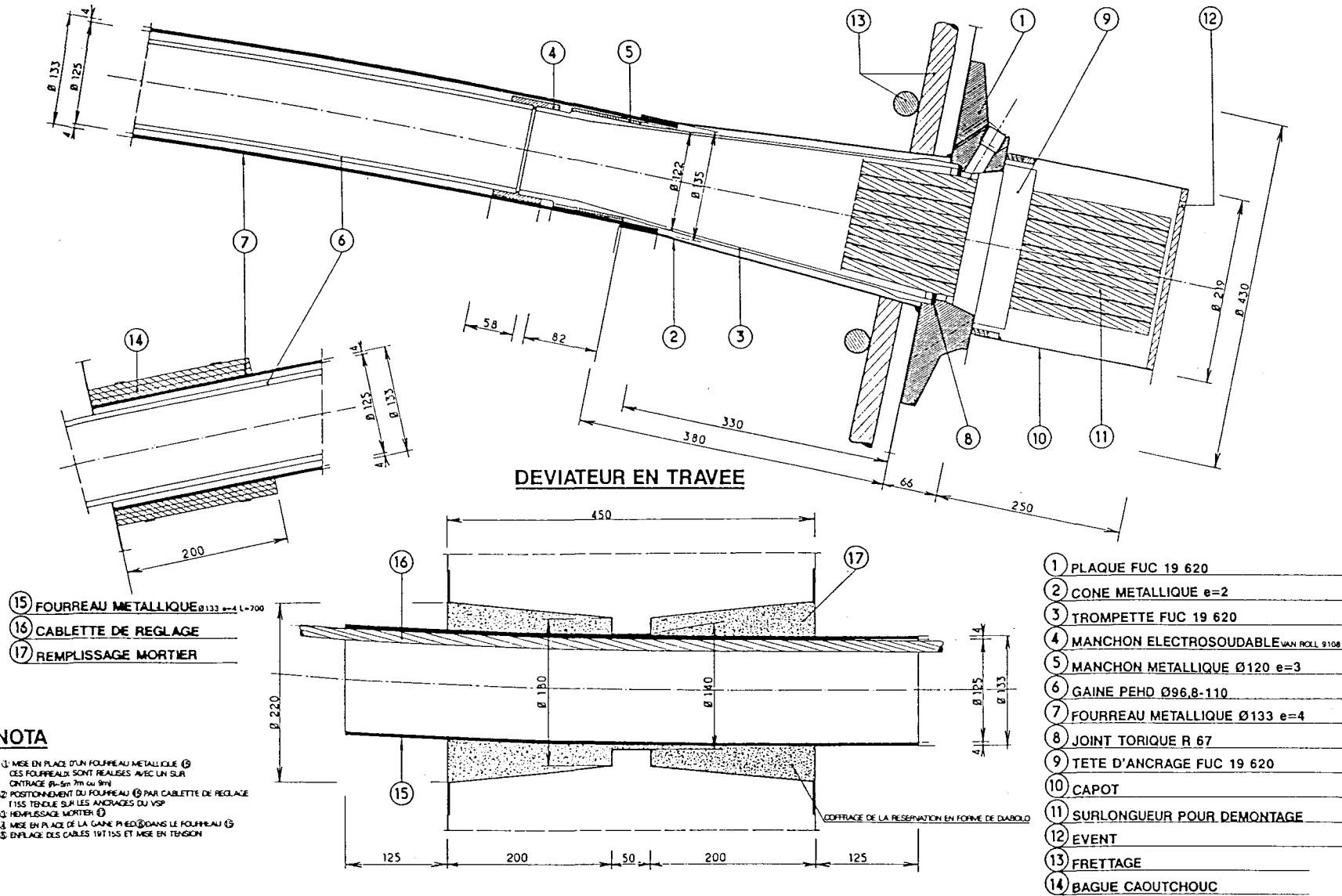


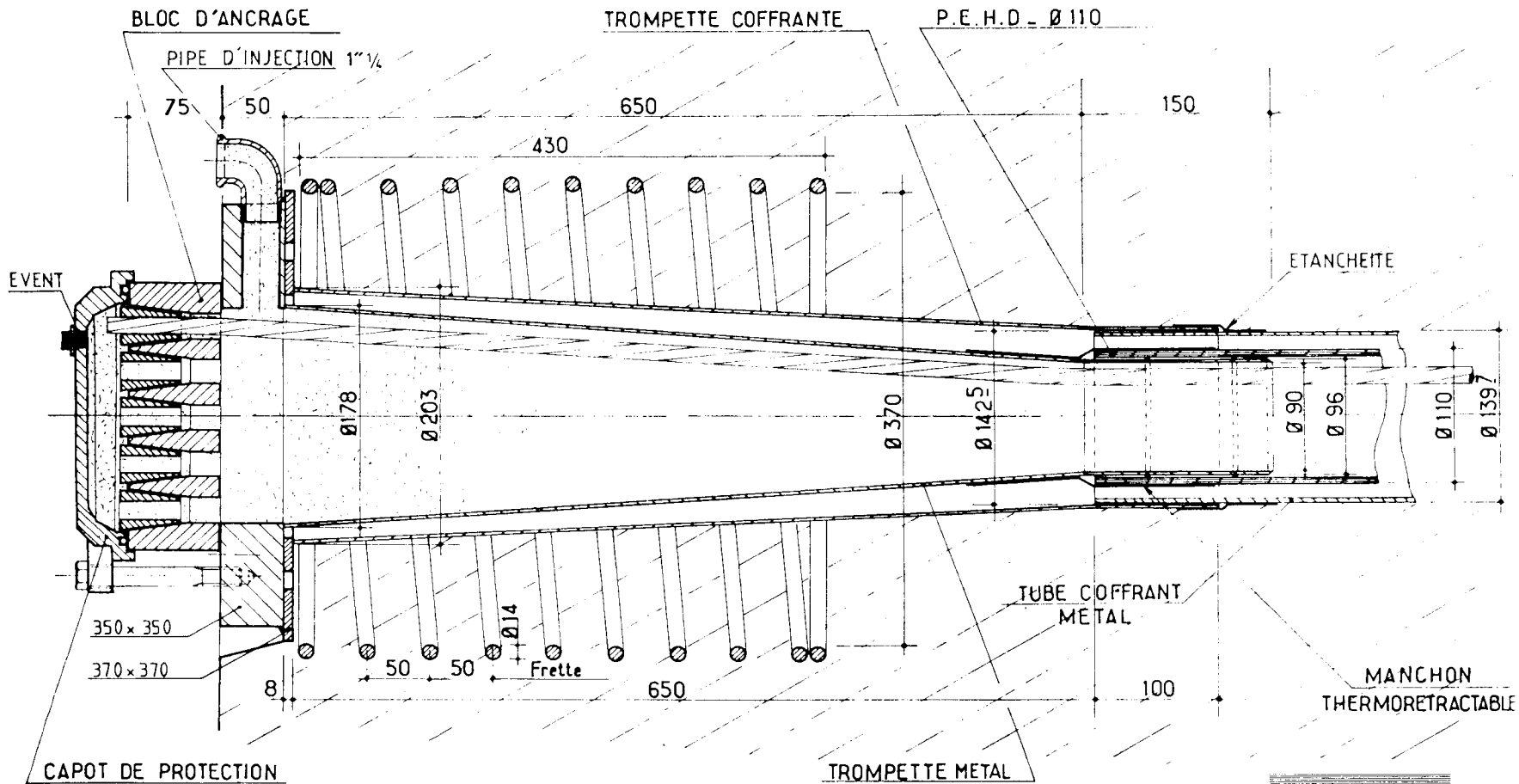
PRECONTRAINTE EXTERIEURE 19K15 - MODELE AVEC TROMPLAQUE FONTE
 SYSTEME 2 : TORONS GAINES PROTEGES

52-54 rue de la Belle Feuille, 92100 BOULOGNE-BILLANCOURT, FRANCE
 TELEPHONE : (33.1) 48 84 39 45 - TELEFAX : (33.1) 48 84 39 90 - TELEX : FRESI A 633683 F

	FORMAT SIZE	ECHELLE SCALE	PLAN / DRAWING N°	IND/REV
	A1	/	13028	A

CREATION FREYSSINET-REPRODUCTION INTERDITE / DESIGNED BY FREYSSINET-COPYRIGHT RESERVED





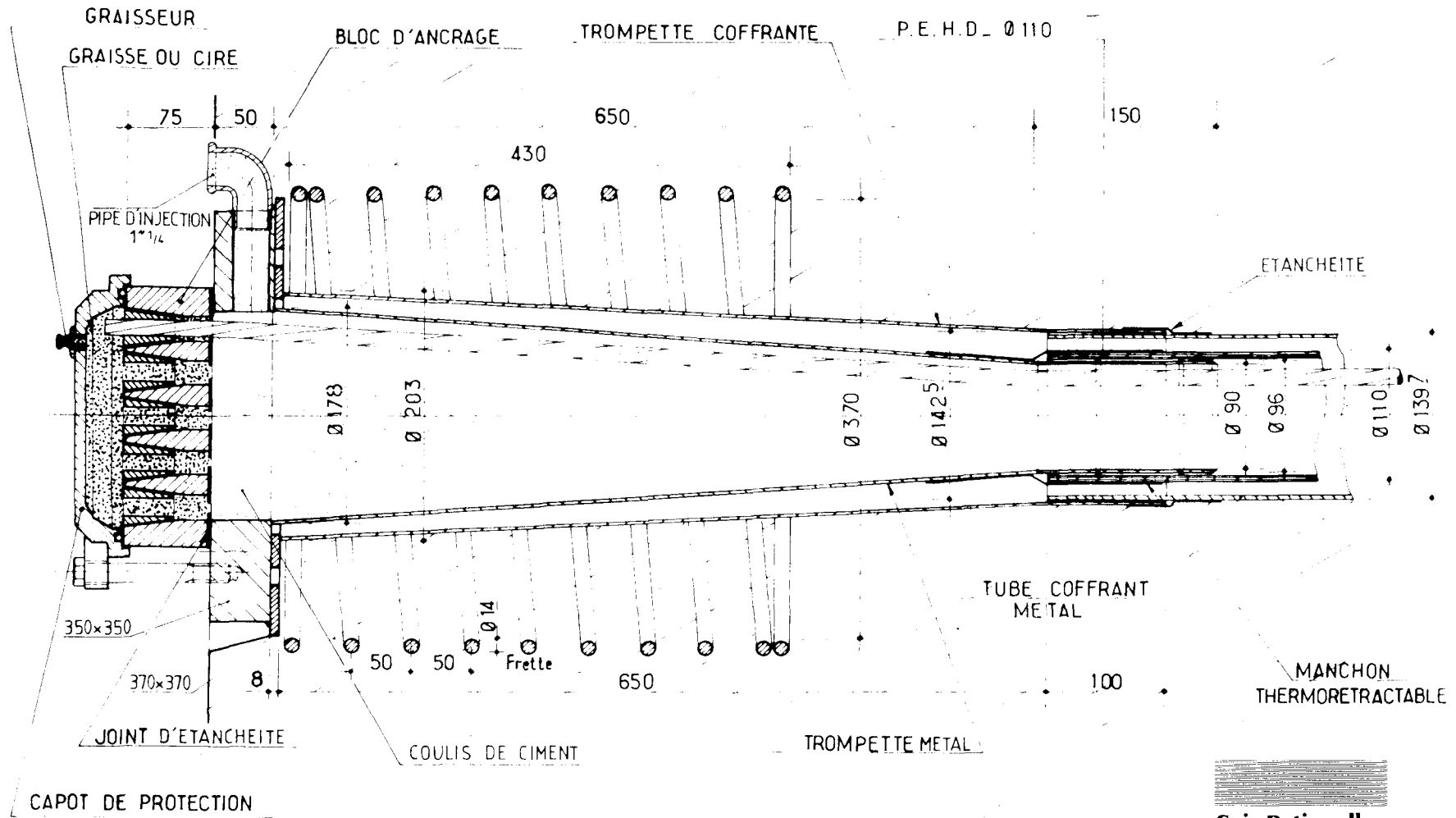
UNITE LHE19 CABLES EXTERIEURS AU BETON - ANCRAGE DEMONTABLE -
 (PROTECTION COULIS DE CIMENT)

Spie Batignolles

DGC/CITRA

DEC.89

ANNEXE 3

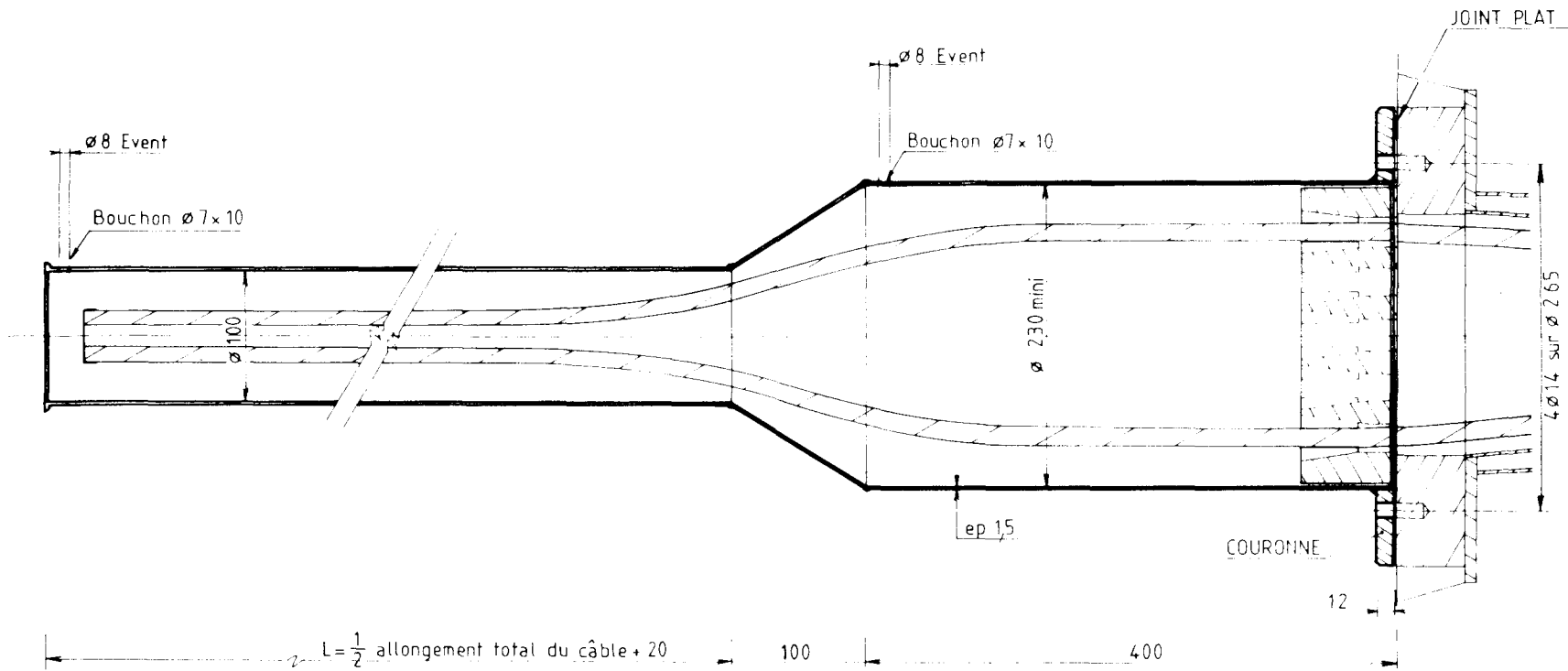


UNITE LHE19 - CABLES EXTERIEURS AU BETON - ANCRAGE DEMONTABLE -
 ANCRAGE DE SECURITE (PROTECTION MIXTE)

Spie Batignolles

DGC/CITRA

DEC. 89



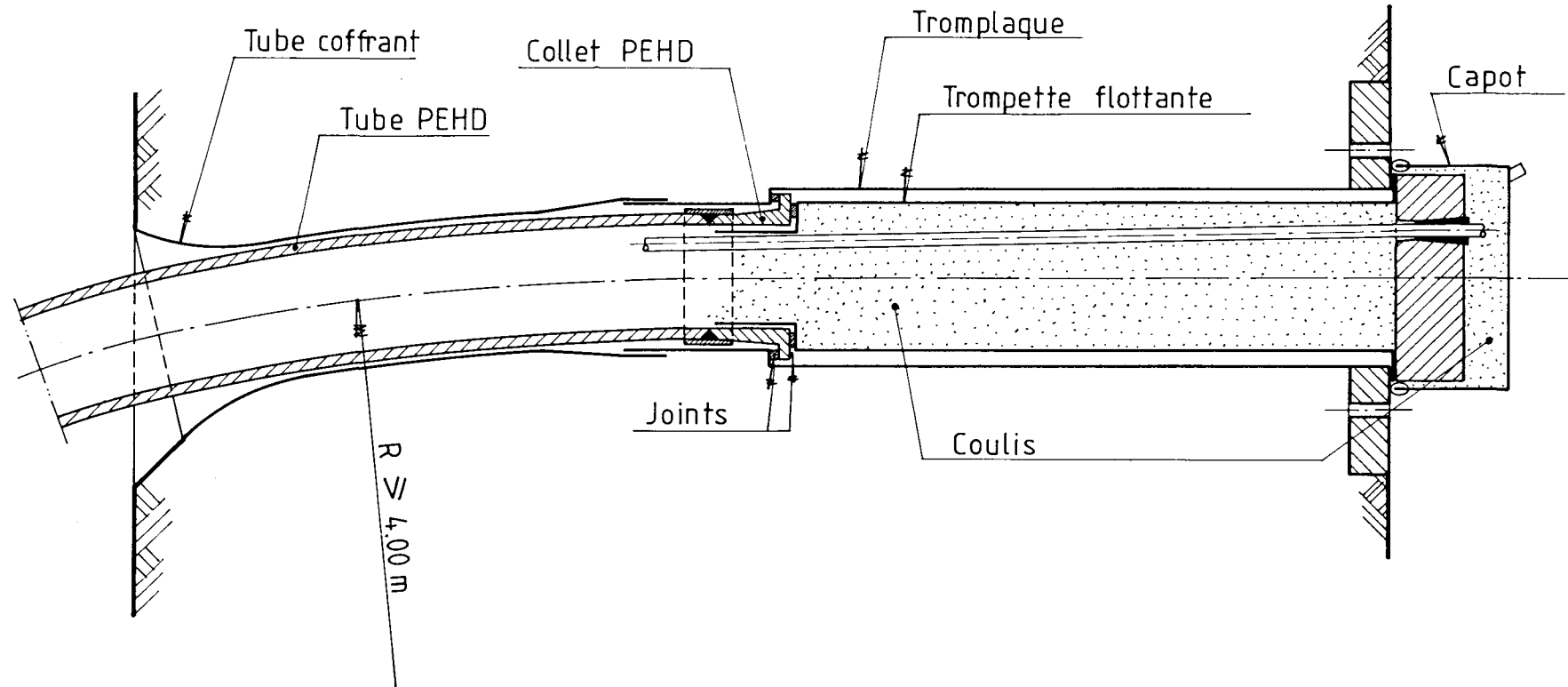
UNITE LHE19 – CAPOT PROVISOIRE DE PROTECTION DES SURLONGUEURS

– POUR CABLES INJECTES A LA GRAISSE OU A LA CIRE –

Spie Batignolles

DGC/CITRA

DEC.89



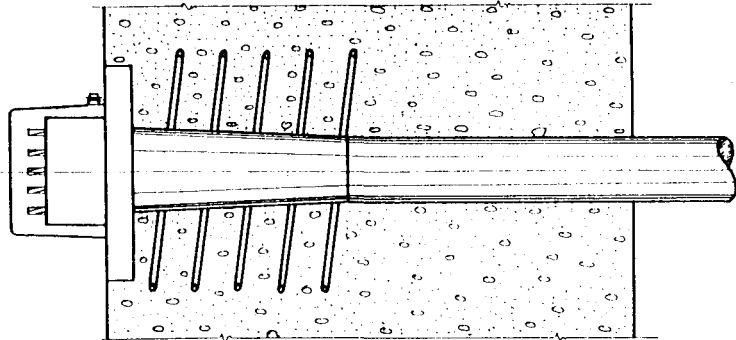
PRECONTRAINTE EXTERIEURE DEMONTABLE

PRINCIPE DES ANCRAGES

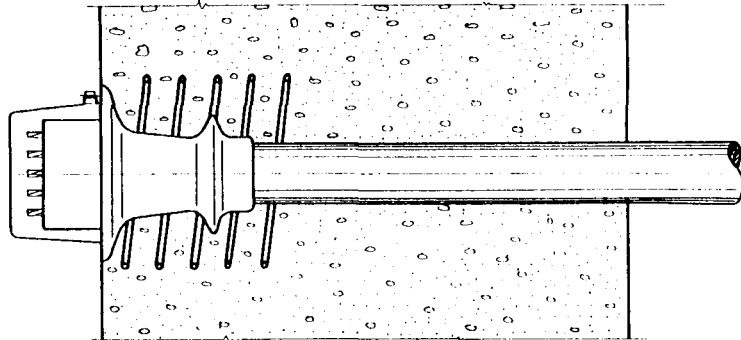
VSL

INJECTION SOUPLE

Ancrage type E

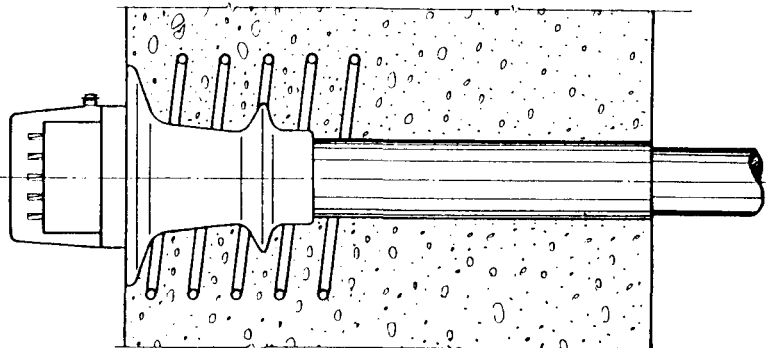


Ancrage type Ec

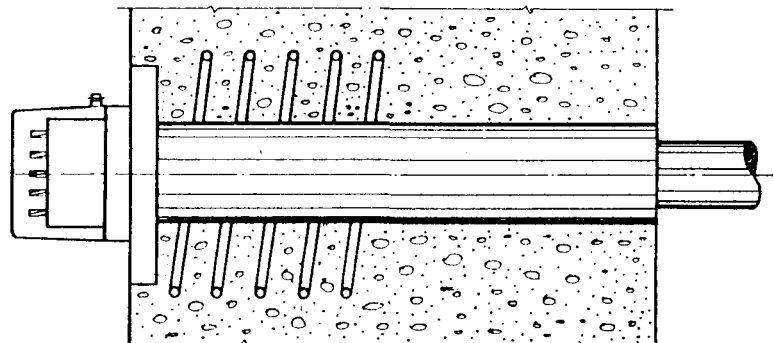


INJECTION RIGIDE

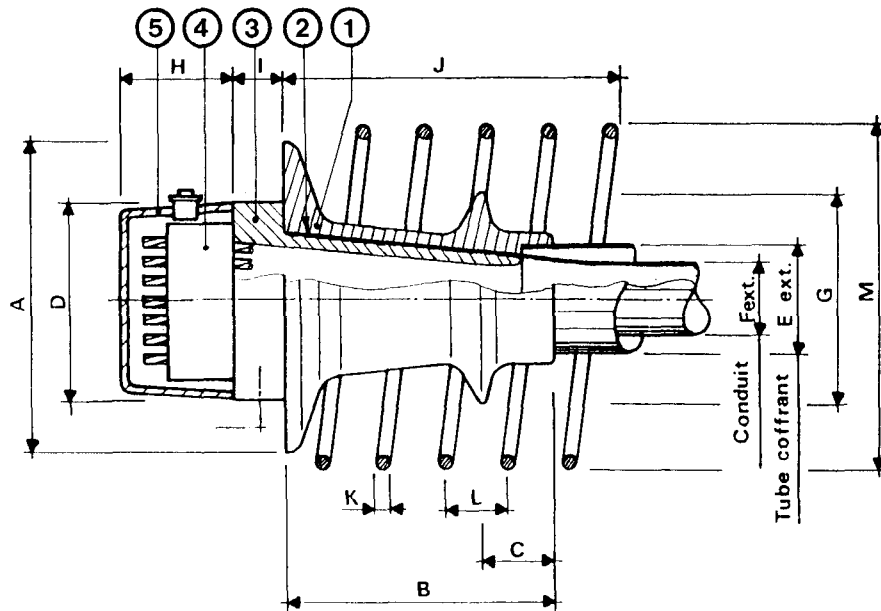
Ancrage type Ed



Variante mécano-soudée du Ed



ANCRAGE DEMONTABLE VSL TYPE Ed



	□A	B	C	∅D	∅E	∅F	∅G	H	I	J	∅K	L	∅M
6_7	250	245	60	175	95	75	190	100	45	345	16	55	330
6_12	310	305	65	225	115	90	235	115	45	440	18	60	400
6_19	390	350	70	275	135	110	295	135	45	540	22	65	510
6_31	430	450	80	305	160	125	320	160	55	605	22	65	550
6_37	520	530	90	320	180	140	420	170	55	745	26	80	640

NOTA

Pour niche et sujétions de fixation de la plaque d'ancrage (type Ec) au coffrage, voir p. 114 de la "Notice technique relative au procédé VSL de précontrainte" avec les dimensions de l'unité immédiatement supérieure à celle considérée. Ex: pour Ed6.19 considérer Ec6.31

REPERE

DESIGNATION

1	plaque d'ancrage, bouchon
2	manchette
3	trompette, joints, coude
4	tête d'ancrage, clavettes
5	capot d'injection, joint, bouchon

MATIERE

fonte
PEHD
fonte
fonte

Références d'ouvrages à précontrainte extérieure

Liste des renseignements fournis pour chaque ouvrage

ANNÉE..... année de fin de construction de l'ouvrage

LOCALISATION

NOM nom du pont

DEPT numéro du département

CONSTRUCTEURS

ENTR..... nom de l'entreprise

PREC nom du procédé de précontrainte

CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

NBTR..... nombre de travées

PORT portée principale en m

LONG longueur totale de l'ouvrage en m

SURF surface de l'ouvrage en m

TYPE DE STRUCTURE - MODE DE CONSTRUCTION

TYPE type d'ouvrage

CONS..... mode de construction

FABR mode de fabrication des éléments du tablier

Préfa préfabriqué

Coulé coulé en place

Autre..... autre

QUANTITÉS DE PRECONTRAINTE

INTÉ précontrainte intérieure en t

EXTÉ précontrainte extérieure en t

PROV..... précontrainte provisoire en t

PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE

ARMA	type d'armatures
F.....	Fil
T	Toron
TGAL.....	Toron galvanisé
TG	Toron gainé
TGG	Toron gainé graissé
TGC.....	Toron gainé ciré
Autre	Autre
COND	type de conduit général
Sans	Sans conduit
Acier	Tube rigide acier
PEHD.....	Gaine PEHD
PVC.....	Gaine PVC
Prop.....	Gaine Polypropylène
Plas.....	Gaine Plastique
Rési.....	Tube résine
Prov.....	Gaine Provisoire
Autre	Autre
INJE	injection
Sans	Sans injection
Coulis.....	Coulis de ciment
Cire.....	Cire
Graisse	Graisse
Epoxy	Brai epoxy
Autre	Autre
DEMO	démontabilité de la précontrainte
N.....	Non démontable
D.....	Démontable
R	Pesable, détentable, retendable

LISTE DES OUVRAGES NEUFS A PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE

classés selon leur année de fin de construction

ANNÉE	LOCALISATION		CONSTRUCTEURS		CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES				TYPE DE STRUCTURE MODE DE CONSTRUCTION			QUANTITÉ DE PRÉCONTRAINTE			PRÉCONTRAINTES EXTÉRIEURES			
	NOM	DEPT	ENTR	PREC	NBTR	PORT	LONG	SURF	TYPE	CONS	FABR	INTE	EXTE	PROV	ARMA	COND	INJE	DEMO
82	VALLON DES FLEURS	06	CAMPENON	FREYS	3	48	111	1150	Pont-caisson	Avancement	Préfa	26,5	16,7	-	T	PEHD	Graisse	D
82	LA BANQUIERE	06	CAMPENON	FREYS	6	43	203	3200	Pont-caisson	Avancement	Préfa	91,0	57,5	-	T	PEHD	Graisse	D
83	LA FLECHE SUR LE LOIR	72	DRAGAGES	VSL	3	64	116	1247	Pont-caisson	Rotation	Coulé	16,0	21,0	-	T	Acier	Graisse	R
83	BUBIYAN KOWEIT		BOUYGUES	PAC	59	54	2383	43370	Ames triangulées	Avancement	Préfa	-	514,0	-	T	PEHD	Coulis	N
83	CERGY PONTOISE	95	CITRA	LH	3	70	142	1675	Pont-caisson	Poussage	Coulé	22,0	17,7	-	T	Acier	Coulis	D
83	RUMILLY SUR LE CHERAN	74	CAMPENON	FREYS	2	46	90	1342	Pont-caisson	Encorbell.t	Préfa	12,8	8,9	0,7	T	PEHD	Coulis	D
84	PONT-A-MOUSSON 2 ^e	54	PERTUY	FREYS	9	76	457	5027	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	71,6	63,0	-	T	PEHD	Coulis	D
84	OA11 A TOUL SUR MOSELLE	54	CAMPENON	FREYS	7	76	169	1770	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé				T	PEHD	Coulis	D
84	SAINT AGNANT	17	CAMPENON	FREYS	6	37	202	2100	Pont à nervures	Avancement	Préfa	-	53,5	-	T	PEHD	Coulis	D
84	SUR L'AIGUES A SERIGNAN	84	CAMPENON	FREYS	3	35	97	970	Pont à nervures	Cintre	Coulé	-	16,0	-	T	PEHD	Coulis	D
84	LYONS 2 ^e (2 tabs en Y)	76	CAMPENON	FREYS	4	37	135	3900	Pont-caisson	Cintre	Préfa	-	104,0	-	T	PEHD	Coulis	D
85	SERMENAZ	69	GFC	FREYS	5	90	396	7358	Pont-caisson	Encorbell.t	Autre	48,0	283,0	-	TGAL	Sans	Sans	R
85	ROQUEBILLIERE CAHORS	46	DRAGAGES	VSL	7	110	525	6038	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	126,0	90,0	-	T	PEHD	Coulis	N
85	OA33 MARSEILLE (2 tabs)	13	DRAGAGES	VSL	8	43	286	8308	Pont-caisson	Poussage	Coulé	100,0	60,0	80,0	T	PEHD	Coulis	N
85	PS 8 BEPAC SALBRIS	41	SCAO	CCL	1	38	40	297	Ames métal. planes	Poussage	Coulé	-	9,0	7,5	T	PEHD	Cire	D
85	SUR LA DARSE A86 (2 tabs)	94	QUILLERY	CCL	10	76	680	22400	Pont-caisson	Encorbell.t	Préfa	430,0	220,0	-	T	Acier	Graisse	D
85	VAL DE DURANCE	84	CAMPENON	FREYS	6	51	289	3160	Pont-caisson	Poussage	Coulé	-	150,1	58,0	T	PEHD	Coulis	D
85	VAUBAN	67	CAMP-SATP	FREYS	4	42	140	3060	Pont-caisson	Autre	Préfa	49,7	41,1	-	T	PEHD	Coulis	D
85	CHINON SUR LA VIENNE	37	GTM	SEEE	3	70	166	1809	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	55,0	50,0	-	T	Acier	Coulis	D
85	ARBOIS SUR LA CUISANCE	39	SGE DTP	PAC	3	40	100	1100	Ames triangulées	Cintre	Coulé	-	13,0	-	T	PEHD	Coulis	D
85	METRO VAL DE LILLE	59	NORPAC	PAC	75	48	2848	19082	Pont-caisson	Cintre	Coulé	-	381,0	-	T	PEHD	Coulis	D
86	PONCIN	01	CITRA-DTP	LH	6	155	568	11125	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	320,0	230,0	40,0	T	PEHD	Coulis	D
86	LAKDAR MAROC		CITRAM	LH	3	54	107	1120	Pont-caisson	Poussage	Coulé	16,0	10,9	-	TGAL	Prov.	Sans	D
86	G12 OA14 MONTIGNY	78	BOUYGUES	FREYS	3	33	66	2475	Pont-caisson	Poussage	Coulé	15,5	22,6		T	PEHD	Coulis	D
86	G12 OA15 MONTIGNY	78	BOUYGUES	FREYS	3	33	75	1025	Pont-caisson	Poussage	Coulé	6,5	9,4		T	PEHD	Coulis	D
86	OA18 ET OA21 STRASBOURG	67	CAMPENON	FREYS	3	30	70	1200	Ponts à nervures	Poussage	Coulé	-	22,5	11,7	TGG	PEHD	Coulis	D
86	LE VENANT (2 tabliers)	03	GFC	FREYS	5	80	340	7400	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	100,0	88,0	-	T	PEHD	Coulis	D
86	COGNAC	17	CAMPENON	FREYS	3	43	107	1292	Ames métal. pliss.	Cintre	Coulé	0,5	18,4	-	T	PEHD	Coulis	D

LISTE DES OUVRAGES NEUFS A PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE (suite)

ANNÉE	LOCALISATION		CONSTRUCTEURS		CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES				TYPE DE STRUCTURE MODE DE CONSTRUCTION			QUANTITÉ DE PRÉCONTRAINTÉ			PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE			
	NOM	DEPT	ENTR	PREC	NBTR	PORT	LONG	SURF	TYPE	CONS	FABR	INTE	EXTE	PROV	ARMA	COND	INJE	DEMO
87	LA SIOULE	03	GTM	SEEE	5	45	203	4000	Pont-caisson	Poussage	Coulé	54,7	18,3	13,7	T	Acier	Coulis	D
87	BEAUMONT SUR OISE	95	DRAGAGES	VSL	3	120	192	2054	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	43,4	30,8	3,9	T	PEHD	Coulis	D
87	JULES VERNE AMIENS	80	CAMPENON	FREYS	19	51	943	9807	Pont-caisson	Poussage	Coulé	-	213,4	54,4	T	PEHD	Cire	R
87	SYLANS (2 tabliers)	01	BOUYGUES	FREYS	21	61	1266	27217	Ames triangulées	Encorbell.t	Préfa	-	388,3	-	T	PEHD	Coulis	D
87	GLACIERES (2 tabliers)	01	BOUYGUES	FREYS	4	61	214	4588	Ames triangulées	Encorbell.t	Préfa	-	65,7	-	T	PEHD	Coulis	D
87	TRES CASSES	82	CB-GTM	FREYS	5	77	260	2750	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	14,9	47,6	-	T	PEHP	Coulis	D
87	VALLON DE MAUPRE CHAROL.	71	CAMPENON	FREYS	7	54	325	3488	Ames métal. pliss.	Poussage	Coulé	5,5	30,0	20,0	T	PEHD	Coulis	D
88	ARRET DARRE TARBES	65	CITRA	LH	6	100	512	10445	Pont-caisson	Encorbell.t	Préfa	216,0	144,0	-	T	PEHD	Coulis	D
88	CHARIX A40 (2 tabliers)	01	CITRA	LH	8	65	542	10395	Pont-caisson	Poussage	Coulé	160,0	180,0	120,0	T	PEHD	Coulis	D
88	ILE DE RE	17	BOUYGUES	FREYS	29	110	2926	45353	Pont-caisson	Encorbell.t	Préfa	1053,0	717,0	-	T	PEHD	Coulis	D
88	FREBUGE A40 (2 tabliers)	01	CITRA-CBC	LH	10	47	453	9513	Pont-caisson	Avancement	Préfa	58,0	96,0	-	T	PEHD	Coulis	D
88	BORRIGLIONE A8	06	QUILLERY	CCL	6	41	248	2608	Pont-caisson	Poussage		42,0	23,0	-	T	PEHD	Cire	D
88	PUYBRUN SUR LA DORDOGNE	46	BISSEUIL	VSL	3	56	140	1400	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	14,6	11,7	-	T	Prop.	Coulis	D
88	PERTUISET	42	GFC	FREYS	1	132	136	1442	Pont à haubans	Encorbell.t	Coulé	11,5	15,0	-	T	PEHD	Coulis	D
88	PONT CANAL SUR A55	30	SUD-TRAVA	FREYS	3	29	66	330	Pont-caisson	Cintre	Coulé	-	5,2	-	T	PEHD	Coulis	D
89	SAINT-CYPRIEN	24	SPIE-BAT.	LH	3	82	202	3300	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	37,5	34,0	-	T	PEHD	Coulis	D
89	CHAMP DU COMTE	73	GTM	SEEE	12	100	1040	19900	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	530,2	350,3	-	T	PEHD	Coulis	D
89	FRANCIN A43 (2 tabliers)	73	CAMPENON	FREYS	4	54	200	4000	Pont-caisson	Avancement	Préfa	46,7	40,9	-	T	PEHD	Coulis	D
89	JOIGNY	89	DALLAVERA	VSL	3	46	114	1710	Pont à nervures	Cintre	Coulé	-	48,0	-	T	PEHD	Coulis	D
89	TRAMWAY DE GRENOBLE	38	CB-SOG-PA	FREYS	6	49	249	1930	Pont-caisson	Avancement	Préfa	24,6	24,6	-	T	PEHD	Coulis	D
90	MIRIBEL-JONAGE	01-69	CAMP-GFC	FREYS	11	53	531	6370	Pont-caisson	Avancement	Préfa	76,1	59,4	-	T	PEHD	Coulis	D
90	BARDONNEX (2 tabliers)	74	GTM	SEEE	8	47	358	9300	Pont-caisson	Poussage	Coulé	133,0	66,4	37,6	T	PEHD	Coulis	D
90	ORLYVAL A6	91	DEMATHIEU	VSL	5	32	135	878	Pont-caisson	Poussage	Coulé	12,3	7,6	3,0	T	PEHD	Coulis	D
90	JOLIMONT METRO TOULOUSE	31	DEMATHIEU	CCL	4	32	120	910	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	-	11,0	-	T	PEHD	Coulis	D
91	PIEMONT PRES DE LONGWY	54	CITRA	LH	8	72	530	8000	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	110,0	105,0	-	T	PEHD	Coulis	D
91	CHEVIRE A NANTES (accès)	44	QUILLERY	FREYS	22	242	1563	34400	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	695,0	534,0	10,0	T	PEHD	Coulis	D
91	BELLEVUE 2 ^e	44	SPIE-BAT.	LH	6	74	385	4600	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	64,4	69,7	-	T	PEHD	Coulis	D
91	LE BOURRAN A RODEZ	12	DODIN	PAC	5	100	325	4225	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	65,0	40,1	-	T	PEHD	Coulis	D
91	RIVIERE ST DENIS REUNION		SBTPC	PAC	4	78	256	4808	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	78,7	61,5	-	T	PEHD	Coulis	D
91	ROCHEFORT	17	BOUY-QUIL	FREYS	13	120	1041	18530	Pont-caisson	Encorbell.t	Coulé	308,0	211,0	-	T	PEHD	Coulis	D

Bibliographie

1. Beton und Eisen - 20 novembre 1929 - Cahier 22
Der Bau eine Saalebrücke aus Eisenbeton bei Alsleben
M.M. Buschmann et Thiele
2. Bautechnik 1939 - n° 8
Die Adolf Hitler Brücke in Aue (Saxen)
M. Schoenberg et F. Fichtner
3. Annales des Travaux Publics de Belgique 1950
Le pont de Sclayn sur la Meuse
E. Storrer

Mesure des efforts et de leurs variations dans les fils accessibles des ouvrages en béton précontraint
Application au pont de Sclayn
E. Dehan et H. Louis
4. Revue Travaux - avril 1951
Nouveau mode de mise en précontrainte
Pont de Vaux-sur-Seine
E. Fougea et M. Cayla
5. La Technique Moderne. Construction - sept. 1951
Reconstruction du pont de Vaux-sur-Seine.
Un nouveau procédé de mise en tension
des armatures dans un ouvrage précontraint
L. Moineau
6. Annales de l'ITBTP - juillet-août 1953
Le pont de Villeneuve-Saint-Georges
H. Lossier - M. Bonnet - L. Thomas
7. V.S.L. News letter A 29 - mars 1976
Les viaducs d'Exe et d'Exminster. Angleterre
8. *Concrete International* - août 1980
Segmental bridge design in the Florida Keys
E.C. Figg
9. PCI JOURNAL - november-december 1980
Construction of Long Key Bridge
J. Muller

Design features and prestressing aspects
of Long Key Bridge
T.M. Gallaway
10. Revue Travaux - décembre 1981
Développement de l'innovation dans le domaine
des grands ouvrages
M. Virlogeux
11. Rapport Final - 9^e Congrès FIP - Stockholm 1982
Évolution de la conception des ponts de portée
moyenne
M. Virlogeux
12. Revue Travaux - novembre 1982
Le pont de Bubiyan au Koweït
R.A. Martin - P. Richard- B. Raspaud
13. Bulletin annuel de l'AFPC - 1980/81/82
Viaducs du Vallon des Fleurs et de la Banquière
14. Revue Travaux - janvier 1983
Réparation du bâtiment émetteur d'Europe n° 1
au Felsberg (Sarre)
P. Xercavins
15. Revue Travaux - juillet-août 1983
Le nouveau pont sur le Loir à la Flèche
M. Virlogeux - M. Placidi - D. Hirsch - G. Lacoste
J. Mossot - P. Fresnais - M. Colas
16. Annales de l'ITBTP - décembre 1983 - Journée
d'Études - AFPC - ITBTP du 25 novembre 1982
La précontrainte extérieure
M. Virlogeux
La construction à l'avancement
J. Combault

17. Industria Italiana del Cemento - avril 1984
**The Long Key Bridge, Florida :
new deck construction procedures**
Figg and Muller
18. Industria Italiana del Cemento - août 1984
**A spatial lattice in prestressed concrete for the deck
of the Bubiyan bridge in Kuwait**
P. Richard
19. Publication AFPC - 12^e Congrès AIPC - Vancouver 84
Test loading of a concrete truss
J. Bruneau - G. Causse - B. Raspaud - B. Radiguet
**Concrete structures with steel elements outside
the concrete section**
M. Ivkovic - M. Acic - Z. Perisic - A. Pakvor
20. Thèse de doctorat du 3^e cycle, Université Pierre
et Marie Curie - Paris VI, octobre 1984
**Calcul à rupture des poutres à précontrainte
extérieure au béton**
A. M' Rad
21. Bulletin annuel de l'AFPC 1983/84
Viaduc de Lyons
Pont d'Aiguilly
Pont de Cergy-Pontoise
Pont de Bléré
Viaduc de Saint-Agnant
Viaduc de Rumilly
Viaduc d'Alfortville
Pont de la Flèche
Viaduc de Pont-à-Mousson
22. Revue Travaux - janvier 1985
Le Viaduc de Sermenaz
M. Pham-Tao - J. Piron - Ph. Lecroq
Le Viaduc de Saint-Agnant
J. Combault - D. Poineau - D. Gobinet - M. Duviard
F. Edon - M. Virlogeux
**La construction du 2^e Pont sur la Moselle
à Pont-à-Mousson**
G. Causse - T. Duclos - M. Virlogeux - J.-M. Bonnet
J.-C. Humbert - C. Leclerc - J.-P. Aubry
J.-P. Cazenave - A. Ghenassia
23. Revue Travaux - mars 1985
**Injection à la cire pétrolière des câbles
de précontrainte**
**Mise en oeuvre en première mondiale
au Viaduc de la Boivre**
A. Chabert - S. Barbaux - M. Ivanoff
24. Industria Italiana del Cemento - avril 1985
The new bridge over the Loir river at La Flèche
M. Virlogeux - M. Placidi - C. Lavigne
25. CEBTP - SES - novembre 1985
**Essais de flexion sur des poutres en béton
précontraintes par des câbles extérieurs**
**Etude expérimentale sur des poutres à voussoirs
préfabriqués**
L. H. Hoang - M. Pasquignon - B. Fouré
26. Revue Travaux - janvier 1986
**Viaduc du franchissement de la Darse d'Alfortville
par l'autoroute A 86**
A. Heusse - X. Bonneau
Pont sur le Kouilou
D. Mabounga - L. Sakala - M. Zumaglini - C. Servant
Y. Sidibe - Tran Vo Nhiem
Caractéristiques principales des ouvrages suivants :
Pont de Chinon sur la Vienne
Pont de Rumilly sur le Chéran
**Autoroute A 51 - OA 82 franchissement
de la Durance**
**Viaduc OA 33 sur l'autoroute du Littoral
de Marseille**
Pont de Cergy-Pontoise
Pont sur l'Aigues à Serignan
Viaduc de Lyons n° 2
Passage supérieur n° 8 sur A 71
Viaduc de Saint-Agnant
27. Revue Travaux - Supplément au numéro
de janvier 1986 - 10^e Congrès FIP - New Delhi 1986
**La précontrainte extérieure Freyssinet
International**
Rétrospective d'une évolution
P. Jartoux
**Évolution et développement des ponts modernes
à précontrainte totalement extérieure au béton**
J. Combault
Précontrainte extérieure au béton
**Comportement jusqu'à rupture de poutres
à voussoirs préfabriqués**
B. Fouré - M. Virlogeux
**Utilisation de la cire pétrolière dans le domaine
du Génie Civil**
A. Chabert
**Améliorations des connaissances sur la mise
en oeuvre de la précontrainte**
A. Chabert - R. Ambrosino - J. Lavigne - A. Rémy
B. Fargeot - P. Jartoux
28. Rapport Final - 10^e Congrès FIP - New Delhi 1986
**New prestressed concrete hangar at the Belgrade
International Airport in Yugoslavia**
M. Ivkovic - Z. Perisic - A. Pakvor - M. Acic
29. Industria Italiana del Cemento - avril 1986
**Campeon Bernard. Two viaducts for
the Estérel - Côte d'Azur motorway (France)**
S. Capitanio - A. Guerrieri

30. Chantiers de France - septembre 1986
Autoroute A 71 - Viaduc sur le Venant
31. FIP Recommendations 1986
Corrosion protection of unbonded tendons
32. Journée d'études de la SIA - 26 septembre 1986
Genève 1986
Évolution de la construction des grands ouvrages en France
M. Virlogeux
33. PRAGUE - octobre 1986
Vnejsi predpinani betonu. Inzenyrske stavby
M. Virlogeux
34. Revue Travaux - octobre 1986
Les ouvrages n° 14 et 15 de la voie Express G12
Ph. Meyrand
35. FIP Notes 1987/2
External prestressing of concrete
M. Virlogeux
36. CEBTP - SES - mai 1987
Essais de flexion sur des poutres en béton précontraintes par des câbles extérieurs
Étude expérimentale sur des poutres coulées en place
L.-H. Hoang - M. Pasquignon
37. Chantiers de France - octobre 1987
Pont de l'Île-de-Ré
38. Chantiers de France - novembre 1987
Pont sur la Charente à Cognac
Viaduc de Maupré à Charolles
39. Symposium de l'AIPC - Paris-Versailles 1987
Ponts poussés à précontrainte totalement extérieure
J. Combault - P. Néron - A. Leveille - J.-L. Thibonnet
Les viaducs de Sylans et Glacières
J. Boudot - P.X. Thao - B. Radiguet
Viaduc de Poncin
C. Servant
Viaduc de l'Arrêt Darré
C. Servant
Évolution récente des ponts en béton précontraint
J. Mathivat
40. IABSE - 13 th Congress - Helsinki 1988
The introduction of unbonded greased or waxed tendons in external prestressing
A. Chabert - P. Jartoux - P. Villette
Charix viaduct
C. Cézard - C. Servant
41. FIP Symposium - Jérusalem 1988
External Prestressing
A. Chabert - P. Jartoux - R. Villette
French specifications concerning protected sheathed strands
A. Chabert
Non-linear analysis of externally prestressed structures
M. Virlogeux
42. Annales de l'ITBTP - octobre 1988
L'ouvrage 33 sur l'autoroute du Littoral à Marseille
G. Gillet - Ph. Jacquet
43. Revue Travaux - octobre 1988
Le viaduc de Poncin sur l'autoroute A 40 (Ain)
Y. Grennerat
Le pont sur la voie 3 de Cergy-Pontoise (Val d'Oise)
M. Falempin - J.-E. Simon - J.-P. Glasson - A. Lacroix
P. Villette - C. Servant
Le pont de Beaumont-sur-Oise (Val d'Oise)
B. Cathelain - M. Falempin - G. Edon - D. Poineau
G. Arnaud - Ph. Jacquet - M. Placidi - D. Regallet
44. Revue Travaux - janvier 1989
La réparation du pont de Cadenet sur la Durance
P. Faure - P. Guérin - Y. Godet - P. Villette - D. Jeager
D. Laurens - A. Chabert - C. Servant
45. FIP Commission « Prestressing Steel and systems »
External prestressing - Draft report
46. C.E.B. - G.T.G. 17
« State of the art report on internal and external unbonded tendons »
(Draft report to be published)

Ce document sur la précontrainte extérieure comporte deux parties :

- la première constitue un point des connaissances accumulées depuis plus de dix ans, en faisant le tour des différentes solutions mises en œuvre ;
- la deuxième définit un ensemble de prescriptions et de spécifications pour les conduits, les déviateurs, les zones d'ancrage et les études d'exécution, et peut être directement visée dans les CCTP.

This document on external prestressing is divided into two parts :

- the first one presents the state of the knowledge gathered for more than ten years, by describing the different implemented solutions ;
- the second one defines a group of regulations and specifications for ducts, deviators, anchorage areas and execution studies, and may be input directly in the Special Technical Clauses Book.

Ce document est disponible au Bureau des ventes des publications du SETRA

☎ 42 31 31 53

Réf. F9024 - Prix : 140 Frs