

## 8.2 Le béton précontraint

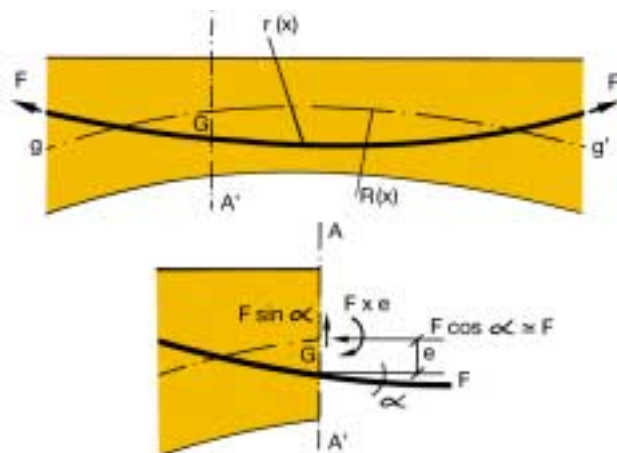
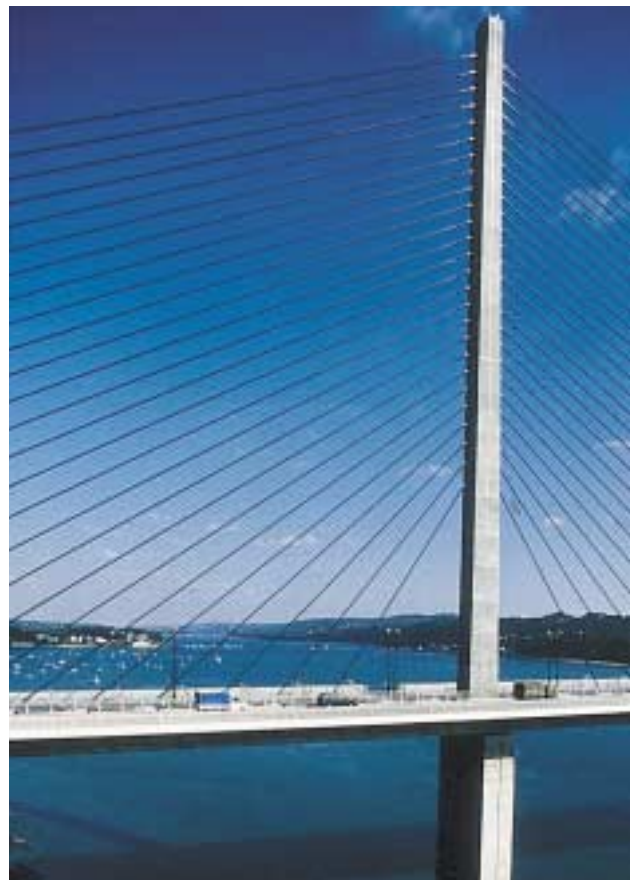
Comme le béton armé, le béton précontraint associe béton et armatures, mais il s'en différencie de façon fondamentale dans son principe.

En 1935, son inventeur, Eugène Freyssinet, définissait ainsi la précontrainte : « Précontraindre une construction, c'est la soumettre avant application des charges à des forces additionnelles déterminant des contraintes telles que leur composition avec celles qui proviennent des charges donne en tout point des résultantes inférieures aux contraintes limites que la matière peut supporter indéfiniment sans altération. »

La précontrainte, en effet, a pour but de soumettre le béton à des contraintes préalables de compression telles qu'une fois en service, elles s'opposent aux contraintes de traction créées par les charges et maintiennent le béton en état de compression.

Le béton, matériau qui présente une faible résistance à la traction, se trouve ainsi utilisé au mieux de ses possibilités en ne travaillant qu'en compression. Cette technique est à l'origine de progrès considérables dans l'emploi du béton, que ce soit dans les structures et les ouvrages d'art ou dans les éléments préfabriqués pour le bâtiment.

La précontrainte permet la réalisation d'ouvrages soumis à des contraintes importantes (ponts ou réservoirs de grande capacité) aussi bien que d'éléments qui, tout en étant de faible épaisseur, doivent assurer des portées relativement longues (dalles-planchers, poutres).



### Comment agit un câble de précontrainte ?

Pour bien comprendre la décomposition de l'effort exercé par un câble de précontrainte, il est intéressant de considérer le cas simple d'une poutre fléchie, comprimée par une force égale et opposée à la tension  $F$  du câble.

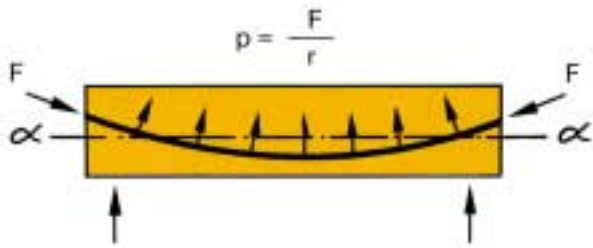
Au centre de gravité  $G$  d'une section quelconque  $AA'$  de la poutre, les efforts peuvent se réduire à :

- un effort normal  $F \times \cos \alpha \approx F$  (car l'angle  $\alpha$  est petit) ;
- un moment de flexion  $F \times e$  ;
- un effort tranchant  $F \times \sin \alpha$ .

Pour une poutre isostatique de hauteur constante et dont la ligne moyenne est rectiligne, un câble de courbure constante exerce des efforts verticaux uniformément répartis le long de la poutre  $p = \frac{F}{r}$  qui

s'opposent aux charges supportées par la poutre et à son poids propre. L'équilibre se traduit par la relation :

$$\sum \frac{F}{r(x)} = 2F \times \sin \alpha$$



En fait, l'assimilation de l'action de la précontrainte à une charge répartie est rarement utilisée dans les calculs, du fait de la complexité à laquelle conduit cette analyse. On préfère considérer la précontrainte comme un effort extérieur sollicitant la section de l'élément considéré en flexion composée, et se réduisant aux efforts ramenés au centre de gravité : effort normal, effort tranchant, moment de flexion.

En présence de forces extérieures développant des efforts tranchants, l'effort tranchant résultant est la somme algébrique de ces efforts et de ceux engendrés par la précontrainte. Dans une section quelconque d'un élément où l'effet de la précontrainte  $F \times \sin \alpha$  (s'oppose à celui des forces extérieures  $V$ , l'effort tranchant réduit  $V_r$ , est égal à :

$$V_r = V - F \times \sin \alpha$$

Dans la pratique, la tension d'un câble de précontrainte est calculée pour appliquer au béton un effort tranchant permettant de compenser les forces extérieures et le poids propre de l'élément, ce qui empêche généralement l'apparition des fissures d'effort tranchant que l'on observe dans certaines conditions en béton armé (inclinaison à 45° sur l'axe d'une poutre exagérément sollicitée, par exemple).

## Principes de calcul du béton précontraint

De même que pour le béton armé, les règlements de calcul du béton précontraint sont conçus de façon à garantir la sécurité et la pérennité des structures. D'une part, ils précisent le niveau maximal des actions (voir le paragraphe « Actions et sollicitations ») pouvant s'exercer sur un ouvrage pendant sa durée de vie ; d'autre part, ils tentent de prémunir le concepteur contre les insuffisances de qualité des matériaux.

Le premier objectif est atteint par la prescription de valeurs caractéristiques ou nominales des actions et, éventuellement, par l'imposition des coefficients de sécurité majorateurs frappant les sollicitations résultant de ces actions. La probabilité d'occurrence simultanée d'actions indépendantes peut être très variable selon leur nature. Il est donc nécessaire de définir les combinaisons d'actions dans lesquelles, à la valeur caractéristique d'une action dite de base, s'ajoutent des valeurs caractéristiques minorées d'autres actions dites d'accompagnement.

Le second est obtenu par l'application de coefficients de sécurité minorateurs aux valeurs des résistances caractéristiques des matériaux utilisés. Les valeurs de ces coefficients diffèrent selon les principes de calcul adoptés.

La méthode de calcul « aux états-limites » se fonde sur une approche semi-probabiliste de la sécurité. Ce type de calcul permet de dimensionner une structure de manière à offrir une probabilité acceptable de ne pas atteindre un « état-limite », qui la rendrait impropre à sa destination. Cette définition conduit à considérer plusieurs familles d'états-limites, telles que les états-limites de service, les états-limites de fissuration, de déformation, les états-limites ultimes de résistance, de renversement, de flambement, les états-limites de fatigue ou les états-limites de tenue au feu.

Les règles BPEL 91 (Béton Précontraint aux États-Limites) sont fondées, comme leur nom l'indique, sur ces notions.



## Actions et sollicitations

### ■ Les actions

Elles sont constituées par les forces et les couples résultant des charges appliquées ou des déformations imposées à une construction, ainsi que celles résultant de la précontrainte.

On distingue :

- Les actions permanentes dues au poids propre de la structure et au poids total des équipements fixes. Les poussées de terre ou la pression d'un liquide (pour les murs de soutènement, les réservoirs, etc.) sont également comptées comme actions permanentes.
- Les actions de la précontrainte.
- Les actions variables dues aux charges d'exploitation, aux charges climatiques, aux charges temporaires appliquées en cours d'exécution, aux déformations provoquées par les variations de température.

En fonction de la destination des locaux ou des ouvrages et en l'absence de données résultant des conditions réelles d'exploitation, les charges retenues pour les calculs sont fixées forfaitairement par des normes ou des règlements (par exemple, la norme AFNOR NF P 06-001 pour les charges d'exploitation des bâtiments).

Les charges dues au vent ou à la neige sont fixées par les règles Neige et NV selon le site, l'altitude, l'exposition, l'inclinaison de l'ouvrage.

- Les actions accidentelles dues aux séismes, aux explosions, à l'incendie sont prises en compte par des règlements spécifiques (Règles PS pour les séismes).

### ■ Les sollicitations

Les sollicitations sont les efforts (effort normal, effort tranchant) et les moments, appliqués aux éléments de construction. Elles sont déterminées, à partir des actions considérées, par des méthodes de calcul appropriées faisant généralement appel à la résistance des matériaux ou à des études de modélisation.

### ■ Les combinaisons d'actions

Dans les calculs justificatifs de béton armé, on considère des sollicitations dites de calcul qui sont déterminées à partir de combinaisons d'actions dont on retient les plus défavorables.

## Détermination des sollicitations de calcul

Si l'on désigne par :

$G_{\max}$  : l'ensemble des actions permanentes défavorables ;

$G_{\min}$  : l'ensemble des actions permanentes favorables ;

$Q_{1k}$  : une action variable dite de base ;

$Q_{ik}$  : les autres actions d'accompagnement ;

$P_m$  : la valeur probable d'action de la précontrainte.

Pour les états-limites ultimes de résistance (ELU), les sollicitations de calcul résultent de la combinaison suivante :

$$S\{\gamma_p P_m + 1,35 G_{\max} + G_{\min} + \gamma_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i>1} 1,3 \psi_{0i} Q_{ik}\}$$

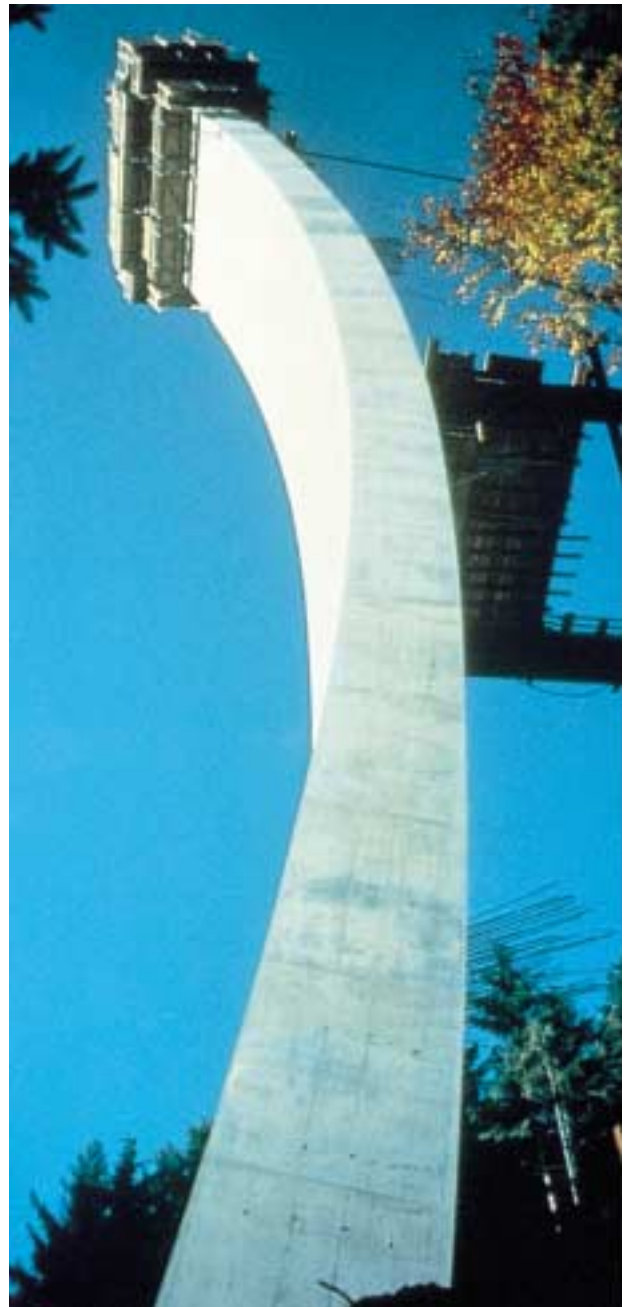
Le coefficient  $\gamma_{Q1}$  vaut généralement 1,5 ; dans les bâtiments agricoles à faible densité d'occupation humaine, entre autres, il vaut 1,35.

Les valeurs des coefficients  $\Psi$  sont fixées par les textes en vigueur (norme).

$\gamma_p$  est égal à 1 dans la plupart des cas ; il est pris égal à 1,35 lorsque la précontrainte est à considérer comme une action extérieure. Les combinaisons accidentelles ou celles définissant les sollicitations de calcul vis-à-vis des états-limites de service sont précisées par le BPEL 91.

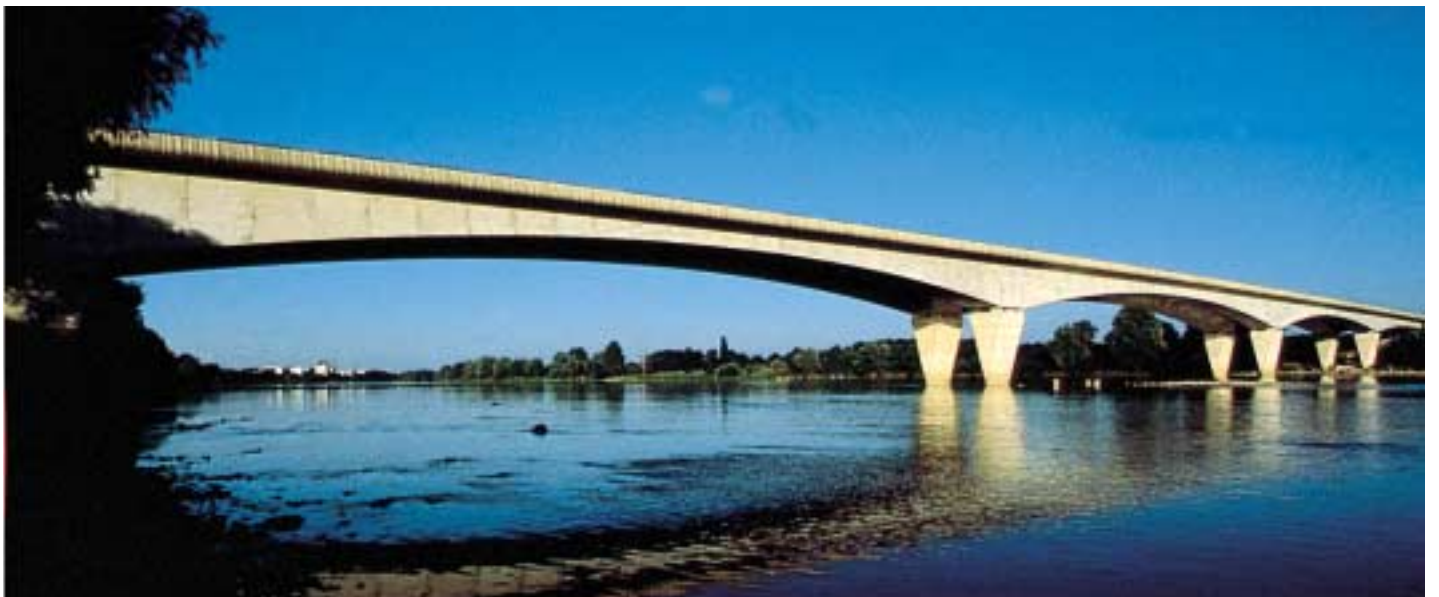
### Coefficients de sécurité partiels sur les matériaux

Les valeurs des résistances caractéristiques des matériaux sont minorées par un coefficient de sécurité partiel ( $\gamma_m$  dont la valeur est fonction du degré de certitude avec lequel sont réputées connues ces résistances. A l'ELU, on prend  $\gamma_m = 1,50$  (sauf dérogation sur justification) pour le béton et  $\gamma_m = 1,15$  pour l'acier.





*Béton précontraint  
pour tous les ouvrages d'art  
(viaducs, ponts)  
ou pour des bâtiments  
circulaires, avec  
précontrainte annulaire.*



## Mise en œuvre de la précontrainte

La précontrainte peut être appliquée au béton soit par pré-tension, soit par post-tension des armatures, selon que celles-ci sont mises en tension avant le coulage du béton ou après son durcissement.

### ■ La post-tension

#### Principe

La précontrainte est réalisée par des armatures (généralement des câbles ou des torons) mises en tension lorsque le béton a acquis une résistance suffisante lui permettant de supporter les efforts de compression auxquels il est alors soumis.

Les armatures, qui doivent pouvoir coulisser librement dans le béton, sont disposées dans des conduits et s'appuient sur les extrémités de la pièce à précontraindre par l'intermédiaire de systèmes d'ancrage.

Une technique dite de précontrainte extérieure s'est développée depuis quelques années. Elle consiste à faire passer les câbles de précontrainte à l'extérieur de la section de béton. Cette solution présente de nombreux avantages, notamment l'allégement des structures par réduction des sections, la facilité de mise en œuvre et surtout les possibilités de remplacement des câbles endommagés ou de renforcement de structures soumises à des charges accrues.

La mise en tension des câbles est effectuée à l'aide de vérins, généralement de façon échelonnée dans le temps (entre 2 et 28 jours) de manière à respecter l'évolution du durcissement du béton et l'application des charges.

Le contrôle de la tension est effectué soit par manomètre, soit de manière plus précise par mesure de l'allongement des câbles. Le calcul de l'allongement du câble doit tenir compte des différentes causes de pertes de tension, par frottement, par déformations instantanée ou différée du béton ou par rentrée des ancrages. Les règles BPEL 91 fournissent les différents coefficients liés à ces pertes de tension.

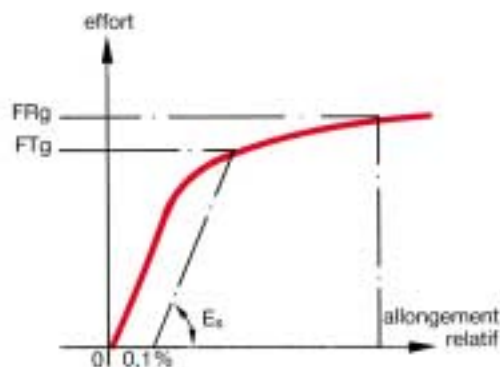
Après mise en tension des armatures, les conduits sont remplis avec des coulis de ciment qui doivent occuper aussi parfaitement que possible les espaces entre câbles et conduits. La qualité de l'injection est une opération très importante, qui conditionne la protection des armatures, donc leur durabilité.

#### Les armatures de précontrainte

Elles sont composées de torons ou de fils en acier à haute limite élastique (HLE), plus rarement de barres.

- Les torons comportent en général sept fils de petit diamètre dont six sont disposés en hélice autour d'un fil central de diamètre légèrement plus grand. Les torons les plus courants ont un diamètre d'environ 13 mm et 15 mm. Par abréviation, on les dénomme torons T 13 et T 15. La réglementation définit les résistances garanties à la rupture des fils d'armatures d'une part – contrainte de rupture RG comprise entre 1 400 et 1 800 MPa –, des torons d'autre part, pour lesquels on considère l'effort de rupture exprimé en kilonewtons (kN).

L'effort garanti de rupture (FRG) d'un toron T 13, de 93 mm<sup>2</sup> de section nominale, varie, selon la classe de l'acier, de 160 à 180 kN ; celui d'un toron T 15, de 139 mm<sup>2</sup> de section nominale, de 220 à 260 kN.



La limite d'élasticité des armatures a une valeur conventionnelle définie par la valeur de l'effort FTg pour les torons, et par celle de la contrainte Tg pour les fils, correspondant au point d'intersection de la loi de comportement de l'acier avec une droite passant par le point (0,1 %, 0) et ayant une pente de 200 000 MPa.

La valeur de FTg est comprise entre 137 et 155 kN pour les T 13, et entre 196 et 225 kN pour les T 15.

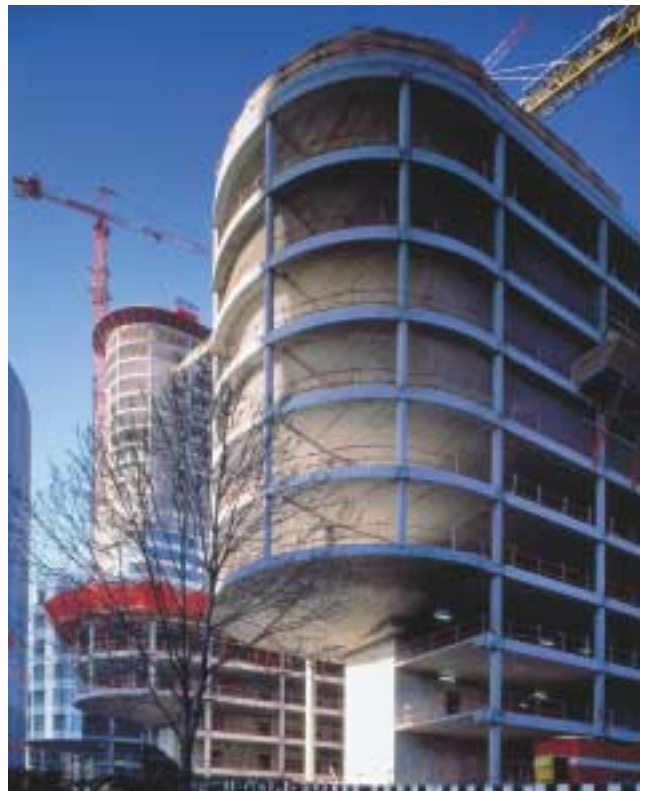
L'allongement à rupture est d'au moins 3 %.

- Les câbles de précontrainte sont composés de plusieurs torons ou fils. Les câbles les plus couramment utilisés sont les 12 T 13, 12 T 15, 19 T 15 (comportant respectivement 12 et 19 torons). Lorsque de grandes puissances sont nécessaires, on utilise des câbles 37 T 15 (37 torons).

Les conduits dans lesquels sont disposées les armatures sont soit métalliques (à profil ondulé en feuillard d'épaisseur comprise entre 0,3 et 0,6 mm ou en tube d'acier laminé soudé de 1,5 à 2 mm d'épaisseur, notamment pour des câbles extérieurs), soit en matière plastique (polychlorure de vinyle PVC ou polyéthylène, de 5 à 6 mm d'épaisseur pour les gros diamètres). Afin de permettre un bon remplissage des conduits, leur section intérieure doit être 2 à 2,5 fois plus grande que la section des armatures qu'il contient.



*Précontrainte pour des voiles de longue portée, des paraboloïdes, des dalles de grande surface, des poutres et des caissons - ou des tours de bureaux.*



## **Les ancrages de précontrainte**

Ils constituent un organe essentiel puisqu'ils permettent d'assurer le maintien de l'effort de précontrainte dans les armatures après la mise en tension.

Dans la plupart des systèmes de précontrainte, le blocage des armatures par rapport à l'ancrage est obtenu par frottement (clavetage dans une pièce conique).

Les ciments utilisables dans le béton précontraint par post-tension font l'objet de la norme NF P 15-318 « Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint ». La norme précise les spécifications relatives à ces ciments ; le critère de sélection est essentiellement une teneur en sulfures et en chlorures limitée.

Les ciments retenus sont des CEM I, CEM II, CEM III/A et B ou CEM V de classe au moins 32,5.



## **■ La pré-tension**

Les fils ou les torons sont tendus avant le bétonnage. Le béton est ensuite mis en place au contact de ces câbles « pré-tendus » auxquels il va se trouver lié. Lorsque le béton est suffisamment durci (résistance à la compression d'au moins 25 MPa), on libère la tension des câbles qui se transmet au béton par adhérence en engendrant, par réaction, sa mise en compression ; cette forme de précontrainte est dite « par fils adhérents ».

Les armatures de précontrainte sont tendues en prenant appui sur des culées fixes (bancs de précontrainte), spécialement construites à cet effet.

Après coulage et durcissement du béton, les torons ou les fils sont libérés des culées.

Les fils et les torons utilisés pour la précontrainte par pré-tension sont en acier à haute limite élastique. Ils doivent satisfaire (de même que les armatures pour



la post-tension) aux prescriptions du titre II (Armatures en acier haute résistance pour construction en béton précontraint) du fascicule 4 du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG).

Seuls sont autorisés les torons lisses ou crantés et les fils autres que les fils ronds et lisses. Pour les éléments préfabriqués les plus usuels en béton précontraint par fils adhérents, qui sont les poutrelles pour planchers, on utilise surtout des fils de diamètre 4 à 7 mm ou des torons T 5,2 ou T 6,8. Pour les dalles, on utilise des torons de plus forte section : T 9,3 ou T 12,5.

Les ciments utilisables pour la précontrainte par pré-tension font l'objet de la norme NF P 15-318, déjà citée précédemment. Ce sont de préférence des CEM I.

## **■ La précontrainte par vérins**

Les deux techniques précédentes utilisent des torons ou des fils d'acier à haute limite élastique. Il est possible, lorsque l'on peut disposer de culées suffisamment résistantes, d'effectuer directement la mise en compression d'une structure en béton au moyen de vérins prenant appui sur ces culées.

C'est encore Freyssinet qui, le premier, a mis en œuvre ce mode de précontrainte au moyen de vérins plats, outils extrêmement puissants, d'un faible coût.

Ce procédé, par la nécessité des culées qu'il impose, n'a que des applications limitées. Il a cependant été utilisé pour la construction de pistes d'aviation ou de routes. Il a, en particulier, permis la réalisation de la chaussée du tunnel sous le Mont Blanc. La précontrainte par vérins plats est aussi utilisée dans les barrages.

*Banc de précontrainte.*





*L'un des cas les plus courants d'utilisation des poutres précontraintes : les parkings.*

*Poutrelles standard précontraintes par pré-tension.*



## Les domaines d'emploi de la précontrainte

### ■ La post-tension

Les premières applications, qui se sont multipliées par la suite, sont les ponts à moyenne et grande portée : le pont haubanné de Barrios de Luna atteint une portée de 440 mètres. Plus couramment, l'allègement des âmes béton et l'emploi de la précontrainte extérieure permettent des portées variant entre 50 et 250 mètres.

La précontrainte permet aussi la réalisation de réservoirs. Certains réservoirs à hydrocarbure atteignent 100 000 m<sup>3</sup> ; des réservoirs d'eau et des silos, de volume plus modeste, font aussi largement appel à la précontrainte. Il faut encore citer les plates-formes off-shore et les enceintes de réacteurs nucléaires, ainsi que l'emploi de la précontrainte extérieure dans la réparation de ponts ou de barrages.

Dans le domaine du bâtiment, la précontrainte par post-tension, bien que moins courante, est utilisée pour des poutres de grande portée ou pour des dalles de planchers de section relativement mince par rapport à leur portée : parkings, bâtiments industriels ou commerciaux.

### ■ La pré-tension

Cette technique est essentiellement utilisée pour les éléments préfabriqués standardisés, où elle se justifie par la notion de séries.

Le bâtiment constitue le domaine d'emploi le plus courant pour ces éléments : poutres, poutrelles de planchers, prédalles, dalles alvéolées de planchers ou panneaux de bardage de grandes dimensions (10 à 15 m de longueur), pour bâtiments industriels, commerciaux ou agricoles.

La pré-tension est également utilisée pour les poteaux de tous types (télégraphiques ou électriques, clôtures, etc.) ou les traverses de chemin de fer.