

La **précontrainte** est un phénomène qui existait avant qu'on la connaisse dans son acception courante. Par exemple, la gravité agit sur les voussoirs des voûtes en pierre comme une **précontrainte**. Grâce à elle, les efforts internes peuvent être canalisés dans la voûte, condition pour son maintien. La **précontrainte** est maintenant généralement exercée par l'intermédiaire de câbles composés de **torons**, ceux-ci étant à l'extérieur ou à l'intérieur du béton.

1. Principe du béton précontraint

On présente ici le principe du béton précontraint au travers de l'étude d'une **poutre** en flexion. En réalité, la **précontrainte** trouve des applications dans les pièces soumises à d'autres sollicitations (**traction** pure ou **compression** pure).

Dans le calcul du **béton armé**, la part du béton qui est en traction est négligée. On comprend alors qu'une partie importante du matériau « ne sert » qu'à éloigner les aciers (tirants) du centre de gravité des sections fléchies. Au contraire, l'idée qui a conduit à l'avènement du béton précontraint consiste à placer la matière dans un état pour lequel on peut profiter de toute la section de béton. On fabrique un matériau capable de résister aux 2 sens des sollicitations sous l'action des surcharges, bien que n'ayant de piètres performances en traction. Il faut pour cela que le béton ne soit pas tendu. On vient alors le comprimer de manière à ce que l'addition des contraintes initiales de compression aux contraintes dues aux surcharges conduise à des sections toujours comprimées. Sur la figure 1 qui illustre cette opération, on additionne aux contraintes dues aux chargements extérieurs, une compression centrée apportée par la **précontrainte** préalable du béton. L'effort P centré (schéma 1) conduit à une distribution constante des contraintes de compression dans toutes les sections transversales de la poutre. Lorsque celles-ci sont additionnées aux contraintes de flexion dues aux surcharges (schéma 2), on obtient une distribution triangulaire des contraintes résultantes (schéma 3).

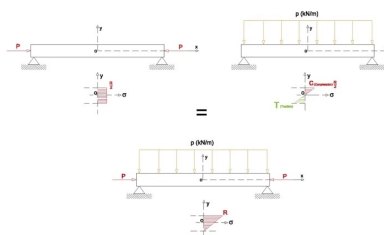


Figure 1 : principe de la précontrainte. En additionnant les schémas du haut et du milieu, on obtient le schéma du bas.

Cette **précontrainte** est créée par des câbles tendus en acier, ainsi maintenus par des têtes d'ancrages s'appuyant sur le **béton**. Celui-ci est alors comprimé. Dans la suite on assimilera la **précontrainte** à un seul **câble**, dans un souci de simplification, alors que la **précontrainte** est obtenue en général par un ensemble de câbles.

1.1 Etape 1 - Précontrainte centrée

Pour une **poutre** soumise à la flexion positive (**flèche** due aux surcharges dans le même sens que la gravité), la **précontrainte** centrée, c'est-à-dire celle qui passe par le centre de gravité des sections, ici à mi-hauteur, n'est pas optimale. En effet, dans le cas de la figure 1 ci-dessus, si R est la **contrainte** maximale admissible en **compression** dans le béton, la **précontrainte** centrée va « consommer » une partie de R . Supposons que la **précontrainte** « consomme » $R/2$. On a pré comprimé la zone même de béton qui se trouvera comprimée par les surcharges.

1.2 Etape 2 - Précontrainte excentrée

On observe dans le cas de la **précontrainte** centrée, que les compressions vont devoir être limitées de façon qu'elles ne dépassent pas $R/2$ dans la zone la plus comprimée (leur somme devant être égale à R en fibre supérieure). Il est donc judicieux d'excentrer la **précontrainte** de manière à ne comprimer que la matière qui sera ensuite tendue par les surcharges. On obtient alors la configuration de la figure 2. L'excentrement de la **précontrainte** sera telle que la fibre inférieure sera sollicitée à R en l'absence de surcharges. Cet excentrement génère une distribution triangulaire des contraintes de compression dans la section de la poutre (schéma 1 de la figure 2). Pour un excentrement positionné au tiers inférieur de la poutre, pour une poutre rectangulaire, la **contrainte** due à la **précontrainte** s'annule à la fibre supérieure. On s'aperçoit que la capacité à supporter les surcharges sera alors doublée puisque celles-ci pourront provoquer des contraintes valant R et non pas $R/2$ comme dans l'exemple précédent (schéma 2 de la figure 2). En conséquence, en l'absence de surcharges, la flèche de la poutre sera négative (**contreflèche** vers le haut) puisque la flexion due à la **précontrainte** est aussi négative (Figure 3).

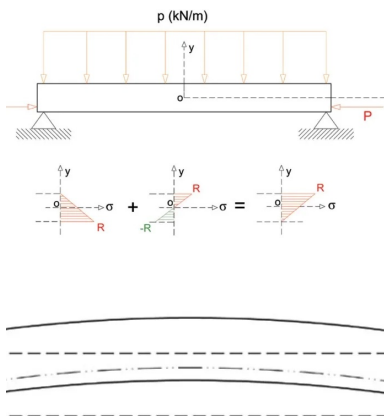


Figure 2 : Excentrement de la précontrainte.

Contre flèche

Figure 3 : Contreflèche produite par la précontrainte excentrée.

1.3 Etape 3 - Précontrainte parabolique

En fait, le poids propre des pièces de **béton** vient modifier le diagramme des contraintes. Une amélioration rendue possible par la technique de la **post tension** consiste à faire varier l'effet de la **précontrainte** le long de l'axe de la **poutre**. Au droit des appuis, la flexion due au poids propre est nulle si bien que le **câble** peut être proche du centre de gravité de la **section**, alors qu'à mi **portée**, l'effet du poids propre étant maximal, l'excentrement du **câble** sera alors maximal. Ainsi, le tracé optimal du **câble** suit homothétiquement celui de la distribution du **moment fléchissant** résultant du poids propre. Le tracé du **câble** s'en trouve donc parabolique (Figure 4).

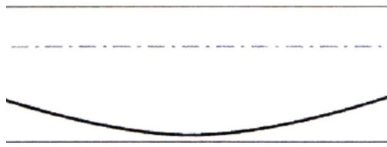


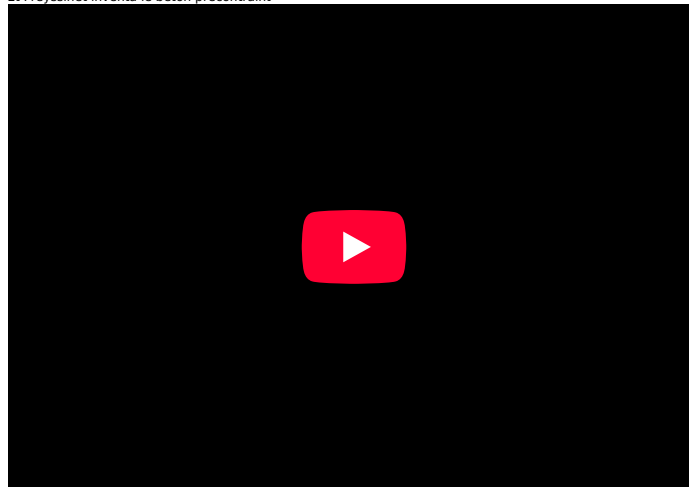
Figure 4 : Tracé parabolique du câble.

À lire aussi

Pont en béton précontraint construits par poussage

La méthode de construction d'un tablier de pont par poussage consiste à le réaliser par tronçons successifs sur l'une ou les deux

Et Freyssinet inventa le béton précontraint



Les principes du **béton précontraint** que l'on vient d'illustrer à propos des poutres sont aussi appliqués à d'autres éléments de structure, tels que les poteaux, les pieux, les dalles, etc.

2. Développement de la précontrainte par Freyssinet

Eugène Freyssinet (1879-1962) est l'auteur du premier brevet sur la **précontrainte** en 1928, bien que l'idée soit plus ancienne et revête plusieurs formes. Par exemple, Freyssinet utilisa des systèmes de vérins plats en tôle d'acier placés à la clé des 3 arcs du viaduc du Veurdre (1911-1912) qui s'affaissaient irrémédiablement sous l'effet du **fluage** du béton. Cette **précontrainte** des arcs avait à la fois l'effet de les relever et d'empêcher l'apparition de contraintes de tractions internes. Il est le premier à avoir compris les 2 conditions nécessaires pour que la **précontrainte** perdure dans la matière. En effet, les déformations du béton (**déformations instantanées**, de **fluage** et de **retrait**) réduisent, voire peuvent annuler, l'effet de la **précontrainte**. Il se produit alors une réduction de l'allongement des câbles, donc de la **précontrainte** du béton. Freyssinet fait le calcul suivant. Pour un béton comprimé à une **contrainte** de 5 MPa, produisant par ailleurs un **retrait** de 500 µm/m et dont le module à long terme (incluant le **fluage**) vaut 5000 MPa, la déformation du matériau vaut alors :

$$\varepsilon_{\text{béton}} = \frac{5}{5000} + 500 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

La perte de **précontrainte** dans le **câble** vaut alors (le module de l'acier est de l'ordre de 200 000 MPa) :

$$\Delta\sigma_{\text{acier}} = 200000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 300 \text{ MPa}$$

Cette perte de traction est donc très importante et peut suffire à annuler la **compression** permanente du béton. Freyssinet tire la leçon suivante de ce calcul. Il faut premièrement utiliser un béton de résistance élevée, dont les déformations seront alors réduites. Deuxièmement, il faut tendre les câbles de **précontrainte** à des valeurs très élevées, de manière à ce que les pertes (inévitables) soient aussi faibles que possible en proportion de leur valeur initiale. C'est ce qu'il s'est attaché à réaliser pour ces premières expériences de poteaux électriques creux de 12 à 16 m de hauteur (ces poteaux étant soumis à la **flexion**). Son objectif de produire des structures performantes et économiques à base de béton était ici atteint (Figure 5).

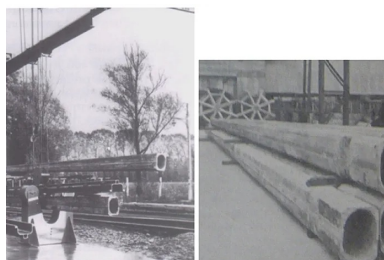


Figure 5 : Précontrainte de poteaux électriques en béton (Montargis 1933).

Puis, vient en 1934 le fameux sauvetage de la gare maritime du Havre, gare destinée à recevoir le paquebot Normandie. Les fondations de la gare existante sont des pieux de 10 m de longueur environ, fichés dans un sol argileux de mauvaise qualité. La gare s'enfonçait irrémédiablement. La solution de Freyssinet consiste à enfoncer 700 pieux de 25 à 30 m de hauteur, pieux réalisés par tronçons de 2 m, assemblés par **précontrainte**.

Les grandes étapes de l'application de la **précontrainte** seront les canalisations d'eau de l'oued Fodda en Algérie en 1936, les ouvrages maritimes (barges, caissons ballastés, etc.), le pont de Luzancy (Figure 6), sur la Marne, construit de 1941 à 1946, etc. Le pont de Luzancy, conçu sur le principe de poutres caissons préfabriquées et mises en place par un blondin (structure à câbles), sera une source d'inspiration pour 5 ponts identiques construits également sur la Marne entre 1946 et 1949 (Ponts de Ussy, d'Annet, de Trilbardou, de Changis et d'Esblly).

Dès lors, la **précontrainte** s'est développée dans de nombreuses applications.

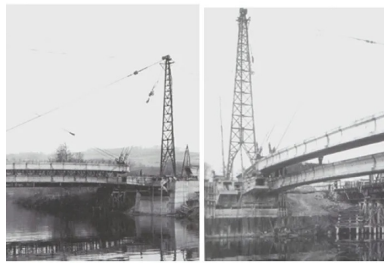


Figure 6 : Pont de Luzancy en construction.

3. Types de précontrainte

On distingue actuellement 2 grands types de **précontrainte** : la **précontrainte** par **pré-tension** et celle par **post-tension**.

3.1 Précontrainte par post-tension

Dans la post-tension, des conduites destinées à recevoir les **torons** sont placés dans le **coffrage**, suivant le tracé pré-établi (Figure 7). Un **câble** est un ensemble de **torons**. Après bétonnage et **durcissement** du béton jusqu'à une valeur minimale (à contrôler précisément), les **torons** sont introduits dans les conduites, assemblés dans des têtes d'**ancrage** (Figure 8), puis tendus à l'aide d'un vérin (Figure 9).

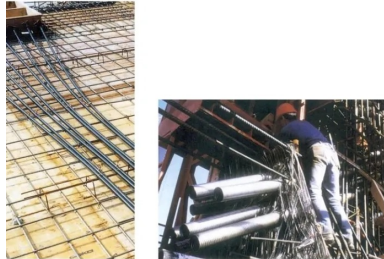


Figure 7 : Conduites de précontrainte pour la post-tension. A gauche pour une dalle, à droite pour une poutre de l'arche de la Défense.

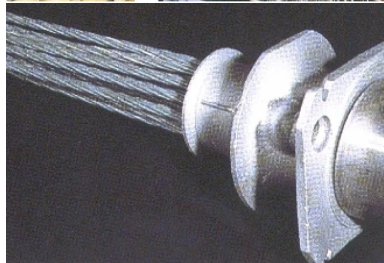


Figure 8 : Exemple de tête d'ancrage et des torons en l'absence de la conduite de protection.



Figure 9 : Vérin de mise en tension.

3.2 Précontrainte par pré tension

Les **torons**, disposés dans le **coffrage** aux emplacements voulus, sont préalablement tendus, c'est-à-dire avant le coulage du **béton**. Le béton est ensuite coulé dans les coffrages. Une fois durci et suffisamment résistant, on coupe les **torons** à l'extrémité des poutres, et, par **adhérence**, les **torons** sollicitent le béton en **compression**. Cette méthode est utilisée en usine de **préfabrication**.



Figure 10 : Précontrainte par pré-tension. Exemple de poutrelles du bâtiment.

4. Applications de la précontrainte

Les domaines privilégiés d'utilisation de la **précontrainte** sont le bâtiment et les ouvrages d'art. Dans les domaines du tertiaire et industriel, un grand usage est fait des planchers précontraints alvéolaires (Figure 11 et 12). Ces éléments sont réalisés par extrusion sur des bancs de **précontrainte** de plus de 100 m de longueur. Le **béton** contient très peu d'**eau** et n'est pas adjuvanté de manière à pouvoir supporter son propre poids juste après le passage de la machine à **coffrage glissant**. La pré tension est réalisée par des vérins de grande capacité situés à une des extrémités du banc. Les planchers alvéolaires précontraints sont des éléments structuraux optimisés qui permettent de franchir des portées de plus de 12 m pour des charges de bureau.

D'autres applications plus particulières sont à citer. Freyssinet a par exemple appliqué la **précontrainte** pour des poteaux électriques (**flexion** composée), ou des galeries d'**eau** (**étanchéité**).

Les poussées en pied des arcs ou des coques peuvent être reprises par des tirants précontraints (**voir le CNIT**).

Les réservoirs ou silos sollicités en **traction** orthoradiale peuvent recevoir une **précontrainte** annulaire qui maintient le béton en **compression**, à l'image du cerclage du tonneau.

Dans le domaine du nucléaire, les parois intérieures des enceintes de confinement doivent supporter une pression accidentelle de 0,5 **MPa** tout en gardant une étanchéité satisfaisante. La solution est apportée par la **précontrainte** dans les 2 directions (Figure 13).



Figure 11 : exemple de planchers alvéolaires précontraints.



Figure 12 : exécution des planchers par une machine à coffrage glissant (extrusion) et vue des ancrages de torons aux extrémités du banc.



Figure 13 : Enceinte de confinement d'une centrale nucléaire.

Certains ouvrages à la mer doivent garder leur **étanchéité**. La **digue flottante de Monaco** (Figure 14) est un ouvrage de 350 m de longueur, construit en **béton** de haute performance et précontraint dans les 3 directions. Cette **précontrainte** est nécessaire au maintien de l'étanchéité car elle permet d'éviter les fissures d'origine mécanique.



Figure 14 : Digue flottante de Monaco sur le site de construction d'Algeciras (Espagne).

Dans le domaine de la géotechnique, les tirants précontraints sont utilisés pour stabiliser les murs de soutènement ou autres parois (Figure 15).

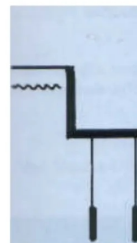


Figure 15 : tirants d'ancrage de sols. A gauche, ancrage d'un massif de fondation support de câble de pont suspendu. A droite, ancrage d'un cuvelage soumis à la poussée d'Archimède (sol saturé d'eau).

BIBLIOGRAPHIE

- Jose A. Fernandez Ordóñez, (1979), *Eugène Freyssinet*, Grupo 2C, Barcelone.
- *L'art de l'ingénieur*, (1997) sous la direction d'Antoine Picon, Le moniteur, centre Georges Pompidou, Paris.
- Ivan Margolius (2002), *architects + Engineers = structures*, Wiley academy.

À lire aussi

Les ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs

La technique consiste à construire un ouvrage par éléments successifs appelés voussoirs. Chaque voussoir est construit en

Auteur

Cimbéton, Patrick Guiraud



Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur
infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
 Accédez à toutes nos archives
 Abonnez-vous et gérez vos préférences
 Soumettez votre projet

