Béton précontraint

Avril 2018

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.
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 rives de la brèche à franchir (à l'arrière d'une ou des deux culées)...

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 :

$$\varepsilon_{béton} = \frac{5}{5000} + 500.10^{-6} = 1{,}5.10^{-3}$$

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

$$\Delta\sigma_{acier} = 200\,000.1{,}5.10^{-3} = 300\,MPa$$

Cette perte de traction est donc très importante et peut suffir 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'enfonce 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'Esbly).

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 structurels 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 Ordonez, (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 encorbellement par rapport au voussoir précédent.

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

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr