

Chapitre I : Généralités Sur Le Béton Précontraint

I. Introduction

En béton armé, les deux matériaux se complètent parfaitement l'un à l'autre : l'acier réduit et répartit les fissures du béton et renforce la section en reprenant une partie des efforts. Le béton assure la protection de l'acier vis-à-vis de la corrosion grâce aux caractéristiques physico-chimiques relatives des deux matériaux.

Le fonctionnement du béton précontraint est très différent : l'armature de précontrainte modifie le chargement de la section. Les câbles de précontraintes, constitués d'aciers durs, sont très sensibles à une corrosion même faible. Il en découle des difficultés qui suivent :

- La protection de l'armature de précontrainte relève d'une problématique très différente de celle du béton armé, car les conséquences d'une défaillance de la protection sont potentiellement très graves.
- En post-tension, le procédé le plus utilisé sur les grands ouvrages de génie civil, la protection intime de l'armature dans sa gaine et la protection du câble dépendent des qualités de la section et des accessoires de précontrainte : étanchéité de l'ouvrage, qualité des ancrages, etc.
- La permanence de l'effort de précontrainte dans le temps est une condition nécessaire à l'intégrité de la section.

La protection du câble et donc de la section ne relève pas d'un processus naturel et il faut s'en préoccuper à l'aide de bonnes dispositions et s'en occuper par une surveillance efficace et régulière !

Dans ces conditions, il est bien évident que le milieu aquatique est assez peu favorable au béton précontraint, d'une part parce qu'il accroît le risque d'agression par le milieu et d'autre part parce qu'il rend difficiles la surveillance et l'entretien. Les risques associés doivent toutefois être nuancés selon la zone concernée (proximité eau salée ou non, ouvrage immergé dans l'eau salée ou non...). La décision de construire en béton précontraint en milieu aquatique doit donc être prise en connaissance de cause :

- ☐ En cas où la précontrainte est techniquement la solution la plus ou la seule à adapter.
- ☐ En cas de milieu aquatique même si la surveillance et l'entretien sont difficiles.,
- ☐ En cas d'utilisation de moyens et dispositions constructives (enrobage important, capots d'ancrage définitifs, gaines plastiques, etc....).

Le béton précontraint pose donc un grand nombre de problèmes spécifiques et souvent délicats à traiter du fait de la complexité et de la variété des procédés ; une bonne connaissance de l'histoire de la technologie est également utile pour comprendre ou décider les investigations à entreprendre.

II. Historique Du Béton Précontraint

La précontrainte est certainement l'innovation la plus importante de notre siècle dans le domaine des structures en béton. L'idée de précontraint du béton afin de diminuer la fissuration est déjà ancienne. Puisqu'en 1886 *P. H. Jackson*, aux Etats-Unis, proposait de comprimer les chaussées en béton au moyen de barres d'acier tendues à l'aide d'un pas de vis

et un écrou. À cette époque, des déverses tentatives de précontrainte échouèrent, car on utilisait de l'acier normal. Dont la déformation élastique maximale est du même ordre de grandeur que les raccourcissements du béton dus au retrait et au fluage, de sorte que la précontrainte disparaissait progressivement avec le temps.

L'éminent ingénieur français *Eugène Freyssin* (1879–1962), souvent nommé le père de la précontrainte, fut le premier à mettre en évidence la nécessité d'utiliser un acier à très haute résistance pour créer un état d'auto-contrainte permanent. Dès 1928, il développa cette nouvelle technique dans le domaine théorique que dans la pratique. Il voyait dans la précontrainte une nouvelle philosophie des structures en béton en la considérant comme un matériau de construction tout à fait nouveau exempt de fissures grâce à l'absence complète de traction. Il n'envisageait donc que la précontrainte totale, alors qu'aujourd'hui, cette conception a perdu beaucoup de son importance.

Après la deuxième guerre mondiale, le béton précontraint connu un essor fulgurant puisqu'il y avait beaucoup de ponts à reconstruire. D'où un grand nombre de systèmes de précontrainte furent inventés et brevetés dans tous les pays industrialisés. La précontrainte tient actuellement une large place dans le domaine des structures en béton. Parmi ses avantages, on cite en premier lieu la possibilité, essentielle par *Freyssin* et d'éviter ou diminuer la fissuration et par conséquent, également les déformations dans l'état de service. Toutefois, si l'on considère les aspects constructifs et économiques, il devient évident que l'avantage décisif de la précontrainte réside en l'utilisation des aciers à très haute résistance.

III. Principe De La Précontrainte

III.1 Exemples De La Précontrainte

Les deux exemples suivants permettent de mieux comprendre l'apport de la précontrainte.

A) Expérience simple : une expérience simple peut être faite avec des morceaux de sucre représentant des éléments préfabriqués.

Si l'on considère huit morceaux de sucre que l'on assemble par juxtaposition suivant leur grande face disposée horizontalement (*Fig.I.1*), l'application d'une force centrée P sur les deux faces d'extrémité (entre le pouce et le majeur par exemple) conduit à un ensemble qui est « Précontraint ».

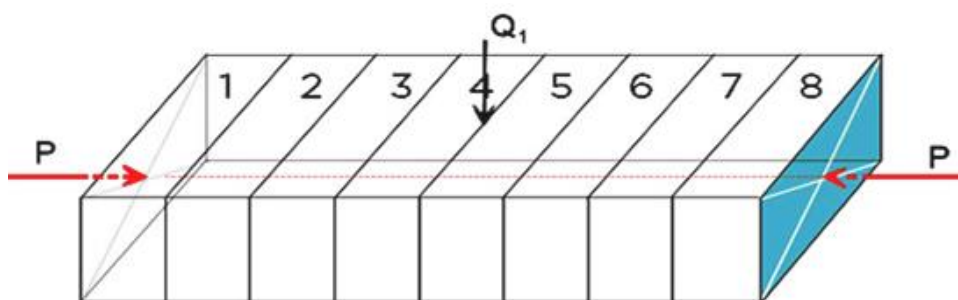


Fig I.1: Blocs assemblés par compression (précontrainte) selon la plus grande dimension horizontale

Si l'on applique une force Q_1 à mi portée et que l'on augmente son intensité jusqu'à l'effondrement, on constate que la ruine se produit par ouverture du joint inférieur entre les morceaux n° 4 et 5.

- Que se passe-t-il si l'on retourne l'ensemble dans le sens vertical (Fig.I.2) ?

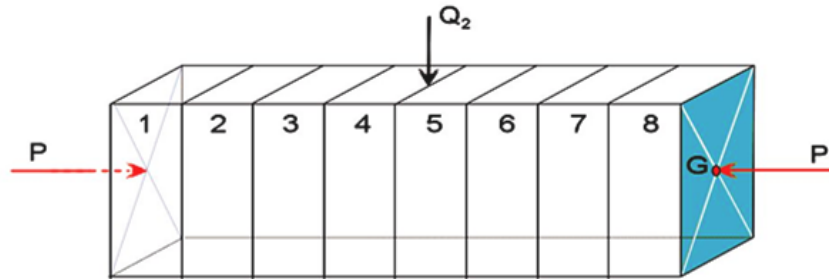


Fig I.2 : Blocs assemblés par précontrainte, selon la plus petite dimension horizontale

La charge de ruine Q_2 est plus grande que Q_1 .

- En remplaçant la position du point de serrage vers le bas (Fig.I.3), l'effort de ruine Q_3 est encore plus élevé : $Q_3 > Q_2 > Q_1$

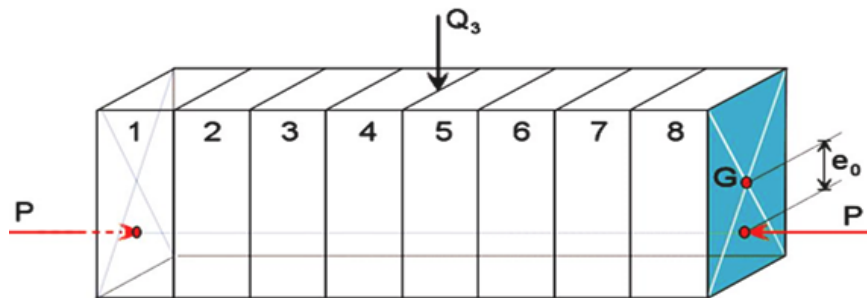


Fig I.3 : Blocs assemblés par précontrainte, selon la plus petite dimension horizontale avec effort excentré.

L'effort de serrage apporté par la précontrainte permet de bénéficier du frottement d'un bloc sur l'autre et évite le glissement des blocs entre eux.

Remarque : On constate donc que la capacité portante est améliorée par :

- une plus grande hauteur ($Q_2 > Q_1$)
- un décalage de l'effort de serrage vers le bas ($Q_3 > Q_2$).

B) Roue de bicyclette : entre la jante et le moyeu d'une roue de bicyclette, sont tendus des rayons métalliques.

✚ *Première approche* : que se passerait-il, si les rayons n'étaient pas prétendus ? (Fig.I.4)

La raideur de la jante n'est pas suffisante pour ne pas se déformer au contact du sol (AB). Les rayons de très faible diamètre ne peuvent résister à des efforts de compression importants.

La jante a tendance à s'aplatir dans la zone des rayons comprimés (En rouge sur Fig.1.4). Dans la zone ED, les déformations de la jante induisent une compression des rayons. L'équilibre général est alors obtenu par :

- la compression des rayons des zones AB et DE ;
- la traction des rayons des zones EA et BD ;
- la jante qui les relie sur toute sa longueur.

Les rayons fortement comprimés vont alors « flamber », c'est-à-dire qu'ils ne résistent pas aux efforts de compression.

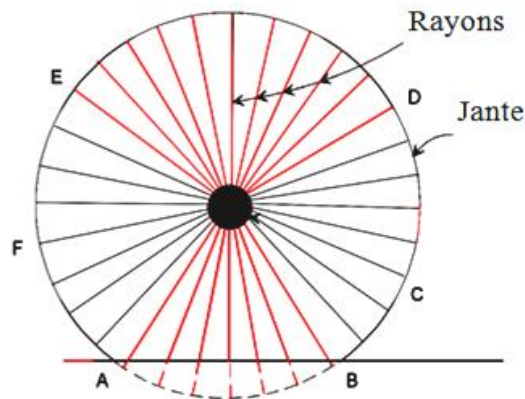


Fig. 1.4 : Roue de bicyclette non précontrainte.

✚ Deuxième approche : si les rayons sont suffisamment « prétendus » à la fabrication de la roue, ils peuvent supporter un effort de compression qui diminue seulement l'effort de traction résistant. Comme ils restent toujours tendus, le risque de « flambement » disparaît.

Alors, la mise en place d'un effort préalable de traction (précontrainte par traction) ramène le comportement des matériaux (rayons) dans leur domaine de résistance. C'est ce que Freyssin et énonçait :

« Précontraindre une construction, c'est la soumettre, avant application des charges, à des forces additionnelles déterminant des contraintes telles que leur composition avec celles provenant des charges donne en tous points des résultantes inférieures aux contraintes limites que la matière peut supporter indéfiniment sans altération ».

IV. Principe Du Béton Précontraint

IV.1 Fonctionnement D'une Section En Béton Précontraint

L'invention du béton précontraint suit de près les premières réalisations en béton armé. Dès 1928, Eugène Freyssinet met au point ce procédé qui permet une utilisation optimale du matériau béton et réalise les premiers ouvrages. Fondamentalement, le béton précontraint se distingue du béton armé en ce sens que toute la section de béton est utile à la résistance.

En effet, les armatures du béton armé se substituent au béton tendu alors que les armatures de précontrainte modifient l'équilibre de la section de telle sorte que celle-ci puisse participer à la reprise des efforts extérieurs. « Précontraindre une construction, c'est la soumettre avant application des charges, à des forces additionnelles déterminant des contraintes telles que leur composition avec celles provenant des charges donne en tous points des résultantes

inférieures aux contraintes limites que la matière peut supporter indéfiniment sans altérations. »

Autrement dit, en béton précontraint on applique en général ce principe, de manière que le béton reste toujours comprimé ou ne subisse que des contraintes de tractions faibles et jugées alors admissibles.

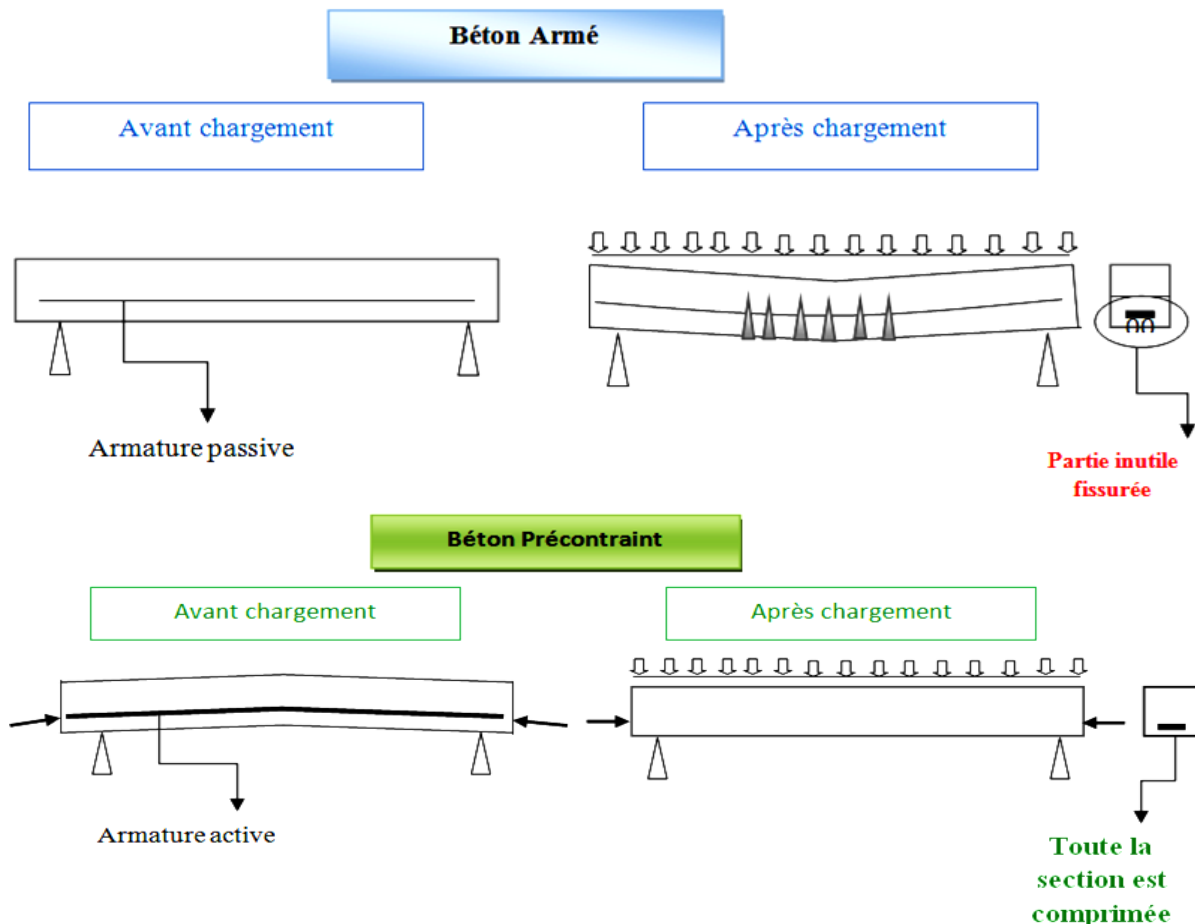


Fig I.5 Comparaison entre le béton armé et le béton précontraint.

Le béton est un matériau bien connu, a pour qualité essentielle une bonne résistance de rupture en compression, malheureusement sa résistance aux efforts de traction est faible ($\approx \frac{1}{12} R_c$). C'est pourquoi dans une poutre en béton armé, on place des barres d'acier dans les zones qui doivent subir des contraintes de traction. Ces barres se substituent alors au béton fissuré et prennent à leur compte les contraintes de traction en question. Le matériau ainsi obtenu présente plusieurs défauts qui limitent son utilisation :

Le béton qui enrobe les armatures est tendu en même temps qu'elles et ne peut subir leur allongement sans se rompre, il en résulte des fissures qui facilitent la corrosion en milieu agressif.

Le béton armé est lourd, les parties tendues ne sont utilisées que pour enrober les aciers et leur poids constitue un handicap sérieux. Il est donc logique de chercher à utiliser à plein temps la qualité essentielle du béton en le comprimant d'avance par un jeu de forces internes. Telles

que la variation des contraintes qui faisait naître des tractions ne provoque plus qu'une décompression du matériau ; ce procédé est appelé PRÉCONTRAINT.

IV.2 Principe De Fonctionnement Du Tirant

On sait que, le béton seul n'a qu'une résistance limitée en traction : un principe applicable est donc qu'aucune partie du béton ne soit utilisée au-delà de la résistance en traction du béton en appliquant un effort permanent dit « effort de précontrainte ». On prend ci-après l'exemple du tirant en béton précontraint en section non fissurée à l'état limite de service.

Afin de ne présenter que des calculs simples, imaginons un parallélépipède en béton de section B que l'on se propose d'utiliser en tirant. Si f_t est la résistance à la traction du béton, au-delà d'un effort $F = f_t * B$, la section est irrémédiablement rompue. Par prudence, comme la résistance de traction est assez aléatoire, et que des fissurations peuvent se produire avant F , on prendra une résistance en traction nulle.

Appliquons maintenant un effort de précontrainte P à la pièce. Au repos, la contrainte dans le béton est une compression et vaut à P/B . Mais ce qui est remarquable est que tant que l'effort appliqué reste dans la plage $0 - P$, la section du tirant reste comprimée et son béton participe pleinement à la résistance : on peut dire en quelque sorte que « le tirant est comprimé ». (Fig I.6)



Fig I.6 : Section du tirant qui reste comprimée dans la plage du chargement $0 - P$

Il est intéressant de calculer la déformation de la section sous l'effort F :

L'allongement : $\varepsilon = F / (B * E_b)$; ou

E_b : Le module précontraint du béton.

B : Section de la poutre en béton

Cette déformation entraîne une surtension dans l'armature de précontrainte de valeur

Surtension : $\sigma = [F / (B * E_b)] * (A * E_a)$.

E_a : Le module d'acier

A : Section du tirant

Comme $A * E_a$ s'avère très petit devant $B * E_b$, la surtension est quasi négligeable et en réalité pour toute la plage de fonctionnement $0-P$ du tirant, la tension dans la précontrainte est constante. C'est bien le béton qui travaille à la reprise des efforts, et c'est pourquoi il n'est pas inexact de dire que l'on a créé un nouveau matériau intègre pour une plage de fonctionnement déterminée.

IV.3 Principe De Fonctionnement D'une Poutre Fléchie

Le béton est un matériau hétérogène qui présente une très bonne résistance à la compression, par contre, il a une très mauvaise résistance à la traction. C'est ainsi qu'une poutre reposant sur deux appuis, soumise à l'effet de son poids propre (G) et d'une charge d'exploitation (Q), subit des contraintes de flexion qui se traduisent par une zone comprimée en partie supérieure et par une zone tendue en partie inférieure (*Fig I.7*).

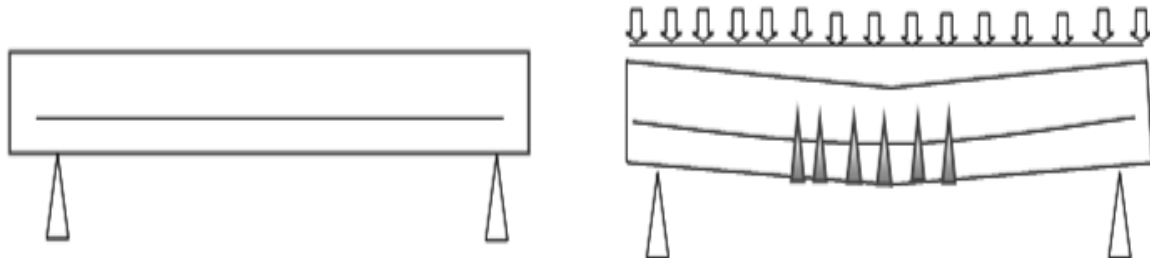


Fig I.7 Cas de la poutre fléchie

La poutre subit également des contraintes de cisaillement dues aux efforts tranchants qui se produisent vers les appuis. Ces contraintes occasionnent des fissures à 45° que le béton ne peut reprendre seul. Dans ce cas de figure, deux solutions sont possibles :

- ✚ **Solution N°1:** L'ajout d'une quantité d'armatures capable de reprendre les efforts de traction dans le béton (Principe du béton armé) (*Fig.I.8.a*).
- ✚ **Solution N°2 :** L'application d'un effort de compression axial qui s'oppose aux contraintes de traction dues aux chargements (Principe du béton précontraint) (*Fig.I.8.b*).

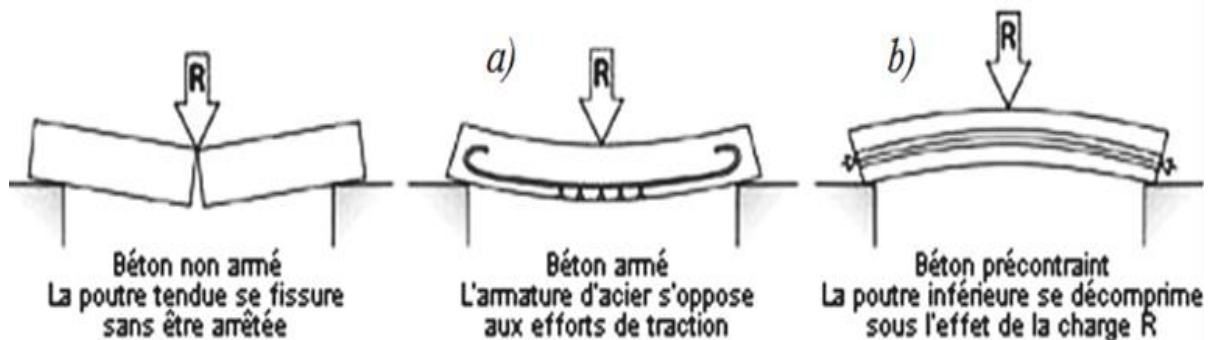


Fig I.8 : Mise en service d'une poutre en béton non armé, ou en béton armé et en béton précontraint.

IV.4 Applications Numériques

- Application 1:

Soit un tirant de **0,25m X 0,25m**, en béton de module $E_B = 40000 \text{ MPa}$ précontraint par un câble de force $P = 0,15 \text{ MN}$, de module $E_a = 200000 \text{ MPa}$ et de section $A = 139 \text{ mm}^2$.

- 1) Calculer la contrainte dans le béton due à la précontrainte P .
- 2) Calculer la contrainte dans le câble due à la précontrainte P .
- 3) La déformation relative du tirant en béton sous l'effort extérieur F compris entre 0 et 0,15 MN et la surtension dans le câble.
- 4) Que se passe-t-il si l'effort appliqué F dépasse l'effort de précontrainte P

- **Application 2:**

Soit une poutre isostatique précontrainte par une force de précontrainte $P=21\text{ t}$, de portée $L=28\text{m}$ et de section $b \times h= 0.15\text{m} \times 0.28\text{m}$ soumise à une surcharge $q=1000\text{ kgf/m}$.

- 1) Calculer les contraintes sous l'effet de la surcharge seule,
- 2) Calculer les contraintes sous l'effet de la surcharge et de la précontrainte centrée,
- 3) Calculer les contraintes sous l'effet de la surcharge et de la précontrainte excentrée à la limite du noyau central.

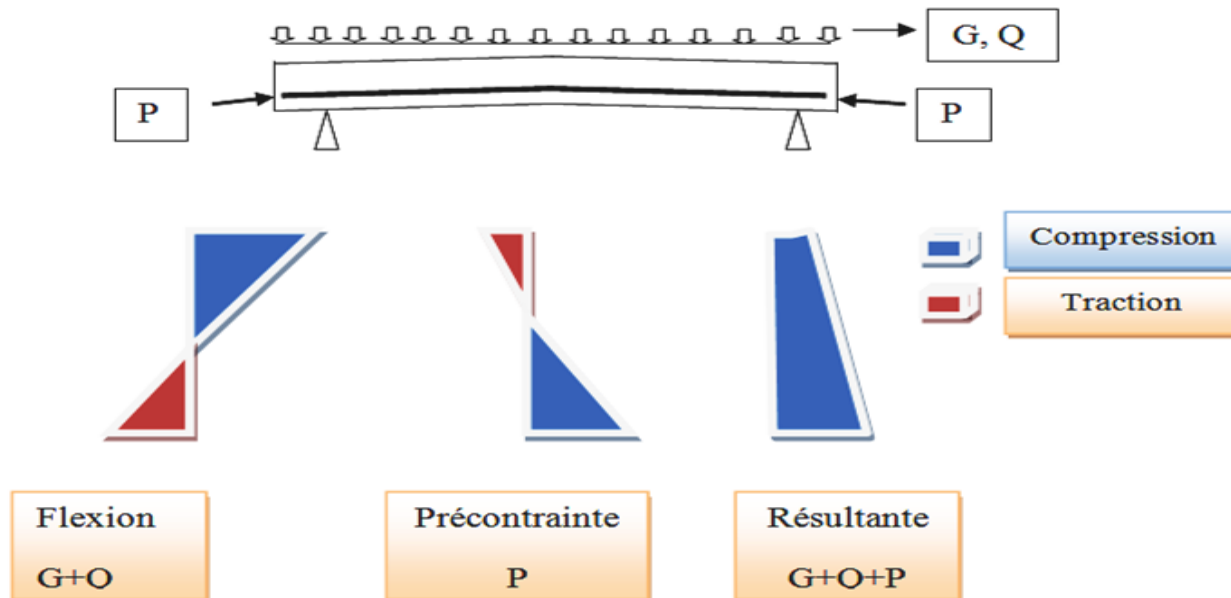


Fig I.9 Principe de la précontrainte

V. Avantages Du Béton Précontraint

La précontrainte peut être :

- ✚ Partielle : autorisation des contraintes de tractions limitées,
- ✚ Totale (intégrale) : élimination entière des contraintes de traction.

Les principaux avantages du béton précontraint sont les suivants :

- Meilleure utilisation du matériau puisqu'en béton armé, le béton tendu est considéré comme fissuré et ne peut être pris en compte dans la résistance. Il est inutilisé, il ne joue qu'un rôle de poids mort.
- L'action ascendante des câbles de précontrainte due à leur courbure, agit en sens inverse des charges extérieures, limitant ainsi les déformées. Il en résulte une diminution des flèches des poutres ;
- Possibilité de franchir de plus grandes portées qu'avec des ouvrages en béton armé.
- Lorsque le béton situé autour des armatures de précontrainte est comprimé, les risques de corrosion des aciers sont limités.
- Les aciers utilisés en béton précontraint sont moins chers, à force égale, que les aciers de béton armé.
- Possibilité d'assembler des éléments préfabriqués par serrage, sans échafaudage, ni bétonnage de deuxième phase.

Cependant, ces avantages nécessitent (les inconvénients) de:

- Fabriquer des bétons plus résistants, principalement avant 28 jours.
- Disposer d'un personnel qualifié pour la vérification de la pose des gaines et câbles et pour la mise en tension des câbles.

- L'obligation d'attendre que la mise en tension soit faite pour continuer l'avancement du chantier.
- Calculs en général plus détaillés que pour les ouvrages en béton armé.