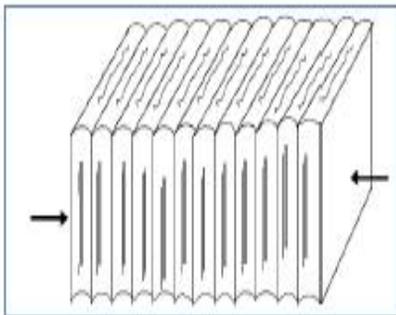


1-Généralités

La résistance du béton à la traction est très faible, de l'ordre de 1/10 de sa résistance à la compression. Dans la technique du béton armé, on remédie à ce défaut en disposant dans toutes les zones qui peuvent être tendues des armatures d'acier, dirigées suivant la direction des forces de traction, et capables d'y résister. Cependant, le matériau ainsi obtenu présente plusieurs défauts qui en limitent l'emploi: 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, dont on peut limiter l'ouverture par un choix du diamètre des aciers et de leur contrainte, mais dont on ne peut éviter la formation, sauf à n'admettre que de très faibles contraintes dans le béton. Par ces fissures, les armatures peuvent être en contact direct avec le milieu ambiant, d'où un risque de corrosion: le béton armé convient mal aux ouvrages placés en atmosphère agressive; d'autre part, le béton armé est lourd: les parties tendues du béton ne sont utilisées que pour enrober l'acier, et leur poids constitue un handicap tel que pour les poutres de grande portée ou de grand élancement, la charpente métallique se révèle souvent plus économique.

Il est donc logique de chercher à utiliser à plein la résistance du béton, en le comprimant à l'avance par le jeu de forces internes, de façon telle que la variation de contrainte qui faisait naître des tractions, ne provoque qu'une décompression du matériau.

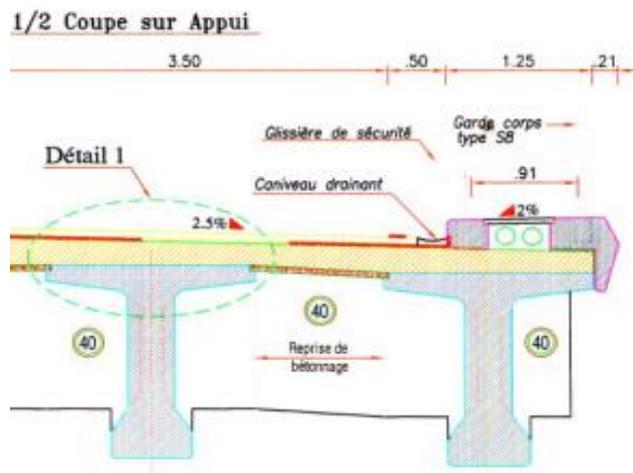
Exemple: tonneau, rayons d'une roue de bicyclette.

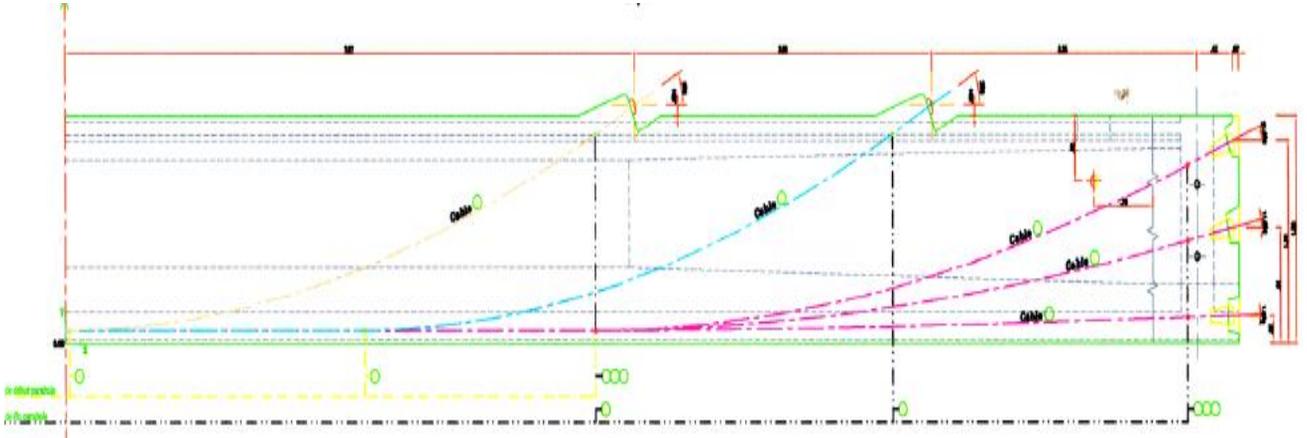


Dès le début du 20^{ème} siècle, plusieurs ingénieurs avaient essayé de pré-comprimer des éléments de béton, de les pré-contraindre, en les traversant de part en part par des barres d'acier doux filetées tendues par serrage d'un écrou; mais ces essais n'avaient abouti qu'à des échecs, en raison de l'intervention du fluage et du retrait du béton: le raccourcissement différé du béton, sensiblement du même ordre que l'allongement initial donné à l'acier suffisait pour annuler la traction de la barre, et la précontrainte disparaissait ainsi au bout de quelques mois.

C'est à Eugène Freyssinet (1879-1962) que revient le grand mérite d'avoir mis au point et développé la technique du béton précontraint. Dès 1908, il réalisait des tirants précontraints au moyen de fils d'acier dur, et à cette occasion, il entreprenait une étude des déformations différées du béton. Il déposait en 1928 les principaux brevets relatifs à la précontrainte. Aujourd'hui, la plupart des ponts sont réalisés en béton précontraint, depuis une dizaine de mètres de portée jusqu'à 150 m et plus.

Ce matériau est également très répandu pour la construction des poutrelles préfabriquées des planchers de bâtiment. On le trouve aussi dans de nombreux types d'ouvrages, parmi les quels nous citerons: les réservoirs, les pieux de fondation, certains ouvrages maritimes, les chaussées, pistes d'aviations, les barrages, les caissons de réacteurs nucléaires et les plates-formes d'exploitation pétrolière en mer.



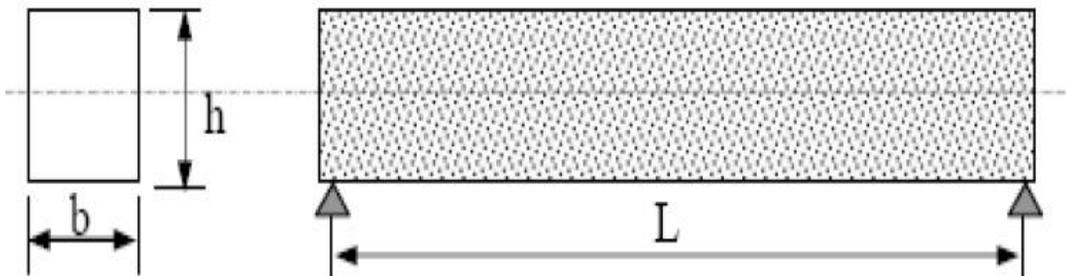


2-Précontrainte d'une poutre isostatique fléchie

- Considérons une poutre de section rectangulaire, désignons par b et h respectivement la largeur et la hauteur de la section.
- Nous nous proposons d'étudier les contraintes dans une section donnée, sollicitée par un moment fléchissant M .

Soit $I = b \cdot h^3 / 12$ le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe horizontal.

- En un point d'ordonnée y par rapport à cet axe, en supposant la poutre formée par un matériau homogène et élastique, la contrainte normale σ s'exprime par: $\sigma = M \cdot y / I$.
- La contrainte varie donc en fonction de la hauteur suivant le diagramme I de la figure 1, et sa valeur absolue maximale est: $\sigma_0 = 6M / bh^2$ sur les fibres extrêmes de la section.



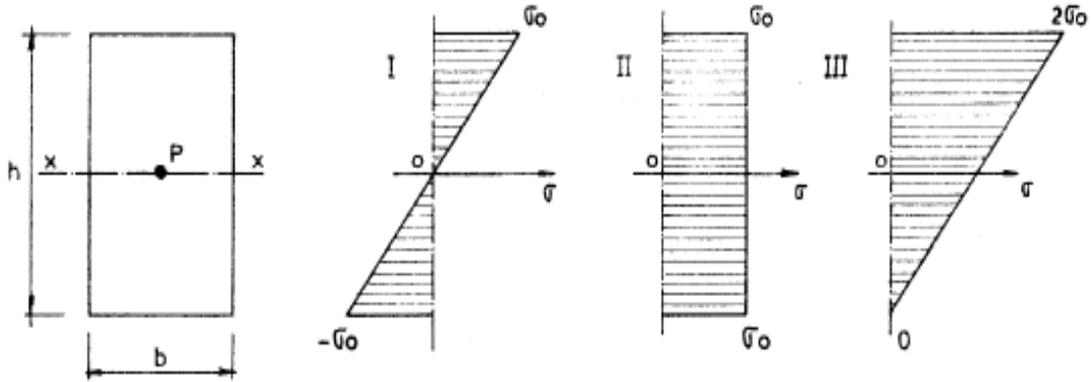
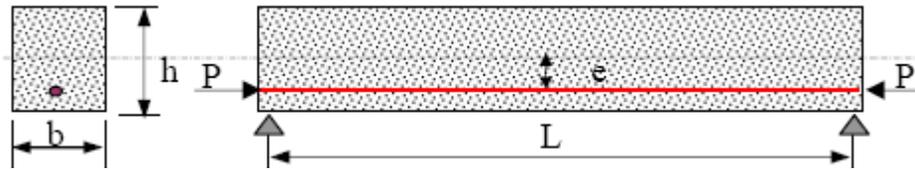


Fig. 01

- Compte tenu de la faible résistance du béton à la traction, il n'est pas possible d'employer ce matériau, non armé, pour former une poutre qui supporte une flexion importante.
- En revanche, supposons que la poutre soit précontrainte, grâce à une armature tendue, prenant appui sur le béton lui-même à ses deux extrémités.
- Si nous fixons à σ_0 (diagramme II) la compression apportée par la précontrainte, le diagramme des contraintes dans la poutre fléchie sera celui qui est représenté en III, et qui résulte de la superposition des diagrammes I et II.
- Nous voyons ainsi que les contraintes de traction ont disparu, grâce l'introduction d'une force de précontrainte: $P = \sigma_0 \cdot b \cdot h = 6M/h$.
- L'élimination des contraintes de traction n'a pu être obtenue, dans le schéma ci-dessus qu'au prix d'une augmentation importante de la contrainte de compression, qui passe de σ_0 à $2\sigma_0$; en fait, la précontrainte, utile dans la partie inférieure de la section, se révèle donc inutile, et même nuisible, dans sa partie supérieure.
- L'idée vient alors à l'esprit d'excentrer le point d'application de P de façon à obtenir des compressions seulement là où elles sont utiles.



- A l'examen du diagramme I, on peut voir qu'un diagramme de précontrainte triangulaire, croissant de 0 au sommet de la section, jusqu'à σ_0 à sa base est suffisant pour annuler les tractions.
- Les diagrammes des contraintes seront alors les suivants (fig.II'.2):

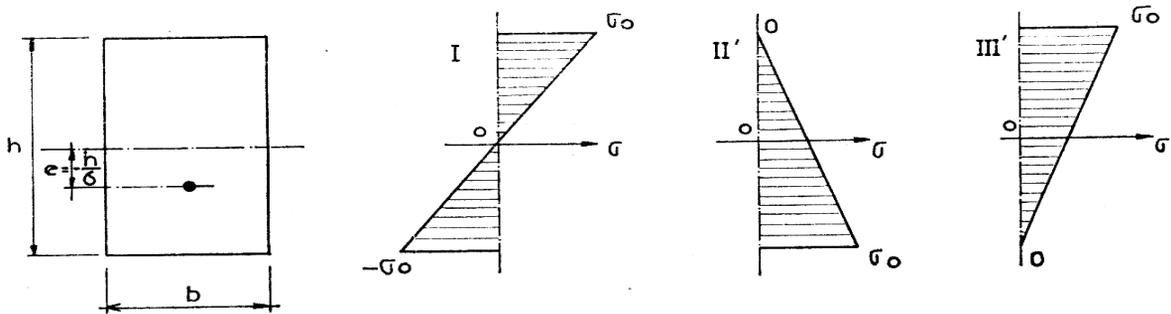


Fig. 2-Effet d'une précontrainte excentrée

- Pour réaliser le diagramme de précontrainte II', il faut placer l'armature de précontrainte à la limite du noyau central de la section, c'est à dire au tiers inférieur de la hauteur, avec un excentrement: $e = -h/6$.
- Cette nouvelle disposition présente sur la précédente deux avantages:
 - La contrainte maximale n'est plus maintenant que σ_0 , au lieu de $2\sigma_0$.
 - La force de précontrainte nécessaire, égale à l'aire du diagramme II', multipliée par la largeur de la section, a pour valeur cette fois: $P' = (\frac{1}{2}) \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot h = 3M/h$ soit la moitié seulement de la valeur trouvée plus haut.
- Nous voyons donc tout l'intérêt que présente le réglage de l'excentrement de la force de précontrainte: en jouant convenablement sur le couple de valeurs (P,e), l'on pourra obtenir les conditions optimales de répartition des contraintes.

- Cas pratique

Considérons maintenant le cas, très fréquent en pratique, d'une section de poutre soumise à un moment fléchissant dû à des actions permanentes au quelle peut se superposer un moment fléchissant dû à des actions variables.

- Sous la seule action des sollicitations extérieures la contrainte normale sur la fibre supérieure varie de σ_G à $\sigma_G + \sigma_Q$; l'existence d'une contrainte minimale σ_G a une conséquence importante.
- Sous l'action de la précontrainte seule, il est possible, sans obtenir de contraintes de traction dans la section, d'avoir un diagramme tel que la contrainte au droit de la fibre supérieure soit négative, c'est-à-dire que le point de passage de la force de précontrainte pourra être extérieur au noyau central de la section, le diagramme optimal est alors le suivant:

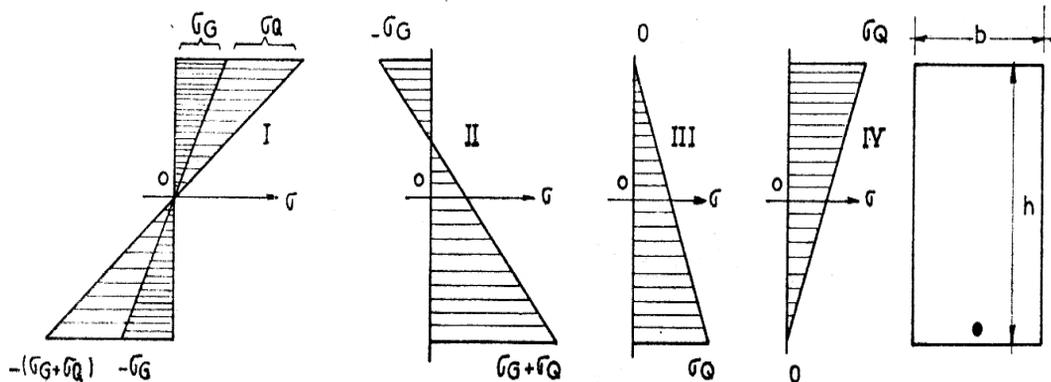


Fig. 3 - Compensation d'une action permanente

- Dans la figure 3 :
 - le diagramme (I) représente les contraintes dues aux sollicitations extérieures.
 - Le diagramme (II) représente les contraintes dues à la précontrainte.
 - Les contraintes figurées en (III) sont celles qui s'exercent sous l'action de M_G dans la section précontrainte.
 - Les contraintes figurées en (IV) sont celles qui s'exercent sous l'action de $M_G + M_Q$ dans la section précontrainte.

- La force P et l'excentrement « e » de la précontrainte nécessaires pour obtenir les contraintes définies par le diagramme (II) se déduisent des deux équations ci-contre:

$$-\sigma_G = \frac{P}{bh} + \frac{6.P.e}{bh^2}$$

$$\sigma_G + \sigma_Q = \frac{P}{bh} - \frac{6.P.e}{bh^2}$$

Ces deux équations se résolvent en:

$$P = \frac{1}{2} b.h.\sigma_Q \quad e = -h \cdot \frac{\sigma_Q + 2\sigma_G}{6.\sigma_Q}$$

- Nous aboutissons donc à un résultat surprenant a priori: avec une précontrainte définie par le couple de valeurs (P,e) ci-dessus, les contraintes extrêmes dans la section représentées en (III) et (IV) ne dépendent plus de MG, mais seulement de la variation du moment soit M_Q .
- Nous découvrons ainsi un avantage essentiel de la précontrainte, qui a fait dire par fois qu'«en béton précontraint, la charge permanente est gratuite».
- Cependant, cette affirmation ne doit pas être acceptée sans réserves car, la valeur de « e » déterminée par la deuxième équation (1) n'est pas toujours compatible avec la géométrie de la section, l'excentrement est limité, car l'armature doit rester intérieure au béton avec une épaisseur d'enrobage convenable.
- Cet exemple simple nous montre que la précontrainte constitue un moyen extrêmement puissant mis à la disposition de l'ingénieur pour tirer le meilleur parti des qualités du béton, et éliminer son principal défaut, qui est sa faible résistance à la traction.

3-Avantages et inconvénients de la précontrainte.

A- Avantages :

- Meilleure utilisation de la matière, puisque, contrairement au béton armé, il n'y a pas de béton tendu inutile (tout au moins en classe I et II).

- Le béton situé autour des armatures de précontrainte est toujours comprimé, on limite ainsi sérieusement les risques de corrosion des aciers.
- L'effort de précontrainte, agissant en sens inverse des charges extérieures limite les déformées ; on obtient ainsi une diminution des flèches des poutres et donc une diminution de leur hauteur (pièces plus fines).
- Possibilité d'assembler des éléments préfabriqués sans échafaudages (ponts construits avec voussoirs préfabriqués posés en encorbellement successifs ; fléaux des couvertures des stades).
- Possibilité de franchir de plus grandes portées qu'avec des ouvrages en béton armé.

B- Inconvénients :

- Nécessité de fabriquer des bétons de résistance élevée.
- Nécessité de disposer d'un personnel qualifié pour la vérification de la pose des gaines et câbles et pour la mise en tension des câbles.
- Calculs, en général, plus complexes que pour les ouvrages en béton armé.
- Risque de rupture à vide par excès de compression. Il faut être très vigilant lors de la phase réalisation (peu chargée) et il faut justifier toutes les étapes.
- Les délais sont très importants (temps de maturité du béton) et traitements thermiques sont parfois nécessaires.