

# **Chapitre 1 :**

## **Généralités**

## I.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau qui résiste bien à la compression, mais peu, et surtout aléatoirement, à la traction. IL est donc intéressant de construire en béton, mais en évitant que ce matériau soit trop tendu, et risque de se fissurer. Et pour cela, il faut le comprimer de façon artificielle et en permanence, dans des zones où les charges extérieures développent des tractions de façon qu'au total le béton reste comprimé (ou assez peu tendu pour ne pas risquer de fissurer) et donc résistant à tout cas de charge. L'effort de compression volontairement développé à cet effet est appelé l'effort de précontrainte (ou la précontrainte). Le remède ne doit pas pêcher par excès: la compression totale du béton doit rester inférieure à une valeur raisonnable de façon à éviter tout risque de fissuration longitudinale des éléments précontraints par excès de compression (alors que les tractions y développent généralement des fissures transversales).

Au total, un ouvrage en béton est dit en béton précontraint quand il est soumis à un système d'efforts créés artificiellement pour engendrer des contraintes permanentes, qui, composées avec les contraintes dues aux charges extérieures, donnent des contraintes totales comprises entre les limites que le béton peut supporter indéfiniment, en toute sécurité (Figure I.1).

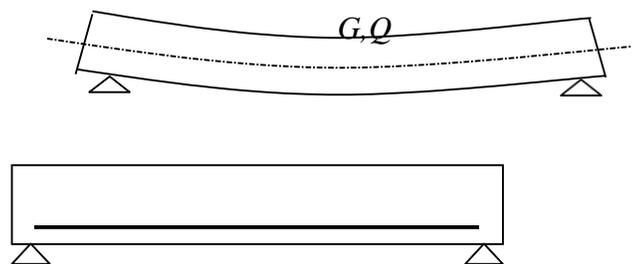


Figure I.1

La poutre subit également des contraintes de cisaillement dues aux efforts tranchants qui se produisent vers les appuis. Ces contraintes occasionnent des fissures à  $45^\circ$  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).

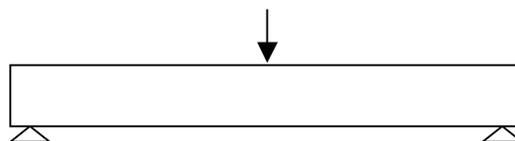


Figure I.2

✚ **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).

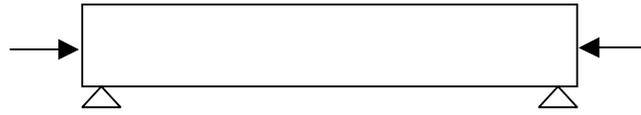


Figure I.3

## I.2 PRINCIPE GENERAL DE LA PRECONTRAINTE

Le béton est un matériau qui résiste bien à la compression, mais peu, et surtout aléatoirement, à la traction. Il est donc intéressant de construire en béton, mais en évitant que ce matériau soit trop tendu, et risque de se fissurer. Pour cela, il faut le comprimer de façon artificielle et en permanence, dans des zones où les charges extérieures développent des tractions de façon qu'au total le béton reste comprimé (ou assez peu tendu pour ne pas risquer de se fissurer) et donc résistant à tout cas de charge. L'effort de compression volontairement développé à cet effet est appelé l'effort de précontrainte (ou la précontrainte).

La précontrainte a pour objectif, en imposant aux éléments un effort de compression axial judicieusement appliqué, de supprimer (ou fortement limiter) les sollicitations de traction dans le béton (Figure I.4).

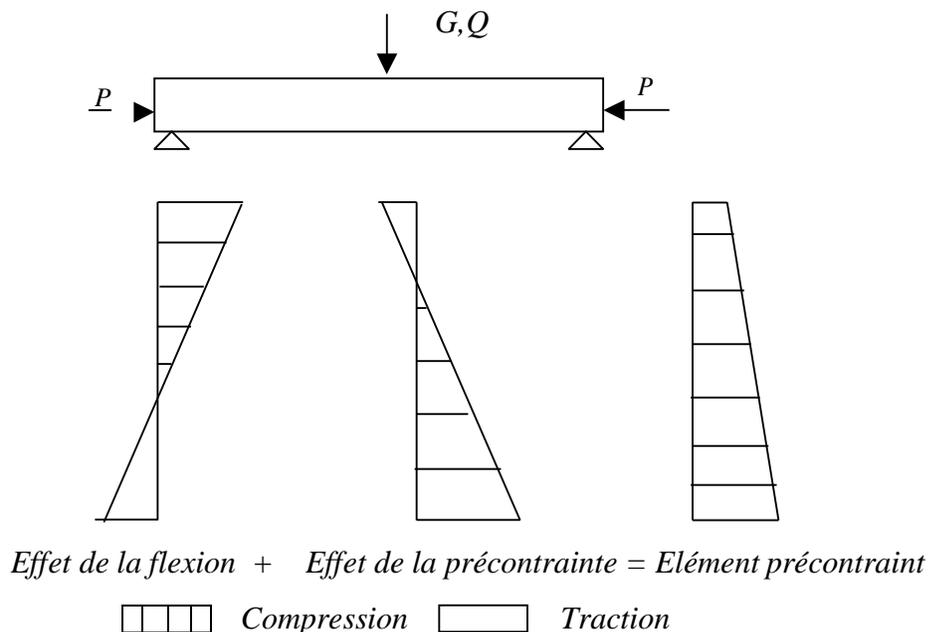


Figure I.4

Cette précontrainte peut être :

✓ **Une précontrainte totale**

La notion de précontrainte totale, introduite et défendue par Freyssinet, impliquait l'absence totale de traction dans le béton, ce qui constitue une condition très sévère. Cette conception avait un caractère quelque peu théorique, puisqu'elle exigeait une précontrainte dans toutes les directions (horizontale, verticale et transversale).

✓ **Précontrainte limitée**

Si les tractions tolérées dans le béton sont suffisamment faibles par rapport à la résistance à la traction, on évite la fissuration. Cela correspond à la « précontrainte limitée » (beschränkte Vorspannung), selon la norme allemande DIN 4227, cette norme indique, pour un béton B300 ( $f_w = 300 \text{ kg/cm}^2$ ) par exemple, les valeurs suivantes :

$$\sigma_b (\text{arête}) = 30 \text{ kg/cm}^2$$

$\sigma_I$  (âme) =  $20 \text{ kg/cm}^2$  (effort tranchant et torsion combinés). Ces contraintes correspondent environ à « l'état limite de formation des fissures »

✓ **Une précontrainte partielle** : autorisation des contraintes de traction limitées.

## I.3 MODES DE PRECONTRAINTE

### I. 3. 1 : Introduction

La technique de la précontrainte comprend deux méthodes d'application principales :

- La pré-tension (anglais : tensioning).
- La post-tension (en anglais : post-tensioning).

Elles sont par fois désignées par d'autres expressions, mais les deux termes ci-dessus sont les plus claires pour exprimer la différence entre des deux méthodes.

### I. 3. 2 Pré-tension

C'est une méthode utilisée en usine, pour préfabriquer des poutres précontraintes destinées à être incorporées dans des constructions en tant que « produits ».

Ce procédé peut être réalisé en usine ou sur chantier. La méthode suit généralement la procédure suivante :

- ✓ Préparation des moules (nettoyage, mise en place d'huile de décoffrage,...),
- ✓ Déroulement des armatures (fils adhérents ou torons) et blocage aux extrémités,
- ✓ Mise en place des armatures passives pour reprendre les efforts de traction,
- ✓ Mise en tension des fils ou torons par des vérins situés à une des extrémités
- ✓ Coulage du béton, lissage et vibration par vibration extérieure,
- ✓ Etuvage ou chauffage du béton pour accélérer son durcissement,
- ✓ Après un durcissement jugé suffisant (par calcul et essais antérieurs), détension et découpage des

fils,

- ✓ Manutention et stockage des éléments en prenant soin de ne pas les retourner.

La pré-tension s'accommode mal d'un tracé de câbles ou de fils adhérents non rectilignes. L'excentricité  $y$  est donc constante. Cela limite l'usage de ce procédé. Il est toutefois possible, en utilisant des déviateurs, de constituer un tracé comportant trois segments rectilignes continus, mieux adaptés pour les sollicitations futures.

La précontrainte par pré-tension est très utilisée dans le domaine du bâtiment. Toutefois, il est difficile de dépasser des longueurs de poutres supérieures à 30m.

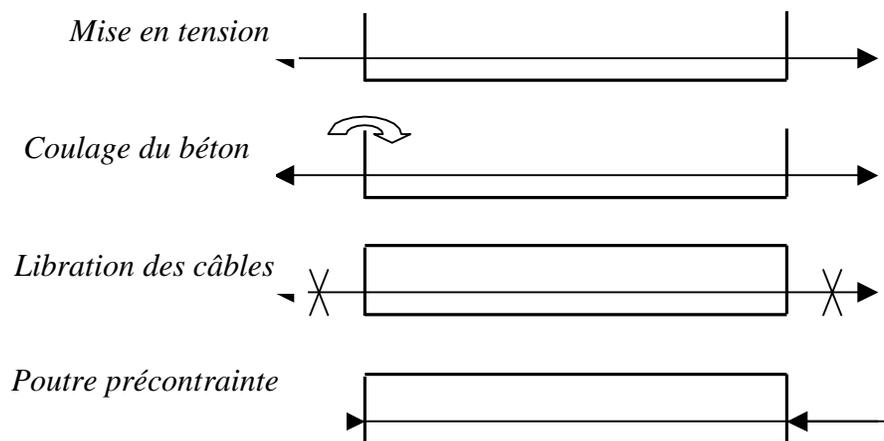


Figure I.5

### I. 3. 3 Précontrainte par post-tension

C'est la méthode la plus utilisée aujourd'hui, elle offre une très grande variété d'applications et se trouve parfois associée à la méthode précédente (préfabriquées à fils adhérents avec câble tendus sur chantier). La technique de post-tension consiste à prendre appui sur le béton déjà durci pour tendre le câble de précontrainte. L'élément en béton est donc coulé au préalable, avec des réservations pour le passage ultérieur de la précontrainte. Lorsque le béton atteint une résistance suffisante, le câble de précontrainte est enfilé et tendu à l'aide de vérins.

On distingue deux variantes : la post-tension interne et la post-tension externe.

Cas de la précontrainte par post-tension interne

- ✓ Mise en place du coffrage,
- ✓ Mise en place des armatures passives et les chaises support des gaines,
- ✓ Mise en place des gaines et fixation solides sur la cage d'armature,
- ✓ Mise en place des plaques d'appui et frettage adjacent aux extrémités des gaines,
- ✓ Coulage du béton,
- ✓ Pendant le durcissement, enfilage des câbles,

- ✓ Après un durcissement jugé suffisant (par calcul et essais antérieurs), mise en place des plaques d'ancrages et des clavettes de blocage des torons dans le vérin,
- ✓ Mise en tension d'un seul côté pour les câbles courts et des deux côtés pour les câbles longs.
- ✓ Injection d'un coulis (ou graisse minérale) afin de protéger les câbles.

Cas de la précontrainte par post-tension externe

- ✓ On coule le béton à température ambiante ou légèrement chauffé par calorifugeage.
- ✓ Les gaines sont placées à l'extérieur du béton (dans la zone intérieure du caisson) et dans la position finale de l'ouvrage.
- ✓ On glisse les câbles non adhérents dans les gaines.

Après un délai jugé suffisant, on effectue les mises en tension des câbles à des périodes et intervalles fonction du projet et des méthodes d'exécution de l'ouvrage. Le blocage se fait par différents systèmes de cales sur une zone de béton fretté.

On injecte un coulis de béton (micro béton) ou de la graisse minérale.

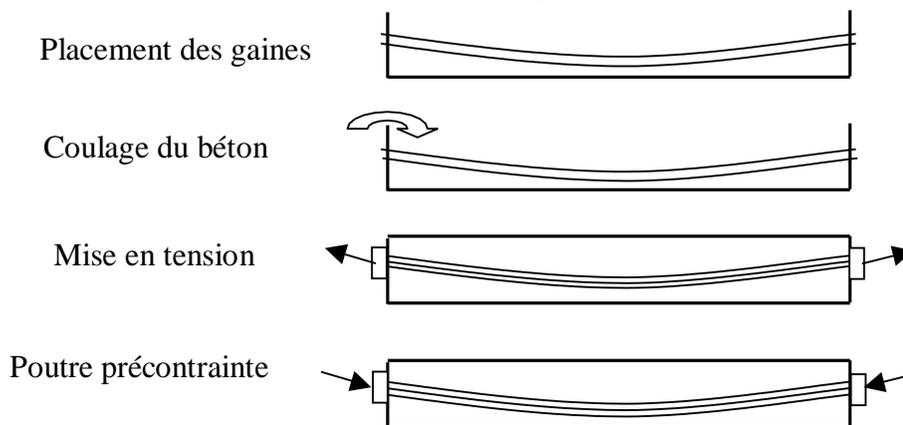


Figure I.6

La mise en tension peut être faite en tendant l'acier aux deux extrémités de la pièce (actif - actif) ou en tendant une seule extrémité uniquement (actif - passif) (Figure I.7).

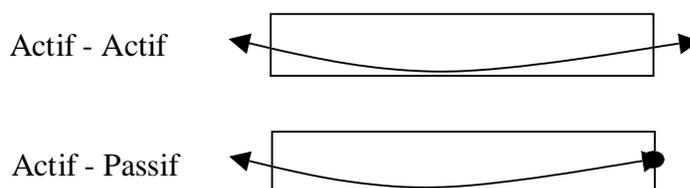


Figure I.7

L'injection est une opération extrêmement importante, car elle assure un double rôle :

- 1) La protection des armatures de précontrainte contre la corrosion.

## 2) L'amélioration de l'adhérence entre les armatures et les gaines.

L'opération de l'injection doit être réalisée dès que possible après la mise en tension des armatures. Le produit d'injection doit répondre aux impératifs suivants:

- ✓ avoir une assez faible viscosité pour couler facilement et pénétrer dans ~~tous~~ les ouvertures et entre fils des câbles de précontrainte ;
- ✓ conserver cette faible viscosité pendant un délai suffisant pour que l'injection puisse s'effectuer dans de bonnes conditions avant le début de prise ;
- ✓ après durcissement, avoir une résistance suffisante pour assurer efficacement l'adhérence de l'armature au béton ;
- ✓ présenter un retrait minimal ;
- ✓ ne pas être agressif vis-vis de l'acier de précontrainte.

Le produit d'injection était autrefois un mortier formé de ciment, de sable et de l'eau ; aujourd'hui le sable est à peu près complètement abandonné, au profit de coulis de ciment CPA, comportant un adjuvant.

L'ensemble d'un procédé de précontrainte comprend, généralement, les éléments suivants :

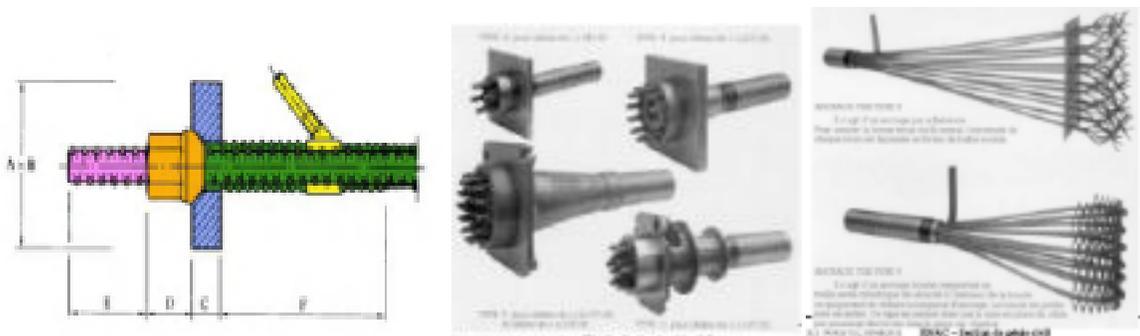
✚ **Dispositif d'ancrage** : on distingue, principalement, deux types d'ancrage :

### -Les ancrages fixes

Destinés uniquement à retenir le câble, sans possibilité de le tirer. Ils peuvent être constitués par une ou plusieurs boucles (fig. I.8), par une plaque incurvée si les fils sont munis de boutons (fig. I.8), par des scellements rectilignes, s'il s'agit de torons (fig. I.8), par des scellements ondulés (fig. I.8), etc. on peut également utiliser les ancrages mobiles comme ancrages fixes, en les bloquant préalablement.

### -Les ancrages mobiles

Sur lesquels on applique le vérin lors de la mise en tension, qui comporte un dispositif de blocage retenant l'extrémité du câble, une fois celui-ci tendu. La plupart des systèmes permettent la mise en tension par étapes, en débloquant et rebloquant le câble.



Ancrage d'une barre de précontrainte

Ancrages mobiles

Ancrages fixes

FREYSSINET

FREYSSINET

Figure I.8: Système d'ancrages fixes et mobiles

## **Les coupleurs**

Dispositif permettant les prolongements des armatures, Les coupleurs fixes permettent de raccorder un tronçon de câble à un autre tronçon déjà tendu. Les coupleurs mobiles joignent deux tronçons d'un câble mis en place successivement, mais tendus en une seule fois. Ces possibilités sont mises à profit dans la construction des ponts à l'avancement par travées.

L'accouplement de barres Dywidag est facile, puisqu'il suffit de placer un manchon fileté à la jonction des barres.

 **Matériels de mise en tension** : vérins, pompes d'injection, pompe d'alimentation des vérins etc.

 **Les accessoires** : gaines, tubes d'injection etc.

### **I. 3. 4 Comparaison des deux procédés**

Une comparaison entre les deux procédés (post-tension et pré-tension) permet de constater les observations suivantes :

#### **Pré-tension**

- 1) L'économie des gaines, des dispositifs d'ancrage et de l'opération de l'injection.
- 2) La nécessité des installations très lourdes ce qui limite, par voie de conséquence, le choix des formes.
- 3) La simplicité de la réalisation du procédé.
- 4) Une bonne collaboration du béton et des armatures.
- 5) La difficulté de réalisation des tracés courbes d'armatures.
- 6) L'impossibilité de régler l'effort dans les armatures après la mise en tension.

#### **Post- tension**

- 1) Ne demande aucune installation fixe puisque ; c'est sur la pièce elle même que s'appuie le vérin de précontrainte.
- 2) Elle permet le choix des différentes formes.
- 3) La possibilité de régler l'effort de précontrainte, ce qui permet d'adapter le procédé à l'évolution de la masse de l'ouvrage.
- 4) La facilité de réalisation des tracés courbes d'armatures de précontrainte.

A côté de ces procédés classiques, il existe des procédés spéciaux qui sont réservés à certains ouvrages ou qui font appel à d'autres principes pour la mise en tension :

- Précontrainte par enroulement
- Précontrainte par compression externe
- Mise en tension par dilatation thermique

□ Mise en tension par expansion du béton

## **I.4 SYSTEMES DE PRECONTRAINTE**

Les systèmes de précontrainte font l'objet de brevet et sont fabriqués par leurs exploitants. Les principaux systèmes sont :

### **I.4.1 Système Freyssinet**

Ce système utilise des câbles composés de torons T 13, T 13 S, T 15 et T 15 S. La lettre T est remplacée par la lettre K (exemple 12 K 15)

#### **Système PAC**

Ce système utilise des câbles composés de 1 à 37 T 13, T 13 S, T15 ou T 15 S.

#### **Système CIPEC**

Ce système utilise des câbles 4 T 13 à 19 T 13, 4 T 15 à 27 T 15, normaux et super.

#### **Système VSL**

Ce système utilise des unités 3 T 12 à 55 T 13, 3 T 15 à 37 T 15, normales ou super. Leur dénomination est de la forme 5-n pour n T 13 et 6-n pour n T 15.(exemple :6-37 représente un câble ou un ancrage 37 T 15).

## **I.5 DOMAINE D'APPLICATION**

L'invention du béton précontraint est due à l'ingénieur français Eugène Freyssinet. Les premières applications pratiques sont tentées en 1933. Dans les années qui suivent, les performances exceptionnelles de ce nouveau concept sont brillamment démontrées.

Grâce à ces avantages le béton précontraint est utilisé dans les ouvrages d'art et les bâtiments de dimensions importantes : il est d'utilisation courante pour les ponts et d'un emploi très répandu pour les poutrelles préfabriquées des planchers de bâtiments.

On le retrouve dans de nombreux autres types d'ouvrages, parmi lesquels nous citerons les réservoirs, les pieux de fondation et tirants d'ancrage, certains ouvrages maritimes, les barrages, les enceintes de réacteurs nucléaires.

## **I.6 REGLEMENTATIONS**

IP1 : Instruction Provisoire n°1 du 12 Août 1965

IP2 : Instruction Provisoire n°2 du 13 Août 1973

BPEL 91 : Béton précontraint aux états limites Euro code 2 : (Béton Armé et Béton précontraint).

## I.7 MATERIAUX UTILISES EN PRECONTRAINTE

### I.7.1 Caractéristiques mécaniques : béton

Le béton doit également être de très bonne qualité. En effet, tant qu'il n'est pas précontraint, il risque de se fissurer sous l'effet de la gêne qu'apportent les coffrages à son retrait ; pour éviter cela, il faut mettre ce béton en précontrainte très tôt alors que, jeune encore, il présente une résistance limitée. Le béton doit donc être de haute résistance et acquérir celle-ci très vite. Il est en effet très sollicité, au moment des mises en tension :

✚ en section courante, car la précontrainte a sa valeur maximale (les pertes n'étant pas encore effectuées) ; de plus, les charges extérieures (dont l'effet est opposé à celui de la précontrainte) sont souvent incomplètes (par exemple, si des superstructures ne sont pas encore mises en place),

✚ localement, sous ancrages, zones où s'exerce un effort très concentré.

Pour limiter la sollicitation du béton jeune, on tend fréquemment les câbles en plusieurs phases successives : du tiers à la moitié des câbles à 7 jours environ après coulage du béton (pour pouvoir décinterner la poutre, qui peut alors porter son poids), et le reste à une date généralement comprise entre 15 et 30 jours après coulage. De plus, on dispose souvent les ancrages dans une pièce d'about préfabriquée en béton fretté et suffisamment âgé pour pouvoir résister aux efforts localisés sous ancrages. De toute façon, la mise en précontrainte constitue pour le béton une épreuve préalable déterminante qui ne lui pardonnerait pas une éventuelle médiocrité.

#### I.7.1.1 Résistance à la compression

Le béton est caractérisé par sa résistance en compression à 28 jours. La mesure de cette résistance se fait selon la norme NF EN 12390. Elle peut se faire sur cylindre ou sur cube. En France, elle se fait habituellement par écrasement d'éprouvettes cylindriques de 200cm<sup>2</sup> de section (diamètre  $\Phi = 160\text{mm}$ ) et de 320mm de hauteur (éprouvette dite « 16/32 »).

Pour les sollicitations qui s'exercent sur un béton âgé de moins de 28 jours, on se réfère à la résistance caractéristique  $f_{cj}$ . Les règles BAEL et BPEL donnent, pour un âge  $j \leq 28$  jours et pour un béton non traité thermiquement :

Si  $f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$  donc :

$$f_{cj} = \frac{i}{4,76 + 0,83 j} f_{c28}$$

Et si  $f_{c28} > 40 \text{ MPa}$

$$f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95 j} f_{c28}$$

Au-delà de  $j=28$  jours, on admet pour les calculs que  $f_{cj} = f_{c28}$

### I.7.1.2 Résistance à la traction

La résistance caractéristique à la traction, à l'âge de « j » jours, notée  $f_{tj}$ , est conventionnellement définie par la formule :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

$f_{tj}$  et  $f_{cj}$  sont exprimées en MPa (ou N/mm<sup>2</sup>)

### I.7.1.3 Déformations longitudinales instantanées

A défaut de résultats expérimentaux probants, on adopte pour le module de déformation longitudinale instantanée du béton noté  $E_{ij}$ , une valeur conventionnelle égale à :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

Le module de déformation longitudinale différée  $E_{vj}$  est donné par :

$$E_{vj} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

### ✚ I.7.1.4 Diagramme Contrainte - Déformation

Le diagramme caractéristique contrainte-déformation du béton a l'allure schématisée sur la figure II.1 dite "parabole - rectangle".

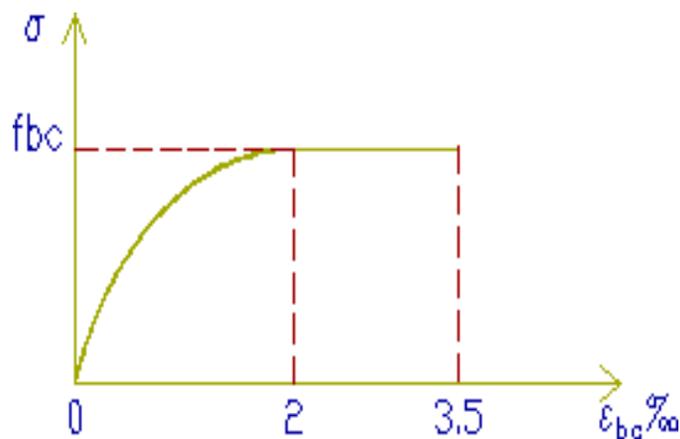


Figure I.9

Le diagramme de calcul comporte un arc de parabole du second degré depuis l'origine des coordonnées et jusqu'à son sommet de coordonnées  $\sigma_{bc} = 2\%$  et d'une contrainte de compression de béton donnée par :

$$\sigma_{bc} = 0,85 \cdot f_{cj} / \theta \cdot \eta_b$$

Le coefficient  $\theta$  prend en compte la durée probable d'application de la combinaison d'actions .

□  $\theta = 1$   $t > 24$  heures

□  $\theta = 0,9$   $1 h \leq t \leq 24 h$

$$\square \theta = 0,85 \quad t < 1 \text{ h}$$

### ✚ I.7.1.5 Déformations différées

#### ✚ Retrait

Le retrait est le raccourcissement spontané du béton au cours de son durcissement en l'absence de toute contrainte. Le retrait a plusieurs origines, mais les deux effets principaux sont le retrait d'origine chimique, dit « retrait endogène » et le retrait de dessiccation ou retrait de séchage. Le retrait endogène est dû à une diminution du volume de béton du fait de la réaction chimique de prise du béton. Les molécules avant réaction chimique occupent en effet un volume plus élevé que les molécules après réaction, ce qui engendre donc une diminution de volume. Le retrait de dessiccation provient de l'évaporation des molécules d'eau non consommées par la réaction chimique. Ceci entraîne également un raccourcissement du béton. La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $t_1, t$ ) peut être évaluée au moyen de la formule :

$$\varepsilon_r(t_1, t) = \varepsilon_r [r(t) - r(t_1)]$$

avec :

$\varepsilon_r$  : la déformation finale de retrait

$r(t)$  : la loi d'évolution du retrait, qui varie de 0 à 1 lorsque le temps  $t$ , compté à partir de la fabrication du béton, varie de zéro à l'infini.

La loi d'évolution du retrait est donnée par:

$$r(t) = \frac{t}{t + 9 r_m}$$

$t$  : l'âge du béton, en jours, compté à partir du jour de fabrication, et  $r_m$  le rayon moyen de la pièce, exprimé en centimètres :

$$r_m = B/u$$

B: L'aire de section

u: Le périmètre de la section

Dans le cas des bétons de structures précontraintes, réalisés avec du ciment Portland, la déformation finale de retrait peut être évaluée par la formule :

$$\square_r = k_s \square_0$$

Le coefficient  $k_s$  dépend du pourcentage des armatures adhérentes  $\square_s = A_s / B$ , rapport de la section des armatures passives longitudinales (et, dans le cas de la pré-tension, des armatures de précontrainte adhérentes) à la section transversale de la pièce.

$$k_s = \frac{1}{1 + 20 \rho_s}$$

Il s'exprime par la formule :

Le coefficient  $\varepsilon_0$  dépend des conditions ambiantes et des dimensions de la pièce. On prendra dans l'eau :  $\varepsilon_0 = - 60.10^{-6}$

### **Fluage**

Par définition, c'est le raccourcissement progressif du béton sous contrainte constante, retrait déduit. Ce phénomène est, lui aussi, lié à la migration de l'eau à l'intérieur du béton.

### **Coefficient de poisson**

Le coefficient de poisson du béton est pris égal à :

- 0,20 en zones non fissurées
- zéro en zones fissurées

### **Coefficient de dilatation thermique**

A défaut de résultats expérimentaux, le coefficient de dilatation thermique est pris égal à  $10^{-5}$  par degré C.

## **I.8 CARACTERISTIQUES MECANIQUES: ARMATURES**

Armatures de précontrainte

### **I.8.1 Formes**

On trouve les armatures de précontrainte sous trois formes : les fils ; les barres ; les torons.

#### **I.8.1.1 Fils**

Par convention, les fils ont un diamètre inférieur ou égal à 12,2 mm, ce qui permet de les livrer en couronnes. Ils peuvent être soit ronds et lisses (pour la post-tension) soit au contraire nervurés, ou crantés, ou ondulés afin d'améliorer leur adhérence au béton (pré-tension). Les fils les plus couramment utilisés ont des diamètres de 5 mm, 7 mm ou 8 mm.

#### **I.8.1.2 Barres**

De diamètre supérieur ou égal à 12,5 mm, elles ne sont livrées que rectilignes (et sous longueur maximale de l'ordre de 12 m). Elles peuvent être soit lisses, soit nervurées, les nervurations faisant alors office de filetage grossier (cas des barres Dywidag). Les diamètres les plus courants sont 26 mm, 32 mm et 36 mm. Mais il existe des barres plus grosses (Macalloy  $\varnothing$  □40, 50 et même 75 mm). De telles armatures ne sont employées qu'en post-tension.

#### **I.8.1.3 Torons**

Ce sont des ensembles de fils enroulés hélicoïdalement les uns sur les autres (cas des torsades à trois fils) ou autour d'un fil central en une ou plusieurs couches. Les torons les plus courants sont à 7 fils et sont

désignés par leur diamètre nominal (diamètre du cercle circonscrit aux fils dans une section droite). Les diamètres les plus utilisés sont les suivants : 12,5 mm (fréquemment désigné par T13) 12,9 mm (T13S) Cours de béton précontraint 29 15,2 mm (T15) 15,7 mm (T15S) Ces armatures sont employées aussi bien en pré-tension (dans les pièces importantes) qu'en post-tension.

Enfin, par le passé, certains procédés de précontrainte (PCB notamment) ont utilisé des torons à plusieurs couches de fils périphériques (torons à 37 ou 61 fils).

### I.8.2 Diagramme contraintes-déformations

Il est d'abord linéaire (phase élastique OI, la pente de la droite OI étant le module d'élasticité  $E_p$  de l'armature), puis il s'incurve, pour aboutir à un quasi-palier plastique (Figure 8). Enfin, la rupture survient pour une contrainte  $f_{pk}$  et un allongement relatif  $\epsilon_{uk}$ .

On attache une importance fondamentale à ce qu'elle ne se produise que moyennant une striction importante (caractérisée par le coefficient de striction  $\zeta$ , réduction relative de l'aire de la section droite au niveau de la rupture). Généralement, on exige :  $\epsilon \geq 20\%$  ;  $\epsilon_{uk} \geq 3,5\%$ ,

Le diagramme contraintes-déformations permet de définir une autre caractéristique importante de l'armature de précontrainte : sa limite conventionnelle d'élasticité  $f_{p0,1k}$ . C'est l'ordonnée du point d'intersection du diagramme avec la droite de pente 200 000 MPa passant par le point d'ordonnée nulle et d'abscisse  $10^{-3}$ .

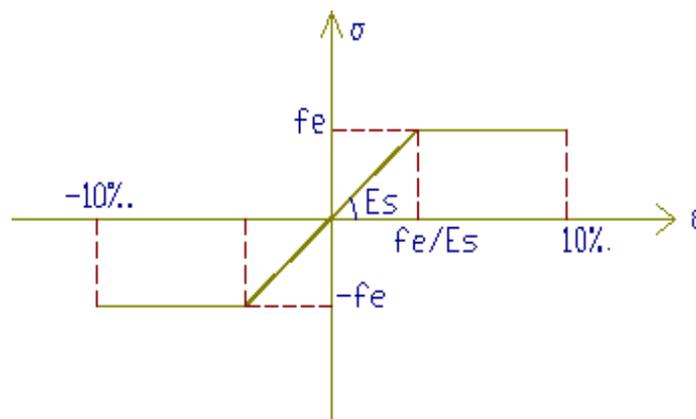


Figure II.3

L'aptitude de l'armature à rester solidaire au béton

Cette aptitude est caractérisée par les coefficients d'adhérence dits de fissuration et de scellement désignés respectivement par  $\eta$  et  $\psi$ .

Coefficients de fissuration :  $\eta = 1$  ronds lisses

$\eta = 1.6$  barres HA ou fils HA de diamètre supérieur ou égal à 6mm

$\eta = 1.3$  fils HA de diamètre inférieur à 6mm

Coefficients de scellement:  $\psi = 1$  ronds lisses

$$\psi = 1.5 \text{ barres HA ou de fils HA}$$

### Armatures actives

Les aciers actifs sont les aciers de la précontrainte, ils sont mis à des tensions. A l'inverse des armatures de béton armé qui se contentent d'un acier de qualité courante, les armatures de précontrainte exige un acier satisfaisant un certain nombre de conditions. Elles ont été classés par :

- Catégorie: fils, barres, torons.
- Classe de résistance.

### Qualités requises

- Une résistance mécanique élevée.
- Une ductilité suffisante.
- Une bonne résistance à la corrosion.
- Une faible relaxation.
- Un coût aussi bas que possible.

## I.8.2 Caractères géométriques

### Les fils

Les fils sont des armatures dont la plus grande dimension transversale est inférieure à 12.5mm ; ils sont livrés en couronnes.

On distingue:

- les fils d'acier ronds et lisse de symbole L,
- les fils autres que ronds et lisses de symbole L.

Les fils sont définis par leur diamètre nominal auquel correspond une section nominale conventionnelle, suivant le tableau I.2

Tableau I.2

Diamètre	4	5	6	7	8	10	12.2
Section	12.6	19.6	28.3	38.5	50.3	78.5	117

### Les barres

Les barres sont définies comme des armatures rondes et lisses de diamètre supérieur à 12.5mm, ou non rondes ou non lisses ne pouvant être livrées en couronnes.

Les caractères géométriques sont le diamètre et la section conventionnellement définie suivant le tableau I.3.

Tableau I.3

Diamètre	20	22	26	32	36
Section	314	380	531	804	1018

### Les torons

Un toron est un assemblage de 3 ou 7 fils enroulés en hélice et répartis en une couche, éventuellement autour d'un fil central.

Les torons sont caractérisés par le nombre de leur fils, par leur diamètre, et par leur section. Le tableau I.4 fournit les valeurs correspondantes.

Tableau I.4

Type	3fils	7fils	7fils	7fils standard	7fils standard	7fils super	7fils super
Diamètre	5.2	6.85	9.3	12.5	15.2	12.9	15.7
Section	13.6	28.2	52	93	139	100	150

### I.8.3 Caractères de calcul

Les caractères des armatures de précontrainte à prendre en compte dans les calculs sont :

- section nominale de l'armature ;
- la contrainte maximale garantie à rupture  $f_{prg}$
- la contrainte à la limite conventionnelle d'élasticité  $f_{peg}$
- coefficient de relaxation  $\rho_{1000}$   
 $\rho_{000} = 2,5 \%$  pour la classe TBR (Très Basse Relaxation)  
 $\rho_{000} = 8 \%$  pour la classe RN (Relaxation Normale)
- adhérence au béton ;
- coefficient de dilatation thermique  $10^{-5}$  par degré C.
- module de déformation longitudinale :  
 $E_p = 200\ 000$  MPa pour les fils et les barres  $E_p =$   
 $190\ 000$  MPa pour les torons
- Diagramme efforts-déformations.

## I.9 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SECTIONS

La résolution des problèmes d'RDM fait appel à des caractéristiques géométriques des sections droites des corps étudiés. Le principe fondamental consiste à déterminer les contraintes qui agissent dans une section et de comparer la contrainte maximale avec la contrainte limite :  $\sigma \leq [\sigma]$

- Traction simple  $\sigma = F/B$
- Flexion simple  $\sigma = M Y/I$
- Flexion composée  $\sigma = F/B + M Y/ I$

Les caractéristiques géométriques à étudier sont :

- Aire de la section B [cm<sup>2</sup>]
- Moments statiques Sx et Sy [cm<sup>3</sup>]
- Moments d'inertie axiaux Ix et Iy [cm<sup>4</sup>]
- Moments d'inertie centrifuges Ixy [cm<sup>4</sup>]
- Moments d'inertie polaires Ip [cm<sup>4</sup>]
- Module de résistance Wx et Wy [cm<sup>3</sup>]
- Module de résistance de torsion Wp [cm<sup>3</sup>]
- Rayon de giration ix et iy [cm]
- Rendement d'une section  $\rho$

### ✚ Moment statique

Les moments statiques de l'aire d'une section par rapport aux axes X et Y sont donnés par les expressions

Si l'axe X ou l'axe Y passe par le centre de gravité de la section, les moments statiques

Sx et Sy sont nuls.

### ✚ Moment d'inertie

Les moments d'inertie de l'aire d'une section par rapport aux axes X et Y sont donnés par les formules :

$$I_x = \int_A y^2 dA$$

$$I_y = \int_A x^2 dA$$

$$I_{xy} = \int_A xy dA$$

Le moment d'inertie polaire d'une section est

donné par :  $I_p = I_x + I_y$

### **Module de résistance**

Le module de résistance est égal au quotient du moment d'inertie axial par la distance de l'axe à la fibre la plus éloignée.

$$W_x = \frac{I_x}{y}$$

### **Rayon de giration**

$$W_y = \frac{I_y}{x}$$

On appelle rayon de giration la quantité donnée par l'équation :

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{B}}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{B}}$$

### **Rendement d'une section**

Le rendement d'une section est donné par :

$$\rho = I / B \cdot i_x \cdot i_y$$