

## 1. Caractéristiques mécaniques du béton

Le béton est un matériau hétérogène composé d'un mélange de liant, granulats, eau et éventuellement d'adjuvants. Sa résistance mécanique est influencée par plusieurs facteurs :

- Qualité du ciment ;

Les ciments sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants.

- **CEM I** : Ciments Portland.
- **CEM II** : Ciments Portland composés.
- **CEM III** : Ciments de haut-fourneau.
- **CEM IV** : Ciments pouzzolaniques.
- **CEM V** : Ciments composés.

Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5- 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale à la compression du ciment à 28 jours.

Il est à noter que le dosage en ciment pour le béton précontraint varie entre 400 et 500 kg/m<sup>3</sup>.

- Dosage en ciment
- Teneur en eau
- L'âge du béton
- La température
- L'humidité
- La durée de chargement

### 1.1. Qualités requises

- Une résistance élevée en compression.
- L'étanchéité et la non-agressivité chimique.
- Une faible sensibilité aux effets des déformations différées.
- Une bonne maniabilité.

### 1.2. Résistance à la compression

Le béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite «résistance caractéristique spécifiée ». Celle-ci, notée  $f_{c28}$  .

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 :

$$si f_{c28} \leq 40 MPa$$

$$et si f_{c28} > 40 MPa$$

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

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

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

### 1.3. 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>)

### 1.4. Déformations du béton ;

#### a- Module de déformation longitudinale instantanée

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 :

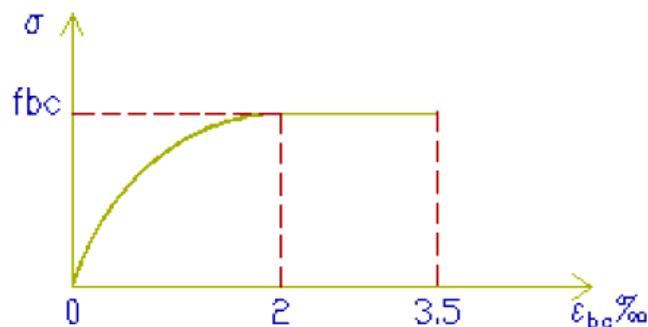
$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

b- Module de déformation longitudinale différée  $E_{vj}$  est donné par :

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

### 1.5. Diagramme Contrainte - Déformation

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



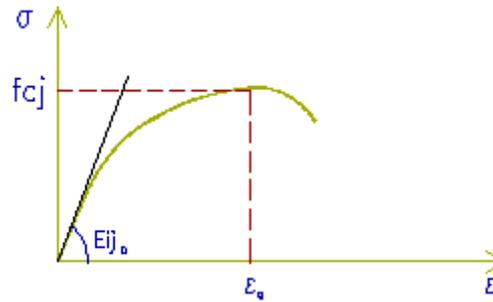
Le diagramme de calcul comporte un arc de parabole du second degré depuis l'origine des coordonnées et jusqu'à son sommet de coordonnées  $\epsilon_{bc} = 2\text{‰}$  et d'une contrainte de compression de béton donnée par

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

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

- $\theta = 1$      $t > 24$  heures
- $\theta = 0,9$      $1 \text{ h} \leq t \leq 24 \text{ h}$
- $\theta = 0,85$      $t < 1 \text{ h}$

Lorsqu'on a besoin d'une évaluation plus précise des déformations et à défaut de données expérimentales probantes, il est nécessaire d'adopter le diagramme suivant (Figure II.2) :



En prenant en compte :

- la valeur du module tangent à l'origine pour lequel on conserve la formule :

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

- la valeur de la déformation au maximum de contrainte, appelé pic de contrainte, que l'on peut évaluer par la formule :

$$\varepsilon_{bo} = 0,62 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{f_{cj}}$$

- la valeur de la résistance à la compression du béton  $f_{cj}$ .

## 1.6. Déformations différées

### 1.6.1. Retrait

Le retrait est le raccourcissement du béton non chargé, au cours de son durcissement.

Son importance dépend d'un certain nombre de paramètres:

- l'humidité de l'air ambiant;
- les dimensions de la pièce ;
- la quantité d'armatures;
- la quantité d'eau;
- le dosage en ciment ;
- le temps.

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 :

$$\varepsilon_r = k_s \varepsilon_0$$

Le coefficient **ks** dépend du pourcentage des armatures adhérentes, 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.

Il s'exprime par la formule :

$$\rho_s = A_s / B \quad k_s = \frac{1}{1 + 20 \rho_s}$$

Le coefficient  $\varepsilon_0$  bc dépend des conditions ambiantes et des dimensions de la pièce.

On prendra dans l'eau :  $\varepsilon_0 = - 60.10^{-6}$

et dans l'air :

$$\varepsilon_0 = (100 - \rho_h) \left( 6 + \frac{80}{10 + 3 r_m} \right) 10^{-6}$$

où :

$\rho_h$  : est l'hygrométrie ambiante moyenne, exprimée en pourcentage d'humidité relative.

En l'absence de données plus précises, on peut prendre pour des ouvrages à l'air libre :

$\rho_h = 55$  dans le quart Sud-Est de la France

$\rho_h = 70$  dans le reste de la France.

A défaut de résultats expérimentaux le retrait final  $\varepsilon_r$ , est donné par les valeurs forfaitaires suivantes en Algérie :

- $2 \times 10^{-4}$  en climat humide Zone A de la carte de zonage climatique de l'Algérie
- $3 \times 10^{-4}$  en climat tempéré sec Zone B
- $4 \times 10^{-4}$  en climat chaud et sec Zones B', C, D1.
- $5 \times 10^{-4}$  en climat très sec ou désertique Zones D2 et D3.

### 1.6.2. Fluage

Le fluage correspond à une déformation croissante dans le temps sous contrainte constante. Il dépend d'un certains nombres de paramètres:

- l'épaisseur moyenne de la pièce;
- la contrainte appliquée ;
- le dosage en ciment ;
- la teneur en eau ;
- l'humidité;
- la température ;

- l'âge de mise en tension.

La déformation de fluage à l'instant  $t$  d'un béton soumis à l'âge  $j = t_1 - t_0$ , à une contrainte constante  $\sigma_1$  est exprimée sous la forme :

$$\varepsilon_{fl} = \varepsilon_{ic} K_{fl} (t_1 - t_0) \cdot f(t - t_1)$$

$t_0$  : date du bétonnage,

$t_1$  : date de mise en charge ;

$\varepsilon_{ic}$  : déformation conventionnelle instantanée sous l'effet de la contrainte  $\sigma_1$

$$\varepsilon_{ic} = \sigma_1 / E_{i28}$$

$K_{fl}$  : coefficient de fluage, qui dépend notamment de l'âge  $(t_1 - t_0)$  du béton au moment où il subit la contrainte  $\sigma_1$  ;

$f(t - t_1)$  : une fonction de la durée du chargement  $(t - t_1)$ , exprimée en jours, qui varie de 0 à 1 quand cette durée varie de 0 à l'infini.

On peut également mettre  $\varepsilon_{fl}$  sous la forme :

$$\varepsilon_{fl} = \varepsilon_i \phi (t_1 - t_0) f(t - t_1)$$

$\varepsilon_i$  : la déformation réelle instantanée :  $\varepsilon_i = \sigma_1 / E_{ij}$  ;

$\phi = K_{fl} E_{ij} / E_{i28}$  le rapport entre la déformation finale du fluage et la déformation réelle instantanée.

Dans les cas courants, on peut prendre  $\phi = 2$ . La loi d'évolution de fluage  $f(t - t_1)$  est donnée par la formule :

$$f(t-t_1) = \frac{\sqrt{t-t_1}}{\sqrt{t-t_1} + 5\sqrt{r_m}}$$

Dans laquelle la durée de chargement  $(t - t_1)$  est exprimée en jours et le rayon moyen  $r_m$  en centimètres.

### 1.6.3. Coefficient de poisson

Le coefficient de poisson du béton est pris égal à :

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

### 1.6.4. Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique est pris égal à  $10^{-5}$  par degré C.

## 2. Caractéristiques mécaniques des armatures

Les aciers utilisés en précontrainte sont de deux natures différentes :

- les aciers actifs qui créent et maintiennent la précontrainte ;

- les aciers passifs nécessaires pour le montage, pour reprendre les efforts tranchants, et pour limiter la fissuration.

## **2.1. Armatures passives**

Ce sont des armatures identiques à celles utilisées dans le béton armé, ils ne sont mis en tension que par la déformation de l'élément.

### **2.1.1. Description des différents types d'aciers**

Les aciers généralement utilisés sont classés en plusieurs catégories :

- Barres rondes lisses.
- Barres à haute adhérence.
- Fils (Fils à Haute adhérence et fils lisses).
- Treillis soudés.

D'une façon générale, on distingue pour les armatures passives en béton précontraint :

- Les aciers passifs longitudinaux
- Les aciers passifs transversaux

### **2.1.2 Caractères des armatures passives**

Les caractères des armatures passives à prendre en compte dans les calculs sont les suivants :

- Section nominale de l'armature
- Module de déformation longitudinale ; Le module de déformation longitudinale de l'acier  $E_s$  est pris égal à 200 000 MPa.
- Limite d'élasticité garantie

L'acier est défini par la valeur garantie de sa limite d'élasticité, notée  $f_e$ .

Le tableau II.1 donne les désignations conventionnelles, les nuances et les limites d'élasticité actuellement sur le marché.

## **2. Armatures de précontrainte**

### **2.1 Généralités**

Le béton précontraint exige l'emploi de matériaux de haute qualité, mis en œuvre avec soin. Il permet de les utiliser sous des contraintes élevées, notamment à la construction (c'est-à-dire au moment de la mise en tension des câbles).

### **2.2. Acier pour câbles de précontrainte**

L'acier pour câbles de précontrainte doit être de haute résistance, pour pouvoir être tendu à un taux initial très élevé (couramment compris entre 1 200 et 1 500 MPa, sauf pour les barres). Cette tension initiale, pas très éloignée de la contrainte de rupture, n'est pas dangereuse car elle diminue progressivement par suite des pertes de précontrainte. Par ailleurs, la tension

utile finale est d'autant plus élevée que le sont davantage la tension initiale et donc la résistance de l'acier.

### 2.3. Formes

On trouve les armatures de précontrainte sous trois formes :

- les fils ;
- les barres ;
- les torons.

#### 2.3.1. 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>Diamètre</i>	4	5	6	7	8	10	12.2
<i>Section</i>	12.6	19.6	28.3	38.5	50.3	78.5	117

#### 2.3.2. 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 nervurassions 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* Ø 40, 50 et même 75 mm). De telles armatures ne sont employées qu'en post-tension.

<i>Diamètre</i>	20	22	26	32	36
<i>Section</i>	314	380	531	804	1018

#### 2.3.4. 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)

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).

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

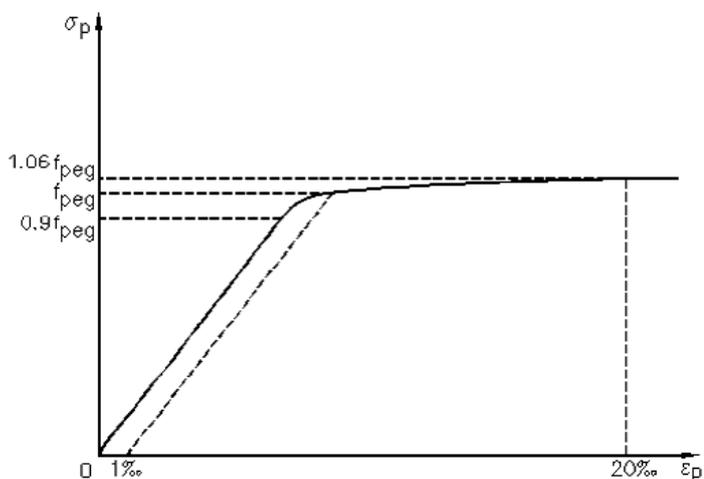
### 2.2.3. Caractères de calcul

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  $f_{peg}$
- 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.

Les diagrammes à utiliser conventionnellement pour les calculs sont donnés respectivement :

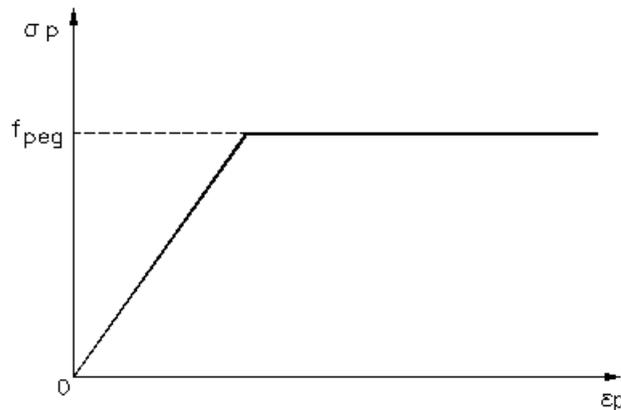
Pour les fils tréfilés et les torons



$$\text{si } \sigma_p \leq 0.9 f_{peg}, \quad \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

$$\text{si } \sigma_p > 0.9 f_{peg}, \quad \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left( \frac{\sigma_p}{f_{peg}} - 0.9 \right)^5$$

Pour les fils trempés et revenus et pour les barres :



$$\text{pour: } \varepsilon_p \leq \frac{f_{peg}}{E_p} \quad \sigma_p = E_p \varepsilon_p \quad \text{si non } \sigma_p = f_{peg}$$

Ce dernier diagramme est toléré pour les fils tréfilés et torons si on ne recherche pas une grande précision.

- Relaxation de l'acier

L'acier fortement tendu sous longueur constante va subir une diminution progressive de sa tension dans le temps. Ce phénomène, appelé relaxation, dépend très sensiblement de la température. Cette dernière accélère la relaxation sans modifier sa valeur finale réelle.

$$\rho(t) = \frac{\Delta \sigma(t)}{\sigma_i}$$

On définit la perte relative de tension par le terme

Où  $\sigma_i$  est la tension initiale.

En pratique, on mesure la relaxation isotherme à 20 C° d'une éprouvette tendue initialement à 0,7 fprg. La perte relative de tension observée dans ces conditions à 1000 h, et notée  $\rho_{1000}$  sert de base aux calculs de relaxation.

- A partir de cela, on peut définir les deux sous-classes de coefficient de relaxation  $\rho_{1000}$ 
  - $\rho_{1000} = 2,5 \%$  pour la classe TBR (Très Basse Relaxation)
  - $\rho_{1000} = 8 \%$  pour la classe RN (Relaxation Normale)

Dans la pratique, afin d'évaluer la perte finale par relaxation, le temps infini conventionnel retenue par le BPEL est de 500 000 h (soit environ 57 ans).

### Matériels utilisés en béton Précontraint

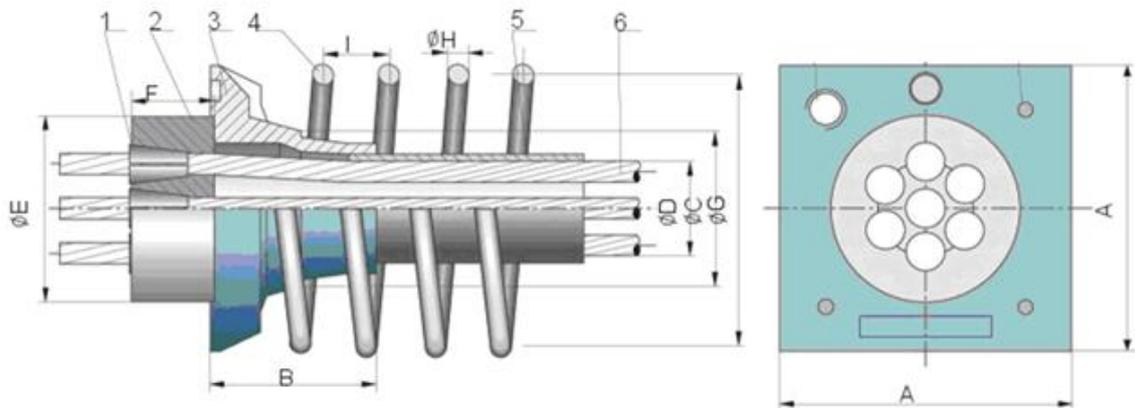
L'ensemble d'un procédé de précontrainte comprend, généralement, les éléments suivants :

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

- Ancrage actif, situé à l'extrémité de la mise en tension.
- Ancrage passif (ancrage mort), situé à l'extrémité opposée à la mise en tension.
- **Les coupleurs** : dispositif permettant les prolongements des armatures.
- **Matériels de mise en tension** : vérins, pompes d'injection, pompe d'alimentation des vérins etc.
- **Les accessoires** : gaines, tubes d'injection etc.







1 - Clavette

2 - Plaque d'ancrage

3 - Plaque d'appui

4 - Frettage

5 - Gaine

6 - Toron

