

Chapitre 2 : Matériaux utilisés en béton précontraint

2.1. Introduction :

Le comportement d'un élément en béton précontraint sur toute la plage de charges dépend des propriétés et du comportement des matériaux qui le composent. Afin de satisfaire à l'objectif de conception d'une résistance structurelle adéquate, les résistances ultimes du béton et de l'acier doivent être connues. De plus, les facteurs affectant la résistance du matériau et le comportement non linéaire de chaque matériau dans la plage de surcharge doivent être pris en compte. Afin de vérifier l'aptitude au service, les propriétés instantanées et dépendantes du temps du béton et de l'acier à des niveaux de contrainte en service typiques sont nécessaires.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un aperçu général du comportement des matériaux et de fournir suffisamment d'informations quantitatives sur les propriétés des matériaux pour mener à bien la plupart des tâches de conception.

2.2. Le béton :

Le béton pour les éléments et les structures précontraintes ne diffère principalement pas de celui utilisé pour le béton armé, mais étant soumis d'habitude à des efforts élevés, certaines qualités lui sont demandées. Parmi celles-ci, nous citons :

Le béton utilisé dans les éléments précontraints est généralement plus résistant que celui utilisé pour le béton armé. Les différences de module d'élasticité, de capacité de déformation et de résistance doivent être prises en compte dans la conception, et les caractéristiques dépendantes du temps revêtent une importance cruciale.

- **Résistances mécaniques élevées**

Elles conditionnent la grandeur de la force de précontrainte et le comportement du béton à l'action des charges statiques et dynamiques.

- **Module d'élasticité élevé**

Le transfert des efforts des armatures tendues au béton provoque une déformation élastique de celui-ci et implicitement une réduction de la force de précontrainte par le raccourcissement des armatures. Pour réduire cette perte de tension dans l'armature tendue, le béton doit avoir des déformations très petites.

- **Déformation due au retrait et aux fluages aussi petits que possible**

La force de précontrainte est réduite dans le temps grâce au béton. Une bonne composition s'impose, surtout le rapport E/C .

- **Béton compact et sans matières agressives**

Le béton constitue, surtout pour les éléments prétendus, le principal matériau de protection des armatures tendues contre la corrosion

- **Une bonne maniabilité**

Dans le but de permettre le remplissage correct de toutes les parties des modules et surtout les zones à ferrailage très dense.

2.2.1. Principales caractéristiques du béton

a. Résistance caractéristique en compression

Un béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours. Celle-ci notée f_{c28} est déterminée à partir d'essais normalisés sur cylindres 16x32 cm

Pour un nombre de jours $j < 28$, la résistance f_{cj} des bétons suit les lois données par les règles de BAEL et BPEL :

$$\text{Bétons de résistance courante : } f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.2.1})$$

$$\text{Bétons de haute résistance : } f_{cj} = \frac{j}{1.4 + 0.95j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.2.2})$$

$$\text{Pour } j \geq 28 \rightarrow f_{cj} = 1.1 f_{c28} \quad (\text{Eq.2.3})$$

b. Résistances caractéristiques à la traction :

La résistance caractéristique à la traction f_{tj} du béton à j jours est définie par :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \quad (\text{Eq.2.4})$$

Avec, f_{cj} est la résistance caractéristique à la compression à j jours exprimée en MPa.

c. Déformation instantanée

- **Déformation longitudinale**

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

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{\frac{1}{3}} (\text{MPa}) \quad (\text{Eq.2.5})$$

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

$$E_{vj} = 3700 f_{cj}^{\frac{1}{3}} (\text{MPa}) \quad (\text{Eq.2.6})$$

- **Déformation transversale**

$\mu = 0.2$ en zones non fissurées

$\mu = 0$ en zones fissurées

- **Diagramme contrainte-déformation**

Dans les calculs aux ELU, lorsqu'on n'a pas besoin d'une évaluation précise des déformations, on peut adopter le diagramme parabole-rectangle (Fig. 2.1).

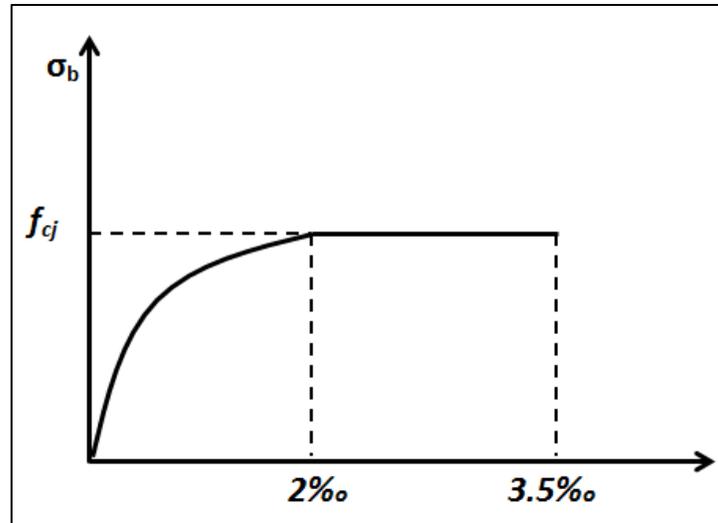


Figure. 2.1. Diagramme caractéristique contrainte déformation du béton.

La résistance de calcul du béton est déterminée par la relation suivante :

$$f_{bc} = 0.85 \cdot \frac{f_{cj}}{\theta \cdot \gamma_b} \quad (\text{Eq.2.7})$$

γ_b : le coefficient de sécurité égale à 1,5 (cas courant) et 1,15 (cas accidentel).

θ : Coefficient dépendant de la durée d'application de la charge avec :

$\theta = 1$ si la durée > 2h.

$\theta = 0.9$ si : 24 h la durée 1h.

$\theta = 0.85$ si : la durée 1h.

d. Déformation différée (retrait, fluage)

- **Le retrait :**

Le retrait est un phénomène de raccourcissement différé du principalement au départ de l'eau libre interne. Le retrait final dépend de plusieurs facteurs :

- De la composition du béton (fonction croissante du rapport E/C).
- De l'hygrométrie ρ_h du milieu ambiant.
- Des dimensions transversales de la pièce.

Dans les conditions climatiques de l'Algérie, on admet souvent, pour $\varepsilon_r(t)$, les valeurs forfaitaires suivantes : (Carte de zonage climatique de l'Algérie, CBA 93)

- 2×10^{-4} en climat humide (Zone A)
- 3×10^{-4} en climat tempéré sec (Zone B)
- 4×10^{-4} en climat chaud et sec (Zones B, C et D1)
- 5×10^{-4} en climat très sec ou désertique (Zones D2 et D3)

La valeur du retrait en fonction du temps peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_r \cdot r(t) \quad (\text{Eq.2.8})$$

Où ε_r et le retrait final du béton

Et $r(t)$ est une fonction du temps variant de 0 à 1 quand le temps t varie de 0 l'infinie à partir de la date de bétonnage.

$$r(t) = \frac{t}{t+9r_m} \quad (\text{Eq.2.9})$$

t : l'âge du béton, en jour

r_m : le rayon moyen de la pièce (cm) (Figure. 2.2)

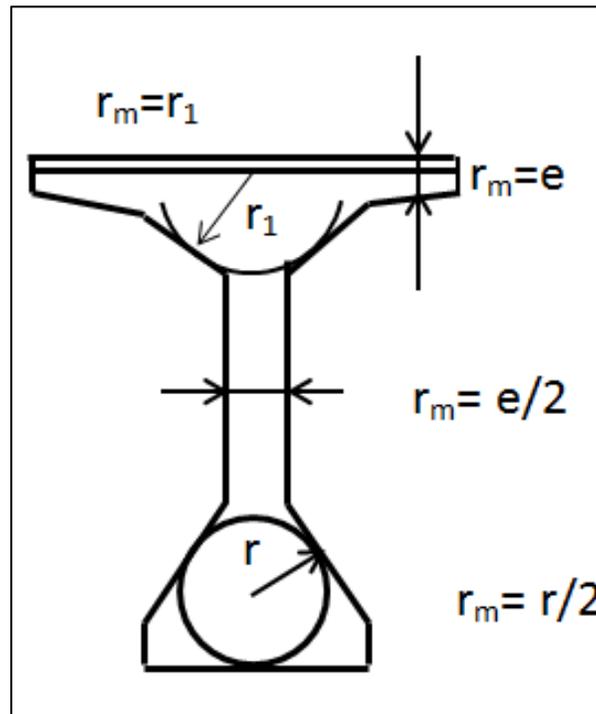


Figure. 2.2. Pièce pour mesure de retrait

- **Fluage**

Le fluage du béton est une déformation à long terme sous une contrainte ou une charge constante. Le taux d'augmentation de la déformation est rapide au début, mais diminue avec le temps jusqu'à ce qu'une valeur constante soit approchée asymptotiquement.

La déformation de fluage du béton a été constatée expérimentalement comme dépendant non seulement de la température, mais aussi des proportions du mélange, de l'humidité, des conditions de durcissement et de l'âge du béton lorsqu'il est chargé pour la première fois.

La déformation différée est environ 2 fois la déformation instantanée (Figure 2.3).

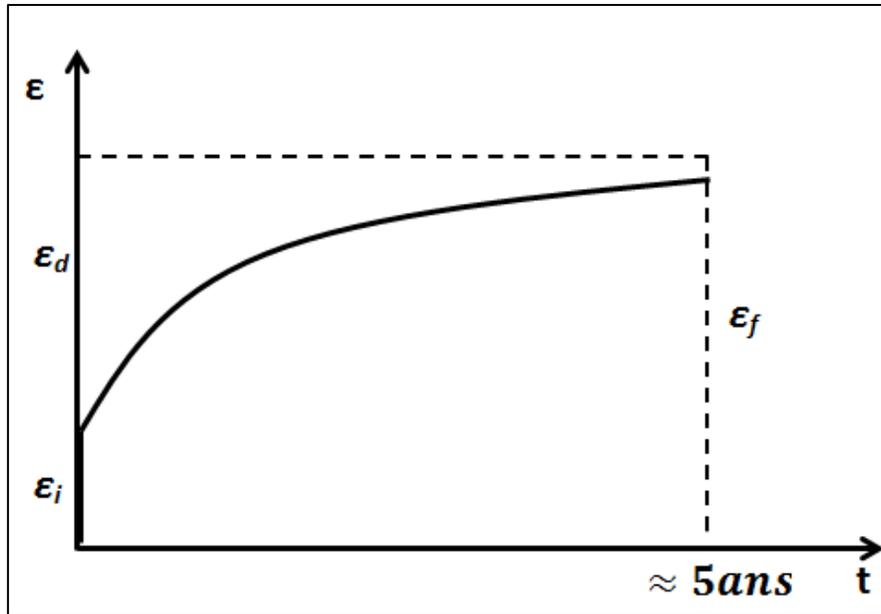


Figure. 2.3. Courbe de déformation de fluage en fonction du temps

Il est important de noter que les déformations du fluage croissent proportionnellement aux efforts si ceux-ci ne dépassent pas le domaine élastique, domaine dans lequel on considère que les déformations du fluage sont linéaires. Après l'apparition des microfissures et l'entrée dans le domaine plastique, le fluage croît plus intensément que dans le domaine élastique, il devient non linéaire.

La déformation de fluage à l'instant t d'un béton soumis à l'âge $j = t_1 - t_0$ à une contrainte constante σ_1 , est exprimée par la formule:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{ic} k_f (t_1 - t_0) f(t - t_1) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Avec : t_0 : date du bétonnage, t_1 : date de mise en charge.

$\varepsilon_{ic} = \frac{\sigma_1}{E_{t28}}$ est la déformation conventionnelle instantanée sous l'effet de la contrainte σ_1 .

k_f : Est le coefficient de fluage, qui dépend notamment de l'âge ($t_1 - t_0$) du béton au moment

où il subit la contrainte σ_1 , et $f(t - t_1)$ 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 ε_f sous la forme :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_i \Phi (t_1 - t_0) f(t - t_1) \quad (\text{E. 2.11})$$

Où ε_i : Est la déformation réelle instantanée : $\varepsilon_i = \frac{\sigma_1}{E_{t28}}$

$\Phi = k_f E_{ij} / E_{t28}$: est le rapport entre la déformation finale de fluage et la déformation réelle instantanée. Dans les cas courants, on peut prendre :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_1}{E_{t28}} \Phi f(t - t_1) \quad (\text{Eq. 2.12})$$

La loi d'évolution de fluage $f(t - t_1)$ est donnée par la formule :

$$f(t - t_1) = \frac{\sqrt{(t-t_1)}}{\sqrt{(t-t_1)+5\sqrt{r_{mf}}}} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Avec : $t(j)$ est l'âge du béton, $t_1(j)$: date de mise en charge. r_m (cm) : rayon moyen.

2.3. Les armatures de précontraintes

Dans les éléments en béton précontraint, l'acier à haute résistance utilisé se présente sous forme de fils, de barres ou de torons. Cette résistance accrue à la traction est principalement obtenue par une teneur en carbone légèrement supérieure à celle de l'acier doux. La composition typique de cet acier comprend :

- **0,6 à 0,85 % de carbone** (pour renforcer la dureté),
- **0,7 à 1 % de manganèse** (améliorant la trempabilité),
- **0,05 % maximum de soufre et de phosphore** (limitant les impuretés),
- des traces de silicium (favorisant la résistance).

La fabrication débute par le laminage à froid de lingots d'acier haute teneur en carbone, transformés en barres. Ces dernières sont ensuite étirées à travers une série de matrices, un procédé qui réduit leur diamètre tout en augmentant significativement leur résistance à la traction.

2.3.1. Diagramme contraintes-déformations :

Le BPEL propose pour les fils tréfilés et les torons le diagramme contraintes-déformations présenté sur la Figure 2.4. Dans ce diagramme, et en l'absence d'un véritable palier plastique, il est très difficile de déterminer une limite d'élasticité pour ces aciers durs de précontrainte. Pour cela, cette limite a été définie conventionnellement comme étant le point d'intersection de la courbe contraintes-déformations et d'une droite parallèle à la droite d'élasticité décalée de 1‰. A partir de ce diagramme, on admet que :

$$\text{Pour } \sigma_p > 0.9f_{peg} : \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left(\frac{\sigma_p \gamma_p}{f_{peg}} - 0.9 \right)^5 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$\text{Pour } 0 < \sigma_p < 0.9f_{peg} : \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

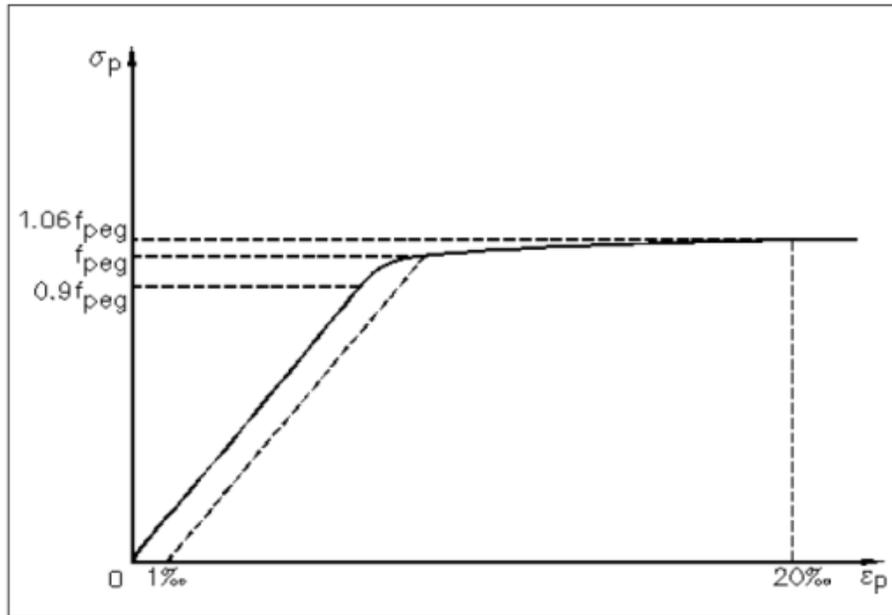


Figure 2.4: Diagramme contraintes-déformations pour les fils tréfilés et les torons.

Pour les fils trempés et les barres (Figure. 2. 5), on admet que :

$$\varepsilon_p < \frac{f_{peg}}{E_p} \text{ donc : } \sigma_p = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (\text{Eq. 2. 15})$$

$$\varepsilon_p \geq \frac{f_{peg}}{E_p} \text{ donc : } \sigma_p = f_{peg} \quad (\text{Eq. 2. 16})$$

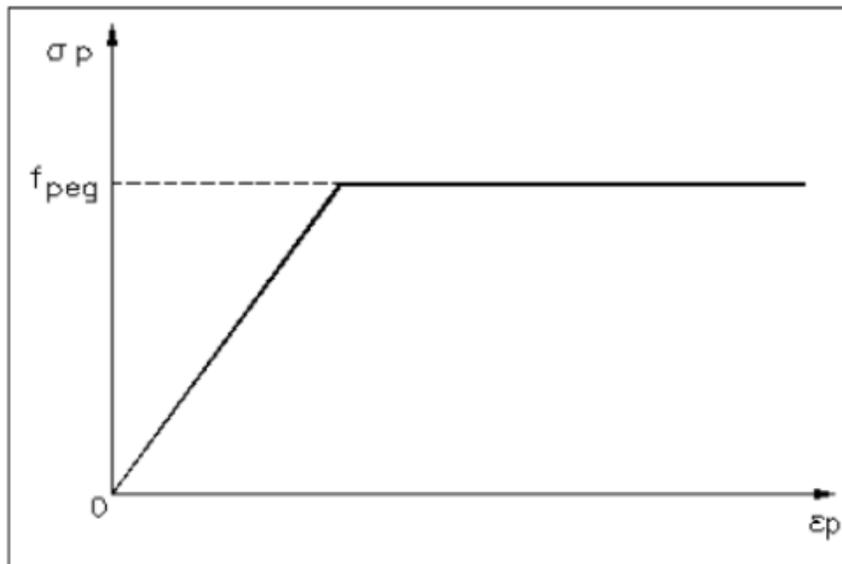


Figure 2.5: Diagramme contraintes-déformations pour les fils trempés et les barres.

2.3.2. Types des armatures utilisés dans la précontrainte

2.3.2. 1. Les fils :

Les fils étirés à froid subissent un **traitement thermique de relaxation des contraintes** (appelé *trempe*), réalisé à des températures comprises entre **150 et 420°C**, pour renforcer leurs propriétés mécaniques. Ce procédé augmente notablement leur **résistance à la traction**, tout en réduisant les tensions internes.

Ces fils sont disponibles en **diamètres nominaux standardisés** :

- **4, 5, 6, 7, 8, 10 et 12,2 mm**,
- avec une **résistance à la rupture** atteignant **1 700 à 1 800 MPa** (Figure 2.6).



Figure. 2.6. Fils pour béton précontraint

2.3.2. 2. Les barres:

Les barres en acier à haute résistance couramment utilisées en précontrainte sont fabriquées dans des dimensions nominales de 12,5, 16, 20, 22, 26, 32 et 36 mm de diamètre avec une longueur variée de 16m à 18m (Figure. 2.7). La résistance à la traction des barres varie sensiblement en fonction du diamètre.



Figure. 2.7. Barres utilisées dans la précontrainte

2.3.2. 3. Les torons :

Le toron est un assemblage de fils enroulés en spirale autour d'un fil central ou sur eux-mêmes, stabilisé par un procédé industriel appelé toronnage (Figure 2.8). Le nombre de fils constituant un toron est déterminé par la formule :

$$N = 1 + 3n(n + 1) \quad (\text{Eq. 2. 17})$$

où n désigne le nombre de couches supplémentaires autour du noyau central.

Exemples de structures de torons :

- Toron à 3 fils : 1 fil central
- Toron à 7 fils : 1 fil central + 6 fils en couche intermédiaire
- Toron à 19 fils : 1 fil central + 6 fils intermédiaires + 12 fils périphériques

Les fils et torons sont généralement assemblés pour former des câbles.

Qualités requises pour les aciers de précontrainte :

- Allongement significatif : L'armature doit pouvoir s'allonger bien plus que les déformations du béton (retrait, fluage) pour maintenir durablement la force de précontrainte. Sans cela, les pertes de tension pourraient réduire, voire annuler, la compression du béton.
- Rugosité adéquate : Une bonne adhérence entre l'acier et le béton est essentielle pour transmettre efficacement les efforts, notamment dans le cas de la pré-tension.



Figure. 2. 8. Torons pour le béton précontraint