

## Chapitre 2

### Matériaux utilisés en béton précontraint

#### 2.1. Le béton

Dans ce qui suit, nous allons nous attacher à mettre en évidence les caractères spécifiques du matériaux destiné à la précontrainte:

- Résistance à la compression
- Déformabilité instantanée et différée
- Résistance aux agent agressifs

##### 2.1.1 Résistance à la compression et à la traction

###### 2.1.1.1 Résistance à la compression

La résistance du béton à la compression, simple est mesurée sur des éprouvettes cylindriques âgées de 28 jours, après conservation dans des conditions définies par la normes NF P.18-404.

La loi de variation de la résistance du béton, surtout au jeune âge (avant 28 jours) est une donnée très importante, car elle gouverne **le délai de décoffrage des éléments**, et en béton précontraint, l'âge auquel **la mise en tension des câbles** devient possible.

La résistance caractéristique du béton se déduit des valeurs mesurées suivant les règles du BAEL et BPEL, qui nous donne pour un âge  $\leq$  à 28 jours et pour un béton non traité thermiquement:

$$f_{cj} = j \times 28 / (4.76 + 0.83 \times j) \quad \text{pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cj} = j \times 28 / (1.40 + 0.95 \times j) \quad \text{pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa}$$

###### 2.1.1.2 Résistance à la traction

Les bétons sont en général caractérisés par leurs résistances à la compression  $f_c$  mais leur résistances à la traction  $f_t$  joue aussi un rôle important dans leur comportement mécanique; c'est le cas en particulier pour tout ce qui concerne l'adhérence.

La résistance à la traction est définie selon les règles BAEL et BPEL, en fonction de la résistance à la compression:

$$f_{ij} = 0.6 + 0.06 \times f_{cj} \text{ (MPa)}$$

##### 2.1.2 Déformation instantanées et différées du béton

###### 2.1.2.1 déformation instantanée

La courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de béton soumise à une compression uni-axiale présente l'allure ci-dessous.

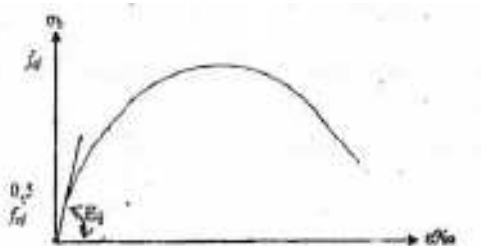


Diagramme contrainte-déformation du béton pour une compression uni-axiale

Les déformations instantanées peuvent être calculer à l'aide du module  $E_{ij}$  déterminé à partir de sa résistance à la compression  $f_{cj}$  par la relation:

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$$

### 2.12.2 Le retrait

Dès sa prise, le béton est sujet au retrait, raccourcissement naturel du essentiellement à l'évaporation de l'excédent d'eau de gâchage, non combinée au ciment.

L'importance du retrait dépend d'un certain nombre de paramètres:

- l'humidité relative de l'air ambiant
- les dimension de la pièce
- le rapport E/C
- la durée du durcissement du béton

Pour les construction courante, on admet en général les valeurs suivantes du retrait final:

$\xi_r = 1,5 \cdot 10^{-4}$  ouvrage implantées en climat très humide

$\xi_r = 2 \cdot 10^{-4}$  ouvrage implantées en climat humide

$\xi_r = 3 \cdot 10^{-4}$  ouvrage implantées en climat tempérés secs

$\xi_r = 4 \cdot 10^{-4}$  ouvrage implantées en climat chaud et sec

Le BPEL définit le retrait qui se développe dans l'intervalle de temps  $(t_0, t)$  par la formule:

$$\xi_r(t_0, t) = \xi_r \cdot [r(t) - r(t_0)]$$

$\xi_r$  désignant la déformation finale du retrait et  $r(t)$  la loi d'évolution du retrait:

$$r(t) = t / (t + 9 \times r_m)$$

$r_m$  désignant le rayon moyen (rapport de l'aire au périmètre) de la section de la pièce, en cm)

$t$  l'âge du béton exprimé en jours, à dater de sa fabrication.

### 2.1.2.3 Le fluage

Le fluage correspond à un raccourcissement croissant dans le temps sous contrainte constante. Une pièce soumise à la compression simple se raccourcit à la mise en application de la charge d'une certaine valeur qu'on appelle raccourcissement élastique instantané.

mais dans le temps, la pièce continue à se déformer pour atteindre, au bout d'un temps (plusieurs années), une limite qui est de l'ordre du triple de la déformation initiale.

On peut évaluer la déformation finale (initiale + différée) au moyen du module de déformation différée.

$$E_{vj} = 3700 (f_{cj})^{1/3}$$

L'indice 'v' vient de Freyssinet, qui considérait qu'ils 'agissait du 'vrai' module de béton.

Le fluage est un phénomène complexe qui n'est ni linéaire ni réversible, et il dépend d'un certain nombre de paramètre:

- Influence de l'hygrométrie
- Rayon moyen de la pièce

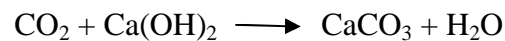
- Pourcentage des armatures
- Age auquel le béton est mis en charge

### **2.1.3 Resistance aux agents agressifs**

La pate de ciment qui enrobe les granulats, peut subir des attaques d'agents extérieures et même après durcissement, et qui peut entrainer des dislocation internes et induire à influencer négativement sur les armatures.

#### **2.1.3.1 LA carbonatation**

Toujours présent dans l'atmosphère, en milieu urbain surtout, pour l'échappement des véhicules, le gaz carbonique CO<sub>2</sub> en présence d'humidité, peut s'allier avec la chaux libre contenue dans la pate, suivant la réaction:



La carbonatation du béton conduit à un matériau plus dur en surface en raison de la formation du carbonate de chaux, mais, par disparition de la chaux, elle engendre un abaissement important du pH, et si elle atteint la zone d'enrobage des armature, elle entraine une fragilisation du film protecteur, et qui deviennent ainsi sujettes à la corrosion.

#### **2.1.3.2 L'action des chlorures**

Il s'agit essentiellement du chlorure de sodium, présent en atmosphère marine (embruns) et dans les sels anti verglas; que l'on répond sur les chaussées en hiver. La pénétration des chlorures est rapide surtout lorsque le béton est sujet à des alternances d'humidification par l'eau salée.

Le remède préventif contre les dégradations correspondante du béton est double: il consiste d'une part à assurer aux armature une épaisse d'enrobage suffisante, tant au projet que sur le chantier, et d'autre part, à soigner la composition du béton, de façon que la perméabilité soit aussi faible que possible.

#### **2.1.3.3 L'action des sulfates**

Les sulfates se rencontrent, soit à l'état naturel dans les nappes phréatiques des terrains contenant du gypse, soit dans les eaux usées, il s'agit surtout du sulfate de calcium, qui au contact de l'aluminate de calcium C<sub>3</sub>A contenu dans le ciment et en présence de l'eau donne naissance à l'ettringite.

L'ettringite formé est un sel expansif, car son volume est de deux à trois fois celui de l'aluminate de calcium à partir duquel il est formé; cette expansion conduit à une dégradation rapide du béton par fissuration, d'abord superficielle, puis en profondeur.

Lorsque les sulfates représente un risque, ce qui souvent le cas pour les travaux de fondation, il est prudent de remplacer le ciment portland par un ciment dont la teneur en C<sub>3</sub>A est limité à 3%.

### **2.2.1 Armatures de précontrainte**

Le béton précontraint s'est développé depuis l'apparition des aciers à haut limite élastique. En effet, pour des aciers ordinaires dont la limite élastique est de l'ordre 200 à 400 MPa, les pertes de précontraintes peuvent représenter de 50 à 80% de cette limite élastique.

Par contre, pour les aciers à haute limite élastique, ces mêmes pertes ne dépassent pas 15 à 20%; ce qui a rendu le béton précontraint compétitif avec les autres matériaux tel l'acier ou le béton armé.

Les armatures utilisés pour mettre en précontrainte les structures de béton sont actives, elles agissent en créant des efforts.

Elles sont soumises à de fortes tension, des chutes de tensions se produisent dans le temps ainsi elle doivent:

- être de très bonne qualité
- être à très forte résistance élastique
- être plus performantes que celles du béton armé
- avoir une ductilité suffisante
- avoir une bonne résistance à la corrosion
- Avoir une faible relaxation

nota: on désigne par  $f_{prg}$  résistance de l'armature de précontrainte de rupture garantie  
et  $f_{peg}$  résistance de l'armature de précontrainte élastique garantie

Les aciers actifs se présentent sur le marché en trois catégories:

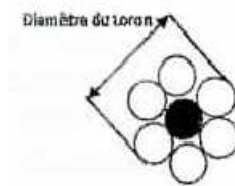
- Les fils
- les torons
- les barres

#### 2.2.1.1 Les fils ( $f_{prg} = 1700$ à $1800$ MPa);

On distingue les fils ronds et lisses et les fils non lisses. leur diamètre maximal ne dépasse pas 12.5 mm, ils sont livrés en couronne dont le diamètre d'enroulement est au moins égal 250 fois la plus petite dimension transversale du fil; ceci permet au fil d'être auto-dérouleur, ce qui signifie qu'au déroulage. Il est approximativement rectiligne et ne garde pas de trace importante de flexion du à l'enroulement. Les diamètres les plus courant en post tension sont 5,7 et 8 mm.

#### 2.2.1.2 Les torons ( $f_{prg} = 2000$ MPa);

Un toron est un assemblage de fils enroulés ensemble en hélice et repartis en une seule couche, éventuellement autour d'un fil central. Les torons sont caractérisés par le nombre de leurs fils, par leur diamètre, et par leur section.



Un toron peut comporter (n) couches de fils comportant chacun 6n fils

- Toron mono couche un fil central et 6 fils périphériques
- Toron bi-couche un fil central, première couche 6 fils périphériques, deuxième couche 2x6 (12) fils périphériques

Les plus utilisés sont constitués par 7 fils (mono couche)

T13 (diamètre = 12,5 mm)

T13S (diamètre = 12,9 mm)

T15 (diamètre = 15,2 mm)

T15S (diamètre = 15,7 mm)

## Caractéristiques des torons les plus couramment utilisés

Nature	Classe ( $f_{prg}$ )	Diamètre en mm	Section en mm <sup>2</sup>	F rupture $F_{prg}$ (KN)	F élastique $F_{peg}$ (KN)	0,8 $F_{prg}$ (KN)	0,9 $F_{peg}$ (KN)	0,6 $F_{prg}$ (KN)
<b>T13</b>	1860	12,5	99	173	154	138,4	138,6	103,8
<b>T13S</b>	1860	12,9	100	186	166	148,8	149,4	111,6
<b>T15</b>	1770	15,2	139	246	220	196,8	198,0	147,6
<b>T15S</b>	1770	15,7	150	265	236	212,0	212,4	159,0

Nota: **0,8  $F_{prg}$**  représente la force à laquelle est tendu le toron

**0,6  $F_{prg}$**  représente la valeur approché de la force utile toute perte déduite du toron

### 2.2.1.3 Les barres $f_{prg} = 1900$ MPa);

Les barres sont définies comme des armatures rondes et lisses de diamètre supérieur à 12,5 mm. Le diamètre le plus courant sont résumé dans le tableau ci-après.

Diamètre en mm	20	22	26	32	36
Section nominale en mm <sup>2</sup>	314	380	531	804	1018

## 2.2.2 Caractéristiques mécaniques

### 2.2.2.1 Résistance à la rupture

Il s'agit de la charge maximale  $f_{prg}$  (**Resistance de l'armature de précontrainte de rupture garantie**) que supporte l'éprouvette dans l'essai de traction jusqu'à rupture. Les différentes catégorie d'aciers sont réparties en classe de résistance en MPa, et qui sont résumés dans le tableau suivant.

### 2.2.2.2 Limite élastique

Les aciers de précontraintes ne présente pas de palier d'écoulement (palier de plasticité), on définit la limite élastique conventionnelle comme étant la contrainte qui, après retour à la contrainte nulle, laisse un allongement résiduelle de 1%, on la désigne par  $f_{peg}$ .

### 2.2.2.3 Module d'élasticité

Le module de Young  $E_p$  des aciers de précontrainte est pris égale à:

200 000 MPa pour les fils et barres

190 000 MPa pour les torons

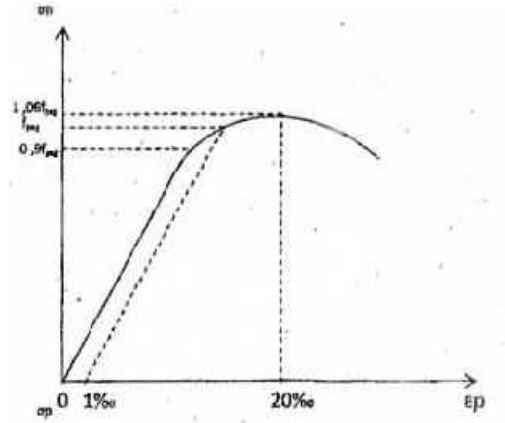
### 2.2.2.4 Diagramme contrainte -déformation

Le diagramme ( $\sigma$ ,  $\xi$ ) est généralement fourni par le producteur de l'acier, mais lors de l'établissement du projet la provenance de l'acier n'est pas encore connue; il faut donc admettre à priori une loi moyenne.

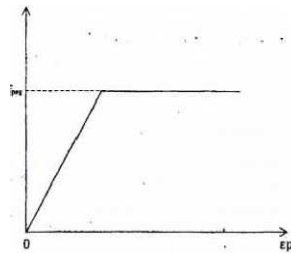
Pour les fils tréfilés et les torons, les règles de BPEL admettent le diagramme représenté ci-après qui comprend une partie rectiligne pour  $\sigma \leq 0,9 f_{peg}$  et, pour les valeurs supérieures, une courbe d'équation:

$$\xi_p = \sigma_p / E_p + 100 [\sigma_p / f_{peg} - 0,9]^5$$

Pour les fils trempés et revenus et pour les barres, le diagramme est bilinéaire avec une droite horizontale d'ordonne  $f_{peg}$ .



a)



b)

### Diagramme contrainte-déformation pour les acier précontraints selon le BPEL

a-Fils tréfiles et toron

b Fils trempes et revenu, barres

#### 2.2.2.5 Relaxation

La relaxation isotherme  $\rho$  est définie comme la perte de tension que subit à 20 °C et au cours du temps, une éprouvette tendue et maintenue à longueur constante. Des essais ont démontrés qu'on peut atteindre une relaxation en quelques heures, à 80 °C, alors qu'elle ne se produit à 20 °C qu'au bout de milliers d'heures. Celle-ci est caractérisée par la valeur de relaxation maximale à 1000 heures.

$$\rho_{1000h} = \Delta\sigma_{1000h} / \sigma_{pinitial}$$

Les armatures de précontraintes sont classées en 03 groupe

- Basse relaxation (BR)  $\rho_{1000h} = 5\%$
- Très basse relaxation (TBR)  $\rho_{1000h} = 2\%$
- Relaxation normale (RN)  $\rho_{1000h} = 8\%$