

Caractéristiques des matériaux

1. CARACTERISTIQUES MECANIQUES : BETON

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*
- ❑ *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

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

et si $f_{c28} > 40$ MPa

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

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

1.3. Résistance à la traction

La résistance caractéristique à la traction, à l'âge de « j » jours, notée f_{ij} , 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/mm²)

1.4. 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 :

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

1.5. Diagramme Contrainte - Déformation

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

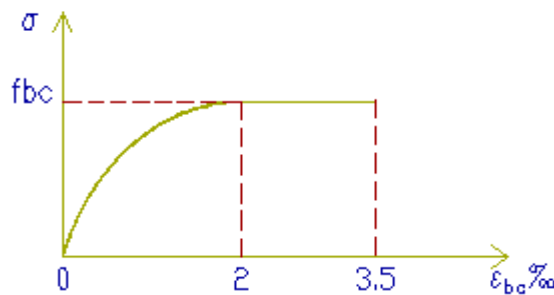


Figure II.1

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 θ 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) :

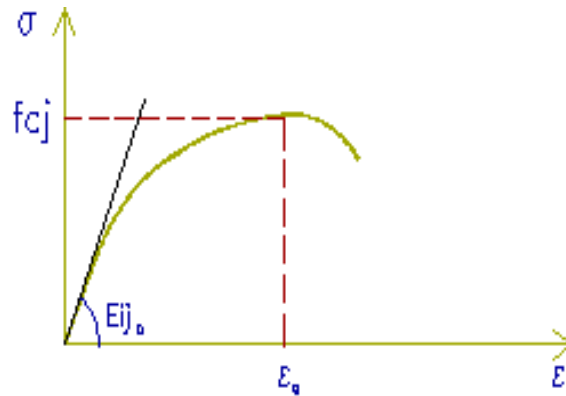


Figure II.2

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 : $\varepsilon_{b0} = 0,62 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{f_{cj}}$
- 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 :

ε_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 k_s dépend du pourcentage des armatures adhérentes $\rho_s = A_s/B$, 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.

Il s'exprime par la formule : $k_s = \frac{1}{1+20\rho_s}$

Le coefficient ε_0 dépend des conditions ambiantes et des dimensions de la pièce.

On prendra dans l'eau :

$$\varepsilon_0 = -60 \cdot 10^{-6}$$

et dans l'air :

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

où ρ_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 ε_r est donné par les valeurs forfaitaires suivantes :

En France :

- $1,5 \times 10^{-4}$ dans les climats humides,
- 2×10^{-4} en climat humide, ce qui est le cas en France, sauf en son quart Sud-Est,
- 3×10^{-4} en climat tempéré sec, comme dans le quart Sud-Est de la France,
- 4×10^{-4} en climat chaud et sec,
- 5×10^{-4} en climat très sec ou désertique.

En Algérie :

- 2×10^{-4} en climat humide Zone A de la carte de zonage climatique de l'Algérie
- 3×10^{-4} en climat tempéré sec Zone B
- 4×10^{-4} en climat chaud et sec Zones B', C, D1
- 5×10^{-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 σ_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 ;

ε_{ic} : déformation conventionnelle instantanée sous l'effet de la contrainte σ_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 σ_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 ε_{fl} sous la forme :

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

ε_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
- zéro en zones fissurées

1.6.4. Coefficient de dilatation thermique

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

NB : pour améliorer la mise en place du béton, ses caractéristiques ou sa durabilité, on peut être amené à ajouter des adjuvants en faible quantité lors de la confection du béton.

On utilise plus spécialement :

- ❖ les accélérateurs de prise
- ❖ les retardateurs de prise
- ❖ les accélérateurs de durcissement
- ❖ les entraîneurs d'air
- ❖ les plastifiants
- ❖ les hydrofuges de masse
- ❖ les antigels.

2. CARACTERISTIQUES MECANIQUES : 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

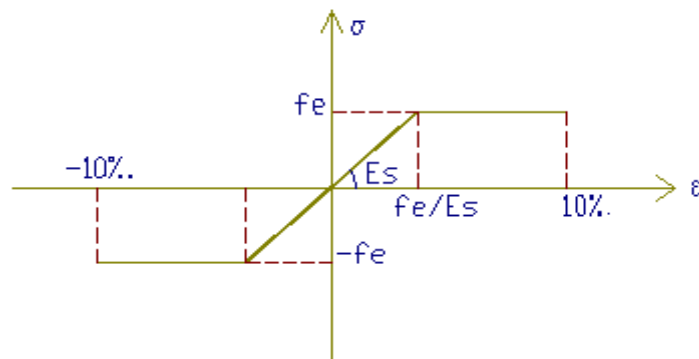
Le module de déformation longitudinale de l'acier E_S est pris égal à 200 000 MPa.

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.

| Type | Désignation | Limite d'élasticité |
|---|-----------------|---------------------|
| Ronds lisses | FeE215 | 215 |
| | FeE235 | 235 |
| Barres HA | FeE400 | 400 |
| | FeE500 | 500 |
| Fils tréfilés HA et Treillis soudés HA | FeTE500 TSHA | 500 |
| Treillis soudés lisses | TSL | 500 |

Tableau II.1**Diagramme Contraintes -Déformations****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 η et ψ .

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

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

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

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

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

2.2. 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.

2.2.1. Qualités requises

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

2.2.2 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 II.2

| | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <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 |

Tableau II.2

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 II.3.

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

Tableau II.3

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 II.4 fournit les valeurs correspondantes.

| 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 |

Tableau II.4**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}
- coefficient de relaxation ρ_{1000}

$\rho_{1000} = 2,5 \%$ pour la classe TBR (Très Basse Relaxation)

$\rho_{1000} = 8 \%$ pour la classe RN (Relaxation Normale)

- adhérence au béton ;
- coefficient de dilatation thermique 10^{-5} par degré C.
- module de déformation longitudinale :
 - $E_p = 200\,000 \text{ MPa}$ pour les fils et les barres
 - $E_p = 190\,000 \text{ MPa}$ pour les torons
- diagramme efforts-déformations.

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

Pour les fils tréfilés et les torons

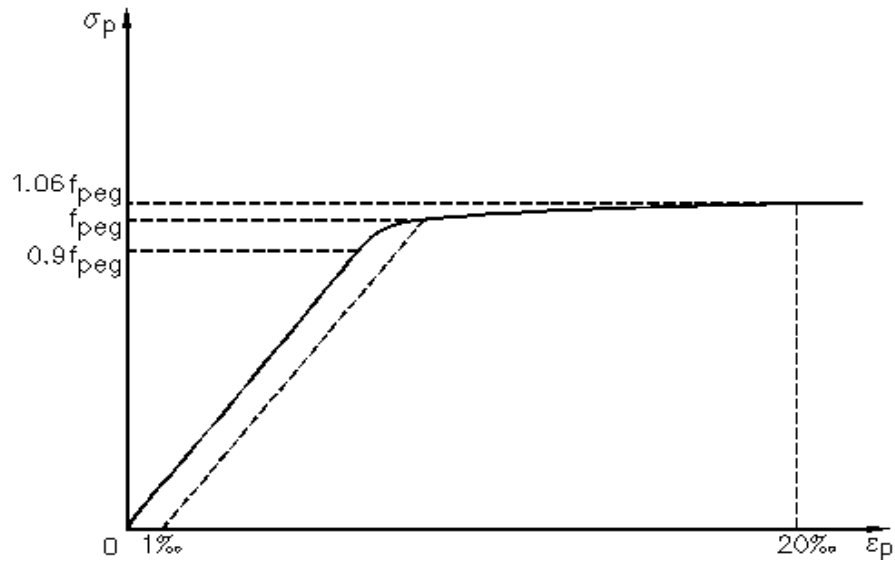


Figure II.4

Pour $\sigma_p \leq 0,9 f_{peg}$ $\epsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$

Pour $\sigma_p > 0,9 f_{peg}$ $\epsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left(\frac{\sigma_p}{f_{peg}} - 0,9 \right)^5$

Pour les fils trempés et revenus et pour les barres :

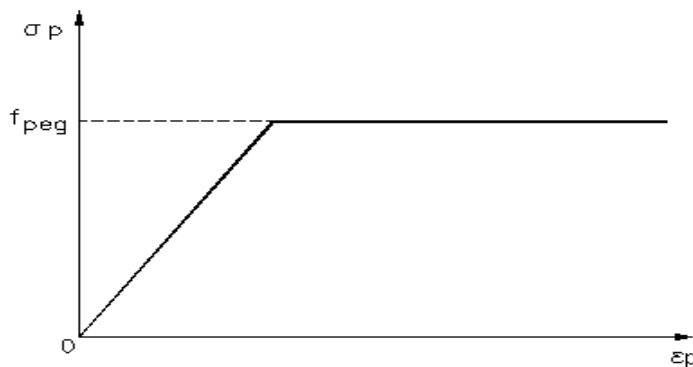


Figure II.5

pour: $\epsilon_p \leq \frac{f_{peg}}{E_p}$ $\sigma_p = E_p \epsilon_p$ 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.

3. APPLICATIONS

Application 1

Déterminer , pour un béton de $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$, les caractéristiques suivantes :

- La résistance à la compression au jour $j= 7$ et 90 jours
- La résistance à la traction au jour $j= 7$ et 90 jours
- Module de déformation longitudinal instantané au jour $j= 7$ et 90 jours
- Module de déformation longitudinal différé au jour $j= 7$ et 90 jours

Solution

- La résistance à la compression au jour $j= 7$ et 90 jours

$$j= 7 \text{ jours} : f_{c7} = \frac{j}{4,76+0,83 j} f_{c28} = 20.04 \text{ MPa}$$

$$j=90 \text{ jours} : f_{c90} = f_{c28} = 30 \text{ MPa}$$

- La résistance à la traction au jour $j= 7$ et 90 jours

$$j= 7 \text{ jours} : f_{t7} = 0.6 + 0.06 f_{c7} = 1.80 \text{ MPa}$$

$$j= 90 \text{ jours} : f_{t90} = f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28} = 2.4 \text{ MPa}$$

- Module de déformation longitudinal instantané au jour $j= 7$ et 90 jours

$$j= 7 \text{ jours} : E_{i7} = 11000 \sqrt[3]{f_{c7}} = 30056.3 \text{ MPa}$$

$$j= 90 \text{ jours} : E_{i90} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}} = 34179.6 \text{ MPa}$$

Application 2

Pour un béton $f_{c28} = 35 \text{ MPa}$:

- Déterminer la contrainte limite de compression ultime en situation courante et accidentelle.
- Déterminer la contrainte limite de compression en service
- Tracer le digramme contrainte – déformation du béton
- A défaut de données expérimentales probantes, dans le cas où on a besoin d'une évaluation plus précise des déformations, tracer le diagramme contrainte – déformation du béton.

Application 3

Pour un acier passif FeE400 :

- ❑ *Déterminer la contrainte limite ultime en situation courante et accidentelle.*
- ❑ *Déterminer la contrainte limite en service dans le cas d'une fissuration préjudiciable et très préjudiciable.*
- ❑ *Tracer le digramme contrainte – déformation de l'acier*

Application 4

Pour un acier actif $f_{peg}=1583\text{MPa}$:

- ❑ *Tracer le digramme contrainte – déformation de l'acier*

Application 5

Déterminer la déformation de retrait d'une poutre de section (0.30, 0.70)m mise en tension à $j=7$ jours dans les conditions suivantes :

- *Un climat humide Zone A*
- *Un climat tempéré sec Zone B*
- *Un climat chaud et sec zones B', C et D1.*
- *Un climat très sec ou désertique zones D2 et D3*

Note : *Voir le règlement algérien CBA93*