

# Caractéristiques des Matériaux

## 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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### 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 »:  $f_{c28}$  .

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  **$j < 28$  jours** et pour un béton non traité thermiquement :

$$\text{Si } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa : } f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} f_{c28}$$

$$\text{Si } f_{c28} > 40 \text{ MPa : } f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} f_{c28}$$

Pour  **$j \geq 28$  jours**, on admet pour les calculs que  $f_{cj} = f_{c28}$

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### 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>)



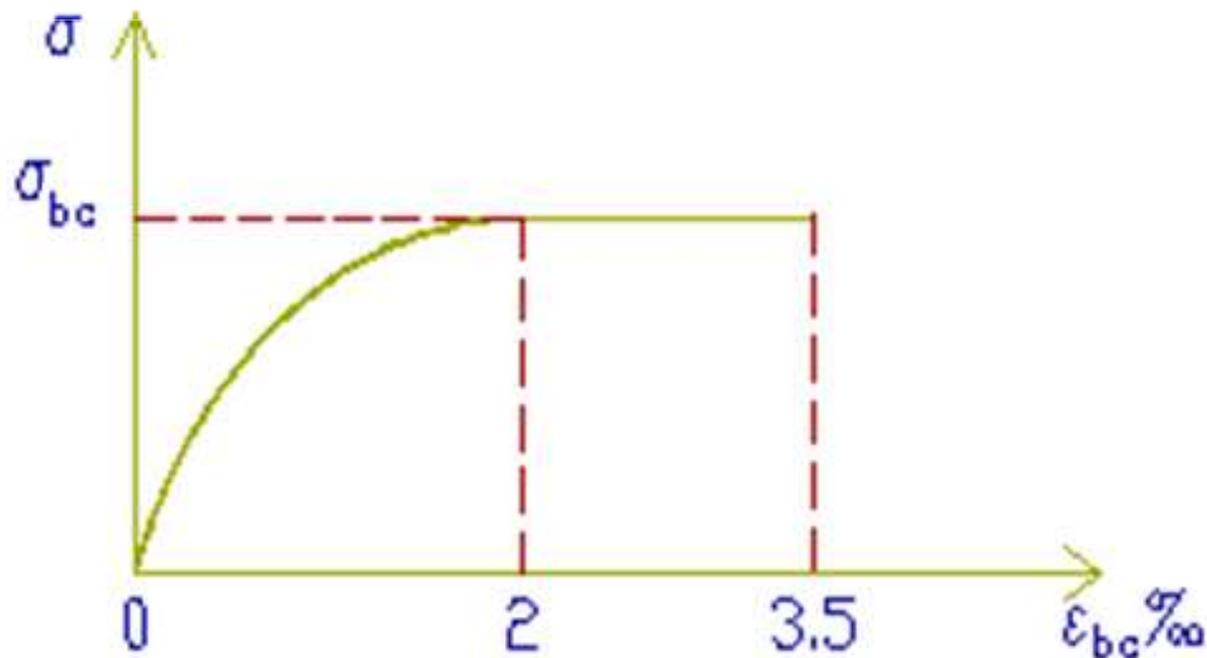
Il faut prévoir comme classe de résistance minimale du béton : C25/30 pour la post-tension et C30/37 pour la pré-tension.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Diagramme Contrainte - Déformation

Le diagramme caractéristique contrainte-déformation du béton a l'allure dite "parabole - rectangle":



# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Diagramme Contrainte - Déformation

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

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b}$$

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

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

# Caractéristiques des Matériaux

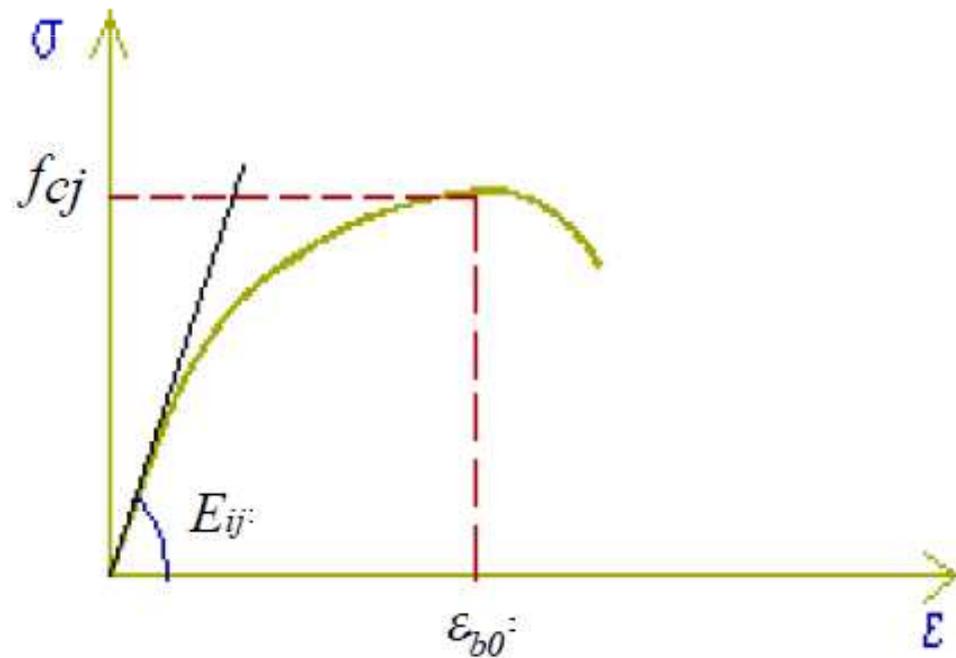
## BETON

### Diagramme Contrainte - Déformation

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:

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

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



# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### 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.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Retrait

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.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

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

## Déformations différées

### Retrait

La loi d'évolution du retrait est donnée par:

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

$t$  : 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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Retrait

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

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

$$\varepsilon_r = k_s \cdot \varepsilon_0$$

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

Il s'exprime par la formule :

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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

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

### Déformations différées

#### Retrait

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

On prendra dans l'eau :

$$\varepsilon_0 = - 60.10^{-6}$$

et dans l'air :

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

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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

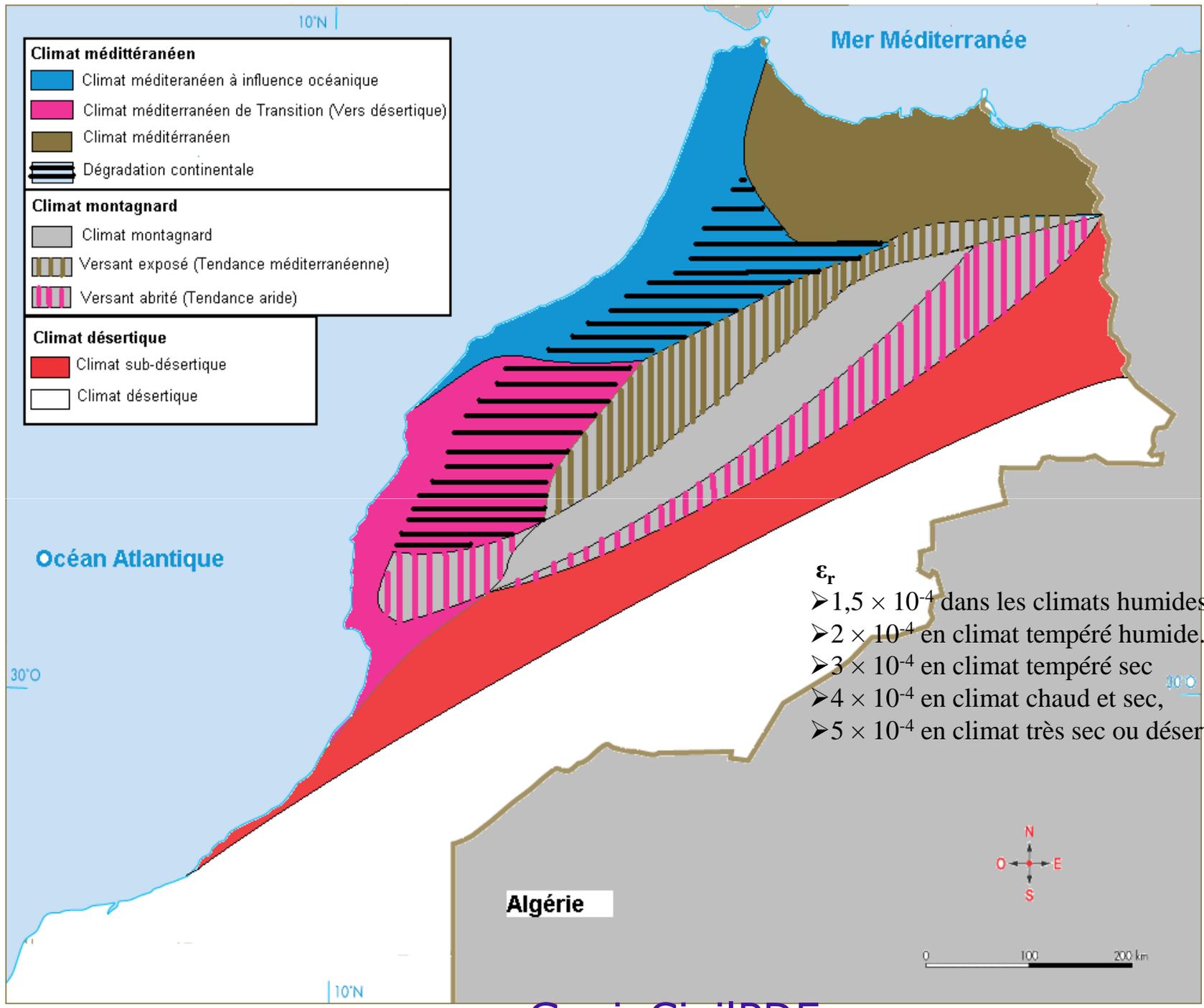
$$\varepsilon_r(t_1, t) = \varepsilon_r[r(t) - r(t_1)]$$

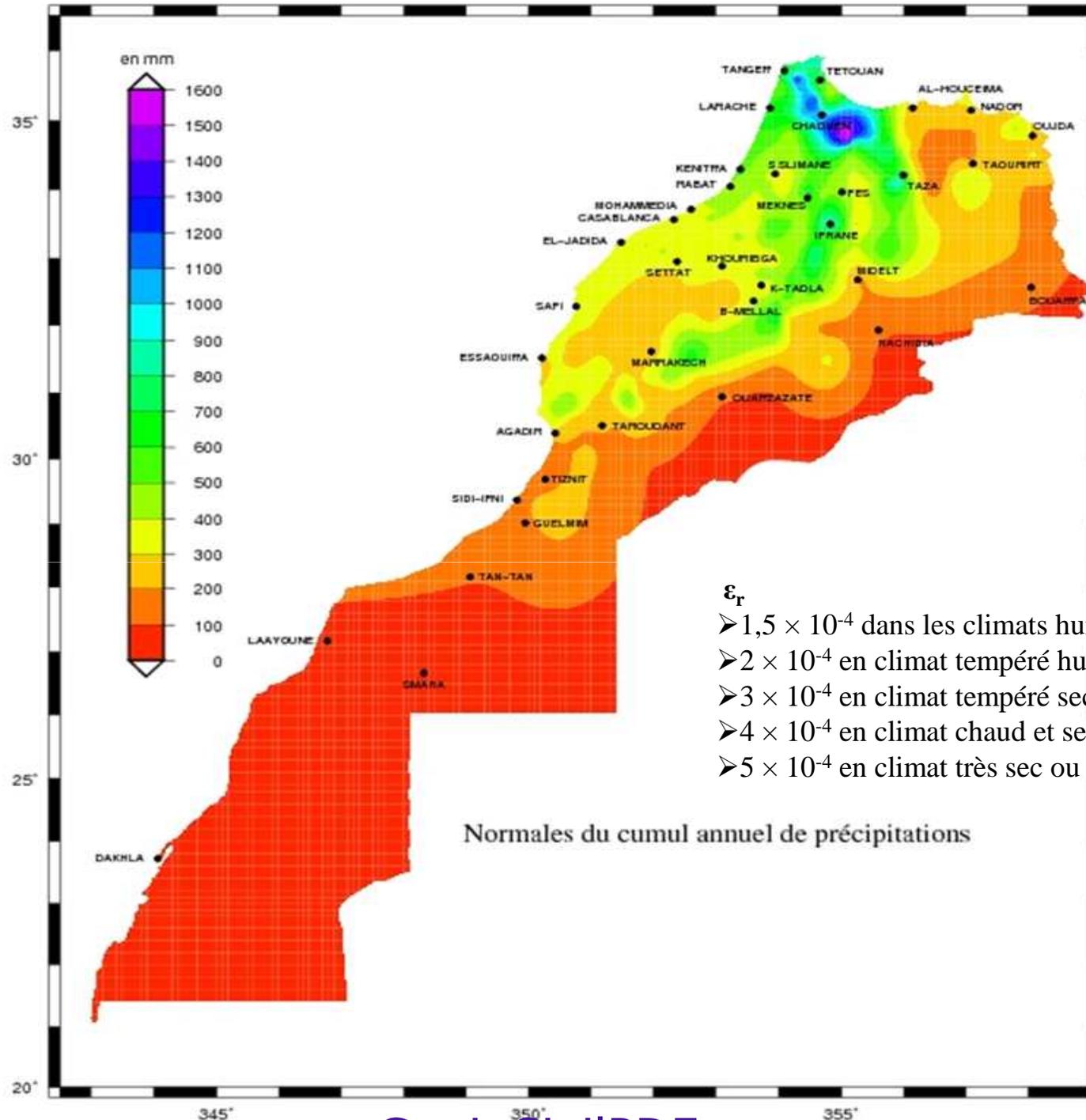
### Déformations différées

#### Retrait

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

- $1,5 \times 10^{-4}$  dans les climats humides,
- $2 \times 10^{-4}$  en climat tempéré humide.
- $3 \times 10^{-4}$  en climat tempéré sec
- $4 \times 10^{-4}$  en climat chaud et sec,
- $5 \times 10^{-4}$  en climat très sec ou désertique.





$\varepsilon_r$

- $1,5 \times 10^{-4}$  dans les climats humides,
- $2 \times 10^{-4}$  en climat tempéré humide.
- $3 \times 10^{-4}$  en climat tempéré sec
- $4 \times 10^{-4}$  en climat chaud et sec,
- $5 \times 10^{-4}$  en climat très sec ou désertique.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Le 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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Le fluage

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 :

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

➤  $t_0$  : date du bétonnage,

➤  $t_1$  : date de mise en charge ;

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

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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Le fluage

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

- $K_{fl}$  : 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.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Le fluage

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 :  $\varepsilon_i = \sigma_1 / E_{ij}$  ;
- $\Phi = K_{fl} \cdot E_{ij} / E_{i28}$  (le rapport entre la déformation finale du fluage et la déformation réelle instantanée).

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Le fluage

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

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**.

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

### Coefficient de poisson

Le coefficient de poisson du béton est pris égal à :

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

# Caractéristiques des Matériaux

## BETON

### Déformations différées

#### Coefficient de dilatation thermique

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

En outre 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 et retardateurs de prise, les accélérateurs de durcissement, les entraîneurs d'air, les plastifiants, les hydrofuges de masse, les antigels....

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### 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.

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### 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.

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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures passives

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

- Section nominale de l'armature.
- Module de déformation longitudinale  $E_s$  (pris généralement égal à 200 000 MPa).
- Limite d'élasticité garantie notée  $f_e$ .

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures passives

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

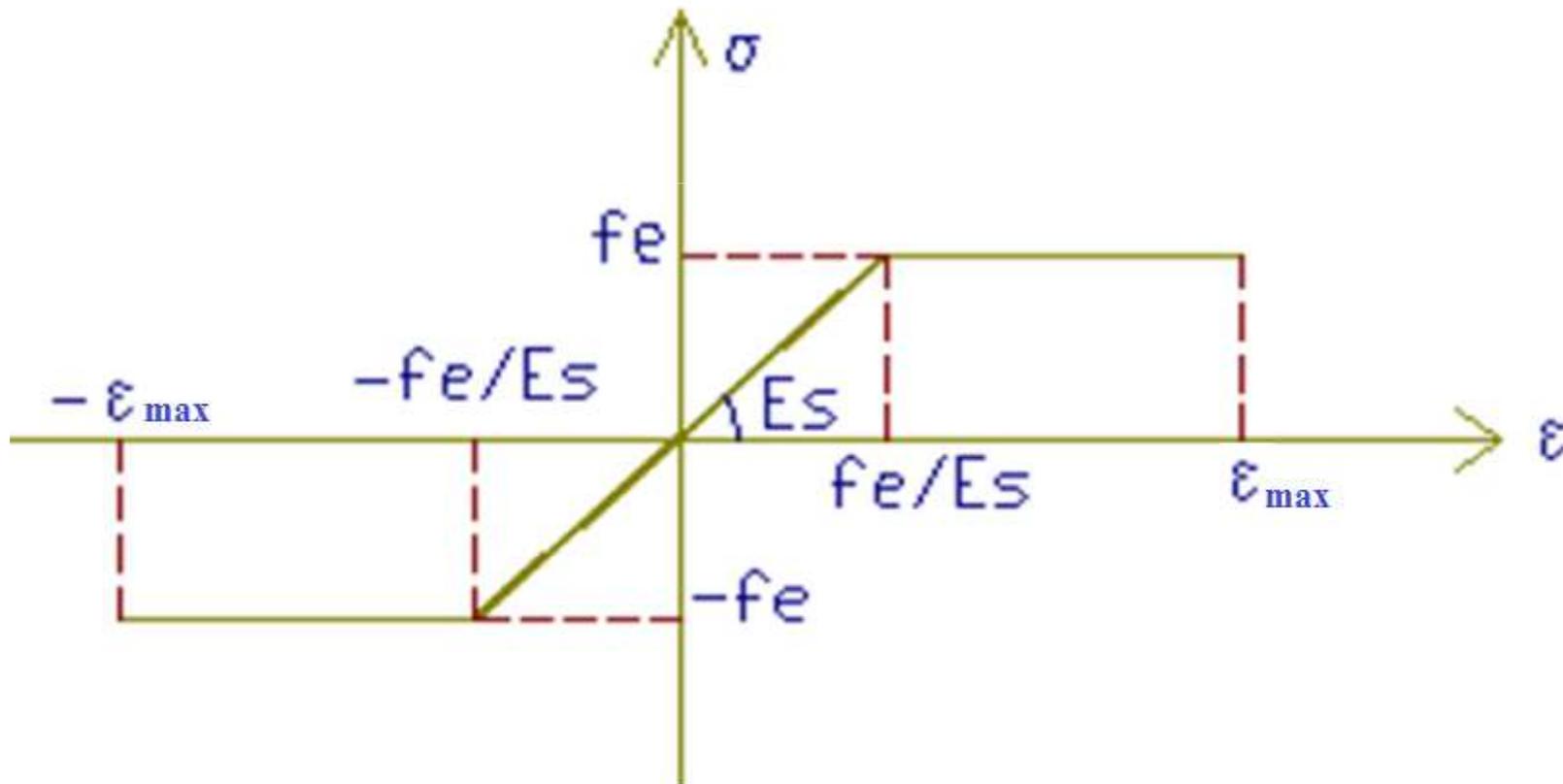
<i>Type</i>	<i>Désignation</i>	<i>Limite d'élasticité</i>
<i>Ronds lisses</i>	<i>FeE215</i>	<i>215</i>
	<i>FeE235</i>	<i>235</i>
<i>Barres HA</i>	<i>FeE400</i>	<i>400</i>
	<i>FeE500</i>	<i>500</i>
<i>Fils tréfilés HA et</i>	<i>FeTE500</i>	<i>500</i>
<i>Treillis soudés HA</i>	<i>TSHA</i>	
<i>Treillis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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures passives

#### Diagramme Contraintes -Déformations



# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures passives

#### 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
- $\psi = 1.5$  barres HA ou de fils HA

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### 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 classées par :

- catégorie : fils, barres, torons.
- classe de résistance.

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### Qualités requises

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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### 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,
- les fils autres que ronds et lisses.

Les fils sont définis par leur diamètre nominal auquel correspond une section nominale conventionnelle :

<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

Diamètre en mm et section en mm<sup>2</sup>

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### Les barres

Les barres sont définies comme des armatures rondes et lisses de diamètre supérieur à 12.5 mm, 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 suivant:

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

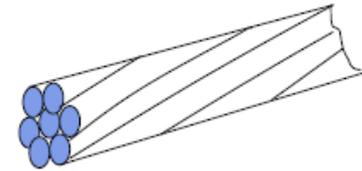
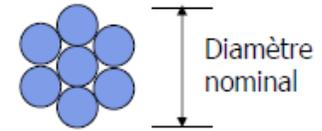
Diamètre en mm et section en mm<sup>2</sup>

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

### Les torons



Toron standard à 7 fils

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 suivant 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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### Caractères de calcul

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

- la section nominale de l'armature ;
- la contrainte maximale garantie à rupture  $f_{prg}$  (obtenue pour  $\varepsilon_{pmax} = 20 \text{ ‰}$ )
- la contrainte à la limite conventionnelle d'élasticité  $f_{peg}$   
(obtenue pour  $\varepsilon_p = 1 \text{ ‰}$ )

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### Caractères de calcul

➤ le 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)

➤ 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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

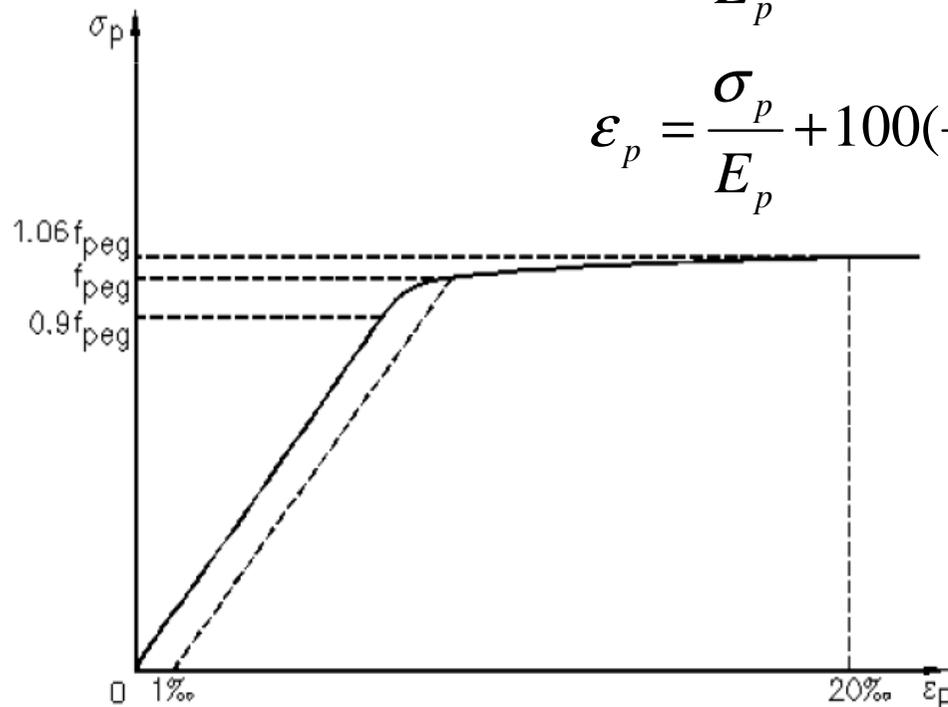
### Armatures actives

#### diagramme efforts-déformations

Pour les fils tréfilés et les torons:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}, \quad \text{pour } \sigma_p \leq 0,9 f_{peg}$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left( \frac{\sigma_p}{f_{peg}} - 0,9 \right)^5, \quad \text{pour } \sigma_p > 0,9 f_{peg}$$



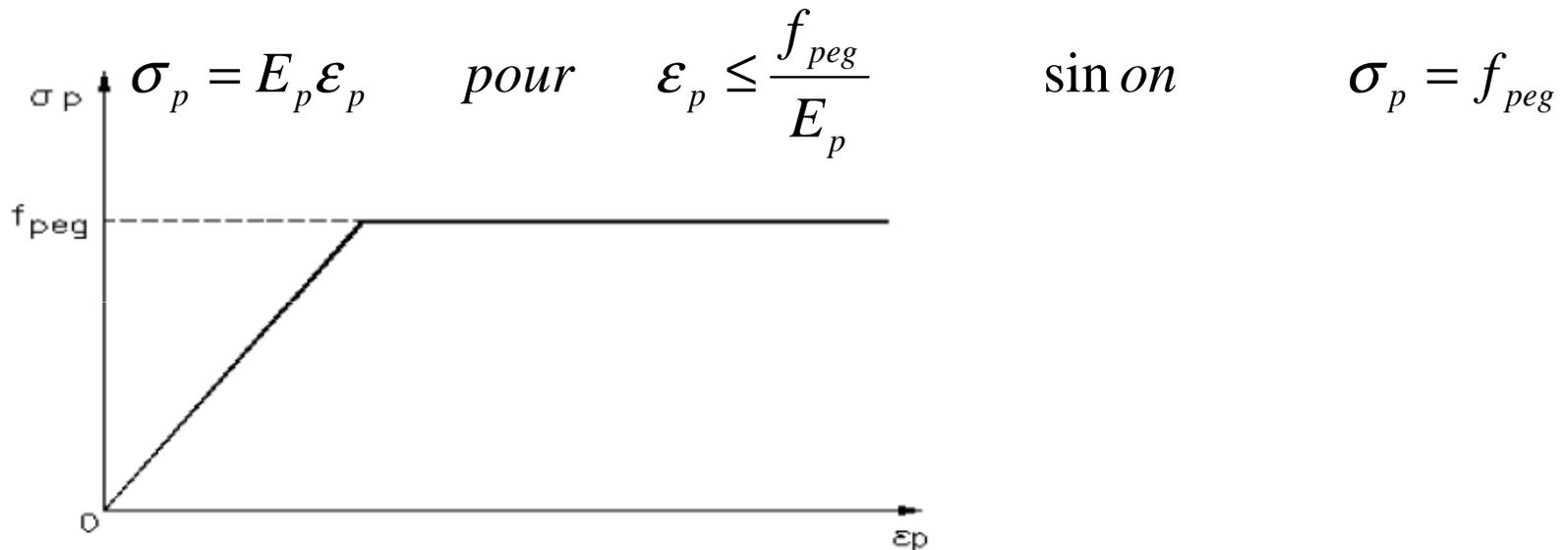
# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

#### *diagramme efforts-déformations*

*Pour les fils trempés et revenus et pour les barres:*



La **trempe** ou **trempage** est un traitement thermique consistant en un refroidissement rapide d'un matériau pour obtenir des propriétés mécaniques particulières, La trempe peut être suivie d'un revenu, qui est un réchauffement de la pièce. Elle permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques définitives de la pièce soit en les augmentant, soit en les diminuant et d'obtenir un alliage moins fragile

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

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Armatures actives

### Longueur de scellement

La longueur de scellement en béton précontraint, désignée par  $l_{cs}$ , nécessaire au transfert de la précontrainte depuis l'armature au béton est estimée par:

$$l_{cs} = \begin{cases} 100\Phi, & \text{si fils (autres que ronds et lisses)} \\ & \text{et torons à 3 fils} \\ 75\Phi, & \text{si torons à 7 fils} \end{cases}$$

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Tension d'une armature de précontrainte

Les structures en béton précontraint, contrairement aux structures en acier ou en béton armé, possèdent la propriété de variation des contraintes dans le temps (effets différés).

En **post-tension**, la précontrainte varie en fonction de l'abscisse du fait du **frottement** à la mise en tension et **dans le temps** à cause du retrait, du fluage du béton et de la relaxation de l'acier.

En **pré-tension**, la précontrainte varie essentiellement **dans le temps**.

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Tension d'une armature de précontrainte

La perte de précontrainte  $\Delta\sigma_p(t, t_0)$  est la différence entre la valeur initiale (à la mise en tension) de la contrainte dans l'armature et la contrainte en un point donné de cette armature et à un instant donné:

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \sigma_p(t_0) - \sigma_p(t)$$

Les pertes de précontrainte constituent un inconvénient des structures en béton précontraint, elles engendrent une baisse du rendement de l'acier et peuvent conduire à une aggravation de l'état de sollicitation du béton.

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Tension d'une armature de précontrainte

Le fait d'admettre des pertes de précontrainte impose d'admettre à la mise en tension des contraintes très élevées du béton. D'où tout l'intérêt d'estimer le plus exactement possible la valeur de ces pertes. On retiendra, enfin, que la contrainte finale du béton s'exprime par la différence:

$$\sigma_c = \sigma(G+Q) - \sigma_p$$

avec :

$\sigma(G+Q)$  = contrainte due aux charges permanentes et aux surcharges

$\sigma_p$  = contrainte engendrée par l'effort de précontrainte.

# Caractéristiques des Matériaux

## ACIER

### Tension d'une armature de précontrainte

La tension à l'origine dépend du mode de précontrainte utilisée.

➤ Cas de la post-tension:

$$\pm \sigma_{p0} = \min (0,80 f_{prg}; 0,90 f_{peg}) \text{ si fils ou torons}$$

$$\pm \sigma_{p0} = \min (0,70 f_{prg}; 0,90 f_{peg}) \text{ si barres}$$

➤ Cas de la pré-tension:

$$\pm \sigma_{p0} = \min (0,85 f_{prg}; 0,95 f_{peg})$$

avec:

$f_{prg}$  : contrainte de rupture garantie de l'armature de précontrainte;

$f_{peg}$  : contrainte à la limite conventionnelle d'élasticité.

$\sigma_{p0}$  : Valeur maximale de la tension à l'origine.

# Sections fléchies et E.L.S.

## Introduction

Sur le plan théorique, les vérifications doivent se faire aux deux états limites, ultime et de service.

Mais de point de vue pratique, ce sont les vérifications aux états limites de service qui déterminent le dimensionnement des ouvrages alors que la vérification aux états limites ultimes est utilisée à postériori.

Les vérifications à l'E.L.S. concernent:

- Le respect des limites des contraintes,
- Le respect des limites d'ouverture de fissure,
- Le respect des dispositions constructives.

# Sections fléchies et E.L.S.

## Introduction

En BPEL, les vérifications doivent être menées :

- À vide, c'est-à-dire sous l'effet de l'ensemble des charges permanentes et de la précontrainte.
- En charge, il s'agit alors de considérer, en plus des charges permanentes et de la précontrainte, l'effet des charges variables.

## Sections fléchies et E.L.S.

### Introduction

En BPEL on considère trois classes de vérification:

- ❖ Classe I: le béton est comprimé en permanence, et les contraintes de traction du béton ne sont pas admises.
- ❖ Classe II: les contraintes de traction sont admises dans le béton, mais pas la formation des fissures (c'est-à-dire que ces contraintes de traction ne doivent pas excéder la contrainte de traction du béton  $f_{t28}$ )
- ❖ Classe III: l'ouverture des fissures est admise sous les sollicitations externes, mais ces fissures doivent se refermer sous les charges de longue durée d'application. Dans ce cas, ce ne sont pas les contraintes de traction dans le béton qui sont limitées, mais plutôt les tensions dans les armatures passives et les variations de tension dans les armatures actives (si elles dépassent les limites, les fissures ne peuvent plus se refermer).