

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/mm²)



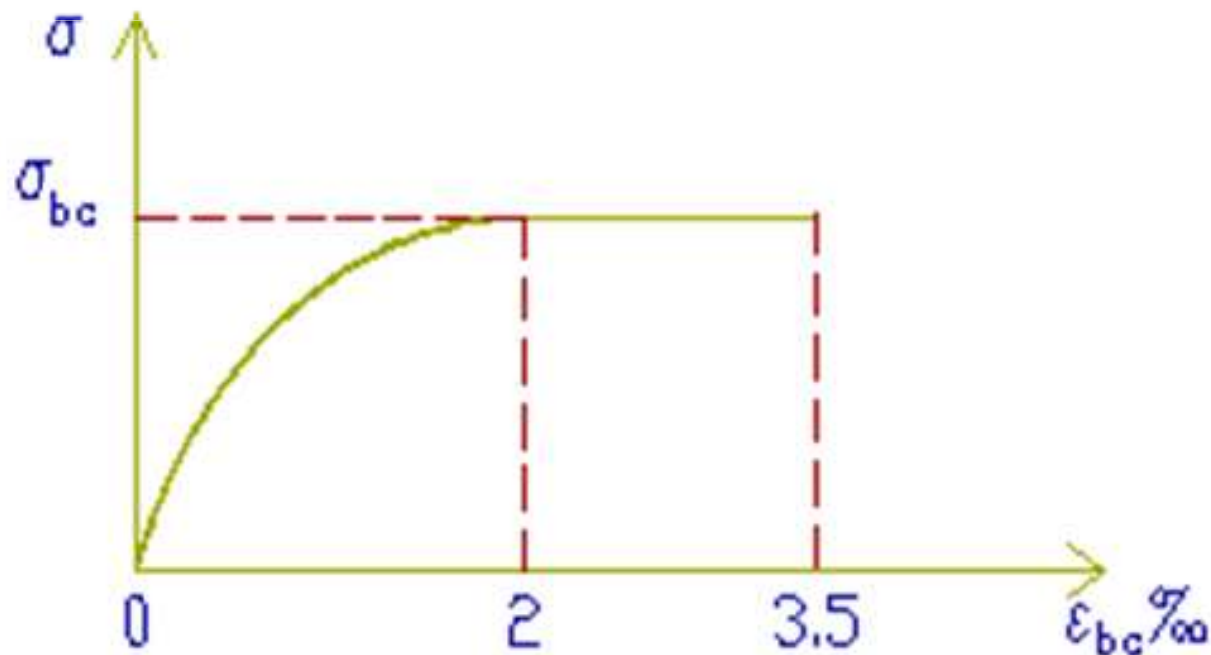
Il faut prévoir comme classe de résistance minimale du béton : C25/30 pour la post-tension et C30/37 pour la pré-tension.

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 θ 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

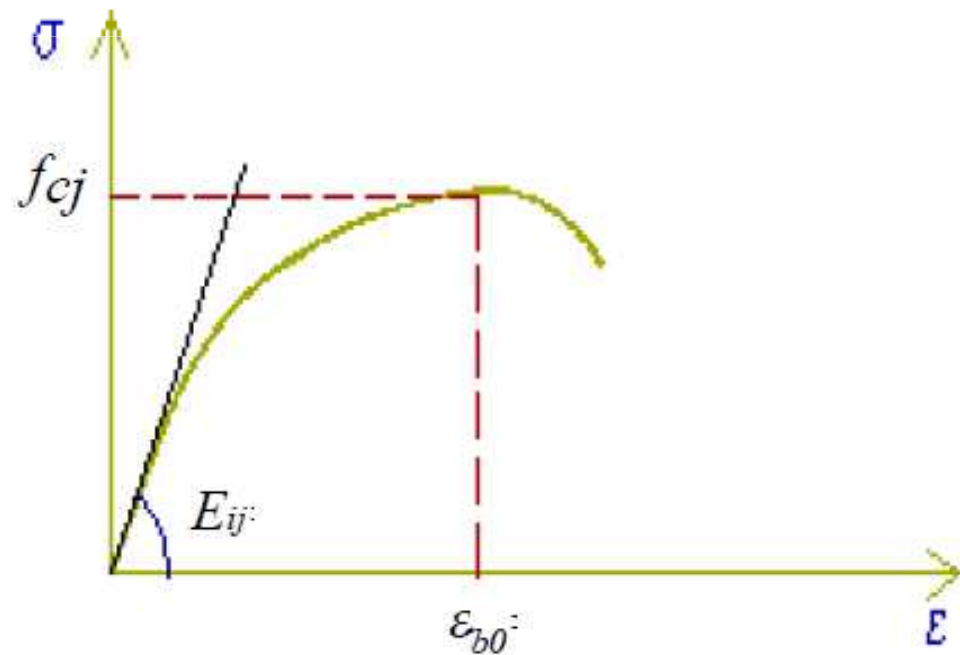
BETON

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 :

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.

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 ε_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 ρ_h est l'hygrométrie ambiante moyenne, exprimée en pourcentage d'humidité relative.

Caractéristiques des Matériaux

BETON

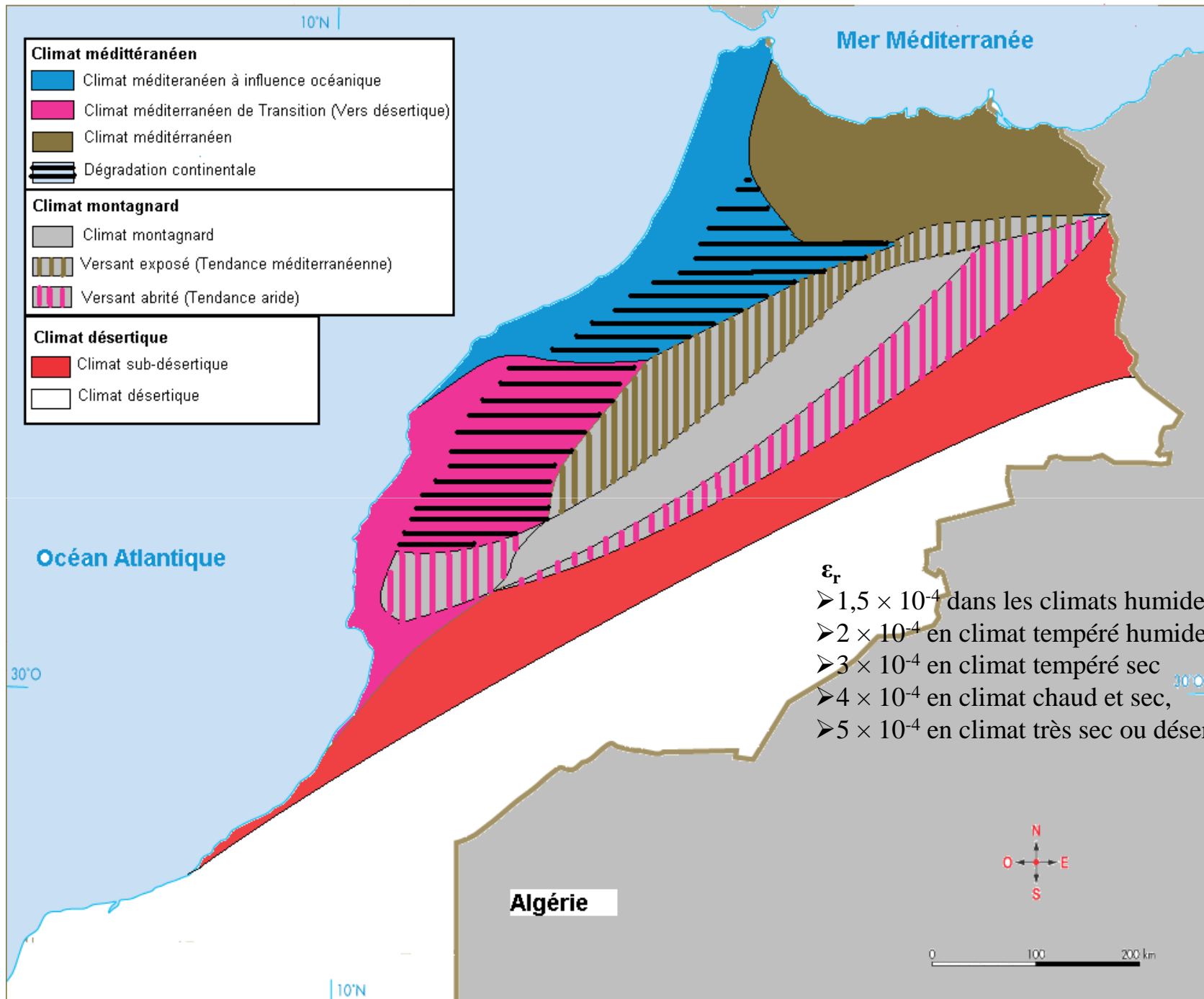
$$\varepsilon_r(t_1, t) = \varepsilon_r[r(t) - r(t_1)]$$

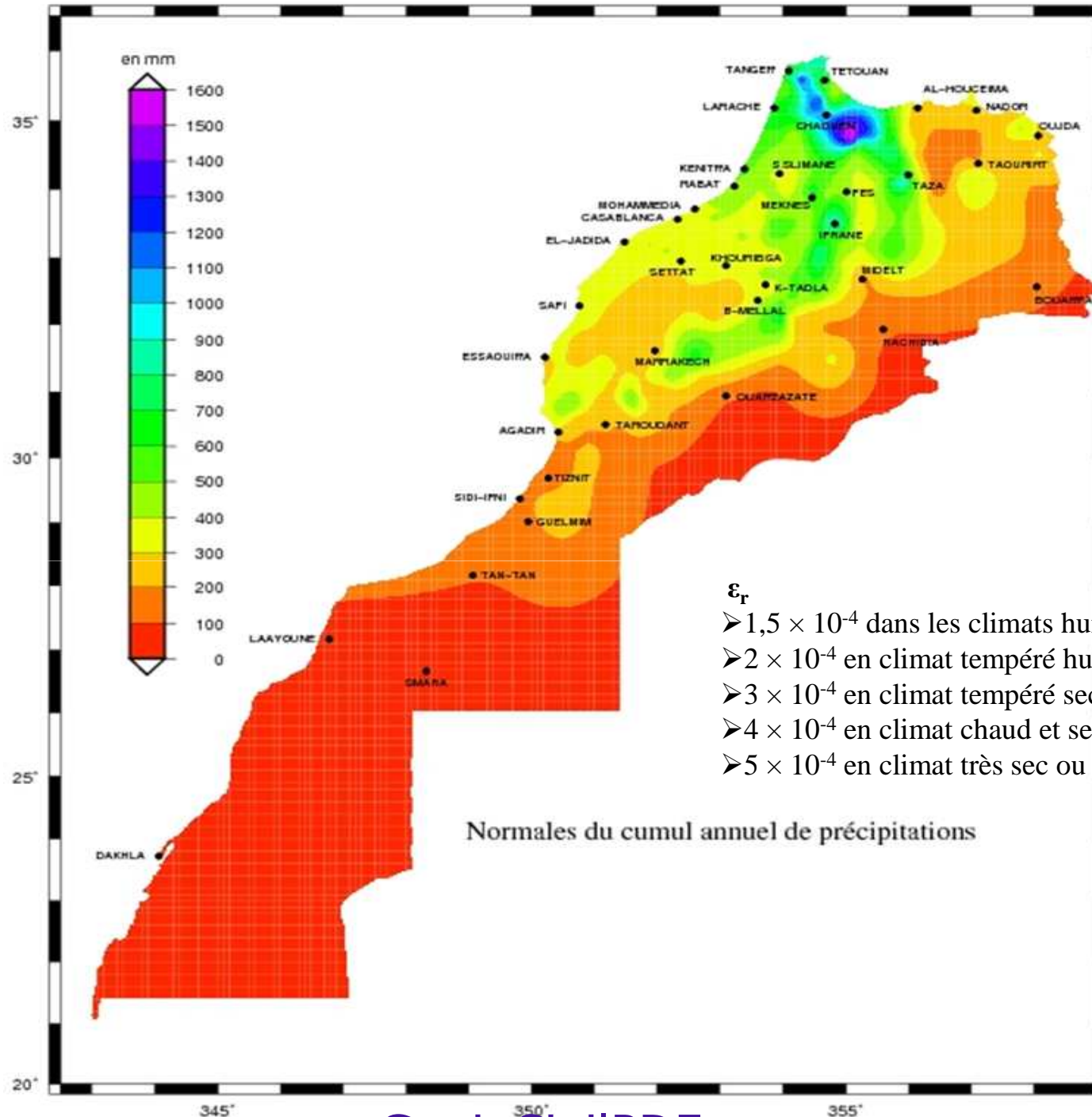
Déformations différées

Retrait

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

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





ε_r

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

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

Caractéristiques des Matériaux

BETON

Déformations différées

Le fluage

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 : $\varepsilon_i = \sigma_1 / E_{ij}$;

➤ $\Phi = K_{fl} \cdot E_{ij} / E_{i28}$ (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.

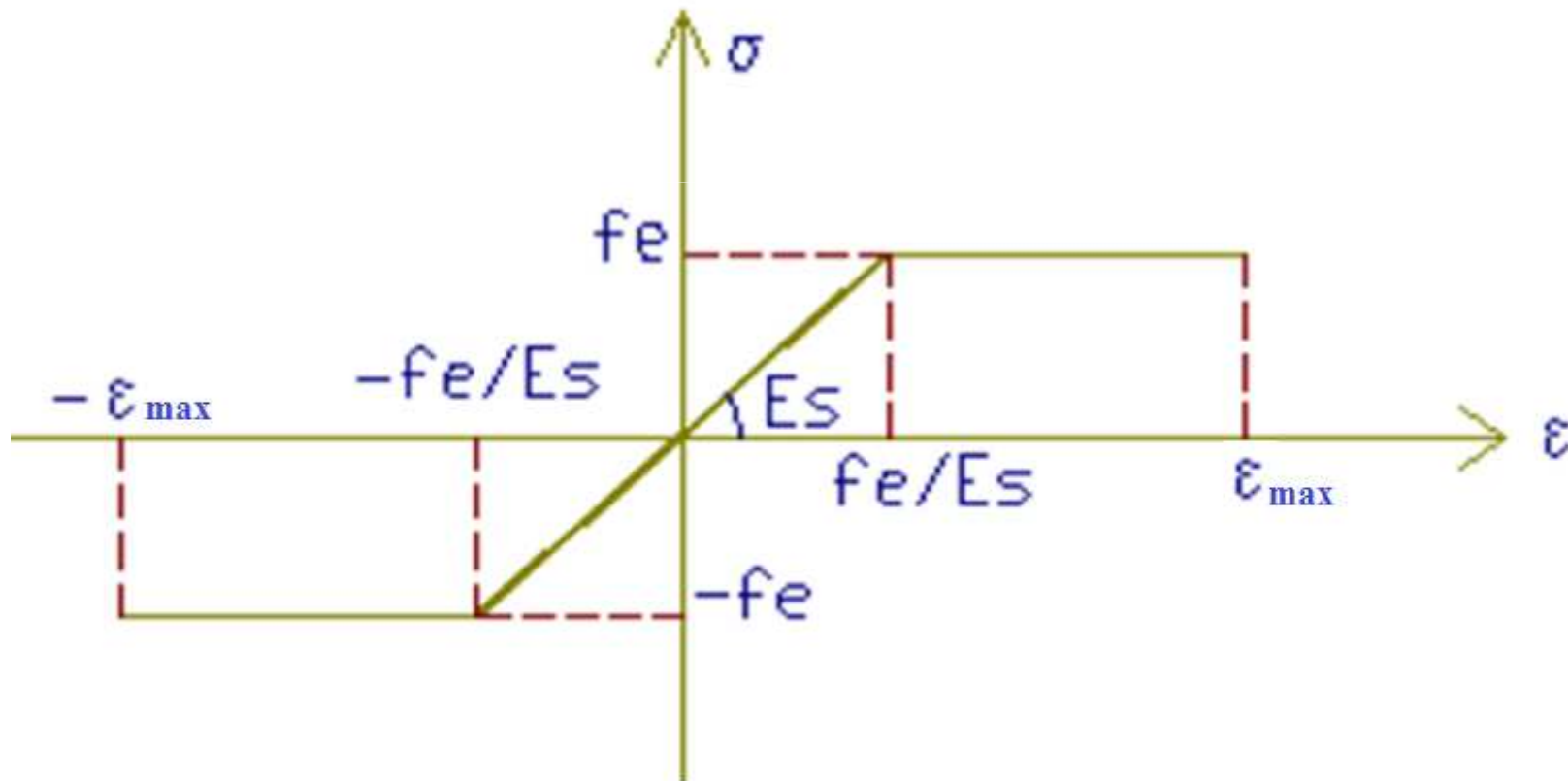
<i>Type</i>	<i>Désignation</i>	<i>Limite d'élasticité</i>
<i>Ronds lisses</i>	<i>FeE215</i>	<i>215</i>
	<i>FeE235</i>	<i>235</i>
<i>Barres HA</i>	<i>FeE400</i>	<i>400</i>
	<i>FeE500</i>	<i>500</i>
<i>Fils tréfilés HA et</i>	<i>FeTE500</i>	<i>500</i>
<i>Treillis soudés HA</i>	<i>TSHA</i>	
<i>Treillis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

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 mm²

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>

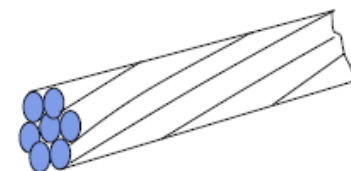
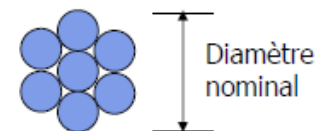
Diamètre en mm et section en mm²

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 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 :

$E_p = 200\,000$ MPa pour les fils et les barres

$E_p = 190\,000$ MPa pour les torons

Caractéristiques des Matériaux

ACIER

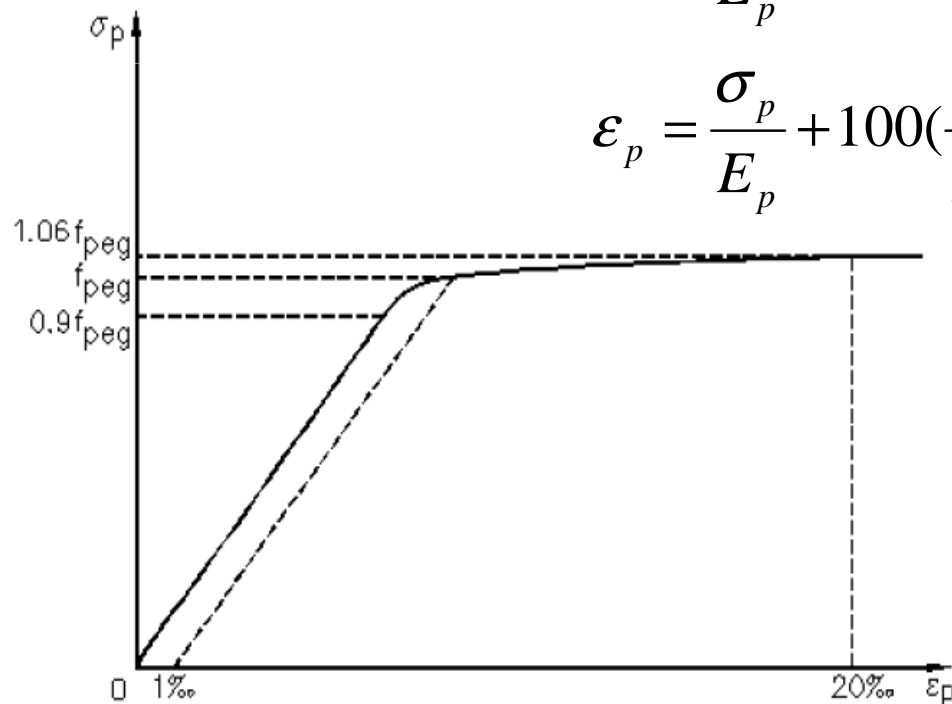
Armatures actives

diagramme efforts-déformations

Pour les fils tréfilés et les torons:

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

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



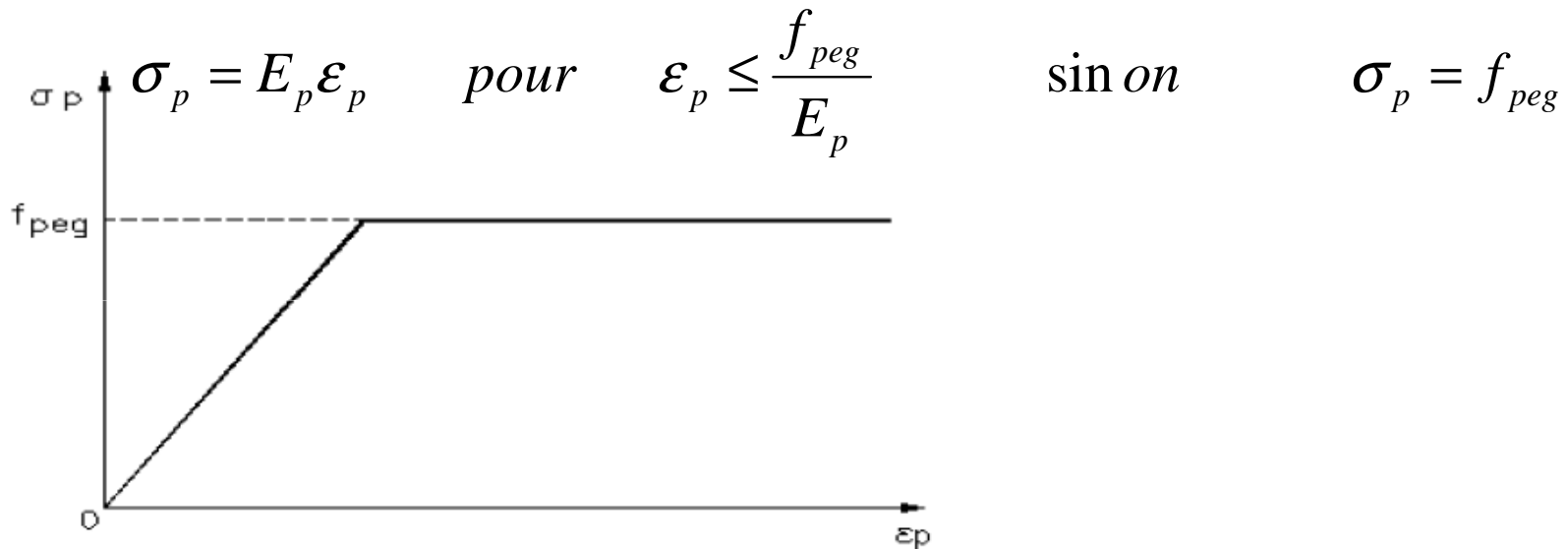
Caractéristiques des Matériaux

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

σ_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.

σ_{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).