

Chapitre 2 : Caractéristiques Des Matériaux

I. Introduction

Le béton est un matériau hétérogène composé d'un mélange de liant (ciment), granulats, eau et éventuellement d'adjuvants. A l'état durci, le béton est caractérisé par sa forte résistance à la compression et sa faible résistance à la traction. Le béton armé fait l'association du béton avec des armatures en acier de haute adhérence. Pour former des éléments de différentes formes, qui résistent aussi bien à la traction qu'à la compression. Dans les structures en béton précontraint, on utilise en plus de ces deux matériaux (béton et armatures) des aciers (câbles) de précontrainte.

Le béton précontraint exige l'emploi de matériaux de haute qualité, mis en œuvre avec soin. Il permet de les utiliser sous des contraintes élevées, notamment à la construction (c'est-à-dire au moment de la mise en tension des câbles). L'acier des câbles de précontrainte doit être de haute résistance, pour pouvoir être tendu à un taux initial très élevé (couramment compris entre 1 200 et 1 500 MPa, sauf pour les barres). Cette tension initiale n'est pas très éloignée de la contrainte de rupture, elle n'est pas dangereuse, car elle diminue progressivement par suite des pertes de précontrainte. Par ailleurs, la tension utile finale est d'autant plus élevée que l'est la tension initiale d'avantage et donc la résistance de l'acier. Le béton doit lui aussi, être de qualité exceptionnelle, car tant qu'il n'est pas précontraint, il risque de se fissurer sous l'effet de son propre retrait dès le décoffrage. D'où il faut le mettre en précontrainte très tôt à jeune âge particulièrement qu'il présente une résistance limitée.

II. Béton

Le béton précontraint exige une connaissance du matériau du béton plus approfondie que celle requise en béton armé. En effet, étant donné que la précontrainte est une sollicitation permanente de grande intensité, il est essentiel de considérer non seulement les propriétés fondamentales du béton comme la résistance caractéristique à la compression. Mais aussi certaines propriétés dont les effets ne sont pas instantanés, mais apparaissent avec le temps.

En béton précontraint on désire des bétons qui présentent une grande résistance, parfois à très court terme, et qui ont un retrait et un fluage réduits aussi que possible. Certaines exigences telles que maniabilité et grande résistance sont parfois en conflit. En effet, les grandes résistances sont obtenues avec des faibles rapports E/C ; or ces mélanges ont moins de maniabilité. Toutefois, grâce à une technologie avancée, il est possible de fabriquer des bétons ayant un rapport E/C aussi faible que 0,25 tout en ayant une maniabilité suffisante surtout avec l'utilisation d'un super-plastifiant.

Un béton ayant le comportement recherché n'est pas le fruit du hasard. Pour déterminer le dosage le plus efficace, il faut généralement fabriquer des mélanges pour des essais, surtout si on ne dispose pas de résultats préalables. Les dosages en ciment utilisés pour les bétons de précontrainte se situent entre 350 et 450 kg/m³ et les rapports E/C entre 0,30 et 0,45. Selon la résistance, les classes de l'Eurocode varient entre un béton C12-15 (non utilisé en béton précontraint) à C50-60. Au-delà de ces résistances, le béton est associé aux BHP (béton à

haute performance). À titre d'exemple, un béton C40-50 possède une résistance caractéristique de 40 MPa. En béton précontraint, la résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours varie entre 30, 35, 40 MPa, et jusqu'à 45 MPa pour les pieux préfabriqués.

II.1 Mise En Œuvre Du Béton

La mise en œuvre du béton intervient de façon importante dans ses qualités attendues, telle que : la résistance mécanique, la compacité, la porosité et la perméabilité. Cette mise en place est favorisée par :

- Une bonne vibration.
- Une granulométrie continue.
- L'utilisation des adjuvants (fluidifiant, plastifiant, etc.).

Inversement, la mise en œuvre est gênée par :

- Une densité importante de ferrailage, surtout en cas de faible distance entre les aciers.
- Les basses/haute températures.
- Les importantes épaisseurs de coulage.

Il est recommandé, lors du coulage d'un béton de ne pas le laisser tomber d'une hauteur importante (plus d'un mètre) sans prendre des précautions spéciales, pour éviter la ségrégation du béton qui nuirait à sa compacité et résistance.

II.2 Caractéristiques Mécaniques Du Béton

II.2.1 Résistances Caractéristiques À La Compression

Un béton est défini par la valeur des résistances à la compression à l'âge de 28 jours f_{c28} exprimée en MPa. Pour un nombre de jours $j < 28$, la résistance des bétons suit les lois données par les règles de BAEL et BPEL (Béton Armé/Béton Précontraint aux Etats Limites) :

Bétons de résistance courante :
$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \quad \text{Pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa.} \quad (\text{II-1}).$$

Bétons de haute résistance :
$$f_{cj} = \frac{j}{1.4+0.95j} f_{c28} \quad \text{Pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa.} \quad (\text{II-2}).$$

Pour $j \geq 28$
$$f_{cj} = 1,1 f_{c28} \quad (\text{II-3}).$$

II.2.2 Résistances Caractéristiques À La Traction

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

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \quad (\text{II-4}).$$

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

Cette formule est valable jusqu'à des valeurs de $f_{cj} < 60$ MPa. Ce pendant, cette loi linéaire pourrait conduire à surestimer la résistance à la traction des bétons dont la résistance en compression est > 80 MPa. La loi serait plus adaptée est donnée par : $f_{tj} = f_{cj}^{2/3}$ (II-5).

Remarque: la résistance mécanique du béton est influencée par plusieurs facteurs, tels que:

- La qualité et le dosage du ciment.
- La teneur en eau.

- L'âge du béton
- La température et l'humidité
- La durée de déchargement

II.2.3 Module De Déformation Longitudinale

À défaut de résultats expérimentaux probants, on adopte pour :

Le module de déformation longitudinale instantanée du béton est égal à :

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3} (MPa) \quad (II - 6).$$

Le module de déformation longitudinale différée est donné par:

$$E_{vj} = 3700 f_{cj}^{1/3} (MPa) \quad (II - 7).$$

II.2.4 Diagramme Contraintes – Déformations (σ - ϵ)

Le diagramme conventionnel utilisé dans les calculs relatifs à l'état limite pour le béton est appelé (Parabole - Rectangle). C'est une représentation de la variation de la contrainte du béton en fonction de son raccourcissement. On distingue :

1 : zone élastique

2 : zone plastique

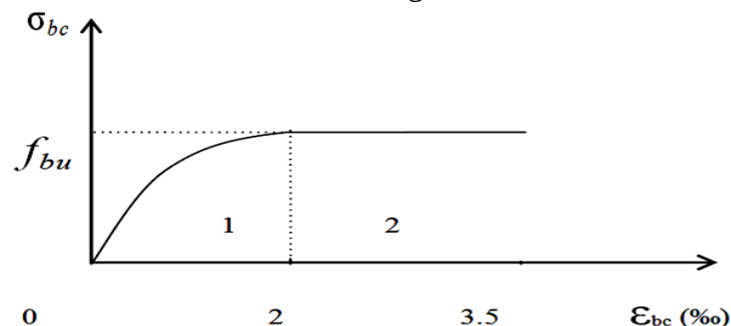


Fig II.1: Diagramme (σ - ϵ) Contraintes – Déformations du béton

f_{bc} : est la résistance de calcul du béton, qui vaut : $f_{bc} = 0.85 \frac{f_{cj}}{\theta \cdot \gamma_b}$ (II - 8).

Avec: Coefficient de sécurité égale à 1,5 (cas courant) et 1,15 (cas accidentel).

Coefficient dépendant de la durée d'application de la charge t (temps). Et:

- $\theta = 1$ si $t > 24h$
- $\theta = 0.9$ si $1h \leq t \leq 24h$
- $\theta = 0.85$ si $t < 1h$

II.2.5 Coefficient De Poisson

Si ϵ_L est la déformation relative longitudinale et ϵ_T est la déformation relative transversale, le coefficient de poisson vaut:

$$\nu = \frac{\Delta T/T}{\Delta L/L} = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_L} \quad (II - 9).$$

$\Delta T, \Delta L$: Différences entre les allongements $T_f - T_0$ et $L_f - L_0$ aux sens transversale et longitudinale.

T, L : Longueurs aux sens transversale et longitudinale des éprouvettes testées.

Et est pris égal à:

- $\nu = 0$: Pour le calcul des sollicitations ultimes (béton fissuré).
- $\nu = 0.2$: Pour le calcul des déformations (béton non fissuré).

II.2.6 Coefficient De Dilatation Thermique

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

II.3 Qualités Requises Du Béton Destiné À La Confection Du B.P

- **Une résistance élevée à la compression** ; elle conditionne la grandeur de la force de précontrainte et le comportement du béton sous l'action des charges qu'il supporte.
- **Un 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 due au raccourcissement des câbles. Pour réduire cette perte de tension dans l'armature tendue, le béton doit avoir des déformations très petites.
- **Une faible sensibilité aux effets des déformations différées** ; la force de précontrainte est réduite dans le temps grâce aux déformations différées du béton. Une bonne formulation s'impose, surtout pour le rapport E/C.
- **Une bonne maniabilité** ; dans le but de permettre le remplissage correct de toutes les parties des moules et surtout les zones à ferrailage très dense.
- **Une grande compacité** ; ce qui permet de réduire sa porosité et sa perméabilité. En effet, le béton est le matériau principal de protection des câbles contre la corrosion surtout dans le cas de pré-tension.
- **Étanche et sans agressivité chimique**; vis-à-vis les câbles de précontrainte.

III. Armatures

III.1 Armatures Passives

Ces aciers sont utilisés généralement pour assurer le montage de la pièce, pour reprendre la traction, les efforts tranchants ; et ainsi limiter la fissuration. Les aciers passifs utilisés pour les éléments en béton précontraint sont classés en trois catégories :

- Barres rondes et lisses.
- Barres à haute adhérence.
- Treillis soudés.

Pour ces aciers, les caractères mécaniques auxquels les normes font références sont:

- La limite d'élasticité garantie en traction f_e .
- La contrainte de rupture par traction.
- L'allongement sous charge maximale.
- L'allongement de rupture par traction.

Les caractères géométriques des aciers passifs sont désignés par les diamètres nominaux $\varnothing_i$ des barres utilisées et leur section nominale A_s .

III.1.1 Diagramme Contraintes - Déformations

Le diagramme Contraintes - Déformations ($\sigma_s - \varepsilon_s$) des aciers passifs prend conventionnellement l'allure présentée ci-dessous, avec $\sigma_s = f_e / \gamma_s$:

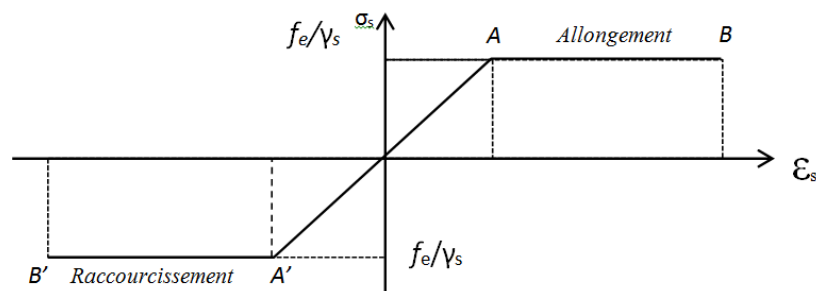


Fig II.2 :

Contraintes – Déformations ($\sigma_s - \varepsilon_s$) des aciers passifs.

Diagramme

On appelle module d'élasticité (ou module de Young) le rapport déduit du diagramme de Contraintes - Déformations des aciers passifs et donné par la formule :

$$E_s = \frac{f_e/\gamma_s}{\varepsilon_{se}} \quad (\text{II} - 10).$$

On peut admettre, pour les aciers doux, que: $E_s=200\,000\text{ MPa}$.

III.1.2 Caractéristiques Technologiques

Les caractères technologiques des aciers passifs sont:

- L'aptitude au façonnage, définie par référence à des essais de pliage et de pliage suivi de dépliage.
- L'aptitude d'une barre à assurer les liaisons mécaniques entre elle et le béton qui l'entoure (caractères d'adhérence).
- L'aptitude aux soudages.

III.1.3 Caractère D'adhérence

L'adhérence est l'aptitude d'une barre à rester solidaire au béton qui l'enrobe sans tenir compte des forces qui tendent à la faire glisser dans le sens de son axe. Elle est définie par 2 coefficients sans dimensions : Coefficient de fissuration η et Coefficient de scellement ψ_s :

Tableau II.1 Coefficient de fissuration η

Ronds Lisses RL	$\eta=1$
Barres Haute Adhérence HA (quel que soit le Φ)	$\eta=1.6$
Fils Haute Adhérence HA $\Phi \geq 6\text{mm}$	$\eta=1.6$
Fils Haute Adhérence HA $\Phi < 6\text{mm}$	$\eta=1.3$

Tableau II.2 Coefficient de scellement ψ_s

Ronds Lisses RL	$\psi_s=1$
Barres Haute Adhérence HA (quel que soit le Φ)	$\psi_s=1.5$
Fils Haute Adhérence (quel que soit le Φ)	$\psi_s=1.5$

III.2 Armatures Actives

Les armatures actives sont les aciers de la précontrainte, leur rôle est de créer et maintenir la précontrainte. À l'inverse des armatures du béton armé qui se contentent d'un acier de qualité courante, les armatures de précontrainte exigent un acier satisfaisant un certain nombre de conditions. Elles sont classées par :

- **Catégorie** ; fils, barres et torons.
- **Classe de résistance**.

Les caractères à prendre en compte pour les armatures actives de précontrainte sont :

- La section nominale de l'armature A_{sT} ou dite A_p qui est la section du ferrailage transversal d'un fil ; une barre lisse ou ronde de diamètre nominal.
- Son module d'élasticité E_p ($E_p=200\text{ GPa}$ pour les fils et les barres, $E_p = 190\text{ GPa}$ pour les torons).
- La valeur de la charge maximale garantie f_{prg}
- La limite d'élasticité garantie f_{peg} .
- Le coefficient de relaxation ρ_{1000} ($\rho_{1000}= 2,5\%$ pour les TBR (très basse relaxation) et $\rho_{1000}= 8\%$ pour les RN (relaxation normale).
- Adhérence au béton.
- Coefficient de dilatation thermique (10^{-5} par $^{\circ}\text{C}$).

III.2.1 Caractères Géométriques

- **Fils**

Les fils sont des armatures dont la plus grande dimension transversale est inférieure à 12,3 mm. Ils sont livrés en couronnes (*Fig II.3*). On distingue :

- Fils d'acier ronds et lisse de symbole L,
- Fils autres que ronds et lisses de symbole L.

Les fils sont définis par leur diamètre nominal auquel correspond une section nominale conventionnelle A_p , suivant le tableau II.3.

Tableau II.3 Caractéristiques géométriques des fils de précontrainte.

Ø (mm)	4	5	6	7	8	10	12,2
$A_p(\text{mm}^2)$	12,6	19,6	28,3	38,5	50,3	78,5	117



Fig II.3 Les fils livrés en couronnes

- **Barres**

Les barres sont définies comme des armatures rondes et lisses de diamètre qui varie entre 12,5 et 36 mm, et de longueur de 12 à 18 m. Les caractères géométriques des barres sont le diamètre et la section nominale A_p , définis suivant le tableau II.4.

Tableau II.4 Caractéristiques géométriques des barres de précontrainte.

Ø (mm)	12,5	16	20	22	26	32	36
$A_p(\text{mm}^2)$	122	200	314	380	531	804	1018

- **Torons**

Un toron est un assemblage de 3 ou 7 fils enroulés en hélice en usine et répartis en une couche, éventuellement autour d'un fil central (*Fig II.4*). Ce façonnage, appelé toronnage, conduit à un câble relativement souple, mais les fils restent solidaires dans toutes les opérations de manutention et de mise en tension.



Fig II.4 Un toron à 7 fils (T15).

Les torons sont caractérisés par le nombre de leur fils, diamètre, et section, ce qui est fourni les valeurs correspondantes au tableau II.5. Le toron à 7 fils (de section 12,5 mm²) est constitué de 6 fils de diamètre de 4,2 mm enroulés sur un fil central de diamètre de 4,3 mm, ce toron est dénommé T13. Le toron à 7 fils (de section 15,2 mm²) est constitué de 6 fils de diamètre de 5 mm enroulés sur un fil central de diamètre de 5,2 mm, ce toron est dénommé T15.

Tableau II.5 Caractéristiques géométriques des torons de précontrainte.

Type	3 fils	7 fils	7 fils	7 fils standard T13	7 fils standard T15	7 fils super	7 fils super
Ø (mm)	5,2	6,85	9,3	12,5	15,2	12,9	15,7
A _p (mm ²)	13,6	28,2	52	93	139	100	150
Section A _p	Faible	Moyenne	Forte section				
Utilisation	Pré-tension	Précontrainte par post tension					

III.2.2 Diagramme Contraintes - Déformations (σ-ε)

Le BPEL propose pour les fils tréfilés et les torons le diagramme (σ - ε) présenté sur la figure II.5. Dans ce diagramme, et en l'absence d'un véritable palier plastique, il est très difficile de déterminer une limite d'élasticité f_{peg} pour ces aciers durs de précontrainte. Pour cela, cette limite f_{peg} a été définie conventionnellement comme étant le point d'intersection de la courbe (σ - ε) et d'une droite parallèle à la droite d'élasticité décalée de 1‰. À partir de ce diagramme, on admet que :

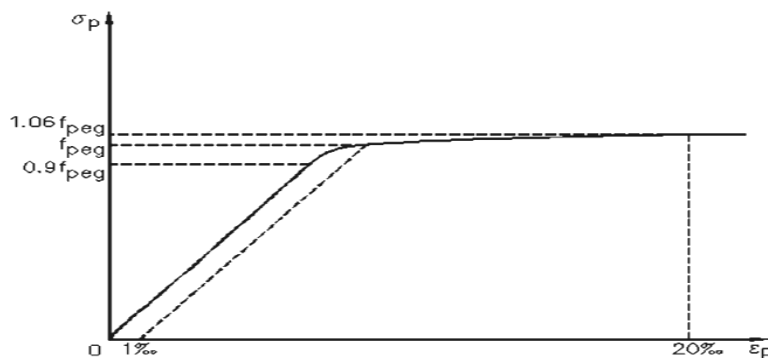


Fig II.5 Diagramme (σ-ε) pour les fils tréfilés et les torons.

Pour les fils trempés et les barres (Fig II.6), on admet que:

$$\text{Si } \varepsilon_p < f_{peg} / E_p \quad \text{donc:} \quad \sigma_p = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (\text{II-13}).$$

$$\text{Si } \varepsilon_p \geq f_{peg} / E_p \quad \text{donc:} \quad \sigma_p = f_{peg} \quad (\text{II-14}).$$

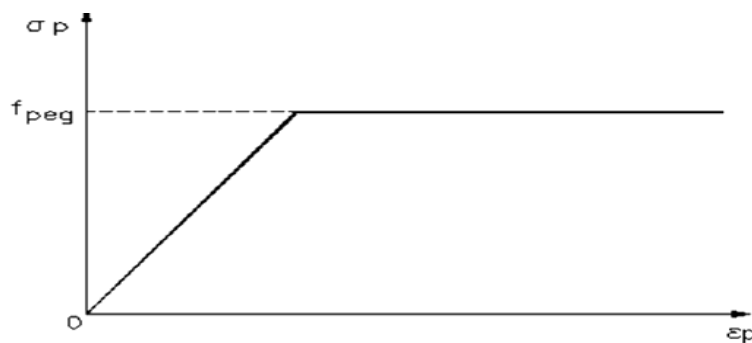


Fig.II.6 Diagramme (σ-ε) pour les fils trempés et les barres.

III.2.3 Qualités Requises Pour Les Aciers De Précontrainte

- L'allongement de l'armature à la mise en tension doit être beaucoup plus grand que les raccourcissements que le béton subit à la précontrainte et dans le temps (retrait et fluage), pour pouvoir maintenir la force de précontrainte. Dans le cas contraire, les raccourcissements du béton présentent des pertes de tension qui peuvent annuler partiellement ou totalement l'effort de précontrainte.
- Les aciers actifs doivent présenter une rugosité suffisante afin d'assurer l'adhérence avec le béton, car cette dernière constitue la condition essentielle de la transmission des efforts des aciers au béton notamment dans le cas de pré-tension.
- Les aciers doivent présenter une faible relaxation, cet effet sur la force de précontrainte est similaire à celui du retrait et fluage sur le béton.
- Les aciers doivent avoir une résistance mécanique élevée, et suffisamment ductile.
- Ils doivent assurer une meilleure résistance à la corrosion.

IV. Applications:

Exercice N°1

Une pièce rectangulaire (150 * 200 mm²) de béton, est précontrainte par pré-tension des armatures dont le CDG coïncide avec celui de la section du béton (Précontrainte centrée). On suppose d'abord, que l'acier de précontrainte est un acier doux et que la contrainte de traction dans cet acier lors de la mise en tension est $\sigma_{s0}=250\text{MPa}$. On suppose ensuite qu'il s'agit d'un acier à haute résistance est que la contrainte de traction dans cet acier lors de sa mise en tension est $\sigma_{p0}=1300\text{MPa}$.

Dans les deux cas, la force de précontrainte initiale P_0 exigée est **175 KN**. Calculer la dilatation unitaire résiduelle et la force de précontrainte après raccourcissement du béton pour chaque type d'acier. On donne:

$$E_p=E_s=200\,000\text{ MPa.}$$

$$E_b=27500\text{ MPa.}$$

Solution :

Cas01 – AcierDoux

$$A_s=P_0/\sigma_{s0} \Rightarrow A_s=175.10^3/250 \Rightarrow A_s=700\text{mm}^2. \text{ On a : } \varepsilon_{s0}=\sigma_{s0}/E_s=250/2.10^5$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{s0}=12,5 \cdot 10^{-4}.$$

Lors du transfert de la précontrainte, le béton est soumis à une force de **175 KN** et il subit un raccourcissement élastique instantané dû à cet effet de précontrainte. La déformation unitaire résultant de ce raccourcissement est donnée par :

$$\varepsilon_{bi}=\sigma_0/E_b=P_0/B.E_b.$$

$$\text{Donc: } \varepsilon_{bi}=175 \cdot 10^3/[(150 \cdot 200).27500] \Rightarrow \varepsilon_{bi}=2,1 \cdot 10^{-4}.$$

Le béton subit aussi une déformation due à son raccourcissement différé (retrait et fluage). Cette déformation est de l'ordre de : $\varepsilon_{bd} = 7 \cdot 10^{-4}$.

L'acier subit les mêmes déformations du béton, alors la dilatation unitaire résiduelle dans l'acier est :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s0} - \varepsilon_{bi} - \varepsilon_{bd} = 12,5 \cdot 10^{-4} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \varepsilon_s = 3,4 \cdot 10^{-4}.$$

La force finale de précontrainte dans l'acier après ces pertes est:

$$P_f = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 700 \Rightarrow P_f = 47,6 \text{ KN}.$$

La perte est: $(175 - 47,6)/175 = 0,728$, donc $\Delta P \approx 73 \%$.

Cas 02- AcierDe Précontrainte

$$A_p = P_0 / \sigma_{p0} \Rightarrow A_s = 175 \cdot 10^3 / 1300 \Rightarrow A_p = 135 \text{ mm}^2. \text{ On a: } \varepsilon_{p0} = \sigma_{p0} / E_p = 1300 / 2 \cdot 10^5 \Rightarrow \varepsilon_{p0} = 65 \cdot 10^{-4}.$$

La déformation (raccourcissement) instantanée du béton est de l'ordre de $2,1 \cdot 10^{-4}$ et celle différée vaut à $7 \cdot 10^{-4}$. L'acier subit les deux déformations, donc :

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p0} - \varepsilon_{bi} - \varepsilon_{bd} = 65 \cdot 10^{-4} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \varepsilon_s = 55,9 \cdot 10^{-4}.$$

La force finale de précontrainte dans l'acier après ces pertes est:

$$P_f = \varepsilon_p \cdot E_p \cdot A_p = 55,9 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 135 \Rightarrow P_f = 151 \text{ KN}.$$

La perte est: $(175 - 151)/175 = 0,14$, donc $\Delta P \approx 14 \%$.

Exercice N°2

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

- La résistance à la compression à 7 et 90 jours.
- La résistance à la traction à 7 et 90 jours.
- Le module de déformation longitudinal instantané à 7 et 90 jours.
- Le module de déformation longitudinal différé à 7 et 90 jours.

Exercice N°3

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

- Tracer le diagramme: Contraintes– Déformations.

Exercice N°4

Déterminer la déformation due au retrait d'une poutre de section $(30,70) \text{ cm}^2$ 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 désertique zones D2 et D.