II. Introduction:

Le béton précontraint est né du raisonnement suivant : le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus économique. Il résiste bien à la compression, mais peu, et surtout de façon aléatoire, à la traction. Il faut donc construire en béton, mais en évitant que ce matériau soit trop tendu, et risque de se fissurer. Et pour cela, il faut le comprimer de façon artificielle et en permanence, dans les zones où les charges extérieures développent des tractions, de façon qu'au total le béton reste comprimé (ou assez peu tendu pour ne pas risquer de se fissurer) et donc résistant, en tous cas de charge.

L'effort de compression volontairement développé à cet effet est appelé l'effort de précontrainte (ou, en abrégé, la précontrainte). Le remède ne doit pas pécher par excès : la compression totale du béton doit rester inférieure à une valeur raisonnable, de façon à éviter tout risque de fissuration longitudinale des éléments précontraints (alors que les tractions y développent généralement des fissures transversales).

Au total, un ouvrage en béton est dit en béton précontraint quand il est soumis à un système d'efforts créés artificiellement pour engendrer des contraintes permanentes qui, composées avec les contraintes dues aux charges extérieures, donnent des contraintes totales comprises entre des limites que le béton peut supporter indéfiniment, en toute sécurité.

II.1. Choix les type de béton précontraint:

La précontrainte est un traitement mécanique qui consiste à produire, dans un matériau, avant sa mise en service, des contraintes contraires à celles produites par les charges qui le solliciteront.

En béton précontraint, le traitement consiste à pré comprimé certaines zones du béton pour le rendre capable de résister aux charges extérieures.

On distingue deux types de pont en béton précontraint :

II.1.1. Les ponts à poutre en B.P :

Les poutres sont précontraintes par câbles ou par câbles ou par fils adhérents (poste tension ou prés-tension respectivement).

Leur préfabrication à terre permet d'économiser l'utilisation souvent onéreuse d'un cintre. Les ponts à poutres en B.P, sont utilisés pour le franchissement des portées intermédiaires de l'ordre de 25m.

Leurs portées les plus économiques situent entre 30m, et 35m.

✓ **Avantages et Inconvénients:**

- Tableau II.1 les Avantages et Inconvénients d'un pont à poutre en B.P

Avantages	**Inconvénients**
▪ La possibilité d'assembler d'éléments préfabriqués sans échafaudages. ▪ La possibilité de franchir de plus grandes portées qu'avec des ouvrages en béton armé. ▪ Les armatures à haute limite élastique utilisées en béton précontraint sont mois chère à force égale que les aciers du béton armé.	▪ La nécessité de fabriquer du béton plus résistant principalement avant 28 jours. L'obligation d'attende que la mise en tension soit faite pour pouvoir décintrer ou décoffrer. • La nécessaire pour disposer d'un personnelle qualifié pour la vérification de la pose des gaines et câbles et pour la mise en tension des câbles.

II.1.1.1 Les ponts à poutres précontraintes par pré tension :

Dans ce procédé, les câbles de précontrainte sont tendus entre deux massifs solidement Ancrés avant le coulage du béton (**Fig. II.1)** Cette technique est employée surtout sur les bancs de préfabrication, pour réaliser des éléments répétitifs.

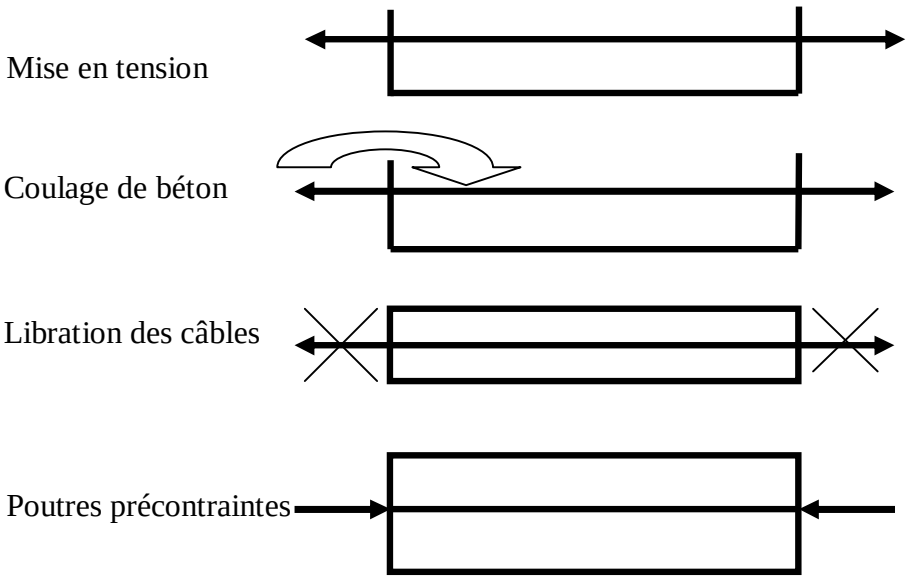


Fig. II.1 ponts à poutres précontraintes par pré tension

II.1.1.2. Les ponts à poutres précontraintes par post tension:

Ce procédé consiste à tendre les câbles de précontrainte, après coulage et durcissement du béton, en prenant appui sur la pièce à comprimer **(Fig. II.3),** Cette technique est utilisée pour le[16]s ouvrages importants est, généralement. Mise en ouvre sur chantier [7]

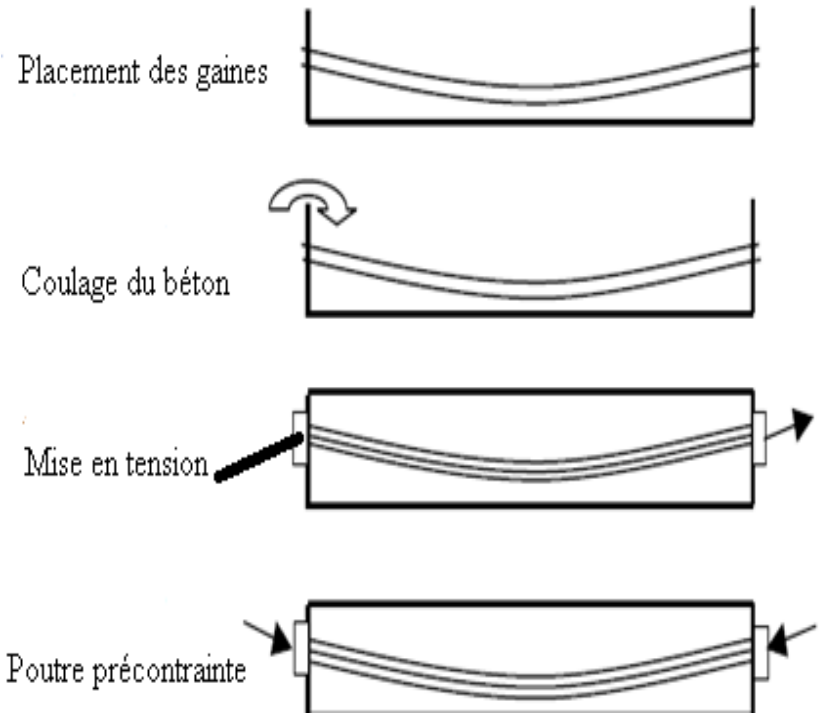


Fig. II.2 : ponts à poutres précontraintes par post tension

✓ **Avantages et Inconvénients:**

- Tableau II.2 : les Avantages et Inconvénients d'un pont à poutre en B.P par post tension

Avantages	**Inconvénients**
• Limitation des fissures (béton comprimé) • franchissement des grandes portées. • La possibilité d'assembler des éléments préfabriqués sans échafaudage ni bétonnage • La maîtrise de la méthode d'exécution.	• Poids très important. • Déformation des poutres par fluage due à la compression excessive de leur partie inférieure • Sensibilité au tassement différentiel. • Le type de cet ouvrage est moins esthétique

II.2. Procédé de précontrainte par post tension :

Le principe de la précontrainte par post tension est de tendre les armatures en prenant l'appui sur la pièce à précontrainte. Pendant sa mise en tension, l'armature s'allonge tandis que le béton se comprimé, présente un léger raccourcissement ; pour permettre le mouvement relatif qui en résulte, il est nécessaire de ménager évidemment dans le béton tubulaire généralement formé par des gaines métalliques de section circulaire disposées et réglées dans les coffrages avant bétonnage.

Les dispositions des armatures et surtout de leurs ancrages et le mode de mise en tension constituent des procédés brevetés, offerts aux entreprises par des sociétés spécialisées.
L'ensemble d'un procédé de précontrainte comprend en général les éléments suivants :

- **L'ancrage actif :** Situe à l'extrémité où s'effectue la mise en tension ;
- **Ancrage passif :** ou ancrage mort, situe à l'extrémité de l'armature opposée à celle par où s'effectue la mise en tension (la mise en tension peut être effectuée soit d'un seul coté, soit simultanément par les deux extrémités, dans les deux cas les deux ancrages sont actifs).
- **Le coupleur :** Disposition permettant, après la mise en tension d'une armature, de la prolonger par une deuxième. La disposition de jonction est utilisée comme un ancrage passif de la seconde ; après la mise en tension de celle-ci, tout se passe en apparence comme si l'on avait une seule armature continue.
- **Les accessoires :** gaine, manchons d'extrémité, évent, tubes d'injection **…etc.**
- **Le matériel de mise en tension**: vérin de traction, pompe d'alimentation des vérines, pompes d'injection,…etc. [7]

II.3. Choix des poutres préfabriquées en béton précontraint: [8]

La figure **(II.4)** montre les caractéristiques des poutres préfabriquées de type NEBT (1000, 1200, 1400, 1600 et 1800). [9]

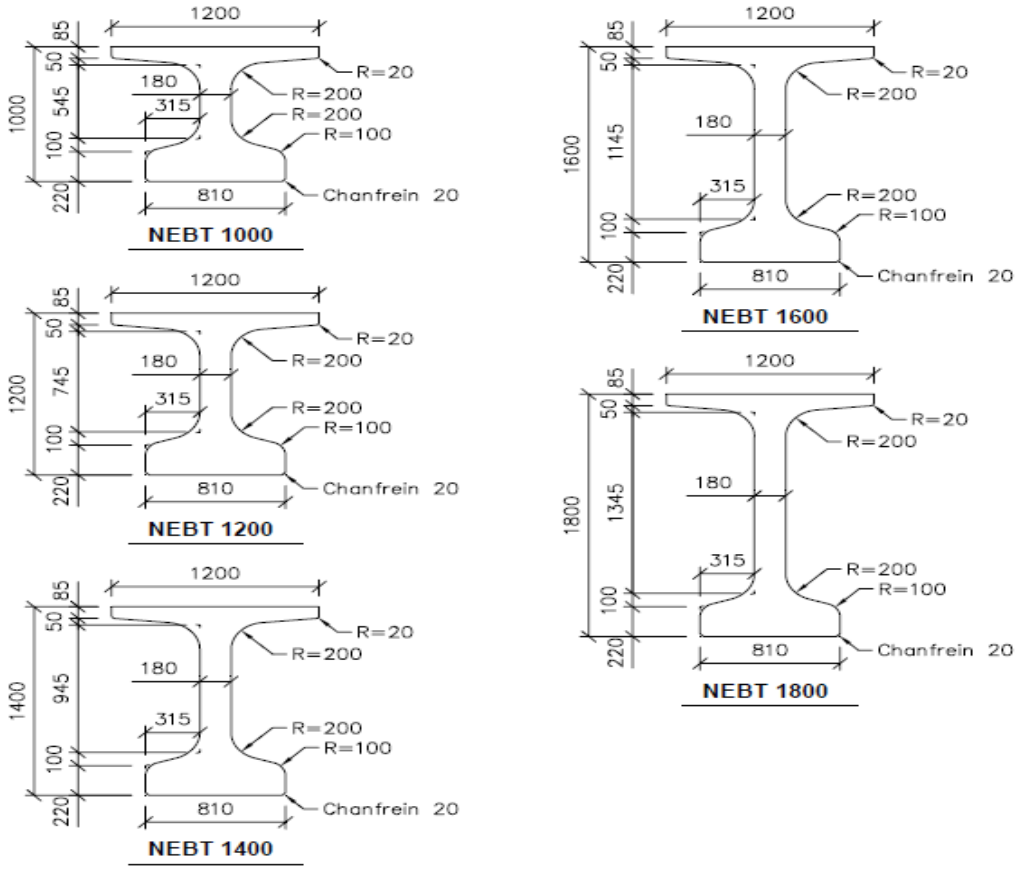
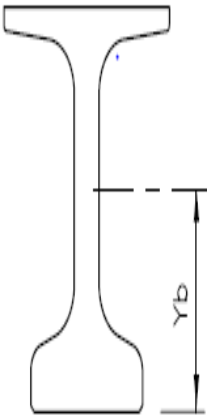


Fig. II.3: Caractéristiques des poutres préfabriquées de type NEBT

- Tableau II.3: Caractéristiques des poutres préfabriquées de type NEBT

Type	**Aire**	**Périmètre**	**Yb**	**Moment d'inertie**	**Point linéique**
NEBT	$mm^2 \times 10^3$	Mm	mm	$mm^4 \times 10^9$	KN / m
NEBT 1000	**481**	**5103**	**483.2**	**62.1**	**11.78**
NEBT 1200	**517**	**5503**	**574.8**	**99.1**	**12.67**
NEBT 1400	**553**	**5903**	**667.3**	**146.5**	**13.55**
NEBT 1600	**589**	**6303**	**760.9**	**204.8**	**14. 43**
NEBT 1800	**625**	**6703**	**855.1**	**274.9**	**15.31**



II.4. Caractéristiques des matériaux des éléments d'un tablier (poutres en béton précontrainte et dalle en béton arme):

II.4.1. Le béton

Le béton s'obtient en mélangeant dans des proportions convenables, et de façon homogène le ciment, le sable le gravier, l'eau, et éventuellement des adjuvent. Le béton destiné au béton précontraint ne diffère pas beaucoup de celui destiné au béton armé, sauf qu'on l'utilise sous des contraintes plus élevées.

Pour le béton précontraint, la section est soumise a une contrainte de compression qui équilibrera les contraintes de traction amenés par les charges. Le module d'élasticité longitudinal est élevé, afin de réduire les déformations, et les pertes de tension des aciers.

Pour le béton précontraint, le dosage du ciment est de l'ordre de 400 à 450 kg/m^3, et ces valeurs peuvent atteindre 500 kg/m3 (c.-à-d. 500 kg de ciment pour 1m^3 de béton). Quant aux liants, les plus utilises pour la mise en œuvre du béton sont les ciments portland artificiels CBA 325.

Densité: la masse volumique du béton armé γ =2,5 t/m^3.

II.4.2. caractéristiques du béton pour le code CAN/CSA-S6-06:

II.4.2.1. La résistance à la compression et à la traction :

À moins d'indication contraire, la résistance spécifiée à la compression du béton *f'c* doit être de 30 MPa au minimum pour les membrures non précontraintes et de 35 MPa au minimum pour le béton précontraint. Toutefois, aucun béton ayant une résistance supérieure à 85 MPa ne doit être utilisé sans avoir été approuvé.

Et Coefficient de dilatation thermique En l'absence de données plus exactes, le coefficient de dilatation thermique linéaire du béton doit être fixé à 10 × 10–6/ °C.

II.4.2.2. la résistance à la traction :

Les bétons en général caractérisé par leur résistance à la compression f_c mais leur résistance à la traction f_t joue aussi un rôle très important dans leur comportement mécaniques : c'est le cas en particulier pour tout ce qui concerne l'adhérence.

Les règles BAEL et BPEL donnent les relations suivantes :

$$f_{tj} = 0{,}6 + 0{,}06\, f_{cj}$$

- Le module E_{ij} est fonction croissante de la résistance à la compression ; les règles BPEL Donnent la relation suivante. $E_{ij}=11000(f_{cj})^{1/3}$

- Pour les charges de longue durée (tel que PP, superstructure, précontrainte…), et pour tenir compte des effets du fluage, le module de déformation différé du béton est :

$$E_{vj}= E_{ij} / 3=3700(f_{cj})^{1/3}. \quad \text{BAEL}$$

Pour les justifications à l'ELS, la contrainte admissible en compression du béton vaut

$\sigma_{bc=} 0,6f_{c28}$ une valeur 33% inferieur **à** celle donnée par le code S6-06

II.4.2.3 Déformation transversale du béton :

La déformation transversale du béton est donnée par la formule suivante.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad \text{BAEL}$$

Le Coefficient de poisson doit être égale à 0,2 aucune valeur n'était spécifiée dans le code S6-88

II.4.2.4 Contraintes admissibles :

On se fixe valeur de contraintes qui ne peut être dépassée en aucun point de l'ouvrage, cette Contrainte est appelée contrainte admissible.

II.4.2.4.1 Contrainte admissible à la compression :

Les règles B.A.E.L donnent la valeur de la contrainte admissible à la compression

Etat limite "ELU" $0,85 f_{c28} / \gamma_b$

f_{c28}: Résistance caractéristique à 28 jours.

γ_b: Coefficient de sécurité.

γ_b: 1,5 situation durable ou transitoire.

γ_b: 1.15 situation accidentelle

- **Module d'élasticité :**

En l'absence de données plus exactes, le module d'élasticité du béton *Ec* par le code Canadian doit être calculé de la façon suivante $Ec = (3000\sqrt{fc'} +6900)*(\gamma_c/2300)^{1,5}$

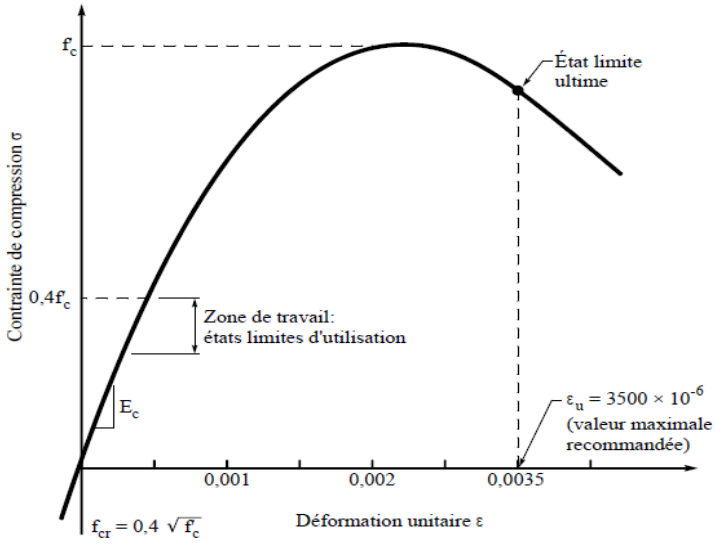


Fig. I.4 : Diagramme de Béton en compression

II.4.2.4.2 Contrainte admissible au cisaillement:

Les essais effectués sur des poutres précontraintes, soumises à des efforts de cisaillement ont mis en évidence l'existence de deux mode de rupture de béton :

- 1er par fissuration pour laquelle la contrainte de cisaillement admissible est

Données par : $\tau^2_1=\delta_x.\ \delta_t+0,4f_{tj}\ (f_{tj}+\delta_x+\delta_t)$

- 2eme par compression cisaillement pour laquelle la contrainte de cisaillement admissible est donnée par : $\tau^2_1=\delta_{x.}\ \delta_t+2f_{tj}\ /\ (f_{cj})+(0.6f_{cj}-\delta_x-\delta_t)\ (f_{tj}+\delta_x+\delta_t)$ La seconde formule est rarement prépondérante. elle n'est utilisée que Dans le cas d'élément soumis a des fortes compressions longitudinales. (si $\delta_x+\delta_t>0,4\ f_{cj}$)

  Avec : $\tau = \min(\overline{\tau_1}+\overline{\tau_2})$

En cas de traction dons le béton, on applique la 1ere formule avec $\delta_x=0$,et Comme il n'y a pas de précontrainte transversale $\delta_t=0$ d'où $\tau^2_1=0,4\ f_{tj}$

ELS $\sigma_{bc}=0,6f_{cj}$

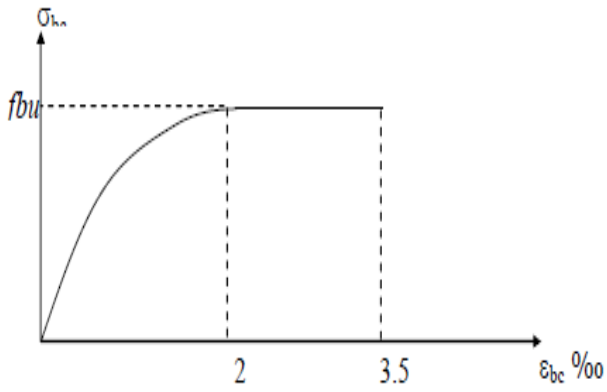


Fig. II.5 : Diagramme contrainte-déformation de béton

- Le module de déformation longitudinale instantanée du béton.
- Le module de déformation longitudinale différée du béton.

II.4.2.5 Qualités attendues d'un béton pour ouvrages:

Ses qualités sont

• Une très bonne résistance à la compression à court terme (quelques jours) et à long terme (28 jours et plus).

•Une très bonne résistance aux agents agressifs, aux intempéries à l'eau de mer, éventuellement aux eaux séléniteuses.

•Une bonne déformabilité instantanée, et différés la plus faible possible.une maniabilité pour mise en œuvre aussi bonne que possible.

II.4.3 L'acier:

Les aciers utilisés dans les ouvrages en béton précontraint sont de deux natures différentes

- Les aciers actifs, qui créent, et maintiennent la précontrainte dans le béton.
- Les aciers passifs nécessaires pour reprendre les efforts tranchants pour Limiter la fissuration.

II.4.3.1Les aciers actifs:

La précontrainte est réalisée par post-tension, Les câbles utilisés sont de type 12T15 CLASSE 3TBR.

- Nombre de torons par câble : 12
- Section utile d'un câble : AP = 1800 mm2
- Force élastique garantie : f_{peg} = 1573,3MPa
- Force de rupture garantie : f_{prg}= 1766,7MPa

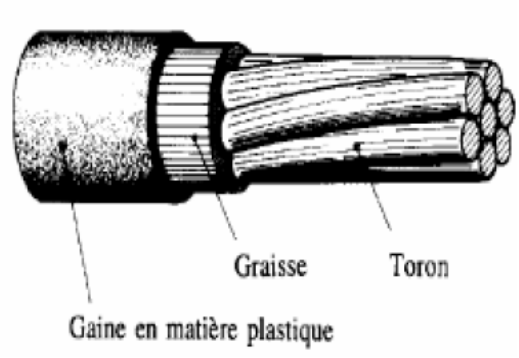


Fig. II.6 : Acier actif ou toron

- Glissement à l'ancrage g = 6 mm
- Coefficient de frottement f = 0,18 rad^{-1}
- Diamètre extérieur de la gaine = 88 mm
- Diamètre intérieur de la gaine = 80 mm
- Entre axe minimum encrage = 420 mm
- Entre axe minimum bord = 230 mm
- Diamètre ancrage = 310 mm
- Coefficient de frottement (gaine-câble) : 0,002 m^{-1}
- Relaxation à 1000h : ρ1000= 2,5 %.

II.4.3.1.1 La valeur max de la tension à l'origine σ_0 doit être :

$\sigma_0 < \text{Min}\ (0{,}8f_{prg}, 0{,}9f_{peg})$ Selon les règles de BPEL

$\sigma_0 < \text{Min}\ (1416, 1425) = 1416\text{MPa}$

f_{prg} : la limite de rupture garantie de l'aciers de précontrainte.

f_{peg} : la limite d'élasticité de l'acier de précontrainte.

II.4.3.1.2 La limite élastique :

Comme ces aciers n'ont pas de palier de plasticité, on définira la limite Elastique comme étant un allongement résiduel de 0,1%. La limite élastique Conventionnelle des aciers représentent 89% de la résidence garantie à la rupture.

Dans les calculs relatifs à l'E.L.U on introduit un coefficient

Tel que

γ_s = 1 situation accidentelle

γ_s = 1.15 situation durable ou transitoire.

II.4.3.1.3 module de Yong pour le code Canadian :

Le module d'élasticité longitudinal "E_P" des aciers de précontrainte est Pris égal à :

- 200 000 MPa pour les barres.
- 190 000 MPa pour les torons.

- **diagramme contrainte déformation :**

Le calcul à l'E.L.U en dehors du domaine élastique, nécessite de connaître la relation entre contrainte et déformation, aux différents stades de calcul.

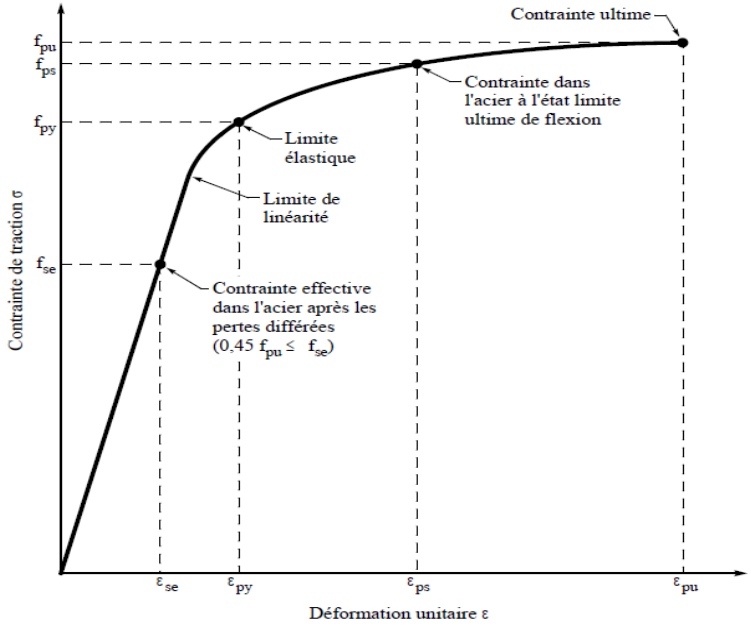


Fig. II.7 : contrainte déformation de l'armateur de précontrainte

II.4.3.2 Aciers passifs:

Les armatures passives sont celles utilisées dans le béton armé. (Les armatures passives sont tendues sous l'effet des sollicitations extérieures).

II.4.3.2.1 Limite élastique :

La limite élastique spécifiée *f*y des barres d'armature doit se situer entre 300 MPa et 500 MPa et être indiquée sur les plans.

II.4.3.2.2 Résistance à la fissuration pour le code CAN/CSA-S6-06

- La résistance à la fissuration f_{cr} doit être :

a) 0,4 pour le béton de densité normale ;

b) 0,34 pour le béton semi-léger ; et

c) 0,30 pour le béton léger.

- La résistance à la fissuration au transfert f_{cri} , doit être :

a) 0,4 pour le béton de densité normale ;

b) 0,34 pour le béton semi-léger ; et

c) 0,30 pour le béton léger.

II.4.3.2.3 Module d'élasticité longitudinale de l'acier :

Es = 2.10^5MPa. **Le code CAN/CSA-S6-06**

II.4.3.2.4 Module d'élasticité des câbles de précontrainte Ep CAN/CSA-S6-06

Le module d'élasticité des câbles de précontrainte Ep**.** Doit être établi à l'aide de courbes caractéristiques de contrainte-déformation, à condition qu'il en existe. En l'absence de telles données, on doit utiliser les valeurs suivantes :

a) toron haute résistance à sept fils :

(i) calibres 9, 13 ou 15 : 200 000 MPa ; et

(ii) calibre 16 : 195 000 MPa ; et

b) barres à haute résistance : 205 000 MPa.

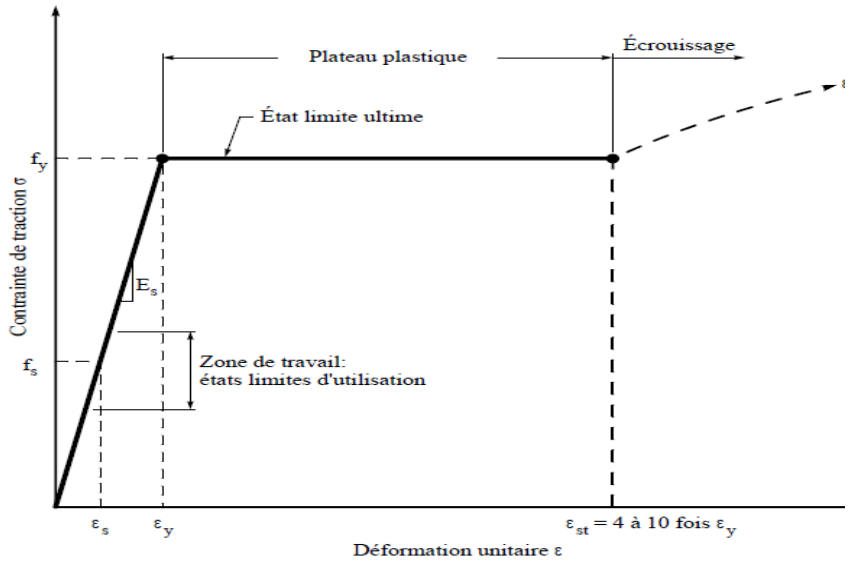


Fig. II-8:Diagramme armatures passives

II.5 Les Normes :

Le calcul des structures sera effectué conformément aux:

- Règles B.A.E.L. 91 modifiées 99: règles techniques de conception et de calcul des ouvrages Et constructions en béton armé, suivant la méthode des états limites ;
- Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Ce Code fait appel à la technique du calcul aux états limites et prend en compte les conditions actuelles en matière de calcul au Canada et des activités de recherche entreprises depuis la publication de l'édition précédente.