

Chapitres 4 : Perte de la précontrainte

4.1. Introduction

La perte de précontrainte est un phénomène inévitable dans les structures en béton précontraint. Elle se produit lorsque la force de précontrainte appliquée aux câbles ou armatures diminue au fil du temps en raison de divers facteurs physiques et mécaniques. Cette perte doit être soigneusement calculée et prise en compte lors de la conception pour garantir la performance et la sécurité de la structure.

4.2. Contrainte à l'origine :

La contrainte à l'origine ou contrainte initiale (σ_{p0}) dans le contexte du béton précontraint fait référence à la tension appliquée dans les câbles ou armatures de précontrainte immédiatement après leur mise en tension, mais avant que les pertes de précontrainte ne se produisent. Cette contrainte est une étape cruciale dans la conception et la réalisation des structures en béton précontraint, car elle détermine la force de compression initiale introduite dans le béton.

Au point le plus sollicité de l'armature, généralement situé au niveau de l'ancrage, il est essentiel d'éviter d'atteindre une valeur trop proche de la limite de rupture de l'acier (f_{prg}). Pour cette raison, une valeur maximale de traction a été fixée réglementairement pour la tension initiale, notée σ_{p0} , définie comme suit :

Pour les fils et les torons :

- $\sigma_{p0} = \text{Min} (0,80 f_{prg} , 0,90 f_{peg})$ en post-tension. (Eq. 4.1)
- $\sigma_{p0} = \text{Min} (0,85 f_{prg} , 0,95 f_{peg})$ en pré-tension. (Eq. 4.2)

ou f_{prg} : la contrainte à la rupture garantie

f_{peg} : la contrainte de déformation élastique

Pour les barres :

- $\sigma_{p0} = 0,7 f_{prg}$. (Eq. 4.3)

On dispose ainsi d'une marge de sécurité (de 15 à 20 %) sur la rupture d'un câble, d'un toron ou d'un fil pour couvrir les incertitudes de mesure de pression du vérin, de correspondance entre pression et effort de traction, de frottement parasite, ce qui peut entraîner des variations de contrainte dans les différents torons d'un même câble.

Il est fortement recommandé de disposer une marge de sécurité sur la rupture des câbles de précontrainte lors de la mise en tension (généralement entre 15% et 20%). Ainsi que la contrainte à l'origine dépend de la force de précontrainte initiale (P_0) et de la section des câbles (A_p) (Figure 4.1). Elle est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{p0} = \frac{P_0}{A_p} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

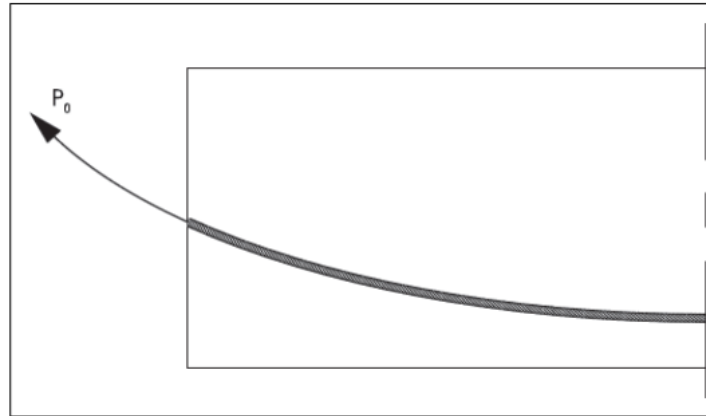


Figure 4.1. Force de précontrainte l'origine.

4.3. Pertes de tension en précontrainte par post-tension

La précontrainte par post-tension est une technique couramment utilisée dans la construction pour améliorer la résistance et la durabilité des structures en béton. Cependant, des pertes de tension peuvent survenir tout au long du processus, affectant l'efficacité de la précontrainte.

Les pertes de tension sont classées en deux catégories principales : les pertes instantanées et les pertes différées.

- **Pertes instantanées** : Ces pertes se produisent pendant ou immédiatement après la mise en tension des câbles.
- **Pertes différées** : Ces pertes se produisent sur une longue période (mois ou années) et sont dues à des phénomènes physiques et chimiques.

4.3.1. Pertes instantanées

Les pertes de tension instantanées désignent la diminution de la force de précontrainte dans les câbles d'une structure en béton post-tendue, qui survient immédiatement lors de la mise en tension ou peu après. Ces pertes sont principalement causées par :

- **Le frottement** entre les câbles et les gaines,
- **Le recul de l'ancrage** lors du blocage des câbles,
- **Les déformations élastiques instantanées du béton** lors de la transmission des efforts.

Elles sont quantifiées par la valeur $\Delta\sigma_{pi}(x)$ à une abscisse « X » du câble. La tension effective après soustraction de ces pertes est appelée **tension initiale** $\sigma_{pi}(x)$, définie par:

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pi}(x) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

où σ_{p0} est la tension appliquée initialement.

a) Perte de la tension due au frottement :

Les **pertes de tension par frottement** surviennent lors de la mise en tension des câbles de précontrainte dans une structure en béton post-tendue. Elles résultent de la résistance créée par le contact entre les câbles et les gaines (conduits de protection) ou

les déviateurs, ainsi que des micro-déviations accidentelles du tracé des câbles (Figure 4.2). Les principales causes sont :

- **Frottement courbe** : Dû à la courbure des câbles (angle total parcouru), qui génère une résistance localisée.
- **Frottement parasite (ou « effet de battement »)** : Lié aux irrégularités du tracé des gaines, même en l'absence de courbure intentionnelle.

La perte de tension par frottement à une abscisse « X » du câble est modélisée par :

$$\Delta\sigma_{frott}(x) = \sigma_{p0}(1 - e^{-(f\alpha + \varphi x)}) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Avec

$$\sigma_{frott}(x) = \sigma_{p0}(e^{-(f\alpha + \varphi x)}) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

où :

- σ_{p0} : Tension initiale appliquée à l'ancrage,
- f : Coefficient de frottement en courbe (rd⁻¹),
- α : somme des déviations angulaires arithmétiques du câble sur la longueur x (rd),
- φ : coefficient de frottement en ligne (m⁻¹) ;
- x : la distance de la section considérée (m).

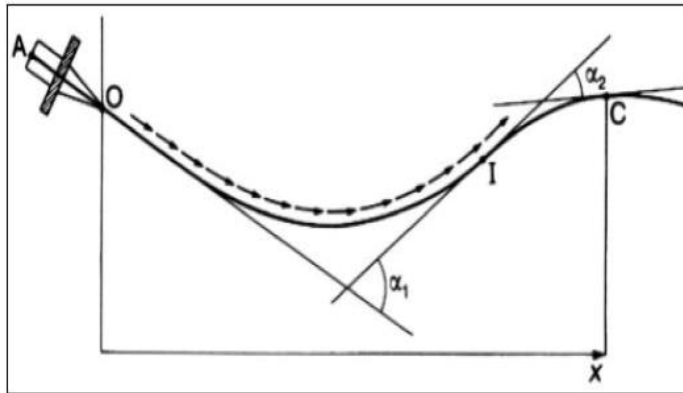


Figure 4.2. Frottements le long du câble lors de sa mise en tension.

b) Perte de la tension due au recul d'ancrage

Les pertes de tension par recul d'ancrage se produisent lors de la phase d'ancrage des câbles de précontrainte dans les structures post-tendues. Elles résultent du léger glissement ou déplacement des clavettes (ou cales) dans l'ancrage lors du relâchement du vérin de mise en tension, ce qui entraîne une rétraction élastique du câble et une diminution localisée de la tension appliquée. Ce type des pertes dues essentiellement aux phénomènes suivants :

- **Élasticité du câble** : Lorsque la tension est relâchée, le câble (en acier) se raccourcit légèrement sous l'effet de son élasticité.

- **Déformation de l'ancrage** : Les composants de l'ancrage (clavettes, plaque d'ancrage) subissent des micro-déplacements lors du blocage du câble.
- **Jeu mécanique** : Un mouvement résiduel inévitable existe entre le câble et l'ancrage après la mise en tension.

Ces trois phénomènes provoquent un raccourcissement du câble, désigné par **g**, induisant une perte de tension. Les notices techniques des systèmes de précontrainte précisent, selon le type d'ancrage, une valeur estimée de **g** :

- **Une valeur faible** (environ 5 mm) pour les ancrages par calage ou vissage, résultant principalement de la déformation du corps d'ancrage et du tassement des cales ou filets.
- **Une valeur plus élevée** (environ 12 mm) pour les ancrages par coincement. Dans ce cas, les torons et clavettes subissent un déplacement vers l'intérieur de la structure, amplifié si le vérin ne dispose pas d'un dispositif de clavetage hydraulique. Ce système permet d'enfoncer les mors dans leur logement conique avant de relâcher la pression dans la chambre du vérin.

Le déplacement des éléments vers le béton est limité par les frottements du câble contre sa gaine, un phénomène inverse à celui observé lors de la mise en tension. Cette résistance diminue progressivement depuis l'ancrage jusqu'à disparaître à une distance **d** de celui-ci (Figure. 4.3), au-delà de laquelle la tension reste constante.

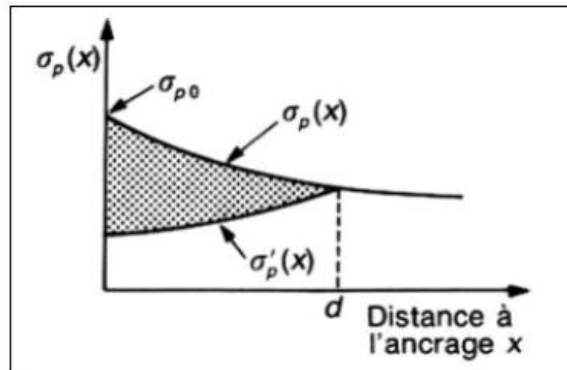


Figure 4.3: Perte de tension due au recul d'ancrage.

Avant rentrée d'ancrage, l'allongement relatif de l'armature de précontrainte à l'abscisse **x** est :

$$\varepsilon_p(x) = \frac{\sigma_p(x)}{E_p} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Après le rentrée d'ancrage, la tension à l'abscisse **x** ($x < d$) n'est plus que $\sigma'_p(x)$, et l'allongement relatif de l'armature de précontrainte est :

$$\varepsilon'_p(x) = \frac{\sigma'_p(x)}{E_p} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

La longueur d'influence de la perte par recul d'ancrage «point d », est donnée par la formule :

$$d = \sqrt{\frac{gE_p x}{\Delta\sigma_{frott}(x)}} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Pour $x \geq d$: $\Delta\sigma_{recul}(x) = 0$

$$\text{Pour } x < d : \Delta\sigma_{recul}(x) = \frac{2gE_p}{d} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

c) Perte de tension par déformations instantanées du béton

Les pertes de tension par déformations instantanées du béton surviennent lors de la mise en tension des câbles de précontrainte dans les structures en béton post-tendu. Ces pertes résultent de la déformation élastique du béton sous l'effet de la force de précontrainte appliquée, ce qui entraîne un raccourcissement du béton et, par conséquent, une diminution de la tension dans les câbles. Ces pertes sont instantanées et font partie des pertes à court terme ($\Delta\sigma_{pi}(x)$).

Cette perte est due essentiellement à la :

- **Déformation élastique du béton** : Lorsque la précontrainte est appliquée, le béton se comprime instantanément sous l'effet de la force de précontrainte.
- **Interaction acier-béton** : Les câbles, solidarisés au béton, subissent un raccourcissement proportionnel à la déformation du béton, réduisant leur allongement initial et donc leur tension.
- **Séquence de mise en tension** : Dans le cas de câbles tendus successivement, chaque nouveau câble mis en tension provoque une déformation supplémentaire du béton, affectant les câbles déjà ancrés.

La perte de tension dans un câble due à la déformation instantanée du béton est donnée par :

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \frac{n-1}{2n} * \frac{E_p}{E_{ij}} \sigma_b(x) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

avec :

n : nombre de gaines

E_p : module d'élasticité des armatures;

E_{ij} : module instantané du béton au jour « j » ;

$\sigma_b(x)$: contrainte normale du béton :

$$\sigma_b(x) = \frac{P}{B_n} + \frac{Pe^2(x)}{I_n} + \frac{M(x)e(x)}{I_n} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$P = (\sigma_{p0} - \Delta\sigma_{frott} - \Delta\sigma_{recu})A_p \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$e(x)$: excentricité du câble de précontrainte.

Remarque :

Cas d'une pièce avec un seul câble ou des câbles tendus simultanément :

Les pertes élastiques sont nulles ($\Delta\sigma_{racc}(x)=0$). En effet, le raccourcissement élastique se produit durant la mise en tension elle-même, car le vérin repose directement sur la

structure. Ainsi, la déformation de la pièce est compensée par l'action simultanée du vérin, dans ce cas :

- Pour le calcul de cette perte, l'équation suivante est utilisée :

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = E_p \sum K \frac{\Delta\sigma_{bj}}{E_{ij}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Le BPEL spécifie deux valeurs pour le coefficient **K** :

- **K = 2** : Pour les variations de contraintes liées à la phase de mise en tension et aux charges permanentes appliquées *simultanément* à cette phase.
- **K = 1** : Pour les variations de contraintes dues aux charges permanentes *postérieures* à la précontrainte, y compris celles générées par les câbles mis en tension ultérieurement.

4. 3.2. Pertes de tension différées :

Les pertes de tension différées désignent la diminution progressive de la force de précontrainte dans les câbles d'une structure en béton précontraint, survenant sur une longue période (mois à années) après la mise en tension. Elles résultent de phénomènes liés au comportement à long terme du béton et de l'acier. Ces pertes sont critiques pour la durabilité et la performance des structures. Les pertes de la tension différées sont :

- Perte de tension due au retrait du béton.
- Perte de tension due au fluage du béton.
- Perte de tension due à la relaxation de l'acier de précontrainte.

A l'instant « t » et dans une section d'abscisse « X » de l'armature, la valeur totale de ces pertes de tension différées, est notée $\Delta\sigma_{pd}(t, x)$.

a) Perte de tension due au retrait du béton

Les pertes de tension dues au retrait du béton correspondent à la diminution progressive de la force de précontrainte dans les câbles d'une structure en béton, causée par le raccourcissement du béton lors de son séchage et de son durcissement. Ce phénomène, différé dans le temps, est l'une des principales pertes à long terme dans les structures précontraintes.

Le retrait est une déformation volumétrique irréversible du béton, principalement due à :

- **Retrait de dessiccation** : Évaporation de l'eau libre du béton après la prise.
- **Retrait endogène (autogène)** : Consommation d'eau par les réactions d'hydratation du ciment (surtout dans les bétons à haute performance).
- **Retrait thermique** : Refroidissement du béton après l'échauffement initial lors de l'hydratation.

Le raccourcissement du béton entraîne un raccourcissement des câbles de précontrainte, réduisant leur allongement initial et donc leur tension.

La perte de tension due au retrait est calculée par :

$$\Delta\sigma_{ret} = E_p \varepsilon_r(t) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

E_p : Module d'élasticité de l'acier de précontrainte ($\approx 195\,000\text{ MPa} \approx 195\,000\text{ MPa}$),

$\varepsilon_r(t)$: Déformation totale de retrait du béton à l'âge t (en ‰ ou mm/m).

b) Perte de tension due au fluage du béton :

Les pertes de tension dues au fluage du béton correspondent à la diminution progressive de la force de précontrainte dans les câbles, causée par la déformation lente et irréversible du béton sous charge constante. Ce phénomène, différé dans le temps, est l'une des pertes les plus significatives dans les structures en béton précontraint, affectant leur durabilité et leur comportement à long terme. Le BPEL donne la perte finale de tension due au fluage du béton dans le temps, $\Delta\sigma_{flu}(t)$, par la formule :

$$\Delta\sigma_{flu}(t) = (\sigma_b^F + \sigma_b^M) \frac{E_p}{E_{ij}} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Avec:

σ_b^F étant la contrainte finale et σ_b^M la contrainte maximale, supportées par le béton dans la section considérée, au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte sous les actions permanentes, y compris celles dues à la précontrainte.

j : l'âge du béton lors de sa mise en tension.

Si $\sigma_b^M \leq \sigma_b^F$ il est loisible, à titre de simplification, d'évaluer la perte finale de tension due au fluage du béton à :

$$\Delta\sigma_{flu}(t) = 2.5\sigma_b^F \frac{E_p}{E_{ij}} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$\text{En plus } \frac{E_p}{E_{ij}} \approx 6 \Rightarrow \Delta\sigma_{flu}(t) = 15\sigma_b^F \quad (\text{Eq. 4.19})$$

c) Perte de tension due à la relaxation de l'acier :

Les pertes de tension dues à la relaxation de l'acier désignent la diminution progressive de la contrainte dans les câbles de précontrainte lorsque ceux-ci sont maintenus à allongement constant sur une longue période. Ce phénomène, lié à la viscosité de l'acier, est une perte différée qui s'ajoute au fluage du béton et au retrait pour réduire la force de précontrainte effective.

La relaxation résulte de réarrangements microstructuraux dans l'acier à haute résistance (tréfilé ou en barres) sous contrainte constante. Ces réarrangements entraînent une réduction de la tension interne sans modification de la longueur du câble. Elle est plus marquée dans les premières années et se stabilise asymptotiquement.

La perte de tension finale d'une armature du fait de sa relaxation, est donnée par la formule:

$$\Delta\sigma_{rel}(x) = 6 \frac{\rho_{1000}}{100} \left(\frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} - \mu_0 \right) \sigma_{pi}(x) \quad (\text{Eq. 4.20})$$

$\sigma_{pi}(x)$: contrainte dans les armatures de précontrainte ; après les pertes instantanées.

ρ_{1000} : coefficient de relaxation à 1000 h

f_{prg} : contrainte limite garantie à la rupture

μ_0 étant un coefficient pris égal à :

- 0,43 pour les armatures à très basse relaxation (TBR).
- 0,30 pour les armatures à relaxation normale (RN).
- 0,35 pour les autres armatures.

d) Perte de tension différée totale :

La formule permettant d'évaluer la perte de tension par relaxation des aciers de précontrainte repose sur l'hypothèse d'une longueur constante des armatures. Toutefois, cette perte est atténuée par le raccourcissement induit par le retrait et le fluage du béton, qui réduisent la déformation des aciers.

Pour intégrer cette interaction, le **BPEL** recommande d'appliquer un coefficient réducteur fixe de **5/6** à la valeur calculée par la relation (Eq. 4.21) lors de la détermination de la perte différée totale. Ainsi, la perte différée finale est définie comme suit :

$$\Delta\sigma_{pd}(x) = \Delta\sigma_{ret} + \Delta\sigma_{flu} + \frac{5}{6}\Delta\sigma_{rel} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

4.4. Contrainte finale probable :

$$\sigma_{pmax}(x) = (1.02 * \sigma_{p0}) - (0.8 * (\Delta\sigma_{inst} + \Delta\sigma_{pd})) \quad (\text{Eq.4.22})$$

$$\sigma_{pmin}(x) = (1 * \sigma_{p0}) - (1.2 * (\Delta\sigma_{inst} + \Delta\sigma_{pd})) \quad (\text{Eq.4.23})$$