

Pertes de précontrainte (suite)

Pertes de précontrainte en pré-tension :

Introduction :

Les armatures de précontrainte sont des armatures de même nature qu'en post-tension mais seuls des fils crantés ou des torons sont employés car il est indispensable de disposer d'une adhérence de forme. De même pour avoir une bonne adhérence les armatures ne sont pas groupées mais utilisées isolément; aussi les armatures employées sont appelées mono-fils ou mono-torons.

L'ancrage sur le banc de précontrainte est réalisé comme en post-tension par des clavettes pour les torons et des plaques de serrage pour les fils crantés.

Toujours dans le but de disposer d'une bonne adhérence, les armatures ne doivent pas recevoir de traitement de surface à base d'huile, de graisse ou de peinture.

Il faut en conséquence prendre toute disposition pour éviter un début de corrosion avant utilisation.

Les pertes de précontrainte en pré-tension sont différentes de celles de post-tension du fait des différences technologiques, mais les phénomènes restent les mêmes.

Nous les examinerons dans l'ordre ou technologiquement elles se produisent

1. Pertes de tension instantanées (à la mise en œuvre) :

Dans le cas de la pré-tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes de tension à la mise en œuvre qui se produisent :

- A la mise en tension de l'armature,
- Entre la mise en tension de l'armature et la mise en précontrainte de l'élément.
- A la mise en précontrainte de l'élément.

1.1 Pertes à la mise en tension de l'armature :

Il est tenu compte, le cas échéant de :

- La perte de tension qui résulte du glissement de l'armature par rapport à son ancrage, sur le banc ;

- La perte de tension qui résulte des frottements parasites ainsi que de l'emploi de déviateurs

NB : Ces pertes doivent alors faire l'objet d'une détermination expérimentale.

Ces pertes sont de deux origines ;

- **A** Les frottements des armatures sur les coffrages d'extrémité des produits, et éventuellement sur les déviateurs, ces frottements sont déterminés expérimentalement.

Pour des câbles rectilignes ; $\Delta\sigma_{fro}(\mathbf{x}) = 1\% \sigma_{p0}$

Pour des câbles déviés ; à déterminer par des essais préalables.

- **B** la rentrée d'ancrage sur le banc ; l'ancrage étant basé sur le même principe qu'en post-tension, provoque une rentrée d'ancrage, ici aussi la surface délimitée par les diagrammes avant et après rentrée d'ancrage est égale à « gE_p », les diagrammes étant généralement rectilignes (câbles rectilignes).

$$\Delta\sigma_g = \frac{gE_p}{l_b}$$

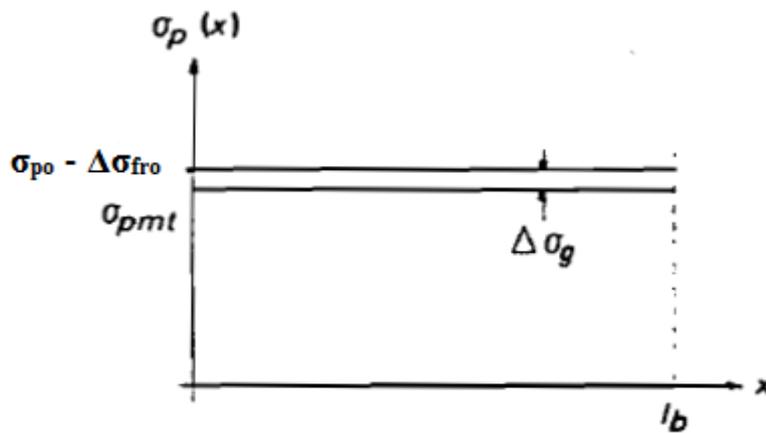


Fig.1 : Effet de la rentrée d'ancrage sur le banc

La longueur du banc l_b , étant généralement grande, cette perte est faible et généralement négligeable.

La valeur totale de ces pertes de tension à la mise en œuvre, dans une section d'abscisse « x » de l'armature, est notée : $\Delta\sigma_{pi}(\mathbf{x}) = \Delta\sigma_{fro} + \Delta\sigma_g$.

A la fin de la mise en tension, la tension probable dans les armatures est :

$$\sigma_{pmt} = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{fro} - \Delta\sigma_g.$$

La tension au point d'abscisse « x » après pertes de tension à la mise en œuvre, appelée tension initiale, est notée : $\sigma_{pi}(\mathbf{x}) = \sigma_{pi} = \sigma_{pmt} = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pi}(\mathbf{x})$

1.2 Pertes entre la mise en tension de l'armature et la mise en précontrainte de l'élément :

Pour certaines productions en série relatives au bâtiment et faisant l'objet d'une procédure de contrôle interne approuvée par un organisme officiel de contrôle ou de vérification, il peut être attribué à ces pertes des valeurs forfaitaires qui sont alors précisées dans la décision correspondante.

Ces pertes de tension résultent de :

- Le retrait du béton,

- La relaxation de l'acier,
- La déformation différentielle de l'armature et du béton sous l'effet d'un éventuel traitement thermique du béton.

Dans le cas où le béton est soumis à un traitement thermique, les deux pertes (retrait du béton et relaxation de l'acier) sont modifiées et il faut y ajouter une perte spécifique appelée perte thermique. L'évaluation de ces différentes pertes est alors effectuée conformément aux indications de l'annexe 6 du BPEL (Traitements thermiques des bétons).

La résistance nécessaire du béton pour le précontraindre n'est atteinte qu'au bout de trois jours à une semaine, pendant ce temps le retrait et la relaxation se développent.

1.2.1. Le retrait :

Si t_1 est l'âge du béton, à la mise en précontrainte la perte est :

$$\Delta\sigma_{r1} = E_p \varepsilon_r r(t_1)$$

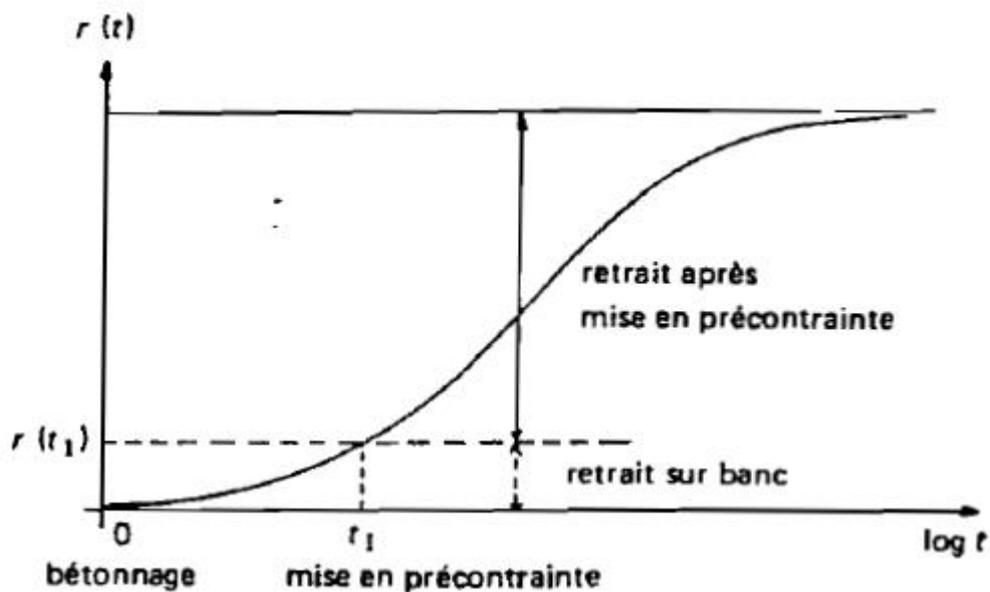


Fig.2 : Effet du retrait sur le banc

1.2.2. La relaxation :

Elle se développe à partir de la tension $\Delta\sigma_{pmt}$, selon la loi

$$\Delta\sigma_{\rho 1} = k_1 \rho_{1000} \left(\frac{t_1}{1000}\right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} e^{\frac{10\mu-7.5}{k_2}} \sigma_{pmt}$$

Avec : $\mu = \frac{\sigma_{pmt}}{f_{prg}}$

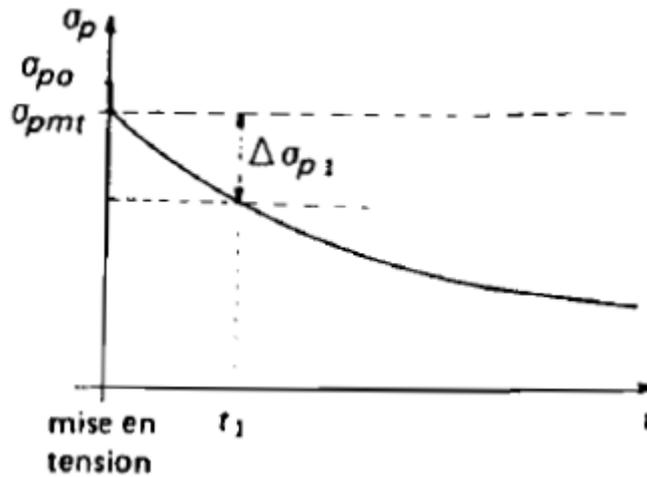


Fig.3 : Evolution de la relaxation sur le banc

A la fin de cette phase, la tension vaut σ_{pr} , c'est la tension probable qui sera relâchée pour mettre en précontrainte les produits :

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pmt} - \Delta\sigma_{r1} - \Delta\sigma_{p1}$$

Une certaine concomitance existe entre les deux phénomènes mais elle est négligeable. Le retrait qu'est d'une part est faible, est gêné par la présence des armatures et n'apparaît que à la fin de cette phase lorsqu'on relâche les armatures.

Valeurs des coefficients k_1 et k_2 :

Classe d'armature		ρ_{1000}	k_1	k_2
Classe 1	Fils ou torons ordinaires	8%	5,39	6,7
Classe 2	Fils ou torons a BR	2,5%	0,66	9,1
Classe 3	barres	4%	1,98	8

1.3. Perte de tension à la mise en précontrainte de l'élément :

Deux phénomènes interviennent ici pour entraîner des pertes ;

a- Le raccourcissement instantané du béton :

La perte de tension à la mise en précontrainte de l'élément résulte de la déformation instantanée du béton due à l'action des armatures lors de leur relâchement.

A la différence de la post-tension, toutes les armatures sont liées au béton et relâchées au même temps. Elles subissent donc totalement le raccourcissement du béton sous l'effet de la compression qu'elles apportent.

Cette perte est prise égale à :

$$\Delta\sigma_{pi}(x) = E_p \frac{\sigma_{bj}}{E_{bij}} (1 + k_i)$$

σ_{bj} : la contrainte dans le béton au niveau du câble moyen sous l'effet de la précontrainte et le poids propre.

E_{bij} : Module de déformation instantané du béton à l'âge j .

$1+ki$: Terme correcteur du module de déformation du béton (l'annexe 1 du BPEL), pour tenir compte de des fortes compressions appliquées au béton ($\sigma_{blim}=0.66f_{cj}$).le domaine élastique est dépassé ce qui modifie le module tangent.

$$-ki = 0 \text{ si } \sigma_{bj} \leq 0.5 f_{cj}$$

$$-ki = 4 \left(\frac{\sigma_{bj}}{f_{cj}} - 0.5 \right)^2 \quad \text{si } 0.5 f_{cj} < \sigma_{bj} < 0.66 f_{cj}$$

b-Pertes de tension dans les zones de scellement :

L'ancrage en pré-tension se fait en partie par frottement et en partie par adhérence, le diagramme de tension dans la zone de scellement est montré au figure suivante, dans cette zone il y a déplacement de l'armature ce qui fait apparaitre une rentrée d'armature « g_0 », on peut établir une relation entre l_s et g_0

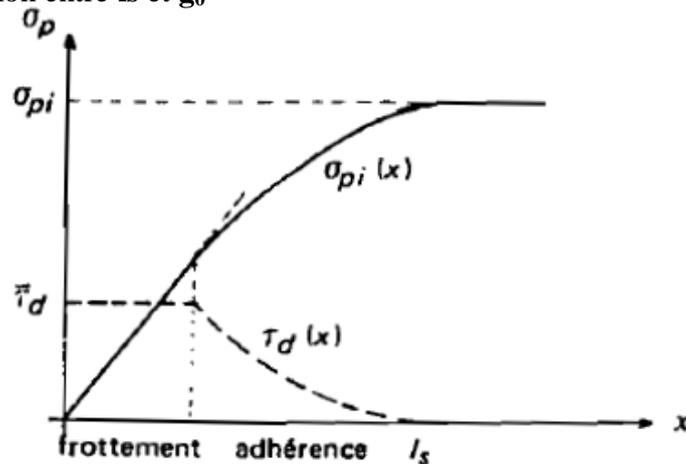


Fig.4 : diagrammes des tensions σ_{pi} et des contraintes d'adhérence $\tau_d(x)$

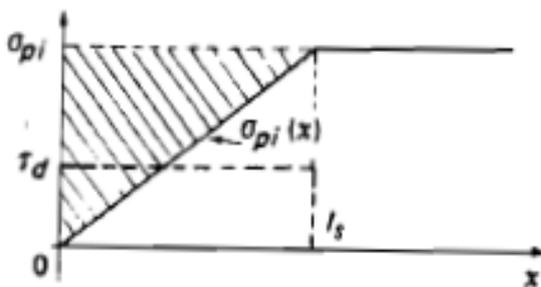


Fig 5

Hypothèse de frottement pure

$$g_0 E_p = \frac{1}{2} \sigma_{pi} l_s$$

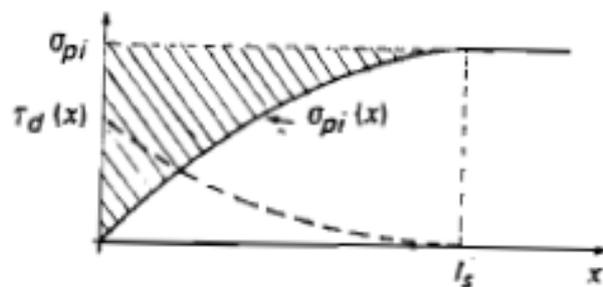


Fig 6

Hypothèse d'adhérence pure et en supposant que $\sigma_{pi}(x)$ est parabolique sur $[0, l_s]$

$$g_0 E_p = \frac{1}{3} \sigma_{pi} l_s$$

La réalité étant entre les deux hypothèses ci dessus, on retient : $l_s = 2.8 \frac{E_b}{\sigma_{pi}} g_0$

A titre de simplification le BPEL retient une variation parabolique de la contrainte sur la longueur de scellement :

$$0 \leq x \leq l_s \quad \sigma_{pi}(x) = \frac{x}{l_s} \left(2 - \frac{x}{l_s} \right) \sigma_{pi}$$

En présence d'un gainage de longueur l_g le phénomène est décalé d'autant à l'intérieur de la pièce :

$$l_g \leq x \leq l_s \quad \sigma_{pi}(x) = \frac{x-l_g}{l_s} \left(2 - \frac{x-l_g}{l_s} \right) \sigma_{pi}$$

Pertes instantanées totales : c'est la somme des pertes que nous venons de voir ;

$$\Delta\sigma_i(x) = \Delta\sigma_{fro} + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{r1} + \Delta\sigma_{p1} + \Delta\sigma_{pi}(x)$$

L'évolution de la tension dans cette phase est montrée à la figure suivante, le retrait et la relaxation sur le banc ne sont pas parfaitement séparés.

La tension à la fin de mise en précontrainte est $\sigma_{pi}(x)$ (tension initiale probable).

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_i(x)$$

Dans la zone de scellement il faut tenir compte de la rentrée d'armature

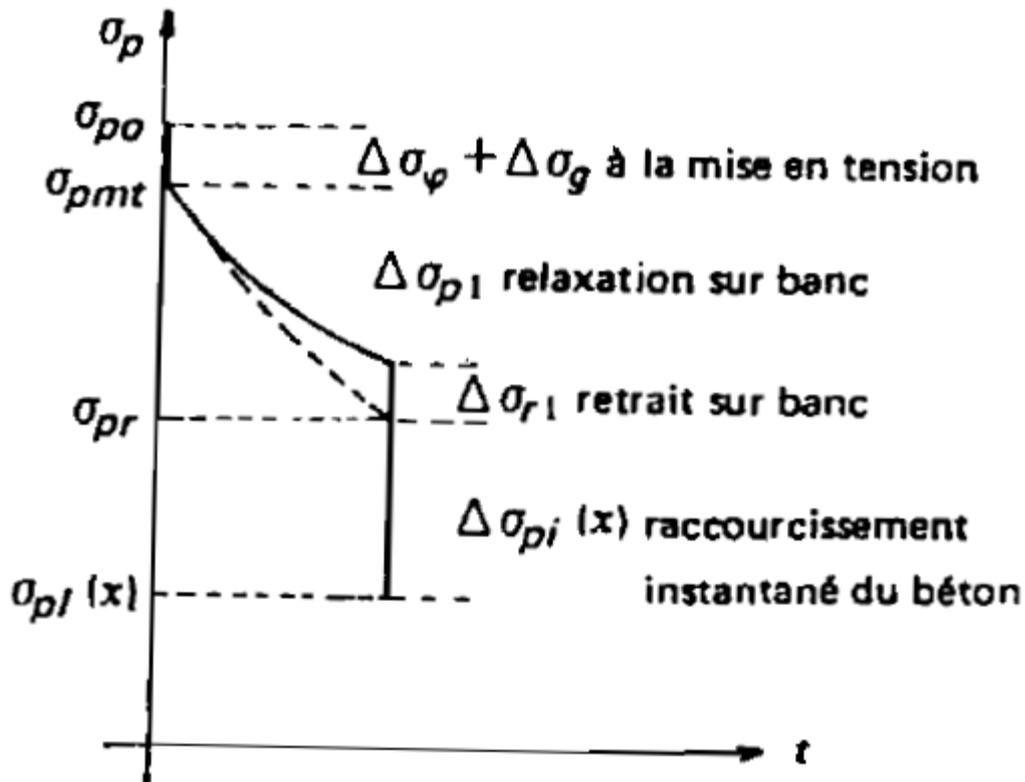


Fig.7 : Evolution de la tension pendant la fabrication

2. Pertes de tension différées :

Les phénomènes qui interviennent pour entraîner les pertes de tension différées sont les mêmes que ceux en post-tension ; le retrait le fluage et la relaxation

Dans le cas de la précontrainte par pré-tension, s'agissant généralement de fabrications industrielles de séries de produits dont la mise en œuvre comporte par ailleurs peu de phases, il est justifié de recourir à une évaluation précise des pertes de tension.

Toutefois, pour certaines productions relatives au bâtiment et faisant l'objet d'une procédure de contrôle interne approuvée par un organisme officiel de contrôle ou de certification il peut être attribué à ces pertes des valeurs forfaitaires qui sont alors précisées dans des documents annexes.

2.1. Perte de tension due au retrait du béton :

C'est le complément du retrait effectué avant la mise en précontrainte des produits, donné par ;

$$\Delta\sigma_{r2} = E_p \varepsilon_r [1 - r(t_1)]$$

A un temps intermédiaire « t_i », elle vaut :

$$\Delta\sigma_{r2}(t_1, t_i) = E_p \varepsilon_r [r(t_i) - r(t_1)]$$

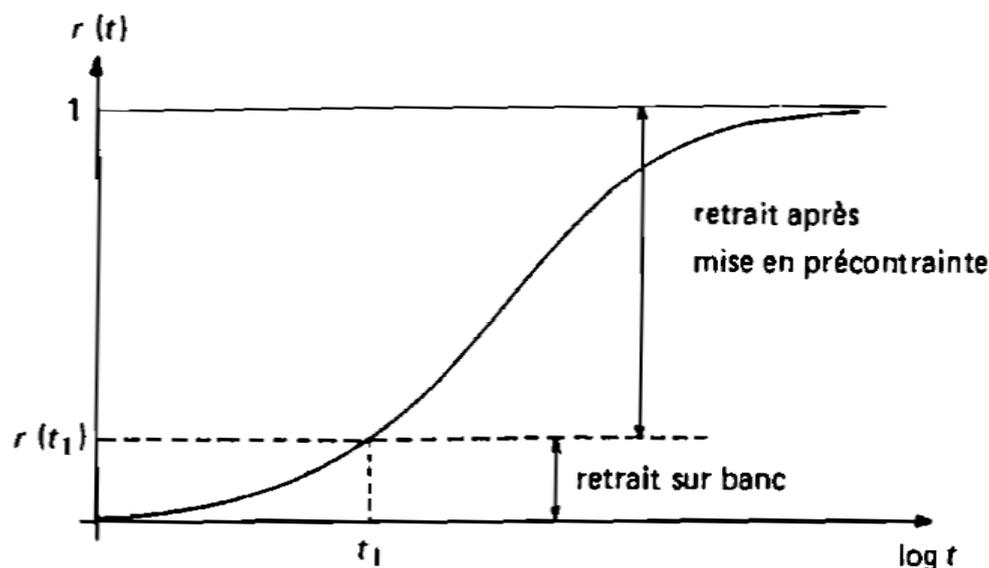


Fig.8 : Effet différé du retrait

2.2. Perte de tension due au fluage du béton :

Dans le cas la pré-tension nous avons généralement des compressions très fortes dans le béton à la mise en précontrainte et des contraintes modérées en service. il faut appliquer l'annexe 1

du BPEL pour tenir compte de la diminution assez importante de la contrainte de compression.

La déformation par fluage se calcul en faisant la somme des déformations sous contraintes résiduelles, déformation sous supplément des contraintes résiduelles (appliquées pendant des temps limités), des déformations dites de retour de fluage consécutives aux décompressions successives.

La perte de tension par fluage s'obtient par une méthode simplifiée (annexe 1 du BPEL), basée sur l'égalité des déformations de l'acier du béton, soit :

$$\Delta\sigma_{fl} = E_p \varepsilon_{fl}$$

Donc pour calculer les déformations il faut prendre la contrainte dans le béton au niveau du câble moyen, avec sa valeur à la phase considérée.

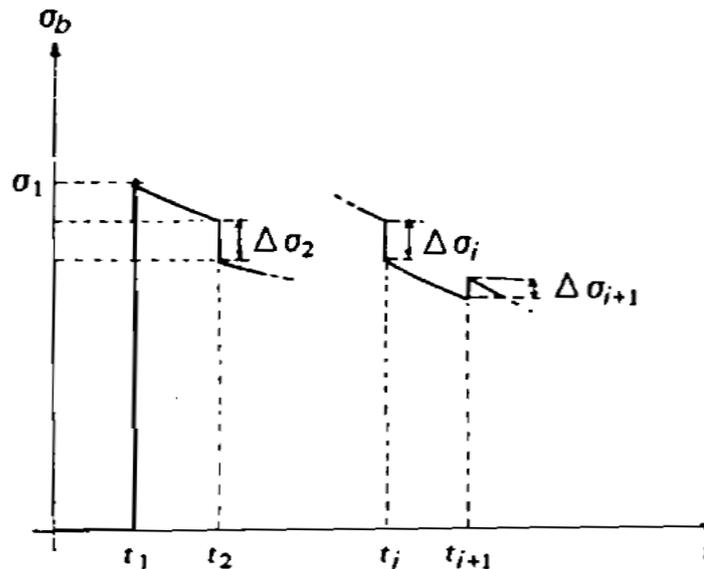


Fig.9 : Effet du fluage dans chaque phase

La perte par fluage est déterminée par :

$$\Delta\sigma_{fl}(t_i, t_{i+1}) = E_p \varepsilon_{fl}(t_i, t_{i+1})$$

2.3. Perte due à la relaxation des armatures

Comme la relaxation est fonction de la tension initiale de l'armature, il est donc possible de tracer un fuseau de courbes de relaxation pour diverses tensions initiales (voir figure). Les variations de tension vont avoir pour effet de déplacer l'évolution de la relaxation d'une courbe sur une autre.

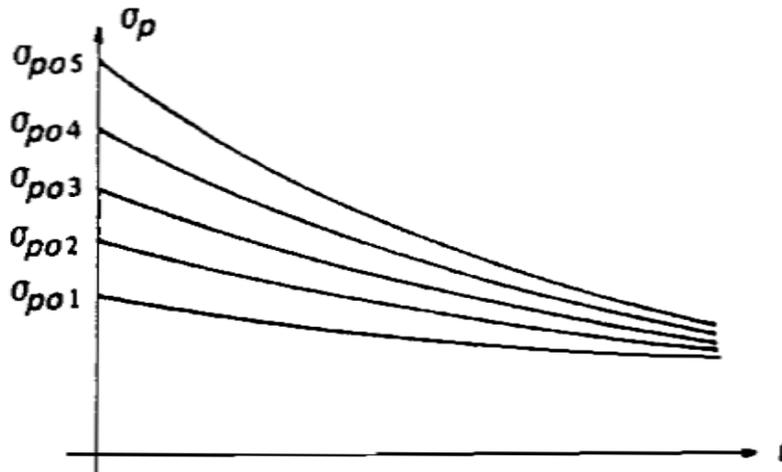


Fig 10; variation de $\sigma_p(t)$ par relaxation selon σ_{p0}

La méthode de calcul de la relaxation (annexe 2 , BPEL), consiste à calculer la relaxation phase par phase en considérant que dans chacune, elle suit la courbe correspondant à la relaxation sous une tension initiale égale à la tension du début de phase augmentée des relaxations déjà effectuées.

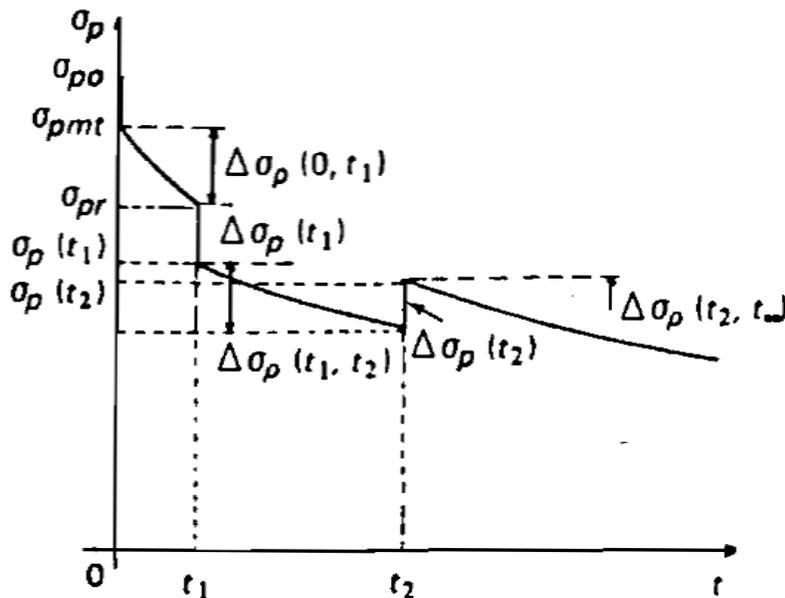


Fig 11; Pertes par relaxation dans chaque phase

La relation permettant la détermination des pertes due à la relaxation est :

$$\Delta\sigma_\rho(t_2, t_\infty) = k_1 \rho_{1000} \left(\frac{t_{e2} + t_\infty - t_2}{1000} \right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} e^{\frac{10\mu-7.5}{k_2}} [\sigma_p(t_2) + (\Delta\sigma_\rho(0, t_1) + \Delta\sigma_\rho(t_1, t_2)) - [\Delta\sigma_\rho(0, t_1) + \Delta\sigma_\rho(t_1, t_2)]]$$

2.4. Pertes différées totale :

Les pertes différées doivent être calculées phase par phase, et dans chaque phase on doit tenir compte de la concomitance des phénomènes par la formule :

$$\Delta\sigma_{dj}(x) = \Delta\sigma_{rj} + \Delta\sigma_{flj}(x) + \Delta\sigma_{\rho j}(x) - 2 \frac{\Delta\sigma_{\rho j}(x) [\Delta\sigma_{rj} + \Delta\sigma_{flj}(x)]}{\sigma_{pij}(x)}$$

J : phase de la perte différée ($j \geq 2$).

$\Delta\sigma_{rj}$: perte par retrait dans la phase « j », la loi $r(t)$ permet ce calcul.

$\Delta\sigma_{pj}(x)$: perte par fluage dans la phase « j », les variations de contrainte dans le béton.

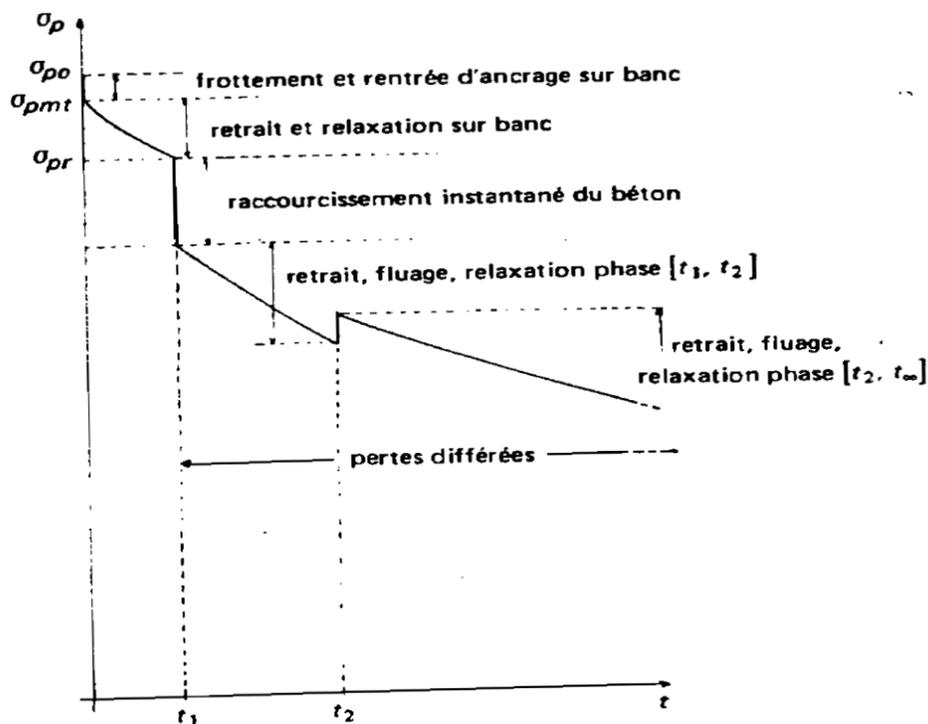


Fig 12 ; Evolution de tension

La tension finale est :

$$\sigma_{p\infty}(x) = \sigma_{pi}(x) - \Delta\sigma_d(x)$$

$\Delta\sigma_d$: est la somme des pertes différées de chaque phase et des variations des tensions entre chaque phase.

3. Cas d'un traitement thermique du béton :

Pour la fabrication d'éléments précontraints par pré-tension, il est fréquent que le béton soit soumis à un traitement thermique en vue d'accélérer son durcissement et de permettre ainsi son démoulage précoce et un raccourcissement du cycle de fabrication.

Dans ce cas traitement thermique entraîne :

- L'élévation de température entraîne une perte importante dite « perte thermique » ;
- La modification des pertes du béton par retrait (pratiquement nulle), et fluage ;
- La perte de relaxation est accélérée par l'effet de la température ;

Il en résulte une chute sensible de tension des armatures avant la mise en précontrainte de l'élément et une réduction de la perte différée due à la relaxation de l'acier.

Le traitement thermique est caractérisé par un cycle qui se compose de 4 phases ;

- (1) Conservation du béton (pré prise).
- (2) Montée en température.
- (3) Phase isotherme.
- (4) Refroidissement.

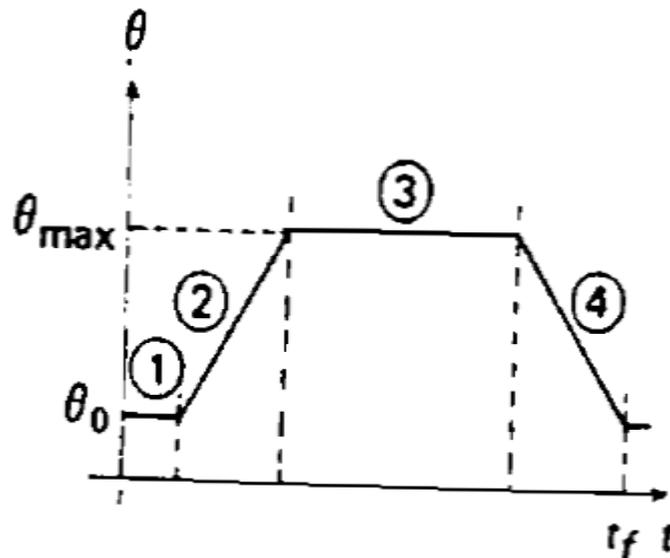


Fig.12 ; Schéma d'un cycle de traitement thermique.

3.1. Pertes instantanées :

3.1.1. Perte d'origine thermique :

Cette perte est égale à : $\Delta\sigma_{\theta_{max}} = E_p \alpha_c (\theta_{max} - \theta_0) (1 - \lambda)$

Avec :

- α_c : coefficient de dilatation thermique du béton ;
 - θ_0 : température à la mise en tension ;
 - θ_{max} : température maximale subie par l'armature ;
 - λ : coefficient compris entre 0,10 et 0,50, dont la valeur, en l'absence de résultats expérimentaux doit par prudence être prise égale à 0,10.
- 3.1.2. Perte par relaxation de l'acier sur le banc :

L'augmentation de la température accélère la relaxation des armatures tendues, mais ne modifie pas sa valeur finale.

Soit $\Delta\sigma_{relt}$, la part de la perte par relaxation qui s'effectue sur le banc avant relâchement de l'armature.

Pour estimer $\Delta\sigma_{relt}$, on peut appliquer la formule du BPEL en décalant l'origine des temps d'une durée fictive équivalente (temps équivalent) :

$$t_{eq} = t_{pa} \cdot 1.14^{(\theta_{max} - 20)}$$

$$t_{pa} = \frac{1}{\theta_{max} - 20} \int_0^{t_f} (\theta - 20) dt$$

Avec ;

θ_{max} : température maximale du béton au cours du cycle en °C ;

t_{pa} : Durée moyenne conventionnelle du palier isotherme.

La perte par relaxation avant relâchement des armatures est :

$$\Delta\sigma_{relt} = k_1 \rho_{1000} \left(\frac{t_r + t_{ep}}{1000} \right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} e^{\frac{10\mu - 7.5}{k_2}} \sigma_{pmt}$$

t_r : temps de relâchement des armatures ($t_r < t_f$)

t_f : temps de fin de cycle thermique.

Pour ce calcul, la tension à considérer est la tension σ_{pmt} de l'armature après blocage sur le banc. Avec des armatures TBR et des traitements thermiques courants, on trouve que $\Delta\sigma_{relt}$ peut atteindre 50% ou même 70% de la relaxation finale, ce qui montre l'importance de ce terme.

▪ 3.1.3. Perte par retrait du béton :

Un traitement thermique devant être fait en atmosphère saturé en vapeur d'eau il n'apparaît aucun retrait pendant le traitement thermique.

3.2. Pertes de tension différées :

En plus de la perte par relaxation, le traitement thermique a une influence sur les pertes par retrait et fluage.

La relation entre ces phénomènes naturels et leurs valeurs en cas de traitement thermique se fait par un temps équivalent défini par :

$$t_{eq} = t_{pa} \cdot 1.08^{(\theta_{max} - 20)}$$

- **3.2.1. Perte par retrait :**

Elle devient:

$$\Delta\sigma_r = E_p \varepsilon_r (1 - r(t_f + t_{eq})) \quad (t_f \sim t_r)$$

- **3.2.2. Perte par fluage :**

Elle se modifier de la façon suivante à un temps $t > t_1$:

$$\varepsilon_{fl}(t) = \varepsilon_{ic1} k_{fl}(t_1 + t_{eq}) f(t - t_1)$$

Avec $\varepsilon_{ic1} = \frac{\sigma_{bi}}{E_{bi28}}$

- **3.2.3. Perte par relaxation :**

Le complément de relaxation $\Delta\sigma_{\rho 2}$ se calcule par détermination de relaxation totale $\Delta\sigma_{\rho}$ sous tension initiale, $\Delta\sigma_{\rho i}(x) + \Delta\sigma_{\rho 1}$ et pour un temps équivalent t_{e1} .

On a alors :

$$\Delta\sigma_{\rho 2} = \Delta\sigma_{\rho} - \Delta\sigma_{\rho 1}$$