**CHAPITRE II: Pertes de Précontrainte**

##

## II.1 DEFINITION

La force de précontrainte dans un câble varie à la fois dans l’espace (le long de l’abscisse du câble) et dans le temps.

La tension en un point du câble dans la structure diffère de la force du vérin avec lequel le câble a été tendu, du fait d’un certain nombre de pertes qui font baisser significativement la tension du câble. C’est d’ailleurs à cause de ces pertes qu’on est obligé d’utiliser des câbles à très haute limite d’élasticité.

On regroupe habituellement les pertes en deux familles :

**II.2 PERTES INSTANTANEES**

Il s’agit des pertes qui se produisent à la mise en tension du câble. Elles comportent :

* Pertes dues au frottement
* Pertes aux ancrages
* Par abus de langage, on classe également dans les pertes instantanées, l’ensemble des pertes qui se produisent « à court terme » durant le processus de construction de l’ouvrage :
* Pertes par non simultanéité des mises en tensions des différents câbles.
* Pertes par application de charges permanentes postérieurement à la tension.

**II.3 PERTES DIFFEREES**

On appelle pertes différées, les pertes qui se développent dans le temps :

* Pertes dues au retrait du béton
* Pertes dues au fluage du béton
* Pertes dues à la relaxation des câbles.

En post tension, l’effort de précontrainte varie à la fois :

* dans l’espace, avec l’abscisse le long du câble, du fait de fortement ;
* dans le temps, à cause du retrait et du fluage du béton et de la relaxation des aciers.

En pré tension, l’effort de précontrainte varie principalement dans le temps du fait de l’application successive des actions.

## II.4 TENSION A L'ORIGINE

C’est la tension qu’on impose aux armatures devant un ancrage actif et le dispositif d’épanouissement associé (trompette ou tromplaque), côté béton, au moment de la mise en tension, avant le transfert de l’effort à l’ancrage Les efforts de précontrainte sont variables le long des armatures et dans le temps. Ils sont évalués à partir de la valeur probable de la tension à l'origine, notée « po » .Ils ne doivent pas non plus dépasser la plus faible des valeurs suivantes :

Min (0,80 fprg, 0 ,90 fpeg) en post-tension

Min (0,85 fprg , 0,95 fpeg) en pré-tension

## II.5 PERTES DE TENSION (EN POST-TENSION)

## II.5.1 Pertes de tension instantanées

Dans le cas de la post-tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes de tension instantanées qui sont :

* les pertes de tension par frottement ;
* les pertes de tension par recul de l'ancrage ;
* les pertes de tension par déformations instantanées du béton.

La valeur totale de ces pertes de tension instantanées, dans une section d'abscisse « x » de l'armature, est notée pi (x).

La tension au point d'abscisse x, après pertes de tension instantanées, appelée tension initiale, est notée : **pi (x) = po - pi (x)**

**II.5. 1.1 Perte de tension par frottement**

Ce type de perte se produit par fortement des câbles sur la gaine lors de la mise en tension.

Le tension appliquée po à l’origine diminue entre le point d’application et un point donnée d’abscisse « x » (Figure II.1),sa nouvelle valeur est donnée par la relation :

**p(x)po e - (f  +  x)**

po : La tension à l’origine ;

e : La base des logarithmes népériens ;

f : Coefficient de frottement en courbe (rd-1 ) ;

 : Somme des déviations angulaires arithmétiques du câble sur la distance x (rd) ;

: Coefficient de frottement en ligne (m-1 ) ;

σp0



x

x : La distance de la section considérée (m).


## Figure II.1 : Tension par frottement

La perte de tension par frottement est estimée par la formule:

**frot (x)= po - p (x)= po (1-e -(f  +  x))**

Si l’exposant est faible, on peut admettre la relation suivante :

**frot (x)  po (f  +  x)**

**II.5. 1.2 Perte de tension par recul de l'ancrage**

Cette perte de tension résulte du glissement de l'armature par rapport à son ancrage, du tassement ou de la déformation de l'ancrage.

Son influence diminue à partir de l’ancrage jusqu’à s’annuler à une distance « d » à partir de laquelle la tension demeure inchangée.

Le glissement à l’ancrage « g », qui dépend du type d’ancrage, est donnée par la relation :



En pratique, en assimilant les branches d’exponentielle à des droites, la perte par recule d’ancrage peut être évaluée à partire de l’aire d’un tringle dans ce cas, on a :

**

 

La longueur du glissement du bloc d’ancrage est donnée par :

*d*=

 *gE lAB*

*pA*\_*pB*

## II.5. 1.3 Perte de tension par déformations instantanées du béton

L’application de toute contrainte sur le béton entraîne sa déformation instantanée. S’il se raccourcit sous l’effet d’une compression, les câbles sous tension qui lui sont incorporés se raccourcissent de la même valeur et, de ce fait, perdent de leur tension.

Lors de la mise en tension d’une famille de n câbles, la mise en tension ne peut s’effectuer que câble après câble. La contrainte apportée par chacun d’eux vaut :σb/n, avec σb contrainte finale sur le béton.

**∆σracc (x) = n-1/2n. Ep/Eij .σb(x)**

avec :

n : nombre de gaines

EP : module d’élasticité des armatures ;

Eij : module instantané du béton au jour « j » ;

b(x) : contrainte normale du béton :



**P= (po - frot - recu) Ap**

e(x) : excentricité du câble de précontrainte.

## Remarque

Le BPEL préconise de prendre un coefficient « 2 » pour les variations de contraintes dues à la contrainte relative à la phase de mise en tension et aux actions permanentes appliquées simultanément à cette mise en tension, et la valeur de « 1 » pour les variations de contrainte dues aux actions permanentes postérieures à cette phase de précontrainte, y compris celles dues aux armatures de précontrainte mises en tension ultérieurement.

## II.5.2 Pertes de tension différées

Dans le cas de la post-tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes de tension différées qui 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

La valeur totale de ces pertes de tension différées, dans une section d'abscisse « x » de l'armature, est notée pd (x).

La tension au point d'abscisse x, après pertes de tension instantanées, appelée tension finale, est notée : **pf (x) = po - pi (x) - pd (x)**

## II.5.2.1 Perte de tension due au retrait du béton

Le raccourcissement du béton dû au retrait entraîne dans les aciers un raccourcissement égal. Il en résulte une diminution de tension dans les câbles de précontrainte, dont laValeur est :

**r= Ep×ɛr[r(t) – r (t1) ]**

r : retrait total du béton

t1 : l'âge du béton au moment de sa mise en précontrainte

r(t) : une fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps

Très souvent, on peut négliger r(t1) devant 1, ce qui conduit à la **formule simplifiée** suivante :

## ≈ Ep×ɛr

## II.5.2.2 Perte de tension due au fluage du béton

Lorsqu'une pièce est soumise, à partir de sa mise en précontrainte, à des actions permanentes subissant des variations dans le temps, la perte finale de tension due au fluage du béton est prise égale à :

**fl = (bM + bF ) Ep /Eij**

bM : contrainte maximale dans le béton ;après les pertes instantanées

bF: contrainte finale dans le béton; après les pertes différées

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

Si **bM ≤1,5 bF** , il est loisible, à titre de simplification, d'évaluer la perte finale de tension due au fluage du béton à :

**fl = 2,5 bF Ep /Eij**

et comme Ep /Eij  6, on aura donc :

**fl = 15 bF**

## II.5.2.3 Perte de tension due à la relaxation de l'acier

La perte finale de tension due à la relaxation de l'acier est donnée par :



pi(x): Contrainte dans les armatures de précontrainte; après les pertes instantanées.

1000 : Coefficient de relaxation à 1000 h

fprg : Contrainte limite garantie à la rupture

µ0 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.

## II.5.2.4 Perte de tension différée totale

La formule donnée pour la relaxation suppose que la longueur de l’armature est constante ; or la perte par relaxation est diminuée par l’effet du raccourcissement due au retrait et fluage du béton.

Pour tenir compte de cette interaction, le BPEL propose de minorer forfaitairement la relation par le coefficient 5/6.

Ainsi, La perte différée finale est prise égale à **:σd = σr+σfl + 5/6 σrel**

Lorsqu'il est nécessaire de tenir compte de l'évolution des pertes de précontrainte en fonction du temps, on peut admettre que la valeur totale des pertes différées d(t) , évaluée « j » jours après la mise en tension du groupe d'armatures considéré, suit la loi suivante :

**d(t) = r(j) d**

La fonction r(j) étant identique à la fonction r(t)

**II.6 LA PRECONTRAINTE PAR PRE-TENSION OU PAR FILS ADHERENTS**

Les armatures de précontrainte (fils ou torons) sont tendues avant bétonnage (dans des bancs de précontrainte de plus de 100 m de longueur) à l'aide de vérins entre deux massifs d'ancrage. Le béton frais est mis au contact des armatures. Lorsqu'il a acquis une résistance suffisante (la montée en résistance peut être accélérée par étuvage), on libère la tension des fils, qui se transmet au béton par adhérence et engendre par réaction sa mise en compression (les fils détendus veulent reprendre leur longueur initiale, mais leur adhérence au béton empêche ce raccourcissement et l'effort qu'il a fallu exercer pour les tendre se transmet au béton).

Cette technique est uniquement appliquée à la **PREFABRICATION** : Elle permet de réaliser des poutrelles, des poteaux, des poutres, des dalles alvéolées, des prédalles.

On enregistre d’abord les pertes instantanées

Dans ce type de précontrainte, on commence par déterminer une première perte de précontrainte, dès la mise en tension où l’armature, par suite du glissement g de cette armature à l’intérieur des clavettes qui la maintiennent et qui sont elles mêmes à l’intérieur d’un cylindre d’ancrage présente une perte :

La perte g s’écrit **:σg= Ep .g/l**

Ep : est le module d’élasticité de l’acier de précontrainte (200000 MPa).

L : est la longueur du banc de précontrainte

g : est la rentrée d’ancrage à la détension de l’armature de l’ordre de 2mm elle est définie pour chaque type d’ancrage dans la notice technique.

**II.6.1 Perte dûe au retrait du béton sur le banc de préfabrication**

**σr = Ep. ɛr (t0, t)**

t :est l’âge du béton au moment de la mise en précontrainte effective de l’élément préfabriqué.

**II.6.2 Perte dûe à la relaxation de l’acier sur le banc**

Elle s’exprime en fonction de la tension σpmt (x) de l’armature après son blocage à l’ancrage, soit: **σpmt= σ0 - σg**

Et par suite : **σp= 6/100× ρ1000× (σpmt/fprg - µ0). σpmt (x).**

Dans la précontrainte 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 un démoulage précoce. Dans ce cas:

* La perte par retrait est pratiquement nulle,
* La perte par relaxation est accélérée par l’effet de la température,
* La perte d’origine thermique est évaluée à :

**σɵmax= Ep.αc. (Ɵmax- θ0)(1-λ)**

αc: est un coefficient pris égal à 0.10

θ0 :et θmax sont les températures de l’armature à la mise en tension, puis maximale.

Sur le banc, la perte suplémentaire par relaxation, par suite du traitement thermique, peut atteindre 50 à 70 % de la relaxation finale à 1000 heures, avec des armatures TBR. La perte σρ est ici très importante.

**II.6.3 Perte par deformation instantanée du béton**

**σc = Ep. σcj/Eij (1+ Ki)**

Où **Ki =0** si la contrainte σcj de compression sur le béton est inférieur ou égale 0.5 fcj et

Ki = 4(σcj/fcj – 0.5)2

Si σcjest compris entre 0.5 Fcj et 0.66 Fcj.

Aprés ces pertes instantanées, la tension initiale du fil ou toron est:

**Ʃpi = σp0 - Ʃσp** avec **Ʃσp = σg + σp+ σθmax + σc**

IL faut maintenant y rajouter les pertes différées dues au retrait, au fluage, à la relaxation au traitement thermique avec deformation instantanée dûes aux phases de chargement.

**I.6.4 La perte par retrait total**

Conduit à enregistrer une valeur du retrait variant de 1,5 à 4 × 10-4 suivant les regions Ep= 200000 MPa, la chute de contrainte dans l’acier peut ainsi être σr= ɛr × Ep et varier de 30 à 80 MPa.

**II.6.5 La perte par fluage différé**

Correspond à deux fois le raccourcissement instantané, ce qui théoriquement correspond à trios fois le raccourcissement instantané, il est cepondant admis que la perte finale dûe au fluage du béton est :

σfl= 2.5. σc. Ep/ Eij

σc: est la contrainte finale du béton dans la section, au niveau des armatures de précontrainte.

**II.6.6 La perte dûe à la relaxation finale**

Pourra correspondre à la formule note précédemment, mais en y introduisant: σpi au lieu de σpmt car σpi, en un point de l’armature, résultante de σp0 diminuée de toutes les pertes instantanées et éventuellement d’une partie déjà note des pertesq par retrait et par relaxation, d’où la formule

**σp = 0.06 ρ1000 (σpi/fprg - µ0) σpi**

Nous pouvans maintenant indiquer que la perte finale (initiale et différée) est prise égale à :

**σd = σ+σfl + 5/6 σp**

Et que par consequent la valeur finale σfin de la tension de l’armature appelée le plus souvant valeur probable de la précontrainte s’exprime à partir de la tension initiale σp0.

**σfin = σpi - σd**

C’est la valeur prise en pré-tension à armatures rectilignes mais dans le cas d’utilisation

D’armatures non rectilignes utilisant des déviateurs, seuls des essays pourront permettre de determiner la perte par frottement dûe aux déviateurs. Cependant si la mise en tension des fils ou torons est effectuée après mise en tension rectiligne suivie d’une deviation vertical.

## EXERCICE 3

Soit une poutre de 42 m de longueur, précontrainte par des câbles formés de torons à très basse relaxation avec une relaxation garantie à 1000 heurs égale à 2.5 % , de limite d’élasticité 1584 MPa et de contrainte de rupture garantie 1775 MPa. La mise en tension a lieu à 13 jours sur un béton de résistance fc28 = 35 MPa.

Le retrait final est égal à εr = 3.10-4 . le glissement de l’ancrage est de 5 mm,

les coefficients de frottement valent : f = 0.18 rd-1, ϕ = 0.0017 m-1

La contrainte au centre de gravité des armatures due à l’action des charges permanentes existantes à la mise en tension et à l’action de la précontrainte vaut : 7.5 MPa . La contrainte supplémentaire apportée par les actions permanentes appliquées à 50 jours vaut 1 MPa. La contrainte finale valant 7.2 MPa.

Pour la section à mi travée (x=21m , α =0.12 rd), déterminer :

* *la tension à l’origine*
* *la perte due au frottement*
* *la perte due au recul d’ancrage*
* *la perte due à la déformation instantanée du béton*
* *la perte instantanée*
* *la perte due au retrait du béton*
* *la perte due au fluage du béton*
* *la perte due à la relaxation des aciers*
* *la perte différée*
* *Déduire la valeur de :*
	+ *La contrainte finale probable*
	+ *La contrainte finale maximale*
	+ *La contrainte finale minimale*