



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Sidaty Eboubekrine

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Structures

Thème

**ANALYSE COMPARATIVE DES PERTES DE PRÉCONTRAINTE EN
POST-TENSION SELON LES NORMES JAPONAISE (JSCE-SSCS)
ET FRANCAISE (BPEL)**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr.Lakhdari.M. Fatah	M.A.A	Président
M ^{me} Benmiloud Meriem	M.A.A	Examinatrice
Mr. Zaidi Ali	Pr	Rapporteur

Promotion : Septembre – 2023

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail a :

A celui qui m'a soutenue tous au long de ce projet : mon encadreur Mr Zaidi Ali

A tous ma famille

A mes amis.

Aux vrais savants, modestes au Dieu.

REMERCIEMENTS

Je vous adresse tous mes remerciements pour le temps que vous m'avez accordé lors de mon travail et qui m'ont orienté dans mes recherches le Dr. ZAIDI ALI.

Je n'aurais pas acquis certains savoir-faire essentiels sans votre encadrement et la confiance dont vous avez fait preuve à mon égard.

Nous remercions également le chef de département de Génie civil, tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger et d'évaluer notre travail. Nous remercions ainsi tout le personnel du staff administratif pour leurs services et leur générosité.

Résumé :

L'utilisation de la précontrainte en génie civil a connu une augmentation remarquable au cours des dernières décennies, particulièrement dans les pays développés, où des normes et des codes ont été mis à la disposition des ingénieurs concepteurs. Cependant, les ingénieurs des pays en développement sont toujours confrontés à l'absence de codes respectant les normes environnementales de leurs propres pays. Dans cette étude on examine les pertes de précontrainte par post-tension en utilisant le code Japonais (JSCE-SSCS) et le code Français (BPEL91). Des applications numériques sont utilisées pour effectuer une analyse comparative des pertes de précontrainte selon ces deux codes. Les résultats de l'analyse de cette étude permettent de conclure par des propositions et des recommandations qui seront ajoutées à la banque de données créée pour l'établissement d'un code algérien dans ce domaine.

Mots clés : pertes, précontrainte, Analyse, codes

Summary:

The use of prestressed of concrete in civil engineering has seen a remarkable increase in recent decades, in developed countries, where standards and codes have been made available to design engineers. However, engineers in developing countries are still faced with the lack of codes that meet their own country's environmental standards. In this study we investigate examines and digitizes prestressed losses by post-tension using the Japanese code (JSCE-SSCS) and the French code (BPEL91). Numerical applications are used to perform a comparative analysis of prestressed losses based on these two codes. The results of the analysis of this study allow to conclude with proposals and recommendations that will be added to the database created for the establishment of an Algerian code in this area.

Keywords: losses, prestressed, analysis, codes

خلاصة:

شهد استخدام الإجهاد المسبق في الهندسة المدنية زيادة ملحوظة في العقود الأخيرة، خاصة في البلدان المتقدمة، حيث تم توفير المعايير والمدونات لمهندسي التصميم. ومع ذلك، لا يزال المهندسون في البلدان النامية يواجهون عدم وجود مدونات تحترم المعايير البيئية لبلدانهم. في هذه الدراسة، ندرس الضياعات في الإجهاد المسبق عن طريق الجهد اللاحق باستخدام المعيار الياباني (JSCE-SSCE) والمعيار الفرنسي (BPEL91). تستخدم التطبيقات الرقمية لإجراء تحليل مقارنة لضياع الإجهاد المسبق وفقاً لهذين المعيارين. نتيج لنا نتائج تحليل هذه الدراسة أن نختتم باقتراحات وتوصيات ستضاف إلى قاعدة البيانات التي تم إنشاؤها لإنشاء مدونة جزائرية في هذا المجال .

الكلمات المفتاحية: الضياع، الإجهاد المسبق، التحليل ، الرموز

NOTATONS :

1) Notations relatives au code BPEL :

f_{cj}	Résistance à la compression à jours
f_{c28}	Résistance à la compression à 28 jours
f_{tj}	Résistance à la traction
σ_b	Contrainte-déformation du béton
ε_{b0}	Déformation au pic de contrainte
E_c	Module de Young
f_{bu}	La contrainte admissible du béton à la compression
F_r	Force de rupture de l'armature de précontrainte
F_e	Force de limite d'élasticité de l'armature de précontrainte
f_{prg}	Contrainte de rupture garantie de l'armature de précontrainte.
f_{peg}	Contrainte limite élastique garantie de l'armature de précontrainte.
$\Delta\sigma_{frott}(x)$	Perte de tension due au frottement
$\Delta\sigma_{pi}(x)$	Perte de tension due au recul de l'ancrage.
f	Coefficient de frottement en courbe (rd^{-1})
φ	Coefficient de frottement par unité de longueur (m^{-1}),
x	Longueur de câble entre l'origine et la section étudiée (m)
σ_{p0}	Tension a l'origine
g	Somme des pertes d'allongement
E_p	Module de Young de l'armature de précontrainte
A_p	Aire de la section transversale de l'armature de précontrainte
$\Delta\sigma_{racc}(x)$	Perte de tension par déformations
E_{ij}	Module de déformation longitudinale du béton à l'âge de j jours.
$\Delta\sigma_r$	Perte due au retrait
ξ_r	Retrait total du béton
t_0	Age du béton a la mise en tension
$r(t):$	Une fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps
r_m	Est le rayon moyen de la section
$\Delta\sigma_{fl}(t)$	Perte de tension due au fluage du béton
σ_b^F	Étant la contrainte finale et la contrainte maximale
σ_b^M	Contrainte permanente maximale dans le béton au ni du câble moyen

j	l'âge du béton lors de sa mise en tension.
$\Delta\sigma_p$	Perte de tension due à la relaxation de l'acier
ρ_{1000}	Coefficient de relaxation des aciers de précontrainte à 1000 h (en %).
μ_0	Coefficient qui tient compte du taux en delà duquel il n y a pas de relaxation, il est égale

2) Notations relatives au code JSCE-SSCE :

f'_{ck}	Résistance à la compression
f_{tk}	Résistance à la traction
ρ'_c	Contrainte-déformation
ε'_{max}	Valeur maximale de la contrainte de compression
ε'_p	Contrainte plastic
k	<i>taux</i> Résiduel de rigidité élastique
E_c	Module de Young
f_{yk}	La limite d'élasticité
f_{puk}	Contrainte de rupture garantie de l'armature de précontrainte.
f_{pyk}	Contrainte limite élastique garantie de l'armature de précontrainte.
$p(x)$	Force de précontrainte a la section considérée après pertes instantanées
p_i	Force de précontrainte à la mise en tension à l'extrémité tendue du câble
$\Delta p_i(x)$	Perte de la force de précontrainte immédiatement après mise en tension
μ	Coefficient de frottement par radian de déviation angulaire
α	Déviation angulaire (radian)
x	Longueur de l'armature
Δp	Perte de force de traction au recul de

	l'armature
E_p	Module de Young de l'armature de précontrainte
A_p	Aire de la section transversale de l'armature de précontrainte
$\Delta\sigma_p$	Perte de précontrainte dans le câble de précontrainte
σ'_{cpg}	Contrainte de compression du béton due à la précontrainte au centre de gravité de câble
E_c :	Module d'Young du béton
E_p :	Module d'Young du câble externe
P_e	Force de précontrainte dans le câble extérieur déterminée en tenant compte de l'influence du fluage et du retrait
ρ_p	Rapport des sections transversales de l'armature (câble) au béton
φ	Coefficient de fluage du béton
χ	Facteur de vieillissement
A_c	Aire de la section transversale du câble externe
A_p :	Aire de la section totale du beton
$\Delta\varepsilon_c$	Perte de tension par fluage et retrait du béton
$\Delta\sigma_{pr}$	Perte de tension due à la relaxation de l'acier
γ	Coefficient de relaxation apparente de l'acier de précontrainte
σ_{pt} :	Contrainte de traction de l'acier de précontrainte juste après mise en tension
γ_0	oefficient net de relaxation de l'acier de précontrainte
$P_t - P_e$	Force de traction dans l'armature externe immédiatement après mise en tension

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. GENERALITE :.....	1
I.1. HISTORIQUE :.....	1
I.2. MODES DE LA PRECONTRAINTE :.....	2
I.2.1. PRECONTRAINTE PAR POST TENSION :.....	2
I.2.2. PRECONTRAINTE :.....	4
I.3 AVANTAGE DU BETON PRECONTRAINTE :.....	6
I.3.1 DEGRE DE PRECONTRAINTE :.....	6
I.4 APPLICATION DE LA PRECONTRAINTE :.....	7
I.5 OBJECTIVE :.....	9
CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	10
II.1 Introduction :.....	10
II.2. Béton :.....	10
II.2.1 Caractéristiques mécaniques du béton.....	10
II.2.1.2 Résistances caractéristiques à la traction.....	12
II.2.1.3 Module de déformations longitudinales.....	12
II.2.1.4 Coefficient de Poisson.....	15
II.2.1.5 Contraintes admissibles.....	15
A.2) Etats limites ultime (ELU).....	16
B.2) Etats limites ultime (ELU).....	18
II.3) Les aciers.....	19
A) Selon BPEL :.....	19
B) Selon JSCE-SSCS :.....	22
CHAPITRE III PERTES DE PRECONTRAINTE PAR POST-TENSION.....	27
III.1. Introduction :.....	27
III.2. GENERALITES :.....	27
III.2.1 Définition de pertes :.....	27
III.2.2 TENSION A L'ORIGINE :.....	28
A) Selon le code BPEL.....	28
B) Selon JSCE.....	28
III.3. PERTES DE TENSION EN PRECONTRAINTE PAR POST TENSION :.....	29
III.3.1. Pertes de tension instantanées :.....	30
A) Selon BPEL.....	30
B) Selon JSCE-SSCS :.....	31

III.3.1.1. Pertes de tension par frottement :.....	31
a) Effet de la courbure de la gaine.....	31
b) Frottement.....	32
c. Déviations parasites.....	33
e) Prescriptions réglementaires	33
A) Selon BPEL.....	33
B) Selon JSCE-SSCS :.....	36
III.3.1.2. Perte de tension par recul de l'ancrage :.....	38
A) Selon BPEL :.....	38
B) Selon JSCE-SSCS :.....	40
III.3.1.3. Perte de tension par déformations instantanées du béton	43
A) Selon BPEL :.....	43
B) Selon JSCE-SSCS :.....	44
III.3.2. Pertes de tension différées :.....	45
A) Selon BPEL :.....	45
A1. Perte de tension due au retrait du béton.....	45
A2.Perte de tension due au fluage du béton :.....	47
A3. Perte de tension due à la relaxation de l'acier :.....	48
A4. Évaluation de la valeur des pertes de tension différées :.....	48
B) Selon JSCE-SSCE.....	49
B1. Perte de tension par retrait du béton.....	49
B.2 Perte de tension par fluage du béton.....	50
B.3. Perte de tension due à la relaxation de l'acier :.....	52
B4. Evaluation de la valeur des pertes de tension différées	55
CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE.....	56
IV.1 INTRODUCTION :.....	56
IV.2 PERTE INSTANTNEES :.....	56
IV.2.1 Perte par frottement	56
IV.2.2 Perte par recul d'ancrage :.....	59
IV.2.3 Perte par déformations instantanées du béton :.....	59
IV.3 Pertes différées :.....	60
IV.3.1 Perte par retrait :.....	60
IV.3.2 Perte par fluage :.....	61
IV.3.3 Perte par relaxation :.....	62
IV.4 Applications numériques.....	64

IV.4.1 EXEMPLE 1.....	64
A.1) Calcul des caractéristiques de la section du béton ‘T’.....	64
A.1) Calcul des pertes :.....	65
A.2.1 Calcul des pertes de section en T.....	67
A.2.1.1 Calcul des pertes selon le code BPEL.....	67
a.1) Perte par frottement.....	68
a.2) Perte par recul d’ancrage.....	68
a.3) Perte par déformation instantanée du béton.....	68
b) Les pertes différées.....	69
b.1) Perte par retrait.....	69
b.2) Perte par relaxation.....	69
b.3) Perte par fluage.....	70
c) Evaluation des pertes totales selon le code BPEL.....	70
A.2.1.2) Calcul des pertes selon les règlements JSCE-SSCE.....	71
a) les pertes instantanées.....	72
a.1) perte par frottement.....	72
a.2) Perte par recul d’ancrage.....	72
a.3) Perte par déformations instantanées du béton.....	73
b) Perte différées :.....	73
b. 1) Perte par retrait :.....	73
b.2 et b.3) Perte par retrait et fluage :.....	74
b.4 Pertes de relaxation :.....	74
c) Evaluation des pertes totales selon le code JSCE-SSCE.....	75
IV .4-Résultats :.....	75
A1) SECTION T.....	75
B) Comparaison et interprétation.....	77
IV.4.2 EXEMPLE 2.....	78
A) Etapes de calcul.....	78
A.2) Calcul des pertes :.....	79
B.1 Calcul des pertes de précontrainte de la section rectangulaire.....	80
B.1.1 Calcul des pertes selon le code BPEL.....	80
a) Les pertes instantanées.....	80
a.1) Perte par frottement.....	80
a.2) Perte par recul d’ancrage.....	80
a.3) Perte par déformation instantanée du béton.....	81

b) Les pertes différées.....	81
b.1) Perte par retrait.....	81
b.2).Perte par relaxation.....	81
b.3) Perte par fluage.....	82
c) Evaluation des pertes totales selon le code BPEL.....	82
A.2.1.2) Calcul des pertes selon les règlements JSCE-SSCE.....	83
a) les pertes instantanées.....	83
a.1) perte par frottement.....	83
a.2) Perte par recul d’ancrage.....	84
a.3) Perte par déformations instantanées du béton.....	84
b) Perte différées :.....	85
b.1 et b.2) Perte par retrait et du fluage :.....	85
b. 3) Perte par relaxation :.....	85
c) EVALUION DE PERTES TOTALES :.....	86
CHAPITRE V CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS.....	89
V.1 Conclusions sur l’analyse des phénomènes de pertes :.....	89
V.2 Conclusion sur l’étude comparative réglementaire :.....	91
V.3 Recommandations et propositions :.....	92

LISTE DES FIGURES

Chapitre I		
fig.	Nom	Page
1	Eléments précontraints : Cercles métalliques du tonneau et la roue d’un chariot	1
2	Procédé de précontrainte par post tension	2
3	Opérations de post –tension	3
4	Principe de précontrainte par pré-tension.	4
5	Etapas de réalisation de la précontrainte par pré-tension	5
6	Précontrainte limitée	7
7	Précontrainte totale	7
8	Précontrainte partielle	7

9	Exemple de planchers alvéolaires précontraints	8
10	Exécution des planchers par une machine à coffrage glissant (extrusion) et vue des ancrages de torons aux extrémités du banc	8
Chapitre II		
1	Diagramme contraintes-déformations du béton en compression	13
2	Le modèle hystérésis simplifiée du béton en compression selon	14
3	Modèle de comportement du béton en compression aux États limites ultime	17
4	Courbe contrainte-déformation du béton	19
Chapitre III		
1	Tension à l'origine	30
2	Effet de la courbure d'un câble	32
3	Frottement en courbe	32
4	Tracé d'un câble	33
5	Frottements le long du câble lors de sa mise en tension	34
6	Déviation angulaire de la ligne centrale de l'armature de précontrainte	36
7	Représentation de la contrainte en fonction de l'abscisse	38
8	Perte de tension due au recul d'ancrage	39
9	Répartition de l'effort de traction dans le câble interne et le câble de précontrainte non adhérent après recul d'ancrage	42
10	Répartition de la force de traction dans le câble externe après recul d'ancrage	43
11	Evolution du retrait du béton avant et après mise en tension des câbles	46
12	Modélisation du membre avec le tendon externe	53
13	Relation entre la contrainte de traction initiale et le rapport de relaxation	54
Chapitre IV		
1	Section Rectangulaire	63
2	Section en 'T'	63

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II		
Tableau II	Nom	Page
1	Module de Young (E_c) du béton	15
2	La valeur du coefficient K_t	16
3	Caractéristiques des files de précontrainte	20
4	Caractéristiques mécaniques des barres de précontrainte	21
5	Caractéristiques des torons de précontrainte.	21
6	Caractéristiques mécaniques des câbles les plus utilisés	22
7	Type de fil	23
8	Caractéristique mécanique de fil de précontrainte	23
9	Caractéristique de barres rondes	25
10	Caractéristique de barres rondes	26
11	Caractéristique déformée de barres	26
12	Caractéristique de torons	26
Chapitre III		
1	Coefficient de frottement (gaine en acier)	37
2	Coefficient de frottement de l'acier de précontrainte et du tube de protection (Armature de précontrainte, fils , torons)	37
3	Coefficients du fluage pour béton léger	49
4	Déformation du retrait du béton	50
5	Coefficient de relaxation apparente de l'acier de précontrainte, γ	53
6	Rapport de relaxation θ correspondant à la contrainte de traction initiale	54

Chapitre IV		
1	Comparaison des formules de perte par frottement	55
2	Comparaison des formules de perte par frottement	56
3	Comparaison des coefficients de frottement en ligne (m^{-1})	56
4	Comparaison d'effets des coefficients de frottement couramment utilisés.	57
5	Comparaison des formules de perte par raccourcissement élastique du béton...	58
6	Comparaison des formules de perte par retrait	59
9	Comparaison des formules de perte par fluage.	60
10	Comparaison des formules de perte par relaxation	61
11	Comparaison des valeurs de relaxation maximale à 1000 heures.	62
12	Dimensions de la section T	64
13	Caractéristiques de la section 'T',	75
14	Résultat des pertes de section T en pourcentage	75
15	Dimensions de la section rectangulaire	77
16	Caractéristiques de la section rectangulaire	78
17	Données de recul d'ancrage.	78
18	Résultat des pertes de section rectangulaire en MPa .	86
19	Résultat des pertes de section rectangulaire en %	87

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I. GENERALITE :

C'est en 1928 qu'Eugène Freyssinet et Jean Charles Séailles déposent leur premier brevet concernant « un procédé de fabrication de pièce en béton précontrainte » : une poutre est coulée dans un coffrage, dans lequel, au préalable, des câbles ont été mis sous tension lorsque le béton a durci, on libère l'extrémité des câbles qui transmettent leur contrainte au béton qui se met alors en compression.

I.1. HISTORIQUE :

La précontrainte sous toutes ses formes existe depuis longtemps. Elle est naturelle dans les arcs, voûtes, ou provoquée comme les cercles de tonneau, les roues de bicyclette, les roues de chariot, le pneu et la chambre à air,...etc.

La pratique de la précontrainte des pièces préfabriquées est très vieille. Qui sait quand et à qui appartient l'idée du cerclage des tonneaux et des roues des charrettes ? Ce sont deux exemples typiques d'éléments précontraints qui appartiennent à la période empirique de l'utilisation de la technique de la précontrainte (Fig. I-1).

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.



Fig. I- 1 Eléments précontraints : Cercles métalliques du tonneau et la roue d'un chariot

Les premières propositions de réalisation d'éléments à ce que nous appelons aujourd'hui béton précontraint sont les brevets d'invention de l'Américain P.H Jackson (1860) et l'Allemand Dohering (1888) et un peu plus tard l'Australien J Mandl (1896) qui proposèrent la réalisation des éléments en béton armé avec des efforts initiaux par la mise en tension des armatures.

Leur préoccupation était d'éliminer la fissuration dans le béton, qui était considérée comme un défaut majeur, par la précontrainte de celui-ci. Leurs travaux n'ont pas mené à des résultats satisfaisants à cause des phénomènes de retrait et du fluage, qui n'était pas encore connu, et de l'utilisation des aciers de qualité non correspondantes, ce qui a annulé en grande partie l'effet de la précontrainte.

I.2. MODES DE LA PRECONTRAINTE :

On distingue deux procédés de précontrainte :

- Précontrainte par post tension.
- Précontrainte par pré tension.

I.2.1. PRECONTRAINTE PAR POST TENSION :

La précontrainte par post-tension est réalisée par des armatures actives (câbles ou torons) mises en tension après coulage et durcissement du béton. Ce dernier doit avoir une résistance mécanique à la compression suffisante, pour lui permettre de supporter les efforts de précontrainte auxquels il sera soumis.

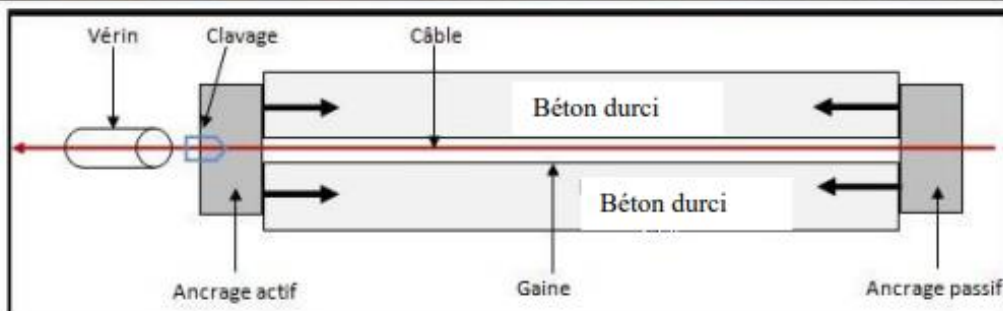


Fig. I- 2 Procédé de précontrainte par post tension.

Dans ce procédé de précontrainte, le câble logé dans sa gaine (Fig. I-2), et sous l'action du vérin auquel il est attaché, s'allonge et se tend à l'effort P . Le vérin qui prend appui le béton de la pièce à précontraindre, exerce sur elle un effort de compression égal à P (principe de l'action et la réaction). P est donc l'effort de précontrainte développé par le câble. Une fois tendu, ce dernier est ancré sur le béton, ce qui assure une permanence de la compression.

I.2.1.2 OPERATION DE POST-TENSION :

Elle se déroule schématiquement (cf. Fig. I -3) de la manière suivante :

1. Mise en place de gaines dans le coffrage

Les gaines sont situées à l'intérieur du coffrage.

Les câbles sont placés dans les gaines avant ou après le bétonnage (cela dépend du diamètre des gaines).

2. Coulage du béton

3. Mise en tension des armatures

Les armatures sont tendues par des vérins après le durcissement du béton.

4. Injection de coulis de ciment dans les gaines

Le but de l'injection est d'éviter la corrosion des câbles

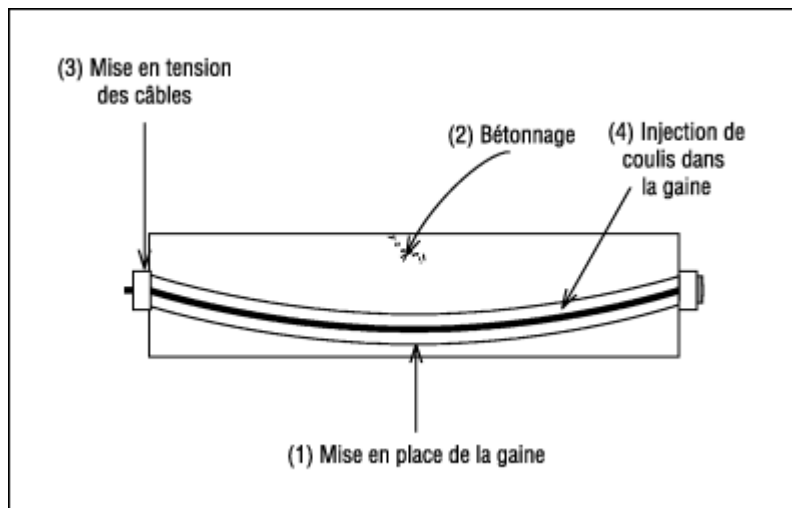


Fig. I- 3 Opérations de post –tension

I.2.2. PRECONTRAINTE PAR PRETENSION :

La précontrainte par pré-tension est réalisée par des armatures actives (câbles, barres ou torons) mises en tension, sur un banc de traction, avant le coulage du béton. Dans ce procédé, on commence par mettre en tension les aciers de précontrainte à l'aide de vérins prenant appui sur une culée (Fig. I-4). Quand l'allongement requis est atteint, l'acier de précontrainte est bloqué à l'aide des ancrages. Ensuite, le béton est coulé en contact direct avec les aciers de précontrainte dans les coffrages qui les entourent. Lorsque le béton atteint une résistance suffisante (après durcissement), on procède au transfert de la précontrainte. Les armatures de précontrainte sont alors libérées de leurs ancrages et coupées à l'extérieur de la pièce coulée. Comme ces armatures ne sont pas libres pour revenir à leur longueur initiale, l'effort se reporte par adhérence au béton et la pièce se trouve précontrainte.

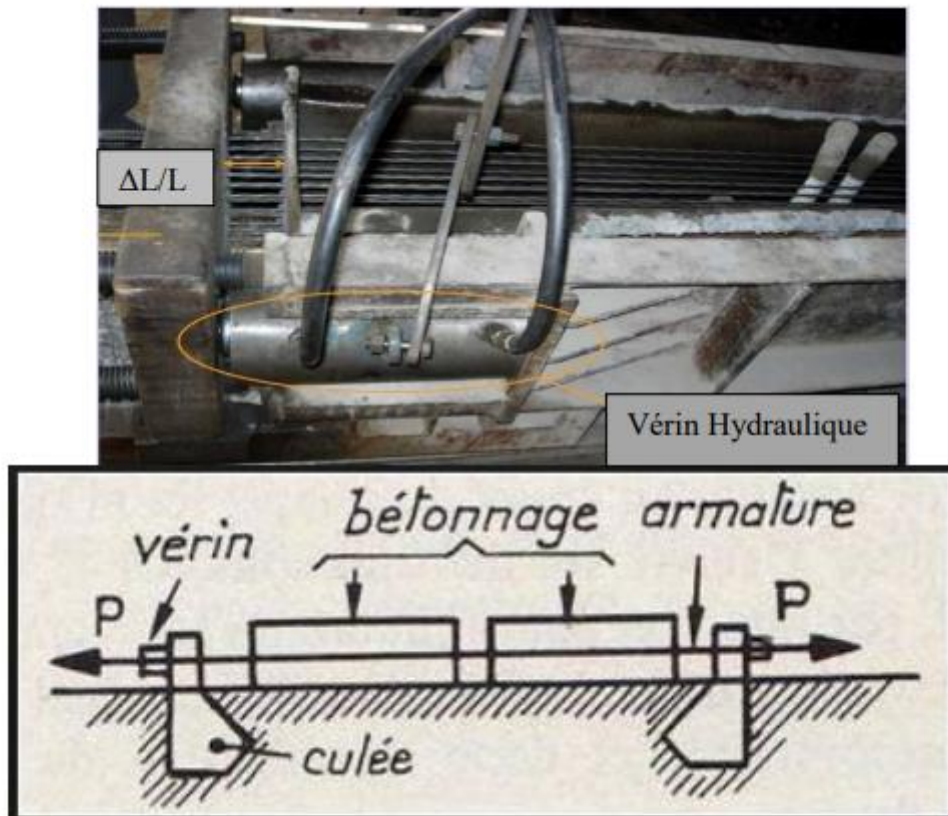


Fig. I- 4 Principe de précontrainte par pré-tension.

I.2.2.1. ETAPES DE MISE EN OEUVRE DE LA PRECONTRAINTE PAR PRE-TENSION INTERNE :

La précontrainte par pré-tension assure une bonne adhérence entre l'acier précontraint et le béton par rapport à la précontrainte par post-tension. De plus, elle permet d'économiser de l'argent en termes de gaines, d'ancrage et d'injection de coulis. De plus, les installations lourdes sont nécessaires pour ce processus, ce qui rend le choix des formes des pièces à précontraindre restreint. L'un des inconvénients majeurs de ce processus est la difficulté de créer des tracés courbes pour les armatures de précontrainte et de régler l'intensité de l'effort de précontrainte une fois que le béton est durci.

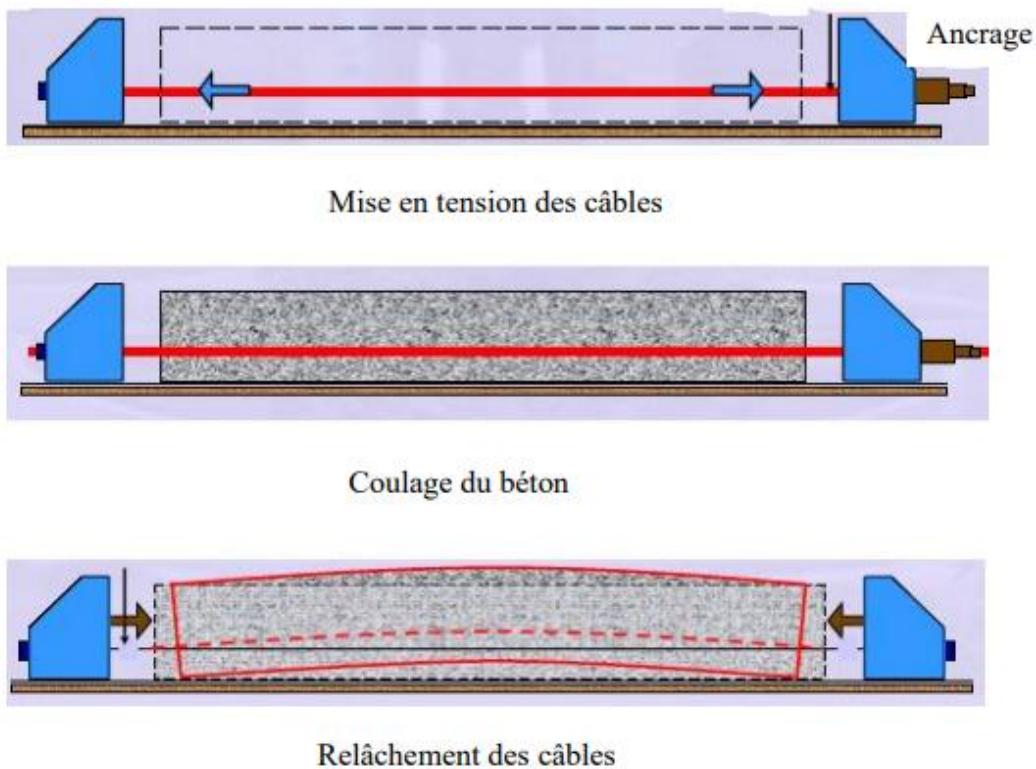


Fig. I- 5 Etapes de réalisation de la précontrainte par pré-tension.

Opération de pré -tension

Elle se déroule schématiquement (cf. . Fig. I-5) de la manière suivante :

1. mise en tension des armatures entre des bancs de coffrage .Les câbles de précontrainte sont tendus sur un banc de préfabrication.
2. Coulage du béton
3. Le béton est coulé directement au contact des câbles (il n'y a pas de gaine).
4. Relâchement des armatures après le durcissement du béton

I.3 AVANTAGE DU BETON PRECONTRAINT :

Le béton précontrainte par pré-tension offre de grands avantages technique par rapport à d'autres de post -tension construction, tel que le béton armé et l'acierLes structures précontraintes sont plus minées et donc plus adaptables aux traitements artistiques.

L'utilisation de béton à haute résistance et d'acier dans les éléments précontraints donne des éléments plus légers et plus fins que ce qui est possible avec le béton armé. Les deux caractéristiques structurelles du béton précontraint, à savoir le béton à haute résistance et l'absence de fissures, contribuent à l'amélioration de la durabilité de la structure dans des conditions environnementales agressives. La précontrainte du béton améliore la capacité du matériau à absorber l'énergie sous les charges d'impact.

L'économie du béton précontraint est bien établie pour les structures à longue portée, le béton précontraint est généralement plus économique que le béton armé. Car la résistance à la fatigue du béton précontraint est comparativement meilleure que celle des autres matériaux.

En raison des contraintes élevées autorisées dans les fils à haute résistance, bien que la quantité de matériaux utilisés dans les éléments en béton précontraint soit considérablement réduite par rapport aux éléments en béton armé.

I.3.1 DEGRE DE PRECONTRAINT :

La précontrainte s'applique avec différentes intensités appelé degrés de précontrainte. Il existe trois degrés de précontrainte :

1°. Précontrainte totale (classe I) :

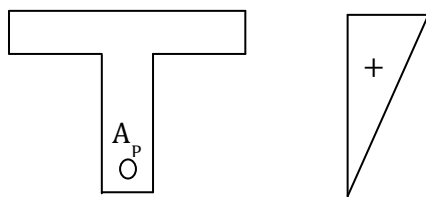
Aucune contrainte de traction n'est acceptée dans le béton (voir Figure I.6) à titre exemple : ponts, barrages de grande importance.

2°. Précontrainte limitée (classe II) :

Les contraintes de traction dans le béton sont limitées (voir Figure I.7).

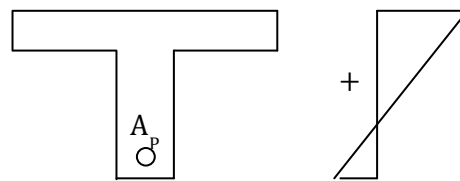
3°. Précontrainte partielle (classe III) :

Les contraintes de traction produites par la charge d'utilisation maximale sont supérieures en valeur absolue, à la résistance du béton à la traction mais largeur des fissures est limitée (Figure I.8).



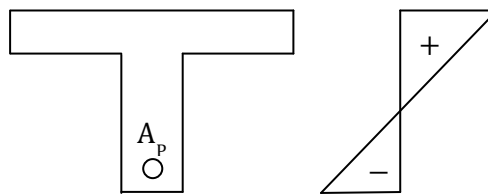
$$\sigma_t = 0$$

Figure I.6 – Précontrainte totale



$$\sigma_b \geq \overline{\sigma}_t$$

Figure I.7 – Précontrainte limitée.



$$\sigma_b \leq \overline{\sigma}_t$$

Figure I.8 – Précontrainte partielle

I.4 APPLICATION DE LA PRECONTRAINTE :

Les domaines privilégiés d'utilisation de la précontrainte sont le bâtiment et les ouvrages d'art. Dans les domaines du tertiaire et industriel, un grand usage est fait des planchers précontraints alvéolaires (fig. 1-9 et 1-10). Ces éléments sont réalisés par extrusion sur des bancs de précontrainte de plus de 100 m de longueur. Le béton contient très peu d'eau et n'est pas adjuvant de manière à pouvoir supporter son propre poids juste après le passage de la machine à coffrage glissant. Le pré tension est réalisé par des vérins de grande capacité situés à une des extrémités du banc. Les planchers alvéolaires précontraints sont des éléments structurels optimisés qui permettent de franchir des portées de plus de 12 m pour des charges de bureau



Fig. I- 9 exemple de planchers alvéolaires précontraints.



Fig. I- 10 exécution des planchers par une machine à coffrage glissant (extrusion) et vue des ancrages de torons aux extrémités du banc

. D'autres applications plus particulières sont à citer. Freyssinet a par exemple appliqué la précontrainte pour des poteaux électriques (flexion composée), ou des galeries d'eau (étanchéité).

. Les réservoirs ou silos sollicités en traction ortho radiale peuvent recevoir un précontraint annulaire qui maintient le béton en compression, à l'image du cerclage du tonneau.

I.5 OBJECTIF :

L'objectif de ce projet d'étude consiste à effectuer une analyse comparative approfondie des pertes de précontrainte par post-tension selon les normes japonaises JSCE-SSCS et les règles françaises BPEL. Ce projet d'étude permet de mettre en relief les différences existantes et les points concordants entre les normes JSCE-SSCS et les règles BPEL en termes de pertes de précontrainte et par conséquent d'enrichir la banque de données déjà fondée pour l'établissement d'un code Algérien du béton de précontrainte CABP.

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente l'étude des caractéristiques des matériaux, aciers et béton, établies par les deux règlements considérés à savoir les normes japonaises JSCE-SSCS et les règles françaises BPEL.

II.2. Béton :

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 bien à la traction et à la compression. Dans les structures en béton précontraint, on utilise en plus de ces deux matériaux (béton et aciers passifs) des aciers de précontrainte (aciers actifs).

II.2.1 Caractéristiques mécaniques du béton

II.2.1.1 Résistances caractéristiques à la compression

A) Selon BPEL

Le béton est caractérisé par sa résistance à la compression à 28 jours. En béton précontraint, la résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours, notée, est fixée par le marché de préférence dans la gamme des valeurs suivantes 30, 35, 40, 50, 60 *MPa*. (Article 2.1.2, BPEL91).

On peut admettre que pour $j \leq 28$, la résistance des bétons non traités thermiquement peut être évaluée par les formules suivantes :

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \quad \text{Si } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad (\text{II-1}).$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95j} f_{c28} \quad \text{Si } f_{c28} > 40 \text{ MPa} \quad (\text{II-2}).$$

Pour $j \geq 28$: $f_{cj} = 1.1 * f_{c28}$ (II-3).

B) Selon JSCE-SSCS

Plusieurs types de béton sont utilisés dans les structures en béton dont la résistance à la compression varie de 18 à 100 MPa même pour des bétons utilisant un ciment portland ordinaire (Section 5.1, JSCE15) La résistance caractéristique à la compression du béton est déterminée par l'essai de compression réalisé à 28 jours selon la norme japonaise JIS A1108 (Section 5.2.1, JSCE15)

Le diamètre d de l'éprouvette cylindrique et la résistance à la compression doivent être calculés à partir des formules ci-dessous données par la norme JIS A1108 (Section 5.1, JIS A1108) .

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{II-4}).$$

$$\sigma_c = \frac{U}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (\text{II-5}).$$

d : diamètre de l'éprouvette (cm)

d_1 et d_2 : diamètre de deux directions accordées avec 4.1 (cm)

σ_c : Résistance à la compression (kgf/cm²) (N/mm²)

U : Charge maximale de rupture de l'éprouvette obtenue par la machine d'essai en (kgf) (N)

Dans le cas de béton prêt à l'emploi conformément à la norme JIS A5308, la résistance nominale spécifiée par l'acheteur peut être utilisée comme résistance à la compression du béton (f'_{ck})

II.2.1.2 Résistances caractéristiques à la traction

A) Selon BPEL

La résistance caractéristique à la traction, à l'âge de j jours, notée f_{tj} , est

Conventionnellement définie par la formule suivante (Article 2.1.3, BPEL91) :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad (\text{II-6}).$$

Dans laquelle f_{tj} et f_{cj} sont exprimées en MPa (ou N/mm²).

B) Selon JSCE-SSCS

Selon JSCE-SSCS la résistance de traction notée doit être obtenue par la formule suivante (Section 5.2.1, JSCE15) :

$$f_{tk} = 0.23 * f'_{ck}{}^{2/3} \quad (\text{II-7}).$$

II.2.1.3 Module de déformations longitudinales

A) Selon BPEL

En absence des résultats expérimentaux, le module de déformation longitudinale instantanée du béton noté E_{ij} est déterminé par la formule suivante (Article 2.1.4.2, BPEL91)

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

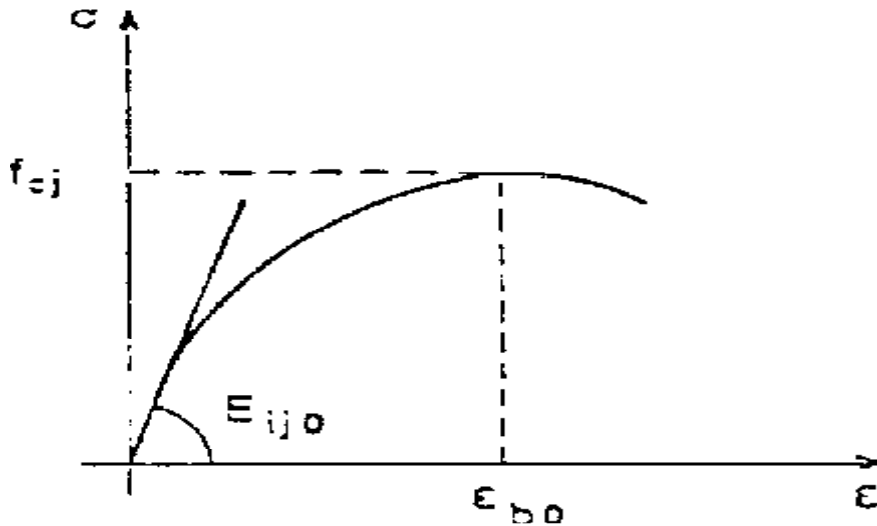


Fig II- 1 Diagramme contraintes-déformations du béton en compression selon le BPEL.

- La relation contrainte-déformation du béton comprimé (Fig.II-1) et la valeur de déformation correspondant à la contrainte maximum, appelée pic de contrainte, pour une évaluation précise des déformations, sont données par les formules ci-après.

On admet généralement la formule de Sargin

$$\sigma_b = f_{cj} * \frac{k \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right) + (k' - 1) * \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right)^2}{1 + (k - 2) \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right) + k' \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right)^2} \quad (\text{II-8}).$$

$$\epsilon_{b0} = 0.62 * 10^{-3} * \sqrt[3]{f_{cj}} \text{ (MPa)} \quad (\text{II-9}).$$

ϵ_{b0} : est la déformation au pic de contrainte

K un coefficient donné par :

$$k = \frac{\epsilon_{ij} * \epsilon_{b0}}{f_{cj}} \quad (\text{II-10}).$$

k' ; Un coefficient permettant d'ajuster l'allure du début de la branche descendante au diagramme réel.

$$k' = (k - 1) * \left(\frac{55 - f_{cj}}{25} \right) \quad (\text{II-11}).$$

B) Selon JSCE-SSCE

La relation de contraintes- déformations du béton comprimé (Fig.II-2) lorsque la résistance à la compression est inférieure à 50 MPa est donnée par la formule suivante (Section 5.2.3, JSCE15) :

$$\rho'_c = E_0 * k(\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0 \quad (\text{II-12}).$$

$$E_0 = \frac{2 * f'_c d}{\varepsilon'_{peak}} \quad (\text{II-13}).$$

$$k = \text{EXP} \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\} \quad (\text{II-14}).$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 * \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp(-0.35) \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right\} \quad (\text{II-15}).$$

Avec ;

ε'_{peak} ; Déformation correspondent à la résistance a la compression (généralement veut 0.002)

ε'_{max} : Valeur maximale de la déformation de compression

ε'_p : contrainte plastic

k : *taux* Résiduel de rigidité élastique

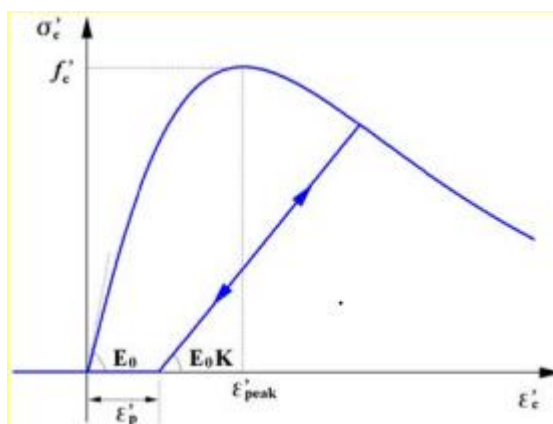


Fig II- 2. Le modèle hystérésis simplifiée du béton en compression selon JGCI5

En général la valeur de module de Young pour le béton (E_c) peut être prise égal à cette
indique dans le tableau suivant : JSCE (5.2.5)

Tableau II- 1 Module de Young (E_c) du béton

		18	24	30	40	50	60	70	80
E (KN/mm ²)	Béton normal	22	25	28	31	33	35	37	38
	Béton de granulat léger	13	15	16	19	-	-	-	-

II.2.1.4 Coefficient de Poisson

A) Selon BPEL

Le coefficient de Poisson du béton non fissuré est pris égal à 0,20. En cas de fissuration, il est pris égal à zéro (Article 2.1.6, BPEL91).

B) Selon JSCE-SSCE

Le coefficient de Poisson du béton peut en général être pris égal à 0.2 dans la zone élastique. Cependant, il doit être considéré égal à zéro lorsque la fissuration due à la traction est permise (Section 5.2.6, JSCE15).

II.2.1.5 Contraintes admissibles

Un état limite est celui dans lequel une condition requise d'une construction ou l'un de ces éléments est strictement satisfait, on distingue les états limites ultimes (E.L.U) qu'il corresponde à la limite :

- ✓ Soit de l'équilibre statique
- ✓ Soit de la résistance.
- ✓ Soit de la stabilité de forme

A) Selon BPEL

A.1) Etats limites de service (ELS)

A.1.1) Compression

La contrainte de compression doit être définie par la relation suivant :

$$\overline{\sigma}_{bc} = K_C * f_{cj} \quad (\text{II-16}).$$

Avec le coefficient **Kc** a pour valeur :

0,6 : pour les combinaisons d'actions rares en phase de construction ou d'exploitation.

0,5 : pour les combinaisons d'actions quasi-permanentes en phase d'exploitation.

A.1.2) Traction :

La contrainte admissible du béton à la traction est :

$$\overline{\sigma}_{bc} = -k_t * f_{tj} \quad (\text{II-17}).$$

La valeur du coefficient **Kt** est donnée par le Tableau (II.2) suivant :

*Tableau II- 2 La valeur du coefficient **Kt***

Situation		Exploitation		construction
Actions		Rares	Fréquente	Rares
<i>*k_t</i> classe II	Section d'enrobage	1	0	0,7
	Hors section d'enrobage	1,5	-	1,5

A.2) Etats limites ultime (ELU)

A.2.1) Compression

La contrainte admissible du béton à la compression selon le diagramme de la Fig. II.3, est

Comme suit :

$$f_{bu} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{(\theta \cdot \gamma_b)} \quad (\text{II-18}).$$

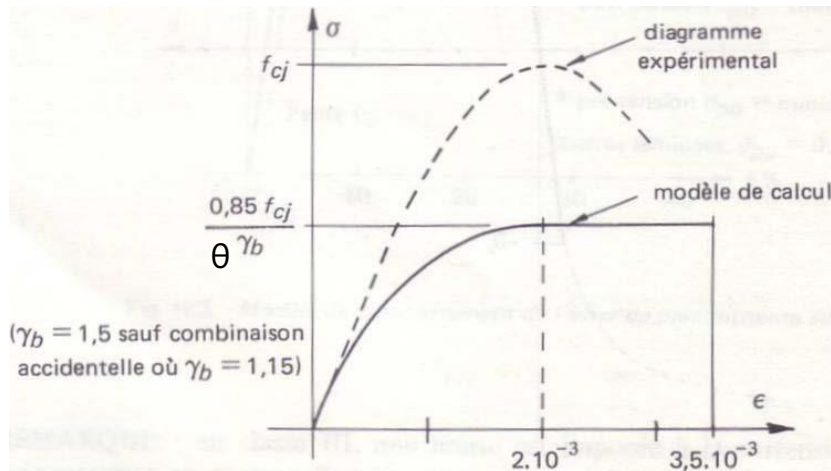
Avec :

$\gamma_b = 1,50$ pour les situations durables.

$\gamma_b = 1,15$ pour les situations accidentelles.

θ : Tient compte de la durée probable d'application de la combinaison d'actions considérée.

- $\theta = 1$ si cette durée supérieur à 24h.
 $\theta = 0,9$ si elle est comprise entre 1h et 24h.
 $\theta = 0,85$ si elle est inférieure à 1h.



II- 3. Modèle de comportement du béton en compression aux États limites ultime (E.L.U) selon BPEL [7].

B) Selon JSCE-SSCS :

B.1) Etats limites de service (ELS)

Aux états limites de service, il doit être vérifié que les structures en béton satisfont les conditions requises de leur exploitation pendant la durée de vie pour lesquels elles ont été conçues. En règle générale dans la vérification de l'état de service d'un ouvrage, il doit être vérifié que ni la structure ni aucun de ses éléments n'atteint l'état limite de service sous les charges de conception (Section 10. 1, JSCE15).

B.1.1) Compression :

La valeur limite de la contrainte de compression en flexion et de la contrainte de compression axiale dans le béton sous charges permanentes doit être évaluée par l'expression suivante (Section 10.2.1, JSCE15) :

$$\bar{\sigma}_c = 0.40 f'_{ck} \quad (\text{II-19}).$$

f'_{ck} : La valeur limite de la contrainte de compression

B.1.2) Traction

Aux états limites de service, la norme japonaise exige de limiter la largeur de fissures dues aux efforts de traction dans les structures en béton armé et en béton précontraint qui peut être prise environ de 0.3mm. Pour cette raison, aucune limite ne peut être imposée à la contrainte de traction dans l'armature lorsque l'on vérifie la fissuration dans le béton et la fatigue de l'armature. Cependant, dans les cas où la contrainte de traction dépasse la limite d'élasticité, certaines difficultés, telles que les hypothèses faites lors de l'analyse structurale ou des contraintes ne tenant plus, peuvent être rencontrées. Par conséquent, la contrainte de traction dans l'armature doit être inférieure à la limite d'élasticité. C'est pourquoi les valeurs maximales des charges permanentes et des charges variables dans les conditions de service doivent être utilisées comme charges de conception. (f_{yk}).

Avec :

f_{yk} : La limite d'élasticité

B.2) Etats limites ultime (ELU)

Il doit être conforme à la spécification standard JSCE (conception), 6.1. Le mécanisme d'effondrement dans les structures statiquement indéterminées ne doit pas être pris en compte.

B.2.1) Compression :

- (1) Une courbe appropriée doit être supposée exprimer le comportement contrainte-Déformation du béton en fonction de l'objectif de l'examen.
- (2) Une courbe contrainte-déformation idéalisée donnée à la Fig. II.4 peut généralement être utilisée pour examen de l'état limite ultime de rupture des éléments soumis à un moment de flexion ou aux forces de flexion et axiales. La courbe contrainte-déformation de la Fig. II.4 peut également être utilisée pour béton de granulats légers, pour l'examen mentionné ci-dessus.

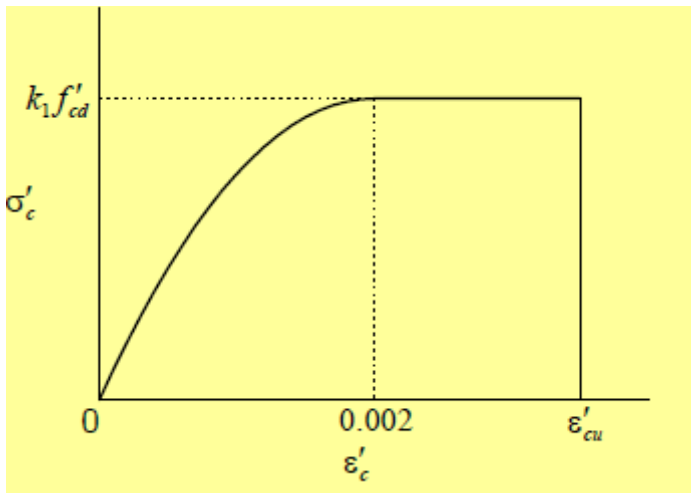
$$k_1 = 1 - 0.003f'_{ck} \leq 0.85 \quad (\text{II-20}).$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{3000} \quad 0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035 \quad (\text{II-21}).$$

L'unité de f'_{ck} est le N/mm².

L'équation de la ligne courbe est :

$$\sigma'_c = k_1 * f'_{cd} * \frac{\varepsilon'_c}{0.002} * 2 * \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right) \quad (\text{II-22}).$$



II- 4. Courbe contrainte-déformation du béton

II.3) Les aciers

Les aciers utilisés dans le béton précontraint sont : BPEL Article (2.2)

• **Armatures passives** : pour les réalisations des cages des armatures qui se composent d'une part, de barre longitudinale de montage située au minimum aux angles de la cage et d'autre part les armatures transversales qui assurent, certes, le maintien des barres longitudinales mais qui équilibrent surtout l'effort tranchant agissant dans les sections.

• **Armatures actives** : elles sont utilisées sous forme de fils ou torons longitudinaux (rarement de barres longitudinales) pour la réalisation de précontrainte, mais surtout sous forme de barres transversales pour compléter l'effet des armatures passives qui équilibrent l'effet de tranchant.

II.3.1) Les armatures de précontraintes :

A) Selon BPEL :

Les types d'armatures intervenant dans la réalisation de la précontrainte sont les suivantes :

a) Les fils :

Par convention, les fils ont un diamètre inférieur ou égale 12 mm, ce qui permet de les livrer en couronnes. Ils peuvent être soit ronds ou lisses (pour la post-tension) soit au contraire nervurés, ou crantés, ou ondulés afin d'améliorer leur adhérence au béton (pré-tension). Les fils les plus couramment utilisés ont des diamètres de 5 mm, 7 mm ou 8 mm [2]

Tableau II- 3 Caractéristiques des files de précontrainte

Diamètre (mm)	Section (mm) ²	Classes* MPa	F _r kN	F _e kN
5	19,6	1570	30,8	27
6	28,3	1570	44,4	39
7	38,5	1570	60,4	53
8	50,3	1570	79	70
10	78,5	1570	123	108
12.2	117	1570	184	164

* contrainte de rupture garantie de l'armature de précontrainte

F_r : Force de rupture de l'armature de précontrainte

F_e : Force de limite d'élasticité de l'armature de précontrainte

b) Les Barres :

Les barres sont les plus souvent round et lisse de diamètres supérieurs à 12.5mm, elles ne peuvent être livrées en couronnes, les caractères géométriques suivant :

Tableau II- 4 Caractéristiques mécaniques des barres de précontrainte

Diamètre (mm)	Section (mm)	classes MPa	F _r KN	F _e KN	f _{prg} MPa	f _{peg} MPa
20	314	1030	325	260	1030	828
		1230	385	340	1230	1083
26	531	1030	547	443	1030	834
		1230	653	575	1230	1083

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

32	804	1030	830	670	1030	833
		1230	990	870	1230	1082
36	1018	1030	1050	850	1030	835
		1230	1250	1100	1230	1081

c) Les Torons :

Un toron est un assemblage de fils enroulés en hélice et repartis en une seule couche, éventuellement autour d'un fil central.

Les torons sont caractérisés par le nombre de leurs fils, par leur diamètre et par leur section comme préciser dans le tableau suivant :

Tableau II- 5 Caractéristiques des torons de précontrainte.

Nature	Diamètre (mm)	Section (mm) ²	Classes <i>MPa</i>	F _r <i>kN</i>	Fe <i>kN</i>	<i>f_{prg}</i> <i>MPa</i>	<i>f_{peg}</i> <i>MPa</i>
Torons à 3 fils	5,2	13,6	1960	26,7	23,7	1960	1742
Torons à 7 fils	6,8	28,2	1960	55,3	49,2	1960	1744
Torons 7 file	12,5	93	1860	173	154	1860	1656
	15,2	139	1670	232	207	1670	1489

d) Les câbles

Tableau II- 6 Caractéristiques mécaniques des câbles les plus utilisés

unité	Classe de résistance	<i>f_{prg}</i> en <i>MPa</i>	<i>f_{peg}</i> en <i>MPa</i>	<i>A_p</i> en mm ²	P ₀ en KN	Relaxation <i>ρ</i> ₁₀₀₀
12Ø7	I	1402	1255	462	518	TBR2
	II	1559	1393		576	BR4
	III	1677	1500		619	RN8
12Ø8	I	1402	1255	603	676	TBR2
	II	1559	1393		752	BR4
	III	1657	1470		798	RN8

6T13	I	1719	1476	558	742	TBR2, 5
	II	1792	1582		795	BR5
	III	1867	1656		832	RN9
12T13	I	1719	1476	1116	1483	TBR2, 5
	II	1792	1582		1586	BR5
	III	1867	1656		1663	RN9
12T15	I	1623	1411	1668	2119	TBR2, 5
	II	1743	1552		2327	BR5
	III	1814	1623		2420	RN9

Natation :

- 12Ø7 c'est un câble composé de 12 fils, chaque fil est de 7 mm de diamètre.
- 12T13 c'est un câble composé de 12 torons, chaque toron est de 12,4 mm de diamètre.
- ρ_{1000} : Relaxation à 1000 heures.
- P_0 : force initiale à l'origine.
- f_{prg} : contrainte de rupture garantie de l'armature de précontrainte.
- f_{peg} : contrainte limite élastique garantie de l'armature de précontrainte.

B) Selon JSCE-SSCS :

a) Les fils :

Les types de fil et ces symboles doivent être indiqués comme le tableau suivant :

Tableau II.8: Type de fil

Tableau II- 7 Type de fil

Sortes			Symbole
Doubler	fil rond	classe A	SWR1AN, SWPR1AL
		classe B grain	SWR1BN, SWPR1BL
	fil déforme		SWPD1N, SWPD1L
fil toronne	2 Brins		SWPR2N, SWPR2L
	fil a 3 Brin forme irrégulier		SWPD3N, SWPD3L
	7 Brins	A	SWPR7AN, SWPR7BL
		B	SWPR7BN, SWPR7BL
	19 Brins		SWPR19N, SWPR19L

Remarque :

a) En fonction de la valeur standard de de relaxation ajoute N à la fin du produit normale et L a la fin du produit à faible relaxation.

b) Le fil round de type B a une résistance a la traction plus élevé de 100N/mm² que le type A.

c) La classe A du fil à 7 brin montre une résistance à la traction de 1720N/mm², et la classe B montre une classe de 1860N/mm².

d) Parmi les 19 fils toronnes, le type de section transversale de 28.6mm doit être de type joint et de type Warrington, et le 19 autre fil tournés doivent être de type joint uniquement.

Tableau II- 8 caractéristique mécanique de fil de précontrainte

Symbole	Surnom	Force d'essai pour 0.2% d allongement Permanent KN	Puissance d'essai maximal KN	Extensibilité %	Valeur de relaxation	
					N	L
SWPR1AN SWPR1AL SWPD1N SWPD1L	2.9 mm	11.3	12.7	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	4 mm	18.6	21.1	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	5 mm	27.9	31.9	4.0	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	6 mm	38.7	44.1	4.0	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	7 mm	51.0	58.3	4.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	8 mm	64.2	74.0	4.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	9 mm	78.7	90.2	4.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
SWPR1BN SWPR1BL	5 mm	29.9	33.8	4.0	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	7 mm	54.9	62.3	4.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	8 mm	69.1	78.9	4.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
SWPR2N SWPR2L	2.9 mm à partir de 2	22.6	25.5	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
SWPD3N SWPD3L	2.9 mm à partir de 3	33.8	38.2	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

SWPR7AN SWPR7AL	9.3mm à partir de 7	75.5	88.8	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	10.8 mm à partir de 7	102	120	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	12.4 mm à partir de 7	136	160	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	15.2 mm à partir de 7	204	240	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
SWPR7BN SWPR7BL	9.5 mm à partir de 7	86.8	102	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	11.1 mm à partir de 7	118	138	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	12.7 mm à partir de 7	156	183	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	15.2 mm à partir de 7	222	261	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
SWPR19N SWPR19L	17.8 mm à partir de 19	330	387	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	19.3 mm à partir de 19	387	451	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	20.3 mm à partir de 19	422	495	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	21.8 mm à partir de 19	495	573	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins
	28.6 mm à partir de 19	807	949	3.5	8.0 ou moins	2.5 ou moins

b) Barres :

Les barres d'aciers d'armature doivent être U-24 ou U-30 (SII, 02932-80) et conformes à S I I 0136 (Standard Industrie Indonésie) comme indique le tableau suivant :

*Pour barre rondes

Tableau II- 9 caractéristique de barres rondes

Désignation	Diamètre (mm)	Croix Superficie de la section (cm)	Poids unitaire Kgf/m
φ6	6	0.283	0.222
φ8	8	0.503	0.395
φ9	9	0.636	0.499
φ10	10	0.785	0.617
φ12	12	1.13	0.888
φ13	13	1.33	1.04
φ14	14	1.54	1.21
φ15	15	2.01	1.58
φ16	16	2.54	2.00
φ18	18	2.84	2.23

*Pour barre déformé ;

Tableau II- 10 caractéristique déformée de barres

Désignation	Diamètre (mm)	Croix Superficie de la section (cm)	Poids unitaire Kgf/m
D10	10	0.785	0.617
D12	12	1.130	0.888
D13	13	1.330	1.040
D14	14	1.540	1.210
D16	16	1.13	0.888
D18	18	2.010	1.580
D19	19	2.540	2.000
D22	22	2.840	2.230
D25	25	3.800	2.980

Les Torons

Tableau II- 11 caractéristique de torons

Type de matériau	Diamètre	Section	Minimum qui fuit		Résistance à la traction σ_p	
	mm	mm ²	KN	Kgf	MPa	Kgf/cm ²
	5.0	19.6	30.4	310	1550	15810
Câble	5.0	19.6	33.4	341	1700	17340
Super 7cable	7.0	38.5	65.5	668	1700	17340
	9.3	54.7	102.0	1040	1860	18972
Torons	12.7	100.0	184.0	1877	1840	18768
	15.2	143.0	250.0	2550	11750	17850
7 câbles	12.7	94.3	165.0	1683	1750	17850
Toron						
	23.0	415.0	450.0	4590	1080	11016
Barre	29.0	660.0	710.0	7242	1080	11016
	32.0	804.0	870.0	8874	1080	11016
	38.0	1140.0	1230.0	12546	1080	11016

CHAPITRE III PERTES DE PRECONTRAINTE PAR POST-TENSION

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre on étudie les pertes de précontrainte par post-tension selon les normes japonaises JSCE-SSCS et les règles françaises BPEL, tout en décrivant chaque type de perte, son fondement théorique, et les prescriptions réglementaires données par chaque règlement.

III.2. GENERALITES :

Les câbles de précontrainte ont des capacités ultimes allant de 200 à 15000 KN et sont initialement tendus à des taux de contrainte relativement élevés, soit 60% à 80% de leurs résistances à la traction. La force de précontrainte correspondante qui agit dans l'élément de béton peut être sensiblement inférieure à la force initiale p_0 appliquée par les vérins.

Cette différence provient des pertes de tension instantanées et différées dans le câble, dont les causes sont :

- Le frottement des armatures dans leurs gaines
- Le glissement au blocage des armatures (Certains types d'ancrages)
- La relaxation de l'acier de précontrainte
- Le retrait du béton
- Le fluage du béton

III.2.1 Définition de pertes :

On désigne sous le nom perte de tension, ou perte de précontrainte, toute différence entre l'effort exercé par les vérins lors de sa mise en tension des câbles de précontrainte «tension à l'origine» et l'effort qui s'exerce en un point donné de ces câbles à un instant donné. En post tension, l'effort de précontrainte varie à la fois :

- Dans l'espace, avec l'abscisse le long du câble, du fait de frottement ;
- 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

III.2.2 TENSION A L'ORIGINE :

C'est la valeur de tension qu'on impose aux armatures de précontrainte devant un ancrage actif, au moment de la mise en tension et avant le transfert de l'effort à l'ancrage. Sa valeur est contrôlée soit à l'aide d'un manomètre branché directement sur les vérins, soit par mesure de l'allongement du câble.

A) Selon le code BPEL

La valeur maximale de la tension à l'origine σ_p ne doit pas dépasser la plus faible des valeurs suivantes (article 3.2.2, BPEL91) :

- Cas de la post -tension : $0.80f_{prg}$ et $0.90f_{peg}$. (III-1)

- Cas de la pré-tension : $0.85f_{prg}$ et $0.95f_{peg}$ (III-2)

Avec :

f_{prg} : Contrainte de rupture garantie des aciers précontraints.

f_{peg} : Contrainte limite élastique garantie des aciers précontraints.

Dans le cas des barres laminées, cette tension initiale est limitée à $0.70f_{prg}$. (III-3)

B) Selon JSCE

La valeur de la contrainte dans l'armature de précontrainte à la mise en tension

(Tension à l'origine) ne doit pas dépasser la plus faibles des deux valeurs suivantes

(Section 15.8.1(i), JSCE15):

$$0.8f_{puk} \quad (III- 4)$$

$$0.9f_{pyk} \quad (III- 5)$$

Avec

f_{puk} : La valeur caractéristique de la résistance à la traction de l'armature de précontrainte (valeur caractéristique ultime).

f_{pyk} : La valeur caractéristique de la résistance limite élastique de l'armature de précontrainte.

Cependant, la valeur de la contrainte dans l'armature de précontrainte immédiatement après mise en tension (tension après pertes instantanées) ne doit pas dépasser la plus faibles des deux valeurs suivantes (Section 15.8.1 (ii), JSCE15) :

$$0.7f_{pu k} \quad (III- 6)$$

$$0.85f_{py k} \quad (III- 7)$$

III.3. PERTES DE TENSION EN PRECONTRAINTE PAR POST TENSION :

En précontrainte par post tension, les pertes de tension se divisent en deux groupes :

*Les pertes de tension instantanées : Elles se produisant lors de la mise en tension des câbles de précontrainte.

*Les pertes de tension différées : Elles se produisant dans un temps plus au moins long après la mise en tension.

En tout point d'une armature de précontrainte, la tension vaut :

$$\sigma_p = P/A_p \quad (III-8)$$

Avec ;

P : La force de précontrainte dans l'armature a la section étudiée

A_p : L'aire de la section de l'armature de précontrainte

A l'origine sa valeur est :

$$\sigma_{p0} = P_0/A_p \quad (\text{Fig. III -9}).$$

Avec :

P_0 : La force de précontrainte de l'armature a l'origine

Comme les efforts de précontrainte sont variables le long des armatures et dans le temps. Ils sont évalués à partir de la valeur de la tension à l'origine, après déduction des différentes pertes de tension. Suite à ces pertes, la contrainte de traction ne peut que diminuer, l'épreuve de la mise en tension est une garantie de résistance du câble en service.

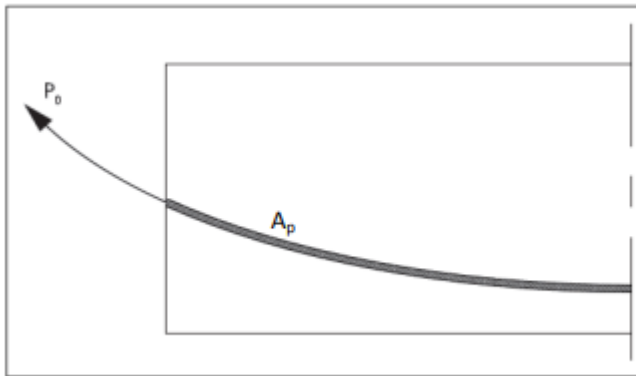


Fig. III - 1 : Tension à l'origine.

III.3.1. Pertes de tension instantanées :

A) Selon BPEL

Dans le cas de la post -tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes de tension instantanées qui sont (Article 3.3.1 BPEL) :

- Perte de tension due au frottement.
- Perte de tension due au recul de l'ancrage. $\Delta\sigma_{pi}(x)$
- Perte de tension due aux déformations instantanées du béton.

Dans une section d'abscisse « X » de l'armature, la valeur totale de ces pertes instantanées, est notée $\Delta\sigma_{pi}(x)$. Après déduction des pertes instantanées, la tension résiduelle au point d'abscisse « X », appelée tension initiale notée $\sigma_{pi}(x)$, est donnée par :

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pi}(x) \quad (\text{III-10})$$

B) Selon JSCE-SSCS :

La force de précontrainte dans l'armature, après pertes instantanées, doit être calculée par la formule suivante inspirée de l'équation citée dans la section (15.3.1) de la norme JSCE15 :

$$p(x) = p_i - [\Delta p_i(x) + \Delta p_t(x)] \quad (\text{III-11})$$

$p(x)$: Force de précontrainte a la section considérée après pertes instantanées

p_i : Force de précontrainte à la mise en tension à l'extrémité tendue du câble

$\Delta p_i(x)$: Perte de la force de précontrainte immédiatement après mise en tension (force après pertes instantanée) à calculer en tenant compte de l'influence des phénomènes suivant :

- I. Déformation élastique du béton
- II. Frottement entre l'armature et sa gaine
- III. Recul de l'ancrage de l'armature
- IV. Autres influences telle que la déformation des joints des blocs de béton préfabriqué.

III.3.1.1. Pertes de tension par frottement :

Lorsque le câble est mis en tension à l'origine, son déplacement à l'intérieur de la gaine va être gêné par les effets de frottements.

Ces derniers peuvent être dus à la **courbure de la gaine** ou **suite aux ondulations parasites**, sachant qu'elle ne peut vraiment être rectiligne lors du montage ou du coulage du béton.

a) Effet de la courbure de la gaine

Considérons un tronçon AB de câble de rayon r et d'ouverture angulaire $d\alpha$. Sa longueur est $r \cdot d\alpha$. Appliquons une force P à chaque extrémité (voir fig.). Le câble exerce sur le béton une force centripète égale à $2 \cdot P \cdot \sin(d\alpha/2)$; $d\alpha$ étant petit, $2 \cdot \sin(d\alpha/2) = d\alpha$

Donc : $2 \cdot P \cdot \sin(d\alpha/2) = P \cdot d\alpha$

Cette force répartie le long de (AB) a une densité $P \cdot d\alpha / r \cdot d\alpha = P/r$. Elle est appelée poussée sur le vide du câble. Le béton exerce une force égale et opposée.

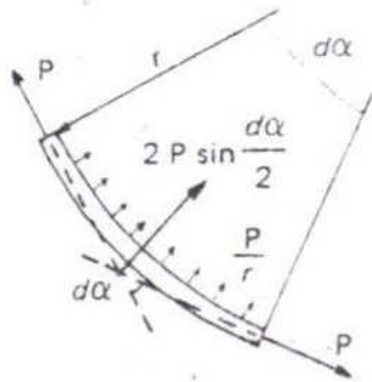


Fig. III - 2 : Effet de la courbure d'un câble

b) Frottement

Considérons le même tronçon de câble AB mis en tension en A avec une force P. Le câble tend à s'allonger mais cet allongement est freiné par le frottement sur la gaine. Soit f le coefficient de frottement (supposé uniforme et constant quel que soit P). Le béton exerce sur le câble une force centrifuge P/r et une réaction tangente $f \cdot P / r$ (voir figure ci -dessous.)

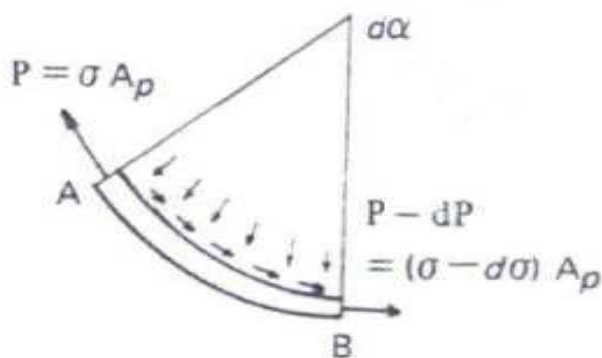


Fig. III - 3: Frottement en courbe

En B la force dans le câble a diminué de $dp = f \cdot P/r \cdot r d\alpha$

Soit $dp = f \cdot p \cdot d\alpha$ De même la contrainte a diminué de $d\sigma = f \sigma d\alpha$.

La solution de $d\sigma - f \sigma d\alpha = 0$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-f d\alpha}$$

c. Déviations parasites

Le tracé théorique d'un câble ne peut pas être parfaitement réalisé (la gaine est soutenue ponctuellement). Le tracé réel présente toujours **des déviations parasites**. On admet que ces déviations sont équivalentes à une ondulation régulière $\alpha_d = 3/4$ de degré par mètre.

On pose $\varphi = f \cdot \alpha_d$;

φ : Est alors le coefficient de la perte au mètre linéaire.

d. Expression de la tension le long du câble

Pour le tracé de la figure ci-dessous les contraintes en B et M sont donc respectivement :

$$\sigma_B = \sigma_A \cdot e^{-f\alpha - \varphi l_{AB}}$$

$$\sigma_M = \sigma_A \cdot e^{-f\alpha - \varphi l_{AM}}$$

Il est à noter que les valeurs du coefficient de frottement en courbe **f** sont en fonction de :

- la nature de la gaine (acier qui peut être nu, plombé ou zingué),
- la nature de la surface des fils (lisse, imprimés ou nervurés),
- leur mode de fabrication (tréfilage ou laminage),
- la lubrification éventuelle qui diminue sensiblement le frottement.

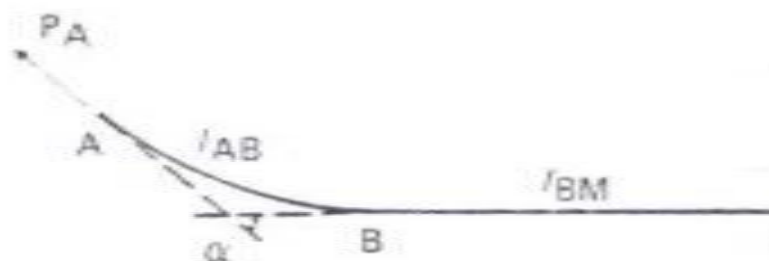


Fig. III - 4:Tracé d'un câble

e) Prescriptions réglementaires :

A) Selon BPEL

Ces pertes se produisent par frottement du câble sur sa gaine lors de la mise en tension du câble, dans les zones où le câble rentre en contact avec sa gaine et plus particulièrement, dans

les parties courbes et aux points où le tracé du câble présente des irrégularités. Dans ce cas, l'action tangentielle de contact de la gaine sur les armatures s'oppose au sens de déplacement du câble suite à sa mise en tension (Fig. III-2). La tension diminue donc entre le point O et le point courant C d'abscisse x du tracé. Dans cette figure, l'angle α , fonction de x, présente la somme des déviations angulaires entre le point O et le point C d'abscisse x : $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$.

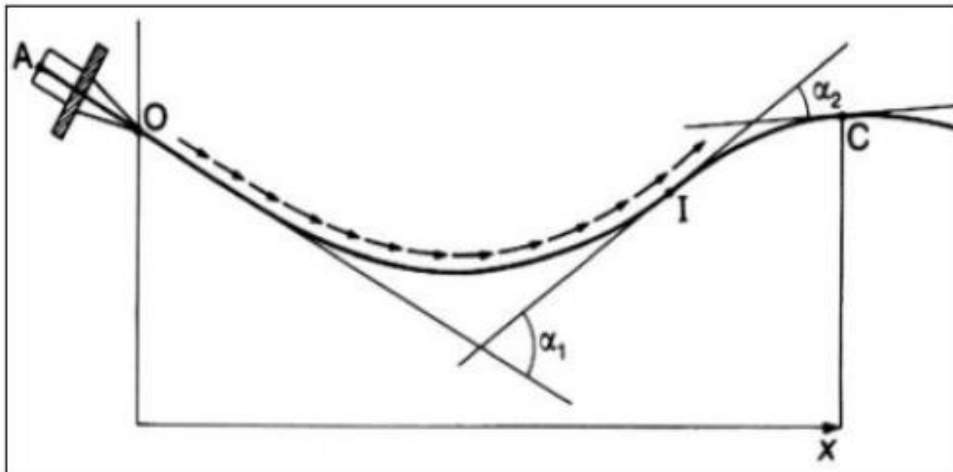


Fig. III - 5: Frottements le long du câble lors de sa mise en tension

Les forces de précontrainte sont variables le long des armatures et dans le temps. Elles sont évaluées à partir de la valeur probable de la tension à l'origine, notée σ_{p0} , c'est-à-dire de la tension prévue dans le projet à la sortie des organes de mise en tension, côté béton, au moment de cette mise en tension.

La tension d'une armature de précontrainte, dans une section située à une distance x de l'origine, lors de sa mise en tension, en tenant compte des phénomènes de frottements, est évaluée par la formule suivante (Article 3.3.1.1, BPEL91) :

$$\sigma_p(x) = \sigma_{p0} \cdot e^{-(f \cdot \alpha + \varphi \cdot x)} \quad (\text{III-12})$$

α : Somme vectorielle des déviations verticales et horizontales comptées en valeur absolue entre l'origine et la section étudiée (rd),

f : Coefficient de frottement en courbe (rd^{-1}),

φ : Coefficient de frottement par unité de longueur (m^{-1}),

x : Longueur de câble entre l'origine et la section étudiée (m),

σ_{p0} : Tension à l'origine

Les valeurs de f et φ sont définies par les textes d'agrément des différents procédés de précontrainte.

En général, le coefficient f varie de 0,15 à 0,24 rd^{-1} et φ varie de 0.001 à 0.003 m^{-1} .

A défaut de renseignement de précontrainte qui sera utilisé au moment de l'exécution on peut adopter $f = 0.23 rd^{-1}$ et $\varphi = 0.003 m^{-1}$.

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

$$\Delta\sigma_{frott}(x) = \sigma_{p0} - \sigma_p(x) = \sigma_{p0}(1 - e^{-(f\alpha + \varphi x)}) \quad (\text{III-13})$$

Remarque :

Même si le câble est rectiligne, cela n'empêche pas l'existence des ondulations parasites. Dans ce cas, il existe une formule approchée pour le calcul des pertes dues au frottement, à savoir :

$$\Delta\sigma_{frott}(x) \approx \sigma_{p0}(f\alpha + \varphi x)$$

Tableau III- 1: Valeurs moyennes des coefficients de frottement φ et f

Cas	nature des armatures	$f (rd^{-1})$		$\varphi(m^{-1})$
		$3 \leq R \leq 6$ (m)	$R \geq 6$ (m)	
Câble ne traversant pas de joints ou surface de reprise	Fils tréfiles ronds et lisses	$(22 - R)/100$	0.16	0.002
	Torons	$(24 - R)/100$	0.18	
Câble traversant de nombreux joints ou surface de reprise bétonnage	Fils tréfiles ronds et lisses	$(24 - R)/100$	0.18	0.003
	Torons	$(26 - R)/100$	0.20	

*R : Rayon de courbure le plus faible du tracé de la gaine considérée

B) Selon JSCE-SSCS :

Dans la méthode de post-tension, à mesure que la distance de l'extrémité active (de mise en tension) (emplacement du vérin) augmente principalement, la force de traction dans l'armature diminue en raison du frottement entre l'armature et la gaine et le frottement entre l'armature externe et les tubes de protection au niveau de déviateurs.

Donc, la force de traction dans l'armature de précontrainte tenant compte de ces frottements peut être calculée par la formule suivante (Section 15.3.II, JSCE15) :

$$p_x = p_i \cdot e^{-(\mu\alpha + \lambda x)} \quad (\text{III-14})$$

Avec :

p_x : Force de traction dans le tendon dans l'armature de précontrainte section étudiée

p_i : Force de traction de l'armature précontrainte à l'endroit du vérin (force l'origine)

μ : Coefficient de frottement par radian de déviation angulaire

α : Déviation angulaire (radian) voir Fig. III -6

λ : Coefficient de frottement par unité de e longueur (m)

x : Longueur de l'armature de l'extrémité active (de mise en tension) à la section transversale étudiée.

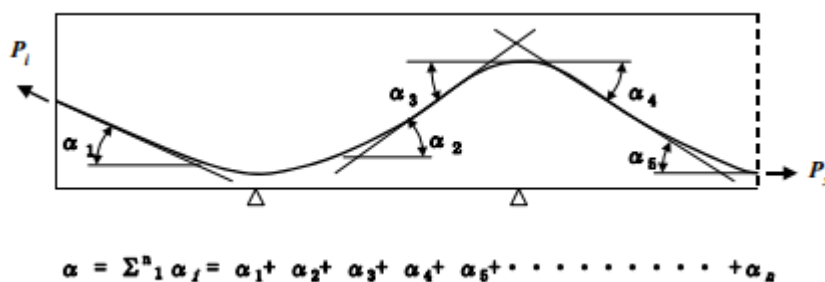


Fig. III - 6: déviation angulaire de la ligne centrale de l'armature de précontrainte

Habituellement, les valeurs de déviation angulaire doivent être déterminées expérimentalement car elles varient en fonction de facteurs tels que l'état de la surface intérieure de la gaine et le type de l'armature de précontrainte. Cependant, si des gaines en

acier sont utilisées, les valeurs indiquées dans le tableau III-2 peuvent être utilisées. Pour le coefficient de frottement dans les zones d'ancrage et de déviation de l'armature externe, les valeurs indiquées dans Le tableau III-3 peuvent être utilisées dépendant du type de matériau du tube de protection.

Cependant, si un type de gaine spécial ou d'entretoise est utilisé pour réduire le frottement, ou si l'armature de précontrainte avec un traitement de surface spéciale tels la résine, un film de revêtement, etc. est utilisé, ou si le frottement est coupé en impactant l'armature précontrainte, le coefficient de frottement peut être déterminé séparément en se référant à des données pertinentes telles que les résultats d'expériences conventionnelles (Section 15.3.II, JSCE15).

Tableau III- 2: Coefficient de frottement (gaine en acier)

Type	μ	$\lambda(\text{unite } 1/m)$
Tendon de précontraint, Brin de précontraint Barre de précontraint	0.30	0.004
	0.30	0.003

Tableau III- 3 : Coefficient de frottement de l'acier de précontrainte et du tube de protection (Armature de précontrainte, fils , torons)

Types	μ	$\lambda(\text{unite } 1/m)$
Tuyau d'acier	0.30	0.004
Tuyau de polyéthylène	0.15	0.004

Dans la méthode de l'armature interne, si la longueur de l'armature est au plus égale à 40m et que l'angle de déviation de l'armature est au plus égale à 30 degré, un calcul approximatif peut être utilisé via l'équation suivante :

$$P_x = P_i(1 - \mu\alpha - \lambda x) \quad (\text{III-15})$$

Il est généralement possible de calculer P en remplant le terme λ (équation (III-15)) pour tenir compte de l'influence de l'armature avec la déviation angulaire supplémentaire par mètre de longueur de l'armature. Dans ce cas, peut être calcule à partir de l'équation suivante :

$$\lambda = \mu\Delta\alpha$$

$\Delta\alpha$: Déviation angulaire supplémentaire par mètre de longueur de l'armature (radian)

III.3.1.2. Perte de tension par recul de l'ancrage :

A) Selon BPEL :

La mise en tension consiste à bloquer les ancrages. Le jeu présent dans l'encrage permet un léger mouvement avant le blocage final. Lorsque l'effort est appliqué par le vérin, les pièces d'encrage subissent un léger glissement et une formation propre, ce qui entraîne un raccourcissement du câble et une perte de tension. Le câble vient frotter à nouveau la gaine lors de ce déplacement.

En raison de la trace du câble constante, il y a un frottement entre l'encrage et le point jusqu'à où se fait sentir cette rentre d'encrage et la même que celle qui s'était produite lors de la mise en tension. Ceci nous donne la direction de la droite, il suffit alors de trouver le point de passage pour définir la droite [9]

Soit C le point jusqu' où se fait cette rentre d'encrage .considérons un élément de câble d longueurs dx, il a subit une variation de contrainte $\delta\sigma_p(x)$, donc un raccourcissement dx.

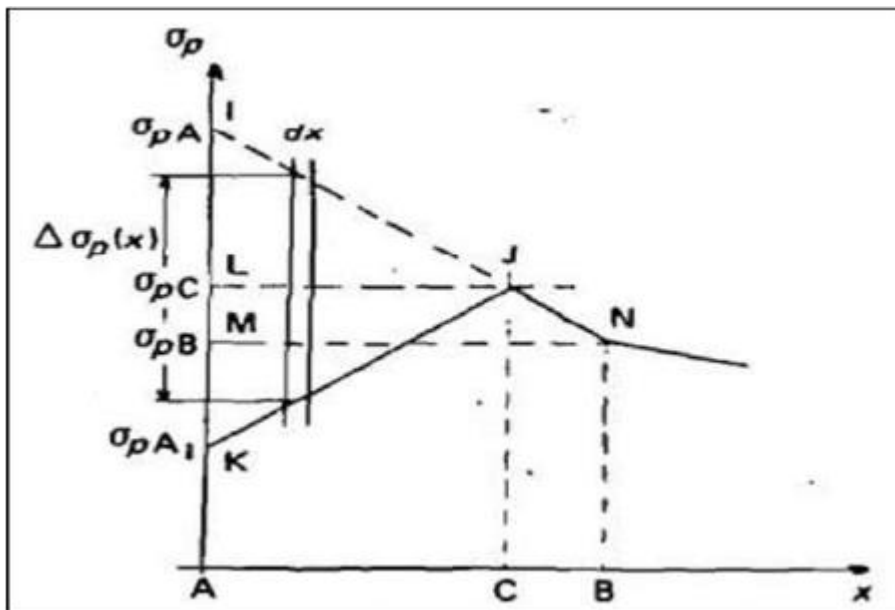


Fig. III - 7: représentation de la contrainte en fonction de l'abscisse

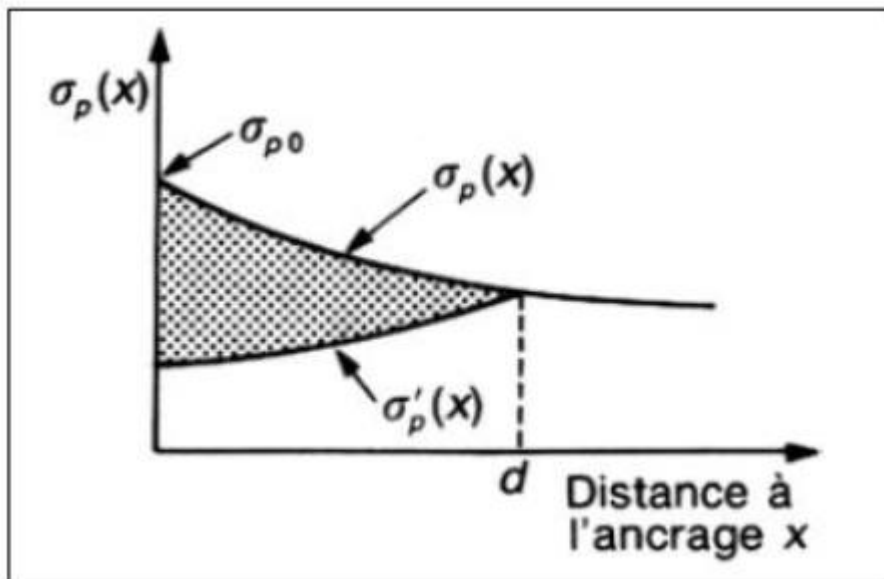


Fig. III - 8: Perte de tension due au recul d'ancrage. (Béton précontraint-Robert CHAUSSIN. Article 4.2.1.3)

Avant rentrée d'ancrage l'allongement relatif de l'armature de précontrainte à l'abscisse x

$$\text{est : } \varepsilon_p(x) = \frac{\sigma_p(x)}{E_p} \quad (\text{III-16})$$

Après la 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 :

$$\varepsilon'_p(x) = \frac{\sigma'_p(x)}{E_p} \quad (\text{III-17})$$

Avant rentrée d'encrage, la tension a l'abscisse x était donnée par la formule

$$\sigma_p(x) = \sigma_{p0} \cdot e^{-(f \cdot \alpha + \varphi \cdot x)} \approx \sigma_{p0} \cdot (1 - f \cdot \alpha + \varphi \cdot x) \quad \text{III-18}$$

On peut écrire que g est la somme des pertes d'allongement

$$(\varepsilon_p(x) - \varepsilon'_p(x))$$

$$g = \int_0^d [\varepsilon_p(x) - \varepsilon'_p(x)] dx \quad \text{III-19}$$

Où

$$g = \frac{1}{E_p} \int_0^d [\sigma_p(x) - \sigma'_p(x)] dx \quad \text{III-20}$$

Avec : g : somme des pertes d'allongement

Si la III – 7 la valeur de cette intégrale est égale à la surface du triangle IJK

$$gE_p = \text{aire du triangle IJK} = \frac{\sigma_{pA} - \sigma_{pA_1}}{2} \times d \quad \text{III-21}$$

d : étant distance entre A et C

D'autre part les deux triangles semblables IJK et INM donne la relation :

$$\frac{\sigma_{pA} - \sigma_{pA_1}}{2d} = \frac{\sigma_{pA} - \sigma_{pB}}{l_{AB}} \quad \text{III-21}$$

$$\text{Donc : } d = \sqrt{\frac{gE_p l_{AB}}{\sigma_{pA} - \sigma_{pB}}} \quad \text{III-22}$$

$$\sigma_{pC} = \sigma_{pA} - 2 \frac{d}{l_{AB}} (\sigma_{pA} - \sigma_{pB}) \quad \text{III-23}$$

B) Selon JSCE-SSCS :

Le terme « recul » signifie le mouvement du câble tiré vers l'ancrage avec les pièces d'ancrage. Si le recul se produit lorsqu'un câble est ancré, la perte de l'effort de traction dans le câble déjà ancre, la perte de l'effort de traction dans le câble doit être prise en compte.

Étant donné que les pièces d'ancrage entraînent une longueur de recul relativement importante, il est nécessaire de vérifier à l'avance la longueur de recul et d'examiner la perte de force de traction dans l'armature et la zone d'influence du recul en supposant une longueur un peu plus grande que prévu pour être du côté de sécurité.

Étant donné que la longueur de recul varie selon les éléments d'ancrage, il est nécessaire de déterminer la longueur de recule pour chaque dispositif d'ancrage en se référant à la littérature telle que : Recommendations for Design and construction of Prestressed concret structures (1991). S'il n'y a pas de frottement entre le câble et la gaine lorsque des câbles internes ou des câbles de précontrainte non adhérents sont utilisés, la perte de la force de traction est constante sur la longueur du câble comme le montre la Fig. III -5. Dans ce cas, la zone délimitée par a', b', o', o", b" et a" peut être calculée comme $\Delta p * l$, et la perte de force de traction dans l'armature due au recul d'ancrage peut être calculée directement à partir de l'équation suivent :

$$\Delta p = \frac{\Delta l}{l} E_p A_p \quad \text{(III-24)}$$

Où, Δp : perte de force de traction au recul de l'armature

Δl : Longueur de recul (raccourcissement de l'armature du au recul)

l : Longueur de l'armature de précontrainte

E_p : Module de Young de l'armature de précontrainte

A_p : Aire de la section transversale de l'armature de précontrainte

S'il y a frottement entre l'armature et la gaine, la perte de force de traction dans l'armature peut être déterminée par la méthode graphique en suivant les étapes 1) à 4) décrites ci-dessous en supposant que le frottement induit lorsque l'opération mise en tension et le frottement induit a cause de recul sont la mêmes.

Déterminez à partir de l'équation. (III-23) la distribution a' , b' et o' de la tension dans le câble immédiatement avant l'ancrage en supposant que l'effort de traction initial à l'extrémité de mise en tension est P , en tenant compte du frottement entre le câble et la gaine.

Supposez l'endroit du point c sous l'influence du recul et trouvez a'' , b'' et c qui sont symétriques de a' , b' et c par rapport à l'axe horizontal $c-e$.

Calculer l'aire délimitée par les points a' , b' , c , b'' et a'' , puit trouver la position du point c auquel : $A_{ep} = E_p \cdot A_p \cdot \Delta l$ (Voir équation. (III-25), est valable et déterminer la distribution de a'' , b'' , c et o' de la force de traction dans le câble immédiatement après l'ancrage.

Trouvez la tension dans l'armature dans une section transversale de conception arbitraire à partir de la distribution a'' , b'' , c et o'' . La force de traction dans l'armature à l'extrémité active est P immédiatement après l'ancrage.

$$\Delta l = \frac{A_{ep}}{E_p \cdot A_p} \quad (\text{III-25})$$

Où A_{ep} : aire de la région ombrée illustrée à la Fig. III -5 (b) (= aire délimitée par a' , b' , c , b''

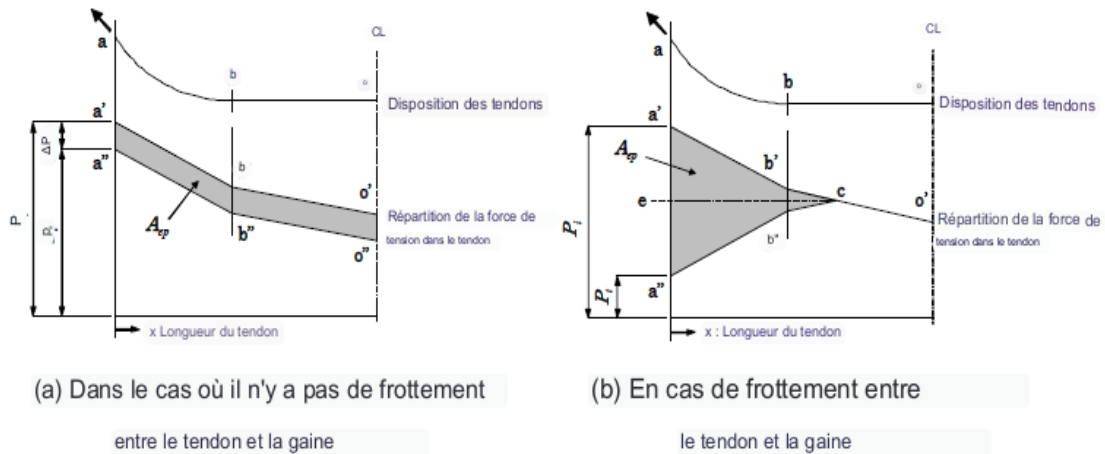


Fig. III - 9: Répartition de l'effort de traction dans le câble interne et le câble de précontrainte non adhérent après recul d'ancrage

La perte de force de traction due au recul d'ancrage qui se produit lorsqu'un câble externe est ancré, peut être calculée par une méthode similaire à la méthode utilisée pour les câbles internes. Cependant, étant donné que la partie libre du câble n'est pas affectée par le frottement, la force de traction dans cette partie diminue uniformément en raison du recul. En général, la longueur de la partie dans laquelle un câble externe est en contact avec des déviateurs (Tronçon b_1 - b_2 dans la Fig. III-9) est courte. Par conséquent, l'influence du recul peut atteindre le point de mi-portée d'un câble externe (l'endroit c) comme illustré à la Fig. III-9 (b) si la déviation angulaire de la ligne centrale du câble externe est petite ou si la longueur du recul est grande. Lorsque l'on considère l'influence du recul d'ancrage en relation avec un câble externe, la force de traction dans le câble dans une section transversale de conception arbitraire peut être déterminée en calculant la surface de la zone délimitée par a' , b_1' , c , b_2' , a'' ou la zone délimitée par a' , b_1' , b_2' , o' , o'' , b_2'' , b_1'' et a'' sur la base de l'équation (III-25) (Voir Fig. III-9), en prêtant une attention particulière aux considérations mentionnées ci-dessus.

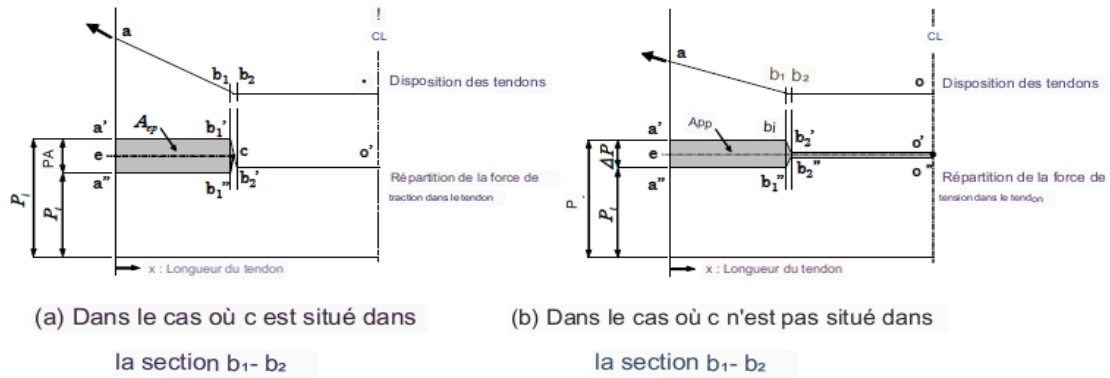


Fig. III - 10: Répartition de la force de traction dans le câble externe après recul d'ancrage

III.3.1.3. Perte de tension par déformations instantanées du béton :

A) Selon BPEL :

Toute action permanente j appliquée après l'ancrage d'un câble de précontrainte entraîne une variation de contrainte $\Delta\varepsilon_{bj}$ dans le béton adjacent, ce qui entraîne un raccourcissement.

$$\Delta\varepsilon_{bj} = \frac{\Delta\sigma_{bj}}{E_{ij}}$$

Le câble considéré subit la même variation de déformation (raccourcissement), d'où une perte de tension : $\Delta\sigma_{bj} = E_p \frac{\Delta\varepsilon_{bj}}{E_{ij}}$ (article 4.2.3.1 Béton précontraint-Robert CHAUSSIN)

Le béton et le premier câble se raccourcissent lorsque le second câble est tendu. La mise en tension du troisième câble entraîne un raccourcissement du béton et des deux premiers câbles. La mise en tension du n ème câble entraîne un raccourcissement du béton et des premiers câbles ($n-1$). La formule suivante peut être utilisée pour calculer la perte totale après la mise en tension de tous les câbles :

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \frac{n-1}{2n} \sigma_b(x) \frac{E_p}{E_{ij}} \quad (\text{III-26})$$

Avec :

$\sigma_b(x)$: est la contrainte moyenne du béton au niveau du centre de gravité CDG des câbles.

Remarque :

- Si la pièce à précontraindre contient un seul câble, ou si tous les câbles sont tendus simultanément, les pertes élastiques sont nulles ($\Delta\sigma_{racc}(x)$). En effet, le raccourcissement élastique a lieu en même temps que la mise en tension des câbles, car le vérin s'appuie sur la pièce.

- Pour le calcul de cette perte, le BPEL donne la formule suivant (article 3.3.1.3.BPEL):

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = E_p \sum k \frac{\Delta\sigma_{bj}}{E_{ij}},$$

Dans laquelle il préconise de prendre un coefficient « $K = 1/2$ » 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 « $K = 1$ » 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

B) Selon JSCE-SSCS :

- a) Pour le câble de précontrainte en pre-tension (section 15.3.I(i),JSCE 15):

$$\Delta\sigma_p = n_p \sigma'_{cpg} \quad \text{(III-27)}$$

- b) Pour le câble interne et le câble de précontrainte non adhérent :

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{2} n_p \sigma'_{cpg} \frac{N-1}{N} \quad \text{(III-28)}$$

$\Delta\sigma_p$: Perte de précontrainte dans le câble de précontrainte

n_p : Rapport du module de Young du câble à celui du béton $n_p = \frac{E_p}{E_c}$

σ'_{cpg} : Contrainte de compression du béton due à la précontrainte au centre de gravité de câble

n_p : Nombre de fois de mise en tension (nombre de groupes de câble)

- c) Pour le câble externe :

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{2} E_p A_p \frac{\Delta L}{L} \frac{N-1}{N} \quad \text{(III-29)}$$

$\Delta\sigma_p$: Perte de l'effort de précontrainte dans le câble externe

E_p : Module de Young du câble externe

A_p : Aire de la section transversale du tendon externe

ΔL : Quantité de mouvement de l'élément en béton entre les point d'ancrage du a la tension initial P

L : Distance entre les points d'encrages

N : Nombre de fois de mise en tension (nombre de câble)

Cependant, si le point d'ancrage du câble externe est situé au niveau ou à proximité du centre de gravité et que la déformation longitudinale n'est pas restreint, la déformation entre les point d'ancrage $\frac{\Delta L}{L}$, dans l'équation (III-30) peut être calcule à partir de l'équation suivant :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{P}{E_c A_c} \quad (\text{III-30})$$

P : Force de précontrainte introduit dans le câble extérieur

E_c : Module de Young du béton

A_c : Aire totale de la section transversale du béton

III.3.2. Pertes de tension différées :

Dans le cas de précontrainte par 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 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) Selon BPEL :

A1. Perte de tension due au retrait du béton

Le retrait principalement le résultat de l'évaporation excessive de l'eau. Il est possible de simplifier en considérant que le retrait final ne dépend que des conditions climatiques.

Le retrait commence lorsque le béton se durcit, et les câbles ne sont tendus que lorsque le béton a acquis la résistance requise. Les câbles qui sont fixés sur le béton ne subissent que le raccourcissement causé par le retrait après la mise en tension.

On peut calculer le raccourcissement dû à la part de retrait, qui est définie par le raccourcissement total ε_r et sa loi d'évolution $r(t)$, en se basant sur l'âge du béton à la mise en tension t_0 .

Connaissant le raccourcissement total ξ_r et sa loi d'évolution $r(t)$ et connaissant l'âge t_0 du béton à la mise en tension on peut déterminer le raccourcissement dû à cette part de retrait qui est : $(\frac{\Delta l}{l})_{b(t_0,\infty)} = \varepsilon_r [1 - r(t_0)]$ (voir fig. ci-dessous) : (BPEL Article 3.3.2)

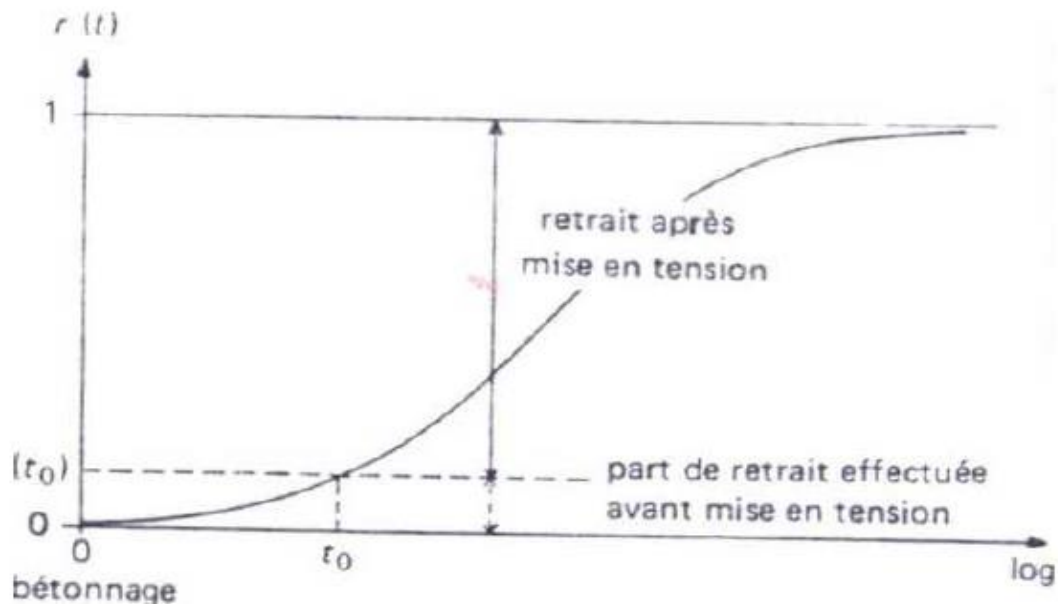


Fig. III - 11: Evolution du retrait du béton avant et après mise en tension des câbles

Le raccourcissement des câbles est égal à celui du béton on a donc : $\Delta l/l = \xi_r [1 - r(t_0)]$

Les câbles étant dans leur domaine élastique : $(\Delta L/L)_p = \Delta\sigma_r / E_p$

Avec $\Delta\sigma_r$ = variation de tension dans les câbles due à ce raccourcissement ; donc la perte totale par retrait selon le BPEL Article 3.3.21, s'exprime par :

$$\Delta\sigma_r = \varepsilon_r [1 - r(t_0)] * E_p \quad \text{(III-31)}$$

$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_r * r(t)$. ou la fonction d'évolution du retrait $r(t)$ varie entre 0 et 1 respectivement au temps $t=0$ au temps $t = \text{infini}$.

C'est l'expression retenue par la perte de retrait a un temps t l'expression devient ;

$$\Delta\sigma_r = \varepsilon_r[r(t) - r(t_0)] * E_p \quad (\text{III-32})$$

$\Delta\sigma_r$: Perte due au retrait

ε_r : Retrait total du béton, tel qu'il définit à l'article 2.1.5.1

t_0 : Age du béton a la mise en tension

$$r(t) = \frac{t}{t+9r_m} \quad (\text{III-33})$$

$r(t)$: Une fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps définie à l'article 2.1.5.1 du BPEL

r_m : Est le rayon moyen de la section (=rapport de la section transversale a son périmètre) exprimé en mètre, il indique le chemin moyen par l'eau durant son équation, ce qui conditionne du retrait dans le temps t .

A2. Perte de tension due au fluage du béton :

L'augmentation de la déformation du béton sous des contraintes de compression continue est connue sous le nom de fluage. Ce type de déformation entraîne un raccourcissement de l'élément, ce qui implique une perte de tension dans l'armature active qui augmente proportionnellement à la déformation du fluage.

Le BPEL, article 3.3.22, donne la perte finale de tension due au fluage du béton dans le temps,

$\Delta\sigma_{fl}(t)$, par la formule :

$$\Delta\sigma_{fl}(t) = (\sigma_b^F + \sigma_b^M) \frac{E_p}{E_{IJ}} \quad (\text{III-34})$$

Avec :

- ✓ σ_b^F étant la contrainte finale, 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.
- ✓ σ_b^M : Contrainte permanente maximale dans le béton au ni du câble moyen
- ✓ j : l'âge du béton lors de sa mise en tension.

Remarque :

Selon le BPEL, Si : $\sigma_b^F \leq 1.5 \sigma_b^M$, il est loisible, à titre de simplification, d'évaluer la perte finale de tension due au fluage du béton par l'expression suivant :

$$\Delta\sigma_{fl}(t) = 2.5\sigma_b^F \frac{E_p}{E_{IJ}} \quad (\text{III-35})$$

A3. Perte de tension due à la relaxation de l'acier :

Le relâchement de la tension dans les armatures de précontrainte à longueur constante est appelé relaxation. C'est un phénomène qui dépend de la contrainte appliquée, du temps et de la température des aciers.

La loi d'évolution de la relaxation dans le temps est assez complexe, par conséquent, la perte de tension par relaxation des aciers $\Delta\sigma_\rho$ est généralement évaluée à sa finale définie par l'expression suivante (article.3.3.23, BPEL) :

$$\Delta\sigma_\rho = 0,06\rho_{1000}(\mu - \mu_0)\sigma_{pi} \quad (\text{III} - 36)$$

ρ_{1000} : Coefficient de relaxation des aciers de précontrainte à 1000 h (en %).

μ_0 : Coefficient qui tient compte du taux en delà duquel il n y a pas de relaxation, il est égale à :

0,43 Pour les aciers de très basse relaxation

0,35 Pour les aciers de basse relaxation

0.30 Pour les aciers de relaxation normale

$$\mu = \sigma_{pi} / f_{prg}$$

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

f_{prg} : Contrainte limite garantie à la rupture des aciers de précontrainte.

A4. Évaluation de la valeur des pertes de tension différées :

La formule (III – 36) donnée pour le calcul de la perte de tension due à la relaxation des aciers de précontrainte, suppose que la longueur de ces armatures est constante. Cependant, 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 (III – 37) par le coefficient **5/6**, lors du calcul de la perte différée totale.

Ainsi, La perte différée finale est prise égale à :

$$\Delta\sigma_d(x) = \Delta\sigma_r + \Delta\sigma_{fl} + \frac{5}{6} \Delta\sigma_\rho \quad (\text{III} - 37)$$

Lorsqu'il est nécessaire de tenir compte de l'évolution des pertes de tension en fonction du temps, on peut admettre que la valeur totale des pertes différées $\Delta\sigma_d(t)$, évaluée à **j** jours après la mise en tension du groupe d'armatures considéré, suit la loi suivante :

$$\Delta\sigma_d(t) = r(j)\Delta\sigma_d \quad (\text{III} - 38)$$

Où : la fonction $r(j)$ étant identique à la fonction $r(t)$ relative au retrait du béton [Béton précontraint-Robert CHAUSSIN (Article 4.4.4)].

B) Selon JSCE-SSCE

B1. Perte de tension par retrait du béton

(Section 15.3.6 et 7, JSCE15)

En règle générale, la perte de contrainte de traction dans un câble due au fluage et au retrait du béton doit être déterminée par une analyse de fluage appropriée tenant en compte l'influence des armatures :

La perte de force de traction ($P_t - P_e$) dans le câble externe due au retrait et fluage du béton, peut être calculée à partir de l'équation suivante.

$$P_e = P_t - \frac{n_p \rho_p * \varphi * P_t + E_p * A_p * \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \rho_p (1 + \chi \varphi)} \quad (\text{III} - 39)$$

Où, P_e : Force de précontrainte dans le câble extérieur déterminée en tenant compte de l'influence du fluage et du retrait

P_t : Force de précontrainte dans le câble extérieur immédiatement après mise en tension (après pertes instantanées).

n_p : Rapport du module d'Young du câble de précontrainte à celui du béton ; $n_p = E_p/E_c$

ρ_p : Rapport des sections transversales de l'armature (câble) au béton ; $\rho_p = A_p/A_c$

φ : Coefficient de fluage du béton comme défini par le tableau suivant :

Tableau III- 4: Coefficients du fluage pour béton léger

La condition d'environnement	Coefficients de fluage pour béton léger âge du béton auquel la précontrainte est introduite ou la charge est appliquée				
	4 à 17 jour	14 jour	28 jour	3 mois	1 an
Extérieur	2.0	1.3	1.1	1.0	0.8
Intérieur	1.8	1.3	1.1	1.0	0.8

χ : Facteur de vieillissement ; généralement, $\chi=0,8$

ε'_{cs} : Déformation de retrait du béton

Tableau III- 5: Déformation du retrait du béton

Environnement la condition	Age du béton				
	moins de 3jour	4 à 7 jour	28 jour	3 mois	1 ans
Extérieur	400	350	230	200	120
Intérieur	730	620	380	260	130

E_p : Module d'Young du câble externe

E_c : Module d'Young du béton

A_p : Aire de la section transversale du câble externe

A_c : Aire de section totale du béton

B.2 Perte de tension par fluage du béton

Dans le but de dériver équation (III-39), on suppose que les variations de tension dans le câble externe dus à la contrainte de flexion dans la section transversale peuvent être ignorées car l'hypothèse de Navier ne peut pas être appliquée aux câbles externes. On suppose également que les variations de déformation dans le câble externe sont la somme de la déformation de retrait dans le béton et de la déformation de fluage longitudinale dans toute la section transversale du béton due à la force de précontrainte. Dans ce cas, les variations de déformation dans le béton et les variations de déformation dans le câble externe peuvent être exprimées par l'équation (III – 40) et (III – 41), respectivement, et l'équation (III – 39) est une équation obtenue à partir du développement des équations suivantes :

$$\Delta\varepsilon_c(t = \infty) = \frac{P_t}{E_c A_c} \varphi - \frac{P_t - P_e}{E_c A_c} (1 + \chi\varphi) + \varepsilon'_{cs} \quad (\text{III} - 40)$$

$$\Delta\varepsilon_p(t = \infty) = \frac{P_t - P_e}{E_p A_p} - \Delta\varepsilon_c(t = \infty) \quad (\text{III} - 41)$$

$\Delta\varepsilon_c(t = \infty)$: Variation de déformation dans le béton immédiatement après mise en tension (après pertes instantanées) jusqu'à $t = \infty$

$\Delta\varepsilon_p(t = \infty)$: Changement de déformation dans le câble externe après mise en tension (après pertes instantanées) jusqu'à $t = \infty$.

L'équation (III – 39) tient compte seulement de l'influence du fluage et du retrait du béton sur l'effort de précontrainte dans les câbles externes. Si des câbles internes et externes sont utilisés, il est nécessaire de calculer l'effort de précontrainte dans les câbles externes par une méthode appropriée, en tenant compte de l'influence du fluage du béton dû à l'effort de précontrainte dans les câbles internes.

Si la perte de la force de précontrainte dans un câble externe due au fluage et au retrait du béton doit être calculée avec précision, il est nécessaire de déterminer la variation de déformation au centre de gravité du câble externe due au fluage et au retrait de l'élément en béton sur toute la longueur du câble externe et calculer, à partir de la déformation moyenne ainsi déterminée, la perte de l'effort de traction dans le câble externe. Cela nécessite des calculs très complexes et laborieux, mais récemment, il est devenu possible de modéliser une structure ou un câble externe en fonction de la configuration de la structure, des conditions d'appui, etc., et de calculer la force de précontrainte dans le câble externe grâce à l'analyse structurelle.

Les trois méthodes illustrées à la Fig. III-8 sont largement utilisées et sont brièvement décrites ci-dessous.

Étant donné que ces méthodes peuvent également être utilisées pour d'autres applications telles que le calcul des efforts de conception, ces méthodes doivent être utilisées de manière rationnelle en fonction des états limites considérés au stade de la conception.

(i) Dans la méthode d'évaluation des éléments, un câble externe est modélisé comme un élément de membrure et la force de tension initiale est donnée sous la forme d'une déformation axiale équivalente. Étant donné que la déformation de la membrure suit la déformation de la poutre, l'influence du fluage et du retrait du béton et l'influence des charges peuvent être analysées directement lorsque la tension change dans la membrure.

(ii) Dans la méthode d'évaluation de la force externe, la force de précontrainte est laissée agir comme une charge concentrée ou une charge répartie aux emplacements d'ancrage et aux emplacements des déviateurs du câble externe. Le point d'action de chaque charge et la direction d'action sont clairement indiqués, et la force de précontrainte peut être clairement évaluée comme une force externe dans la partie libre du câble.

(iii) Dans la méthode d'évaluation de la force interne, la force de précontrainte est laissée agir dans le modèle d'analyse lorsque les forces internes (force axiale N , moment excentrique M) et les forces statiquement indéterminées dues à la force de précontrainte sont calculées. Ceci est basé sur la méthode conventionnelle du câble interne, et la force de précontrainte (force

interne) due au câble externe et la force de cisaillement négative doivent être considérées séparément.

Chaque type de modèle d'analyse et les approches de calcul des forces de précontrainte du câble extérieur décrites dans cette section sont récapitulés dans le tableau C15.3.3 cité dans les normes JSCE15.

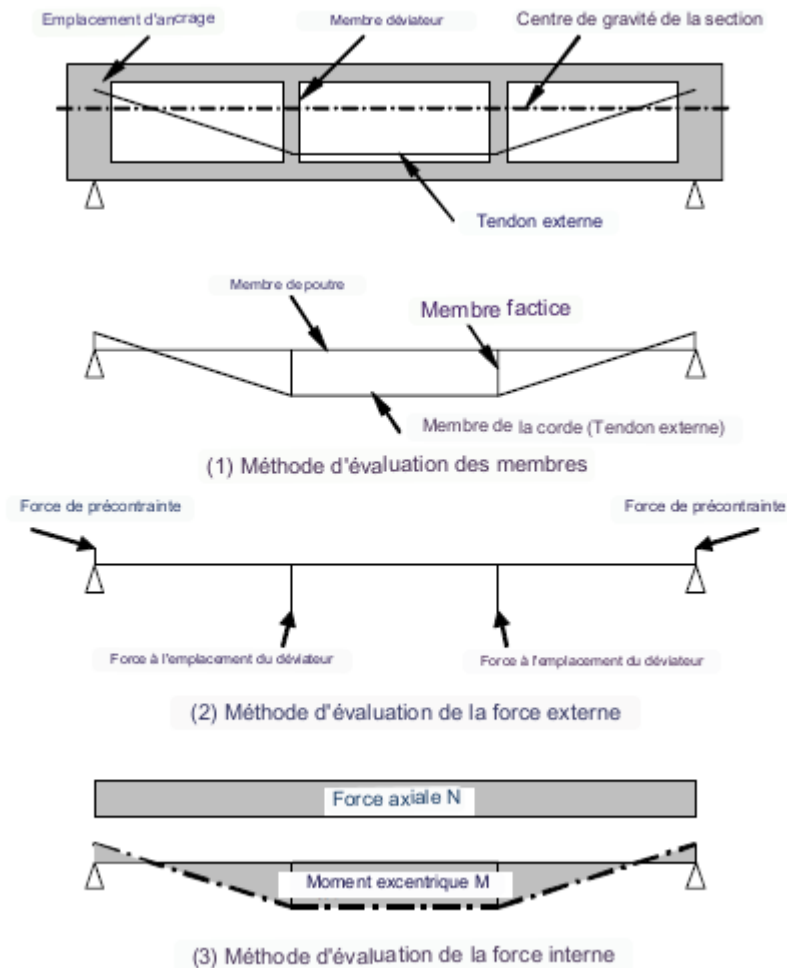


Fig. III - 12 : modélisation du membre avec le tendon externe

B.3. Perte de tension due à la relaxation de l'acier :

La perte de précontrainte dans l'armature de précontrainte due à la relaxation peut être calculée à partir de l'équation suivante (Section 15.3.1, JSCE15) :

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt} \quad \text{(III - 42)}$$

Où, $\Delta\sigma_{pr}$: perte de tension dans l'armature de précontrainte due à la relaxation de l'acier de précontrainte

γ : Coefficient de relaxation apparente de l'acier de précontrainte (Voir Tableau III.4)

σ_{pt} : Contrainte de traction de l'acier de précontrainte juste après mise en tension (après pertes instantanées)

Tableau III- 6: Coefficient de relaxation apparente de l'acier de précontrainte, γ

Type d'acier de précontrainte	Rapport de relaxation apparente de l'acier de précontrainte, γ
Fil et toron de précontrainte	5%
Barre de précontrainte	3%
Acier de précontrainte à faible relaxation	1,5 %

Si la méthode de l'armature externe est utilisée, la perte de force de précontrainte due au fluage et au retrait du béton est généralement plus faible que dans la méthode de l'armature interne. Dans de tels cas, le rapport de relaxation apparente a tendance à devenir supérieur aux valeurs indiquées dans le tableau (III.4). Pour cette raison, si la contrainte de traction initiale est comprise entre 50 % et 75 % de la résistance à la traction, le coefficient de relaxation apparente γ d'un câble externe utilisé pour calculer la perte de force de précontrainte doit être calculé à partir de l'équation (III – 35) après avoir déterminé le taux net de relaxation γ_0 à partir du tableau (III.4) et de la figure C5.3.1 cités dans les normes JSCE15.

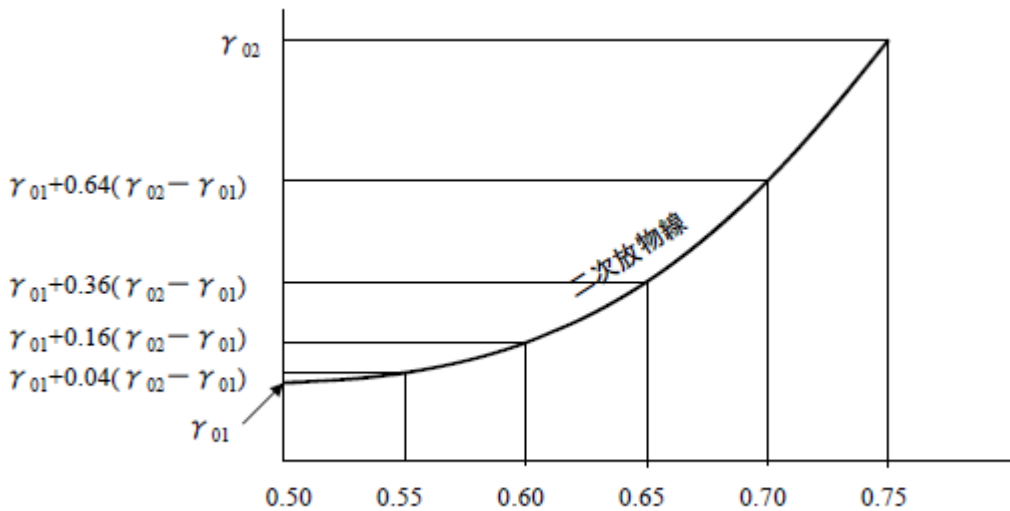


Fig. III - 13: Relation entre la contrainte de traction initiale et le rapport de relaxation

Tableau III- 7 : rapport de relaxation γ_0 correspondant à la contrainte de traction initiale

Type d'acier de précontrainte	Valeur spécifiée pour la contrainte de traction initiale divisée par la résistance à la traction	
	0.50	0.75
Fil et toron de précontrainte	$\gamma_{01} = 3\%$	$\gamma_{01} = 1\%$
Barre de précontrainte	$\gamma_{01} = 1\%$	$\gamma_{01} = 1\%$
Acier de précontrainte à faible relaxation	$\gamma_{01} = 1\%$	$\gamma_{01} = 1\%$

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{2(P_t - P_e)}{P_t} \right) \quad (\text{III} - 43)$$

γ : Coefficient de relaxation apparente de l'armature externe

γ_0 : Coefficient net de relaxation de l'acier de précontrainte

$P_t - P_e$: Perte de force de précontrainte due au fluage et au retrait

P_t : Force de traction dans l'armature externe immédiatement après mise en tension (après pertes instantanées).

P_e : Force de précontrainte dans l'armature externe déterminée tenant en compte de l'influence du fluage et du retrait.

Selon les normes JIS G3536-2008 (section 6, page 3), la valeur de relaxation des aciers évaluée à 1000 heures pour une tension initiale de 70% de la contrainte de rupture de ces aciers est égale à 8% pour les aciers de relaxation normale (N) et 2,5% pour les aciers de basse relaxation (L).

B4. Evaluation de la valeur des pertes de tension différées :

- Les pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{pi} \quad \text{III - 44}$$

- Les pertes différées :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_{shcr} + \Delta\sigma_{pr} \quad \text{III - 45}$$

- Les pertes totales :

$$\Delta\sigma_t = \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_d \quad \text{III - 46}$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

IV.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre on compare les approches de calcul de pertes de précontrainte par post-tension selon les deux codes de conception internationaux en l'occurrence la norme Française BPEL et le Code Japonais JSCE-SSCE. La comparaison est faite en déterminant les modes de réalisation de la précontrainte de la post tension

IV.2 PERTE INSTANTNEES :

IV.2.1 Perte par frottement :

Par comparaison des équations de calcul de perte par frottement selon les deux codes JSCE-SSCE et BPEL on constate qu'elles sont basées sur le même fondement théorique. Ces équations sont indiquées dans le Tableau IV.1 ci-après.

Il est évident que les deux méthodes utilisent la même équation (exponentielle) pour calculer les pertes par frottement. La différence réside dans les valeurs données aux coefficients de frottement, qui sont obtenus par expérience. Ces derniers dépendent principalement des types d'armature (toron, bar, fil), de la surface de contact (protégé graisse), de la technique de mise en tension et du type de coulis d'injection (cire ou ciment) pour les éléments de post tension.

Tableau IV. 1– Comparaison des formules de perte par frottement.

Selon BPEL	Selon (JCE-SSCE)
$\sigma_p(x) = \sigma_{p0} \cdot e^{-(f \cdot \alpha + \varphi \cdot x)}$	$p_x = p_i \cdot e^{-(\mu \alpha + \lambda x)}$

Pour la tension à l'origine les deux codes utilisent la même approche de calcul qui dépend de la contrainte limite élastique et la contrainte de rupture de l'acier de précontrainte utilisé (voir chapitre III).

Pour les coefficients de frottement, il est difficile de les comparer vu que ces coefficients dépendent de plusieurs facteurs. Néanmoins, on essaie de comparer quelques valeurs de ces coefficients, dans le cas où les câbles propres (non oxydés) sont posés dans des gaines métalliques qui ne présentant ni oxydation ni dégrafage du feuillard ni déchirure, comme indiqué dans les Tableaux IV.2 et IV.3.

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Les coefficients de frottement sont les principaux facteurs influençant les pertes pendant la mise en tension, en plus des pertes causées par des erreurs causant des dommages aux conduits ou un mauvais alignement. Cependant, il y a des situations dans lesquelles une détermination précise des coefficients de frottement μ et f est nécessaire.

D'une façon générale, l'attention est attirée sur le fait que la valeur effective de coefficient de frottement voire tableau IV.2 et IV.3 dépend beaucoup de la conception de l'ouvrage et de son câblage, des modalités et de la qualité de l'exécution.

Tableau IV. 2– Comparaison des formules de perte par frottement.

Selon le code BPEL		Selon Cod JSCE-SSCE	
nature des armatures	f	nature de gain	μ
Fils	0,16-0,21	gain en acier (pour fil et torons)	0.30
Torons	0,18-0,23	gain en polyéthylène (pour fil et torons)	0.15

Tableau IV. 3 – Comparaison des coefficients de frottement en ligne ($m^{\wedge}(-1)$).

Selon le code BPEL		Selon Cod JSCE-SSCE	
nature des armatures	φ	nature de gain	λ
fils et torons	0,0020-0.0030	Gain en acier ou en polyéthylène	0.004

D'après les Tableaux IV.2 et IV.3 on remarque que les valeurs de coefficient de frottement μ et λ selon le code JSCE-SSCE sont de gamme très large ($\mu = 0.15-0.30$ et $\lambda = 0.004$) dépendant de type de gaine utilisée (acier ou polyéthylène). Cependant le BPEL existe des valeurs de coefficient de frottement de gamme moins important ($f = 0.16-0.23$ et $\varphi = 0,0020-0,0030$) car ce dernier limite l'utilisation de ces valeurs pour des gaines métalliques et câbles spécifiques et conditionnés (gaines propres protégées, câbles huilés...etc.).

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 4– Comparaison d’effets des coefficients de frottement couramment utilisés.

Type	Selon BPEL		Selon JSCE-SSCE	
12φ8	f	0.23 (rd^{-1})	μ	0.3 (rd^{-1})
	φ	0.003 (m^{-1})	λ	0.004 (m^{-1})
	f_{prg}	1719(MPa)	f_{puk}	1860 (MPa)
	f_{peg}	1476 (MPa)	f_{pyk}	1675(MPa)
	σ_{p0}	1328.4 (MPa)	σ_{p0}	1302(MPa)
	$\sigma_p(x)$	305.5α – 4x(Mpa)	σ_{pi}	1302-7x (MPa)

Nota :

$$\sigma_{p0} = \min(0.80 * f_{prg}; 0.90f_{peg}) \quad \text{Pour le code BPEL}$$

$$\sigma_{p0} \approx (1 - f\alpha - \varphi x)$$

$$\sigma_{pi} = \min(0.70 * f_{puk}; 0.850 * f_{pyk}) \quad \text{Pour JSCE-SSCE}$$

D’après le Tableau IV.4, on observe que les valeurs de la tension initiale avec les coefficients de frottement selon le code JSCE-SSCE sont légèrement supérieures à celles du code BPEL. Ceci qui revient à la différence entre les caractéristiques mécaniques et physiques des aciers de précontrainte approuvées par ces deux codes. Parmi ces caractéristiques les plus importantes sont la limite de rupture (f_{prg} ou f_{puk}) ; la limite élastique (f_{peg} ou f_{pyk}) le coefficient de frottement en ligne (λ ou φ).

IV.2.2 Perte par recul d’ancrage :

En comparant les formules de calcul des pertes par recul d'ancrage pour les deux codes étudiés, il est évident qu'elles partagent la même base théorique. Les valeurs de recul d'ancrage pour les deux codes sont également calculées à partir de la valeur déterminée par l'arrêté d'agrément du procédé de précontrainte utilisée. En l'absence de données expérimentales sur le recul d'ancrage, il est préférable de faire la comparaison théoriquement à l'aide d'une application numérique, qui sera présentée à la fin de ce chapitre.

IV.2.3 Perte par déformations instantanées du béton :

Dans la construction réalisée par la méthode de post -tension, généralement, les câbles sont tendus un par un ou groupe par groupe. Par conséquent, le béton subit une déformation élastique à chaque mise en tension d’un câble ou d’un groupe de câbles, et l’effort de traction dans les câbles préalablement mis en tension diminue progressivement sous l’influence des tendons mis en tension ultérieurement.

En comparant les pertes par déformations instantanées du béton, il est évident que les formules de calcul de la perte par déformations instantanées du béton utilisées dans les deux règlements reposent sur la même base théorique, comme indiqué dans le Tableau IV.5. La différence entre elles résulte des valeurs de module d’élasticité et de contrainte du béton. Il est à souligner que les valeurs de module d’élasticité des aciers de précontrainte utilisées par ces deux codes sont presque identiques. Cependant, le module de déformation du béton selon le BPEL exhibe des valeurs importantes par rapport à celui du JSCE-SSCE. A titre d’exemple, pour une classe de béton de résistance à la compression de $30MPa$, le BPEL donne une valeur de module $=34180 MPa$ alors que la norme japonaise JSCE-SSCE présente une valeur $=28000MPa$. Tableau IV.5 : Comparaison des formules de perte par raccourcissement élastique du béton.

Tableau IV. 5-Comparaison des formules de perte par raccourcissement élastique du béton.

Selon BPEL	Selon (JCE-SSCE)
$\Delta\sigma_{racc}(x) = \frac{n - 1}{2n} \sigma_b(x) \frac{E_p}{E_{ij}}$	$\Delta\sigma_p = \left[\frac{N - 1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_c} \cdot \sigma'_{cpg}$

IV.3 Pertes différées :

IV.3.1 Perte par retrait :

Les approches de calcul des pertes de tension par retrait selon les deux codes (BPEL et JSCE-SSCE) sont basées sur le même fondement théorique. La différence entre-elles dépendent des paramètres utilisés par chaque code pour évaluer la valeur du retrait et par conséquent la perte de tension par retrait, comme le montre le Tableau IV.6. Les valeurs de retrait utilisées pour le calcul de la perte par retrait selon les deux codes (BPEL et JSCE-SSCE) dépendent de plusieurs facteurs tels que : la quantité d'eau et de ciment, présence d'adjuvants, nature e finesse du ciment, humidité relative (RH), l'état de durcissement du béton etc.

Tableau IV. 6- Comparaison des formules de perte par retrait

Selon BPEL	Selon (JCE-SSCE)
- Perte finale ($t \rightarrow \infty$) : $\Delta\sigma_{r\infty}(t) = \varepsilon_r \cdot [1 - r(t_0)]E_p$	$P_e = P_t - \frac{n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot P_t + E_p A_p \cdot \varepsilon'_{CS}}{1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi)}$
- Perte à temps t : $\Delta\sigma_{r\infty}(t) = \varepsilon_r(\infty) \cdot [r(t) - r(t_0)]E_p$ $r(t) = \frac{t_0}{t_0 + 9r_m}$ $r_m = \frac{B}{U}$	

D'après le Tableau IV.6, on remarque que le code BPEL introduit une loi d'évolution du retrait qui permet d'évaluer la valeur du retrait en fonction de temps et par conséquent la perte par retrait à un temps **t**. Cependant, le Cod JSCE-SSCE la perte de contrainte de traction dans un câble due au fluage et au retrait du béton doit être déterminé par une analyse de fluage appropriée en tenant compte de l'influence de l'armature.

IV.3.2 Perte par fluage :

Tableau IV. 7-Comparaison des formules de perte par fluage.

Selon le code BPEL	Selon le code JSCE-SSCE
$\Delta\sigma_{fl}(t) = (\sigma_b^F + \sigma_b^M) \frac{E_p}{E_{IJ}}$ <p>Si $\sigma_b^F \leq 1.5 \sigma_b^M \rightarrow \Delta\sigma_{fl}(t) = 2.5\sigma_b^F \frac{E_p}{E_{IJ}}$</p>	$\Delta\varepsilon_c(t = \infty) = \frac{P_t}{E_c A_c} \varphi - \frac{P_t - P_e}{E_c A_c} (1 + \chi\varphi) + \varepsilon'_{CS}$ $\Delta\varepsilon_p(t = \infty) = \frac{P_t - P_e}{E_p A_p} - \Delta\varepsilon_c(t = \infty)$

Les formules de calcul des pertes de tension par fluage selon les règlements BPEL et JSCE-SSCE sont basées sur le même fondement théorique dépendant des modules d'élasticité des aciers et du béton, de la contrainte du béton et du coefficient de fluage ($\Delta\sigma_{fl}(t)$), comme le montre le tableau IV.7. Il est à noter que le code japonais évalue la perte par fluage conjointement à la perte par retrait comme déjà expliqué au paragraphe du calcul de la perte par retrait vu précédemment. La différence entre ces formules de calcul de perte par fluage est due principalement à l'effet des paramètres suivants :

a) Module d'élasticité des aciers :

La valeur du module d'élasticité des aciers selon le code japonais est dans la gamme de (190-210 KN/mm²) et peut être prise égale à 200 KN/mm² (Section 5.3.4(2), JSCE15) qui est presque similaire à celle recommandée par les règles BPEL françaises (190-200 KN/mm²).

b) Module d'élasticité du béton :

Ce module dans la formule simplifiée du code BPEL, est déterminé à l'âge du béton à la mise en tension des câbles. Il est à souligner que le module cité dans la formule simplifiée est provenu du remplacement du coefficient de fluage existant dans la formule générale par le terme E_{i28} / E_{ij} .

c) Contrainte dans le béton

D'après le règlement BPEL, la contrainte dans le béton au niveau des câbles de précontrainte se compose de deux contraintes. La première est maximale (σ_{max}, σ_M) calculée généralement après les pertes instantanées et l'autre minimale ($\sigma_{min}\sigma_b$)

Les formules de calcul des pertes de tension par fluage selon les règlements BPEL et JSCE-SSCE sont basées sur la même base théorique, comme le montre le tableau IV.7. Ces formules sont basées sur les modules d'élasticité des aciers et du béton, ainsi que sur la contrainte du béton et le coefficient de fluage. Comme l'expliquent les paragraphes suivants, ces paramètres ont un impact significatif sur la perte par fluage :

IV.3.3 Perte par relaxation :

Les valeurs trouvées pour ces facteurs dans le calcul de la perte par relaxation des aciers dans deux codes (BPEL et JSCE-SSCE) tel que :

- ✓ LA TENSION INITIALE,
- ✓ Nuance de l'acier.
- ✓ La composition chimique de l'acier,
- ✓ Type et la raille du câble, la température, type de la gaine.

Tableau IV. 8– Comparaison des formules de perte par relaxation.

Cod BPEL	Cod JSCE-SSCE
$\Delta\sigma_p = 0,06\rho_{1000}(\mu - \mu_0)\sigma_{pi}$ $\mu = \sigma_{pi}/f_{prg}$	$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt}$ $\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{2(P_t - P_e)}{P_t} \right)$

La relaxation de l'acier est relâchement de tension longueur constante.

Elle n'apparait pour les aciers à haute limite élastique utilisée en béton précontraint pour la contrainte supérieure à 30 ou 40 % de leur contrainte de rupture garantie.

Elle dépend de la nature de l'acier de son traitement et l'on distingue des aciers suivant :

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 9- Comparaison des valeurs de relaxation maximale à 1000 heures.

Cod BPEL			Cod JSCE-SSCE		
relaxation normale	très basse relaxation	basse relaxation	Fil et toron de précontrainte	Barre de précontrainte	Acier de précontrainte à faible relaxation
8%	2.5%	4 %	5%	3%	1.5%

La différence entre ces formules est que la formule du code JSCE-SSCE tient compte directement de l'effet du retrait et du fluage sur la relaxation de l'armature au fil du temps. Cette formule n'est utilisable que pour les torons à basse relaxation, mais la relaxation des barres à haute résistance doit être déterminée à l'aide de données d'essai approuvées. Le code BPEL multiplie la perte par relaxation par le coefficient 5/6 pour prendre en compte les effets du retrait et du fluage sur la relaxation. Tous les types d'aciers précontraints peuvent utiliser la formule du (Article.3.3.24 BPEL).

Il est très important de remarquer que la formule développée par le code JSCE-SSCE est d'une utilisation simple et directe, mais plus important encore de tenir compte de la concomitance existant entre les phénomènes de relaxation des aciers, et de retrait et fluage du béton.

IV.4 Applications numériques

La comparaison des pertes de précontrainte selon les codes BPEL et JSCE-SSCE est concrétisée par deux exemples numériques afin de mieux illustrer les points de concordance et de différence entre ces deux règlements. Ces exemples concernent la prédiction des pertes de précontrainte par post-tension d'un câble moyen, de tracé parabolique symétrique situé à mi-travée d'une poutre en béton armé simplement appuyée de section rectangulaire (Figure IV.2) ou de forme **T** (Figure IV.1)

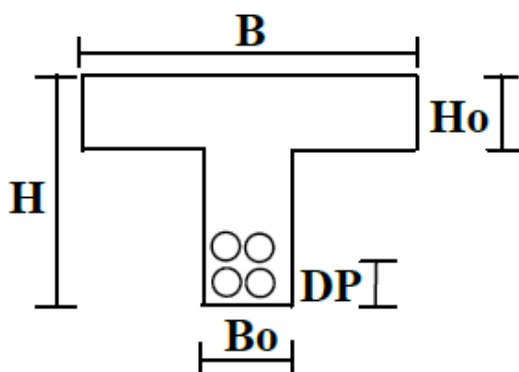


Figure IV. 2- Section en 'T'

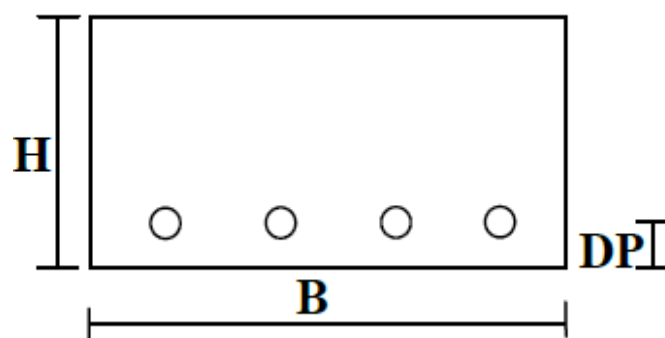


Figure IV. 1 Section Rectangulaire

IV.4.1 EXEMPLE 1

Le premier exemple concerne le calcul des pertes de précontrainte dans le câble moyen qui représente les 4 câbles $12\varnothing 7$ de type **TBR** traversant la section de la Figure IV.1 située à mi-travée d'une poutre isostatique de longueur L . Dans cet exemple, on considère que chaque câble est tiré de ses deux extrémités.

A) Etapes de calcul

A.1) Calcul des caractéristiques de la section du béton "T"

Les différentes dimensions de la section en "T", flèche du câble moyen et la longueur de la poutre sont données par le Tableau IV10 ci-dessous :

Tableau IV. 10-Dimensions de la section T

Largeur de la table (B) en m	1.00
Hauteur de la table (Ho) en m	.20
Largeur d'âme (Bo) en m	.30
Hauteur de la section (H) en m	1.00
Distance entre la fibre la plus tendue et le centre de gravité des câbles (DP) en m	.10
Diamètre de la gaine (DG) en m	.04
Nombre des câbles (N)	4.
Flèche du câble moyen (a') en m	.41
Longueur de la poutre (L) en m	25.6

Tableau IV. 11-Caractéristiques de la section ‘T’,

CARACTERISTIQUES DE LA SECTION	
SECTION NETTE DU BETON (B_n) en m ²	.4350
COORDONNEES DE LA SECTION NETTE (V_e et V_s) en m	.633 .367
RAYON MOYEN (r_m) en cm	10.9
MOMENT D'INERTIE (I_G) en m ⁴	.0393
RAYON DE GIRATION (r_j) en m	.30
EXCENTRICITE DU CABLE MOYEN (e_0) en m	.533
ROTATION DU CABLE MOYEN (θ_0)	.06406

A.1) Calcul des pertes :

Les données nécessaires pour calculer les pertes selon les deux codes BPEL et JSCE-SSCE sont indiquées dans le Tableau IV.15 ci-dessous : Nota :

$$f_{c28} = 35MPa ; f_{cm} = 35MPa ; f_{c14} = 30MPa ; f_{cm14} = 31 MPa$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 12-Données de calcul selon les deux règlements

Type des données	Selon le code BPEL		Selon JSCE-SSCE	
Tension de rupture garantie des A.P. en MPa	f_{prg}	1677	f_{puk}	1700
Contrainte élastique garantie des A.P. en MPa	f_{peg}	1500	f_{pyk}	1446
Module d'élasticité des A.P. en MPa	E_p	200000	E_P	200000
Module d'élasticité du béton à $t_o = 14$ j (MPa)	E_{ij}	34923	$E_c(t)$	28000
Module d'élasticité du béton à $t = 28$ j (MPa)	E_B	35981	E_c	32036
Coefficient du frottement en courbe (rd^{-1})	f	0.23	μ	0.30
Coefficient du frottement en ligne (m^{-1})	φ	0.003	λ	0.004
Charge permanente additionnelle en (MN)	G	0	G	0
Rentré d'ancrage (m)	g	.001	g	.001
Retrait final	ε_r	0.0002	ε_{cs}	0.0027
Age du béton à la mise en tension (j)	t_0	14	t_0	14
Relaxation à 1000 heures pour les aciers TBR	ρ_{1000}	2.5%	γ_0	3 %
Humidité relative en %	-	-	RH	80
Coefficient de relaxation. Acier TBR	μ_0	.43	γ	0.0239
Section des aciers de précontrainte (m ²)	A_p	.001848	A_P	.001848

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

A.2.1 Calcul des pertes de section en T

A.2.1.1 Calcul des pertes selon le code BPEL

$$e(x) = ax^2 + bx + c$$

Condition aux limites :

$$e(0) = e_1 = c$$

$$e\left(\frac{l}{2}\right) = e_1 - a'$$

$$e'\left(\frac{l}{2}\right) = 0$$

$$e'(0) = \theta_0$$

$$\text{Donc : } a = \frac{4a'}{l^2} ; b = \frac{-4a'}{l}$$

$$e(x) = \frac{4a'}{l^2} x^2 - \frac{4a'}{l} x + e_1$$

$$\theta_0 = e'(0) = \frac{4a'}{l}$$

$$\alpha(x) = e'(x) - e'(0) = \theta(x) - \theta(0) = \frac{8a'}{l^2} x$$

$$\alpha(x) = \frac{2|\theta_0|}{l} x$$

$$\sigma_p(x) = \sigma_{p0} \cdot e^{-(f\alpha + \varphi \cdot x)}$$

$$(f\alpha + \varphi \cdot x) = f \cdot \frac{2\theta_0}{l} + \varphi \cdot x$$

$$\lambda' = \left(f \cdot \frac{2\theta_0}{l} + \varphi\right)$$

$$\Delta\sigma_{frott}(x) = \sigma_{p0} - \sigma_{p0} \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)}$$

$$a' : \text{la fleche} = 0.41 \text{ m}$$

$$\theta_0 = e'(0) = \frac{4a'}{l} = \frac{4 \cdot 0.41}{25.6} = 0.0640$$

a) Les pertes instantanées

a.1) Perte par frottement

$$\lambda' = \left(f \cdot \frac{2\theta_0}{l} + \varphi \right) = \frac{2 * 0.23 * 0.0640}{25.6} + 0.003 = 4.15 * 10^{-3}$$

$$\sigma_{p0} = \min(0.8 * f_{prg} \text{ ou } 0.9 * f_{peg}) = \min(0.8 * 1677 ; 0.9 * 1500) = 1342 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{frott}(x) = \sigma_{p0} * e^{-(\lambda' * x)}$$

$$\sigma_{frott}(x) = 1342. e^{-(4.15 * 10^{-3} * x)}$$

$$\sigma_{frott}(12.8) = 1342. e^{-(4.15 * 10^{-3} * 12.8)} = 1272.6 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{frott} = \sigma_{frott}(0) - \sigma_{frott}(12.8) = 1342 - 1272.6 = 69.4 \text{ MPa}$$

a.2) Perte par recul d'ancrage

$$g = 0,001 \text{ m} ; g \cdot E_p = 200 \text{ N/m}$$

$$d = \sqrt{\frac{200}{5.5693}} = 6 \text{ m} < l/2$$

$$\Delta\sigma_g = 0 \text{ MPa} \text{ Donc cette position n'est pas effectuée au recul d'ancrage}$$

a.3) Perte par déformation instantanée du béton

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_{ij}} * \sigma_b(x) \approx \left[\frac{4-1}{2*4} \right] \frac{E_p}{E_{ij}} * \sigma_b(x) = 0.375 \frac{E_p}{E_{ij}} * \sigma_b(x) ; e_0 = -0.533 \text{ m}$$

$$\sigma_b(12.8) = \frac{P}{B} + \frac{P * e_0^2}{I_G} + \frac{M_G * e_0}{I_G}$$

$$P = \sigma_p \cdot A_p \text{ Avec } \sigma_p = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_f - \Delta\sigma_g = 1342 - 69.4 - 0 = 1272.6 \text{ MPa}$$

$$P = 1272.6 * 0.00184 = 2.35 \text{ MN}$$

$$M_g = \frac{g l^2}{8} = \frac{2.5 * 0.435 * 25.6^2}{8} = 0.8908 \text{ MN.m}$$

$$\sigma_b(12.8) = \frac{2.35}{0.435} + \frac{2.35 * (-0.533)^2}{0.0393} + \frac{0.8908 * (-0.533)}{0.0393} = 10.3 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{pi}(x) = 0.375 * \frac{200000}{34923} * 10.3 = 22.1MPa$$

b) Les pertes différées

b.1) Perte par retrait

$$\Delta\sigma_{r\infty}(t) = \varepsilon_r(\infty) \cdot [1 - r(t_0)] \cdot E_p$$

Avec $t_0 = 14\text{jours}$; $E_p = 200000 MPa$; $\varepsilon_r(\infty) = 2 \cdot 10^{-4}$

$$r(t_0) = \frac{t_0}{t_0 + 9r_m} \quad \text{Avec } r_m = \frac{B}{u} = \frac{0.45}{4} = 11.25cm$$

$$r(t_0) = \frac{14}{14 + 9 \cdot 11.25} = 0.1215$$

$$\Delta\sigma_{r\infty}(t) = 2 * 10^{-4} [1 - 0.1215] \cdot 200000 = 35.2MPa$$

b.2) Perte par relaxation

$$\Delta\sigma_p = 6 \cdot 10^{-2} (\mu - \mu_0) \cdot \rho_{1000} \cdot \sigma_{pi}(x) \quad \text{TBR} \rightarrow \mu_0 = 0.43$$

$\sigma_{pi}(x)$: Tension dans le câble moyen après toutes les pertes instantanées à la section mi-travée.

$$\sigma_{pi}(12.8) = \sigma_p(0) - \Delta\sigma_i = 1342 - 91.6 = 1250.4MPa$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} = \frac{1250.4}{1677} = 0.7456$$

$$\Delta\sigma_p = 6 \cdot 10^{-2} (0.7456 - 0.43) \cdot 2,5 \cdot 1250,4 = 47.3 MPa$$

b.3) Perte par fluage

$$\Delta\sigma_{fl} = 2,5 * \frac{E_p}{E_{ij}} \sigma_b$$

$$p = \sigma_p * A_p \text{ Avec } \sigma_p = \sigma_{p0} - \sigma_i = 1342 - 91.6 = 1250.4 \text{ MPa}$$

$$P = 1250,4 * 0.001848 = 2.31 \text{ MN}$$

$$\sigma_b(12.8) = \frac{P}{B} + \frac{P * e_0^2}{I_G} + \frac{M_G * e_0}{I_G}$$

$$M_g = \frac{g l^2}{8} = \frac{2.5 * 0.435 * 25.6^2}{8} = 0.8908 \text{ MN.m}$$

$$\sigma_b(12.8) = \frac{2.31}{0.435} + \frac{2.31 * (-0.533)^2}{0.0393} + \frac{0.8908 * (-0.533)}{0.0393} = 9.9 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{fl} = 2 * \frac{200000}{34923} * 9.9 = 113.4 \text{ MPa}$$

c) Evaluation des pertes totales selon le code BPEL

c.1) Pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_{itot} = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{pi} = 69.4 + 0 + 22.1 = 91.6 \text{ MPa}$$

c.2) Pertes différées :

$$\Delta\sigma_{dtot} = \Delta\sigma_{r\infty} + \Delta\sigma_{fl} + \frac{5}{6} \Delta\sigma_{pi} = 35.2 + 113.4 + 0.83 * 47.3 = 187.9 \text{ MPa}$$

c.3) Pertes totales :

$$\Delta\sigma_{tot} = \Delta\sigma_{itot} + \Delta\sigma_{dtot} = 91.6 + 187.9 = 279.5 \text{ MPa}$$

A.2.1.2) Calcul des pertes selon les règlements JSCE-SSCE

$$e(x) = \frac{4a}{l^2}x^2 - \frac{4a}{l}x + e_1$$

$$\vartheta_0 = e'(0) = \frac{4a}{l}$$

$$\alpha(x) = e'(x) - e'(0) = \vartheta(x) - \vartheta(0) = \frac{8a}{l^2}x$$

$$\alpha(x) = \frac{2|\vartheta_0|}{l}x$$

$$P(x) = P_i \cdot e^{-(\mu\alpha + \lambda \cdot x)}$$

En remplaçant la force par la contrainte talque ($\sigma_p = \frac{P}{A}$), on aura :

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} * e^{-(\mu\alpha + \lambda \cdot x)}$$

$$(\mu\alpha + \lambda \cdot x) = \mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \cdot x$$

$$\lambda' = \left(\mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \right)$$

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)}$$

Si on prend $a' = 0.41 \text{ m}$

$$\vartheta_0 = e'(0) = \frac{4a'}{l} = \frac{4 * 0.41}{25.6} = 0.0640$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

a) les pertes instantanées

a.1) perte par frottement

$$\lambda' = \left(\mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \right) = \left(0,3 * \frac{2 * 0.0640}{25.6} + 0.004 \right) = 5.5 * 10^{-3}$$

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)} = \sigma_{pi} \cdot e^{-(5.5 * 10^{-3} \cdot x)}$$

$$\sigma_{pi} = \min(0.8 * 1700; 0.9 * 1446) = 1301 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(x) = 1301 \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)} \approx 1301 * (1 - \lambda' \cdot x) = 1301 * (1 - 5.5 * 10^{-3} x)$$

$$\sigma_p(x) = 1301 + (1301 * (-5.5 * 10^{-3} x)) = 1301 - 7.2x$$

$$\sigma_p(0) = 1301 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(12.8) = 1208.8 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_f = \sigma_p(0) - \sigma_p(12.8) = 1301 - 1208.8 = 92.2 \text{ MPa} = 7.1\% \sigma_{pi}$$

a.2) Perte par recul d'ancrage

$$g = 0.001 \text{ Et } E_p = 200000 \rightarrow g * E_p = 200 \frac{MN}{m}$$

D'après la relation du triangle

$$g * E = (\sigma_p(0) - \sigma_p(d)) * d$$

$$\sigma_p(d) = 1301 - 7.2d$$

$$g * E_p = (\sigma_p(0) - \sigma_p(d)) * d \leftrightarrow 200 = (1301 - (1301 - 7.2d)) * d = 7.2d^2$$

$$\leftrightarrow d = \sqrt{\frac{200}{7.2}} = 5.27m$$

$$d = 5.27 < \frac{l}{2} = 12.8 \rightarrow \Delta\sigma_g = 0$$

a.3) Perte par déformations instantanées du béton

Pour $M_G = 0.8908 \text{ MN} \cdot \text{m}$ et $e_0 = -0.533$

$$\Delta\sigma_p = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_c} \cdot \sigma'_{cpG} = \left[\frac{4-1}{8} \right] \frac{200000}{28000} \cdot 9.18 = 24.6 \text{ MPa} = 2\% \sigma_{pi}$$

$$\sigma'_{cpG} = \frac{P}{B} + \frac{P \cdot e_0^2}{I_G} + \frac{M_G \cdot e_0}{I_G} = \frac{2.23}{0.4350} + \frac{2.23 \cdot 0.533^2}{0.0393} + \frac{0.89 \cdot (-0.533)}{0.0393} = 9.18 \text{ MPa}$$

$$p = \sigma_p \cdot A_p = 1208.8 \cdot 0.001848 = 2.23 \text{ MN}$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_g - \Delta\sigma_f - \Delta\sigma_p = 1301 - 0 - 92.2 - 24.6 = 1184.2 \text{ MPa}$$

b) Perte différées :

b. 1) Perte par retrait :

Pour $\kappa=0.8$ et $\varphi = 1.7$; $\varepsilon'_{cs} = 0.00027$

$$P_t - P_e = \frac{n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot P_t + E_p A_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi)}$$

$$n_p = \frac{E_p}{E_c} = \frac{200000}{28000} = 7.14$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} = \frac{0.001848}{0.4350} = 4.248 \cdot 10^{-3}$$

- Calcul de la valeur du retrait $\varepsilon'_{cs}(\infty, 14)$ selon JSCE-SSCS:

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})] \varepsilon'_{sh}$$

$$\varepsilon'_{cs}(\infty, 14) = [1 - \exp(-0.108(\infty - 14)^{0.56})] \varepsilon'_{sh} = \varepsilon'_{sh}$$

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 \left[1 - \exp\left(\frac{RH}{100}\right) \right] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2$$

ε'_{sh} : Valeur finale du retrait ($\times 10^{-5}$)

$RH = 80\%$; $W=200 \text{ Kg/m}^3$ (dosage de l'eau); $V/S=B/U=(0.4350/4)=0.10875 \text{ m}=109 \text{ mm}$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

$$\varepsilon'_{sh} = 27.2 \times 10^{-5} = 2.7 \times 10^{-4}$$

Donc,

$$\varepsilon'_{cs}(\infty, 14) = 2.7 \times 10^{-4}$$

$$\frac{P_t}{A_p} = \Delta\sigma_p \rightarrow P_t = A_p * \Delta\sigma_p$$

$$\text{soit : } \Delta\sigma_{shcr} = \frac{P_t - P_e}{A_p} = \frac{n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot P_t + E_p A_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{A_p * (1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi))}$$

Si on remplace P_t par sa valeur puit on prend A_p comme en facteur commun on doit trouver l'équation suivant :

b.2 et b.3) Perte par retrait et fluage :

$$\Delta\sigma_{shcr} = \frac{A_p * (n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot \sigma_{pt} + E_p \cdot \varepsilon'_{cs})}{A_p * (1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi))}$$

$$\Delta\sigma_{shcr} = \frac{7.14 * 4.248 * 10^{-3} * 1.7 * 1184.21 + 200000 * 0.00027}{1 + 7.14 * 4.248 * 10^{-3} * (1 + 0.8 * 1.7)} = 107.37 \text{ MPa} = 8.3\% \sigma_{pi}$$

b.4 Pertes de relaxation :

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma \sigma_{pt}$$

$$\sigma_{pt} = 1184.21 \text{ MPa}$$

$$\gamma = \gamma_0 \left[1 - 2 \left(\frac{P_t - P_e}{P_t} \right) \right] = 2.92\% * \left(1 - 2 * \left(\frac{0.1984}{2.19} \right) \right) = 2.39\%$$

$$P_t = A_p * \sigma_{pt} = 0.001848 * 1184.21 = 2.19 \text{ MN}$$

$$P_t - P_e = A_p * \Delta\sigma_{shcr} = 0.001848 * 107.37 = 0.1984 \text{ MN}$$

$$\sigma_{pt} / f_{puk} = \frac{1184.21}{1700} = 0.70 \Rightarrow \sigma_{pt} = 0.70 f_{puk}$$

À partir de la figure C5.3.1 du code JSCE15 (section 5.3.7, page 73), on a :

$$\text{Pour } \sigma_{pt} = 0.70 f_{puk} \Rightarrow \gamma_0 = \gamma_{o1} + 0.64(\gamma_{o2} - \gamma_{o1})$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Les coefficients γ_{o1} et γ_{o2} sont donnés par le Tableau C5.3.2 du code JSCE15 (section 5.3.7, page 73).

Pour les aciers précontraints de basse relaxation on a :

$$\gamma_{o1} = 1\% \text{ et } \gamma_{o2} = 4\% , \text{ donc } \gamma_o = 1 + 0.64(4 - 1) = 2.92\%$$

$$\gamma = \gamma_o \left(1 - \frac{2(P_t - P_e)}{P_t} \right) = 2.92 \left(1 - \frac{2 * 0.1984}{2.19} \right) = 2.39\%$$

La perte par relaxation est :

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt} = 2.39\% * 1184.21 = 28.3 \text{ MPa} = 2.2\% \sigma_{pi}$$

c) Evaluation des pertes totales selon le code JSCE-SSCE

c-1)- Les pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{pi} = 92.2 + 0 + 24.59 = 116.79 \text{ MPa} = 9\% \sigma_{pi}$$

c-2)- Les pertes différées :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_{shcr} + \Delta\sigma_{pr} = 107.37 + 28.3 = 135.67 \text{ MPa} = 10.4\% \sigma_{pi}$$

c-3)- Les pertes totales :

$$\Delta\sigma_t = \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_d = 116.79 + 135.67 = 252.46 \text{ MPa} = 19.4\% \sigma_{pi}$$

IV .4-Résultats :

A1) SECTION T

Les résultats de calcul des pertes de précontrainte par post- tension, en *MPa* et en %, de la tension initiale (de Vérinage) sont donnés par les Tableau IV.13 et Tableau IV.14 suivants :

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 13-Résultat des pertes de section T en MPa .

PERTES <i>MPa</i>	\ CODE en	BPEL	JSCE-SSCE
FROTTEMENT	\	69,4	92.2
RECU D'ANCRAGE		0	0
DEFORMATIONS INST. DU BETON		22.1	24.6
TOTAL DES PERTES INSTANTANEEES		91.6	116.79
RETRAIT ET FLUAGE		35.2 113.4	107.37
RELAXATION		47.3	28.3
TOTAL DES PERTES DIFFEREES		187.9	135.67
TOTAL DES PERTES		279.5	252.46

Tableau IV. 14-Résultat des pertes de section T en pourcentage

PERTES en %	\ CODE	BPEL	JSCE-SSCE
FROTTEMENT	\	5.2	7.1
RECU D'ANCRAGE		0	0
DEFORMATIONS INST. DU BETON		1.6	2
TOTAL DES PERTES INSTANTANEEES		6.8	9
RETRAIT et FLUAGE		2.6 8.42	8.3
RELAXATION		3.5	2.2
TOTAL DES PERTES DIFFEREES		14	10.4
TOTAL DES PERTES		20.7	19.4

B) Comparaison et interprétation

D'après le Tableau IV.14 on remarque que :

1. Les pourcentages de pertes par frottement du Code JSCE-SSCE sont supérieurs à ceux du Code BPEL (plus de 31%) car les coefficients de frottement du Code Français (BPEL) sont plus petits que ceux du Code japonais (JSCE-SSCE).
2. Le pourcentage ou la perte par recul d'ancrage est nul pour les deux réglementations car la distance obtenue sur laquelle s'effectue le recul d'ancrage est inférieure à $L/2$.
3. Selon le JSCE-SSCE le pourcentage de la perte par déformation instantanées du béton est plus grand de celui du code BPEL (écart de 25%). Cette différence est due à la faible valeur du module d'élasticité du béton adoptée par le (JSCE-SSCE)
4. Le pourcentage des pertes instantanées selon le code JSCE-SSCE est relativement élevé par rapport au code BPEL (plus de 32%). Cette supériorité résulte aux valeurs élevées de la perte par frottement et perte par déformation instantanée discutées précédemment.
5. Le pourcentage des pertes par retrait et fluage prédites par le code japonais JSCE-SSCE est moins important par rapport à celui obtenu par le code français BPEL. Ce faible pourcentage des deux pertes est dû à l'effet de concomitance des phénomènes de retrait et fluage de béton tenu en compte dans le calcul des pertes par le code japonais (JSCE-SSCE) contrairement au code français (BPEL) qui néglige cette concomitance dans ces formules de calcul de pertes par retrait et par Fluage
6. . Le pourcentage des pertes par relaxation selon le code JSCE et très faible par rapport au code BPEL (moins de 59%), cette faible valeur est due l'influence de retrait et fluage du béton sur la relaxation d'acier au cours du temps. Par contre le code BPEL néglige l'effet de ces phénomènes dans le calcul de cette perte.
7. Le pourcentage des pertes différées selon BPEL est relativement grand que celui du code JSCE-SSCE (35 % d'écart). Cette supériorité résulte aux valeurs élevées de la perte par relaxation discutées précédemment aux paragraphes 6.
8. Le pourcentage total des pertes selon le code JSCE-SSCE est légèrement inférieur que celui du code BPEL. Cette légère infériorité estimée à 7 % est quasiment négligeable

IV.4.2 EXEMPLE 2

Pour le deuxième exemple, la poutre est de section rectangulaire (Figure IV.2) tout en considérant que chaque câble est tendu par l'une de ses deux extrémités.

A) Etapes de calcul

A.1) Calcul des caractéristiques de la section "RECTANGULAIRE" :

1° Les données de calcul :

Les différentes dimensions de la section "Rectangulaire", flèche du câble moyen et la longueur de la poutre sont données par le Tableau IV.15 ci-dessous :

Tableau IV. 15-Dimensions de la section rectangulaire

DIMENSIONS DE LA SECTION " Rectangulaire"	
Largeur de la section (B) en m	1.00
Hauteur de la section (H) en m	.70
Distance entre la fibre la plus tendue et le centre de gravité des câbles (DP) en m	.10
Diamètre de la gaine (DG)	.04
Nombre des câbles (N)	4.
Flèche du câble moyen (a) en m	.41
Longueur de la poutre (L) en m	16.

-Résultats :

Les résultats du calcul des caractéristiques de la section "Rectangulaire", sont donnés par le Tableau IV.16.

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 16- Caractéristiques de la section rectangulaire

CARACTERISTIQUES DE LA SECTION	
SECTION NETTE DU BETON (B_n) en m ²	.6950
COORDONNEES DE LA SECTION NETTE (V_e et V_s) en m	.352
	.348
RAYON MOYEN (r_m) en cm	20.4
MOMENT D'INERTIE (I_G) en m ⁴	.0283
RAYON DE GIRATION (r_j) en m	.20
EXCENTRICITE DU CABLE MOYEN (e_0) en m	.252
ROTATION DU CABLE MOYEN (θ_0)	.1025

A.2) Calcul des pertes :

Les données de l'exemple 2 sont les même que celles de l'exemple 1 (voir Tableau IV.14) sauf les valeurs du recul d'ancrage qui sont changées et remplacées par d'autres valeurs indiquées dans le Tableau IV.19 ci-après :

Tableau IV. 17– Données de recul d'ancrage.

Type de de donnée \ Code	BPEL		JSCE-SSCE	
Rentrée d'ancrage en m	g	0.006	g	0.006

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

B.1 Calcul des pertes de précontrainte de la section rectangulaire

B.1.1 Calcul des pertes selon le code BPEL

a) Les pertes instantanées

a.1) Perte par frottement

$$\Delta\sigma_{frott}(x) = \Delta\sigma_{frott}(0) \cdot e^{-(\lambda'x)}$$

$$\lambda' = \left(f \cdot \frac{2\theta_0}{l} + \varphi \right) = \frac{2 * 0.23 * 0.1025}{16} + 0.003 = 5.95 * 10^{-3}$$

$$a = 0.41m \rightarrow \theta_0 = \frac{4 * a}{l} = \frac{4 * 0.41}{16} = 0.1025$$

$$\Delta\sigma_{frott}(x) = 1342 \cdot e^{-(5.95 * 10^{-3} * x)} = 1342 - 7.98x$$

$$\Delta\sigma_{frott}(8) = 1342 \cdot e^{-(5.95 * 10^{-3} * 8)} = 1279.62 MPa$$

$$\Delta\sigma_{frott} = \sigma_{frott}(0) - \sigma_{frott}(8) = 1342 - 1279.62 = 62.4 MPa$$

a.2) Perte par recul d'ancrage

$g = 0,006 m$; $g \cdot E_p = 200000 MPa$

$$d = \sqrt{\frac{1200}{7.985}} = 12.25 m > l/2 = 8 m$$

$$\sigma_b(d) = 1342 * e^{-(5.95 * 10^{-3} * 12.25)} = 1247.66 MPa$$

$$\sigma_p(8) = 1279.62 - 2 * (1279.62 - 1247.66) = 1215.7 MPa$$

$$\Delta\sigma_g = 1279.62 - 1215.7 = 63.92 MPa$$

a.3) Perte par déformation instantanée du béton

$$\Delta\sigma_{racc}(x) = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_{ij}} * \sigma_b(x) \approx \left[\frac{4-1}{2*4} \right] \frac{E_p}{E_{ij}} * \sigma_b(x) ; e_0 = -0.252 m$$

$$\sigma_b(8) = \frac{P}{B} + \frac{P * e_0^2}{I_G} + \frac{M_G * e_0}{I_G}$$

$$P = \sigma_p * A_p \text{ Avec } \sigma_p = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_f - \Delta\sigma_g = 1342 - 62.4 - 63.92 = 1215.68 MPa$$

$$P = 1272.68 * 0.001848 = 2.25 MN$$

$$M_g = \frac{gl^2}{8} = \frac{2.5 * 0.695 * 16^2}{8} = 0.556 MN.m$$

$$\sigma_b(8) = \frac{2.25}{0.695} + \frac{2.25 * (-0.252)^2}{0.0283} + \frac{0.556 * (-0.252)}{0.0283} = 3.34 MPa$$

$$\Delta\sigma_{pi}(x) = 0.375 \frac{200000}{34923} * 3.34 = 7.2 MPa$$

b) Les pertes différées

b.1) Perte par retrait

$$\Delta\sigma_{r\infty}(t) = \varepsilon_r(\infty) * [1 - r(t_0)] * E_p$$

$$\text{Avec } t_0 = 14 \text{ jours} ; E_p = 200000 MPa ; \varepsilon_r(\infty) = 2 * 10^{-4}$$

$$r(t_0) = \frac{t_0}{t_0 + 9r_m} \quad \text{Avec } r_m = \frac{B}{u} = \frac{0.695}{3.4} = 20.44 cm$$

$$r(t_0) = \frac{14}{14 + 9 * 20.44} = 0.0707$$

$$\Delta\sigma_{r\infty}(t) = 2 * 10^{-4} [1 - 0.0707] * 200000 = 37.17 MPa$$

b.2). Perte par relaxation

$$\Delta\sigma_p = 6 * 10^{-2} (\mu - \mu_0) * \rho_{1000} * \sigma_{pi}(x) \quad \text{TBR} \rightarrow \mu_0 + 0.4$$

$\sigma_{pi}(x)$: Tension dans le câble moyen après toutes les pertes instantanées à la section mi-travée.

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{pi}(x) + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{frott} = 7.2 + 63.92 + 62.4 = 133.52 MPa$$

$$\sigma_{pi}(x) = \sigma_p(0) - \Delta\sigma_i = 1342 - 133.52 = 1208.48 MPa$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} = \frac{1208.48}{1677} = 0.72$$

$$\Delta\sigma_p = 6.10^{-2}(0.72 - 0.43).2.5.1208.48 = 52.7 MPa$$

b.3) Perte par fluage

$$\Delta\sigma_{fl} = 2 * \frac{E_p}{E_{ij}} \sigma_b$$

$$p = \sigma_p * A_p \text{ Avec } \sigma_p = \sigma_{p0} - \sigma_i = 1342 - 133.52 = 1208.48 MPa$$

$$P = 2.25 MN$$

$$\sigma_b(8) = \frac{P}{B} + \frac{P * e_0^2}{I_G} + \frac{M_G * e_0}{I_G}$$

$$M_g = \frac{gl^2}{8} = \frac{2.5 * 0.695 * 16^2}{8} = 0.556 MN.m$$

$$\sigma_b(8) = \frac{2.25}{0.695} + \frac{2.25 * (-0.252)^2}{0.0283} + \frac{0.556 * (-0.252)}{0.0283} = 3.33 MPa$$

$$\Delta\sigma_{fl} = 2 * \frac{200000}{34923} * 3.33 = 38.14 MPa$$

c) Evaluation des pertes totales selon le code BPEL

c.1) Pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_{itot} = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{pi} = 62.4 + 63.92 + 7.2 = 133.52 MPa$$

c.2) Pertes différées :

$$\Delta\sigma_{dtot} = \Delta\sigma_{r\infty} + \Delta\sigma_{fl} + \frac{5}{6} \Delta\sigma_{pi} = 31.17 + 38.14 + \frac{5}{6} * 52.7 = 113.23 MPa$$

c.3) Pertes totales :

$$\Delta\sigma_{tot} = \Delta\sigma_{itot} + \Delta\sigma_{dtot} = 133.52 + 113.23 = 246.75 MPa$$

A.2.1.2) Calcul des pertes selon les règlements JSCE-SSCE

En remplaçant la force par la contrainte talque ($\sigma_p = \frac{P}{A}$), on aura :

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} * e^{-(\mu\alpha + \lambda \cdot x)}$$

$$(\mu\alpha + \lambda \cdot x) = \mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \cdot x$$

$$\lambda' = \left(\mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \right)$$

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)}$$

$$a = 0.41 \text{ m}$$

$$\vartheta_0 = e'(0) = \frac{4a}{l} = \frac{4 * 0.41}{16} = 0.1025$$

a) les pertes instantanées

a.1) perte par frottement

$$\lambda' = \left(\mu \cdot \frac{2\vartheta_0}{l} + \lambda \right) = \left(0,3 * \frac{2 * 0.10205}{16} + 0.004 \right) = 7.84 * 10^{-3}$$

$$\sigma_p(x) = \sigma_{pi} \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)} = \sigma_{p0} \cdot e^{-(7.84 * 10^{-3} \cdot x)}$$

$$\sigma_{pi} = \min(0.8 * 1700; 0.9 * 1446) = 1301 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(x) = 1301 \cdot e^{-(\lambda' \cdot x)} \approx 1301 * (1 - \lambda' \cdot x) = 1301 * (1 - 7.84 * 10^{-3} x)$$

$$\sigma_p(x) = 1301 + (1301 * (-7.84 * 10^{-3} x)) = 1301 - 10.2x$$

$$\sigma_p(0) = 1301 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(8) = 1219.4 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_f = \sigma_p(0) - \sigma_p(8) = 1301 - 1219.4 = 81.6 \text{ MPa} = 6.27\% \sigma_{pi}$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

a.2) Perte par recul d'ancrage

$$g = 0.006 \text{ Et } E = 200000 \rightarrow g * E = 1200$$

D'après la relation du triangle

$$g * E = (\sigma_p(0) - \sigma_p(d)) * d$$

$$\sigma_p(d) = 1301 - 10.2d$$

$$g * E = (\sigma_p(0) - \sigma_p(d)) * d \leftrightarrow 1200 = (1301 - (1301 - 10.2d)) * d = 10.2d^2$$

$$\leftrightarrow d = \sqrt{\frac{1200}{10.2}} = 10.85m \geq \frac{l}{2} = 8$$

donc:

$$\sigma_p(d) = 1301 - 10.2 * 10.85 = 1190.3Pa$$

$$\sigma_p(l/2) = 1219.4 - 2 * (1219.4 - 1190.3) = 1161.2MPa$$

$$\Delta\sigma_g = \sigma_p(8) - \sigma_p\left(\frac{l}{2}\right) = 1219.4 - 1161.2 = 58.2MPa = 4.47\% \sigma_{pi}$$

a.3) Perte par déformations instantanées du béton

Pour $M_G = 0.556 MN * m$ et $e_0 = -0.252$

$$\Delta\sigma_{pi} = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_c} \cdot \sigma'_{cpg} = \left[\frac{4-1}{4} \right] \frac{200000}{28000} \cdot 3.35 = 18MPa = 1.4\% \sigma_{pi}$$

$$\sigma'_{cpg} = \frac{P}{B} + \frac{P * e_0^2}{I_G} + \frac{M_G \cdot e_0}{I_G} = \frac{2.1}{0.695} + \frac{2.1 * 0.252^2}{0.0283} + \frac{0.556 \cdot (-0.252)}{0.0283} = 2.78MPa$$

$$p = \sigma_p * A_p = 1161.2 * 0.001848 = 2.1MN$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_g - \Delta P_f = 1301 - 58.2 - 81.6 = 1161.2MPa$$

$$\Delta\sigma_{pi} = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_c} \cdot \sigma'_{cpg} = \left[\frac{4-1}{8} \right] \frac{200000}{28000} \cdot 2.78 = 7.45MPa = 0.6\% \sigma_{pi}$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

b) Perte différées :

b.1 et b.2) Perte par retrait et du fluage :

Pour $\kappa=0.8$ et $\varphi = 1.7$; $\varepsilon'_{cs} = 0.00027$

$$P_t - P_e = \frac{n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot P_t + E_p A_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi)}$$

$$\frac{P_t}{A_p} = \Delta \sigma_{pt} \rightarrow P_t = A_p * \Delta \sigma_{pt} = 0.001848 * 1161.2 = 2.1 MN$$

$$\text{soit : } \Delta \sigma_r = \frac{P_t - P_e}{A_p} = \frac{n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot P_t + E_p A_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{A_p * (1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi))}$$

Si on remplace P_t par sa valeur puit on prend A_p comme en facteur commun on doit trouver l'équation suivant :

$$\Delta \sigma_r = \frac{A_p * (n_p \rho_p \cdot \varphi \cdot \Delta \sigma_p + E_p \cdot \varepsilon'_{cs})}{A_p * (1 + n_p \rho_p (1 + \kappa \varphi))}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{shcr} &= \frac{7.14 * 4.248 * 10^{-3} * 1.7 * 1161.2 + 200000 * 0.00027}{1 + 7.14 * 4.248 * 10^{-3} * (1 + 0.8 * 1.7)} = 106.3 MPa \\ &= 8.2\% \sigma_{pi} \end{aligned}$$

b. 3) Perte par relaxation :

$$\Delta \sigma_{pr} = \gamma \sigma_{pt}$$

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{2(P_t - P_e)}{P_t} \right)$$

$$\sigma_{pt} = 1161.2 MPa$$

$$P_t = A_p \sigma_{pt} = 0.001848 * 1161.2 = 2.1 MN$$

$$(P_t - P_e) = A_p \Delta \sigma_{shcr} = 0.001848 * 106.3 = 0.2 MN$$

$$\sigma_{pt} / f_{puk} = \frac{1161.2}{1700} = 0.70 \Rightarrow \sigma_{pt} = 0.70 f_{puk}$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

À partir de la figure C5.3.1 du code JSCE15 (section 5.3.7, page 73), on a :

$$\text{Pour } \sigma_{pt} = 0.70f_{puk} \Rightarrow \gamma_o = \gamma_{o1} + 0.64(\gamma_{o2} - \gamma_{o1})$$

Les coefficients γ_{o1} et γ_{o2} sont donnés par le Tableau C5.3.2 du code JSCE15 (section 5.3.7, page 73). Pour les aciers précontraints de basse relaxation on a :

$$\gamma_{o1} = 1\% \text{ et } \gamma_{o2} = 4\% , \text{ donc } \gamma_o = 1 + 0.64(4 - 1) = 2.92\%$$

$$\gamma = \gamma_o \left(1 - \frac{2(P_t - P_e)}{P_t} \right) = 2.92 \left(1 - \frac{2 * 0.2}{2.1} \right) = 2.36\%$$

La perte par relaxation est :

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt} = 2.36\% * 1161.2 = 27.4 \text{ MPa} = 2.1\%\sigma_{pi}$$

c) EVALUATION DE PERTES TOTALES :

c-1)- Les pertes instantanées :

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_{pi} = 81.6 + 58.2 + 7.45 = 147.25 \text{ MPa} = 11.3\%\sigma_{pi}$$

c-2)- Les pertes différées :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_{shcr} + \Delta\sigma_{pr} = 106.3 + 27.45 = 133.7 \text{ MPa} = 10.3\%\sigma_{pi}$$

c-3)- Les pertes totales :

$$\Delta\sigma_t = \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_d = 137.76 + 147.2 = 284.5 \text{ MPa} = 21.9\%\sigma_{pi}$$

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

Tableau IV. 18– Résultat des pertes de section rectangulaire en MPa .

PE RTES MPa	\ CODE en \	BPEL	JSCE-SSCE
FROTTEMENT		62,4	81.6
RECU D'ANCRAGE		64	58.2
DEFORMATIONS INST. DU BETON		9,4	7.45
TOTAL DES PERTES INSTANTANEEES		136	147.25
RETRAIT ET FLUAGE		37,2 37,22	106.3
RELAXATION		52.3	27.4 5
TOTAL DES PERTES DIFFEREES		118	133.7
TOTAL DES PERTES		254	284.5

Tableau IV. 19– Résultat des pertes de section rectangulaire en % .

Pertes en %	\ CODE \	BPEL	JSCE-SSCE
FROTTEMENT		4,6	6.27
RECU D'ANCRAGE		4,7	4.47
DEFORMATIONS INST. DU BETON		0,7	0.6
TOTAL DES PERTES INSTANTANEEES		10,1	11.3
RETRAIT ET FLUAGE		2,8 2,7	8.2
RELAXATION		3,9	2.1

CHAPITRE IV COMPARAISON DES PERTES DE PRECONTRAINTE

TOTAL DES PERTES DIFFEREES	8,8	10.3
TOTAL DES PERTES	18,8	21.9

B) Comparaison et interprétation des résultats

D'après le Tableau IV19 on constate que :

1°- la distance obtenue sur laquelle s'effectue le recul d'ancrage est supérieure à $L/2$ donc le pourcentage ou la perte par recul d'ancrage n'est pas nulle pour les deux règlements sont presque similaires (écart de 5% environ pour Cod BPEL).

2°-La comparaison des pertes de précontrainte entre ces deux codes conduit aux mêmes remarques que celles du premier exemple.

CHAPITRE V CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS

Dans ce chapitre on compare l'étude analytique et numérique consiste à analyser d'une manière générale les pertes de précontrainte par post - tension et de faire une étude comparative sur des prescriptions réglementaires des codes Français BPEL et Jeannie JSCE-SSCE pour chaque type de perte. Les formules utilisées pour calculer les différentes pertes utilisées par les deux codes Ils partagent la même base théorique :

V.1 Conclusions sur l'analyse des phénomènes de pertes :

Selon les deux codes BPEL et JSCE-SSCE fournissent quelques suggestions comme contribution à la création d'un guide algérien sur le calcul des pertes de précontrainte

La suite de ces recommandations est la suivante :

- 1) Deux méthodes de calcul des pertes ont été utilisées pour ce règlement : la première est basée sur l'idée de sommation des pertes finales, tandis que la seconde est utilisée dans des situations spécifiques pour calculer les pertes différées en fonction du paramètre temps.
- 2) Comme notre pays, l'Algérie, connaît des variations de conditions climatiques assez importantes entre les régions du sud et nord, il est indispensable d'établir une carte de zonage climatique basée sur des données météorologiques indiquant clairement les valeurs des et de l'humidité relative,

3) Pertes par frottement :

-Elles dépendent de la tension initiale et la valeur des coefficients de frottement, leur valeur augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la section de vérinage.

- Les valeurs du coefficient de frottement en courbe dépendent de :

- ✓ *Types et taille du câble*
- ✓ *Etat de la surface du câble*
- ✓ *Type de gaine*
- ✓ *Le coefficient d'emballage dans la gaine*
- ✓ *La présence ou non de lubrifiants*

- Les frottements existants dans le vérin et le système d'ancrage sont négligeable (très petits pour être considérés).

4) Pertes par recul d'ancrage :

- La perte dépend de la longueur de câble, elle est plus élevée dans le cas du câble de précontraints courts que le cas de fils précontraints longs.
- Elle dépend aussi du type d'ancrage, donc elle est mieux établie par essai.

5) Pertes instantanées causées par la déformation du béton :

Si tous les câbles sont tendus simultanément (au même moment), les pertes par déformation instantanée du béton sont nulles dans la précontrainte par post-tension. Cependant, les pertes ne sont pas nulles si les câbles sont mis en tension de manière progressive. Le premier câble aura la perte la plus grande tandis que le dernier aura la perte la plus faible.

6) Pertes par relaxation:

- La tension initiale, le temps, la température, la nature et le type d'armatures utilisées sont tous des facteurs influençant cette perte.
- Les pertes par relaxation de l'acier et les pertes par retrait et fluage du béton sont liées et s'influent dans le temps.
- Le module d'élasticité pour chaque type d'armatures de précontrainte (fils, torons, ou barres) est pratiquement le même dans les deux codes utilisés.

7) Pertes par recul d'ancrage

La perte par recul d'ancrage s'effectue généralement sur une partie de la longueur de l'armature, elle dépend du type d'ancrage utilisé.

8) Pertes par fluage

Cette perte est sensible aux paramètres influant le fluage de béton à l'âge du béton au transfert de la précontrainte de l'armature au béton telle la contrainte dans le béton et la durée de son application.

V.2 Conclusion sur l'étude comparative réglementaire :

Les conclusions de l'étude comparative réglementaire sont les suivantes :

- Les bases théoriques utilisées par les codes BPEL et JSCE- SSCE pour calculer les différentes pertes sont identiques.
- Ces formules reposent principalement sur les propriétés physiques et mécaniques des deux matériaux, l'acier et le béton.

Matériaux

- Les deux codes utilisent des tests approuvés sur des cylindres pour déterminer la résistance à la compression spécifique du béton.
- Dans les deux codes utilisés, le module d'élasticité de chaque type d'armature (fils, torons ou barres) est presque identique. Cela a donc moins d'impact sur les pertes :
- Le coefficient de Poisson du béton peut en général être pris égal à 0.2 dans la zone élastique. Cependant, il doit être considéré égal à zéro lorsque la fissuration due à la traction est permise

Pertes par frottement :

Les pertes par frottement selon les deux règlements (JSCE-SSCE et BPEL) sont presque similaires , la seule différence qu'on peut constater se trouve à partir de calculs numériques à cause des valeurs des coefficients de frottement adoptés par les deux règlements limite de rupture (f_{prg} ou f_{puk}) ; la limite élastique (f_{peg} ou f_{pyk}) le coefficient de frottement en ligne (λ ou φ).

Pertes par recul d'ancrage :

L'intensité de la perte par recul d'ancrage selon les deux codes JSCE-SSCE et BPEL est très similaire. D'une manière générale, elle est mieux établie par essais.

Pertes par déformation instantanées du béton :

Les valeurs de module de déformation longitudinale du béton adoptées par le code BPEL sont relativement supérieures par rapport à celles du code JSCE-SSCE. Par conséquent, la perte selon le code JSCE-SSCE est supérieure à celle évaluée par le code BPEL.

Perte par retrait et fluage :

Les valeurs des pertes ((retrait et fluage)) sont calculées selon le code JSCE-SSCE en fonction de l'autre pur, il est donc impossible de les comparer à celui du BPEL.

Pertes par relaxation :

La perte par relaxation selon le code JSCE-SSCE est très faible par rapport au code BPEL, cette faible valeur est due l'influence de retrait et fluage du béton sur la relaxation d'acier au cours du temps. Par contre le code BPEL néglige l'effet de ces phénomènes dans le calcul de cette perte.

V.3 Recommandations et propositions :

Les résultats de l'étude comparative des pertes de précontrainte basées sur les codes BPEL et JSCE-SSCE fournissent quelques suggestions pour l'élaboration d'un guide algérien sur le calcul des pertes de précontrainte. Cela peut être résumé comme suit :

1. Deux méthodes de calcul des pertes sont adoptées pour ce règlement :
La première méthode est basée sur l'idée de sommation des pertes finales. Une seconde pour les circonstances particulières qui permet de calculer les pertes différées en fonction du temps. On peut s'inspirer de l'approche créée par le comité PCI pour prendre en compte ce facteur.
2. Comme notre pays, Algérie, connaît des variations de conditions climatiques assez importantes entre les régions du sud et nord, il est indispensable d'établir une carte de zonage climatique basée sur des données météoriques indiquant clairement les valeurs de températures et humidités relatives.
3. Vu leur influence sur l'intensité des pertes, les caractéristiques du béton (module d'élasticité, fluage, retrait...) doivent être établies en fonction des paramètres principaux et des conditions climatiques (résistance du béton, humidité relative, rayon moyen...). Pour cela, on peut s'inspirer des modèles des résultats de recherches existants
4. L'adoption de ce code Algérien en béton précontraint facilite la tâche aux ingénieurs et aux constructeurs de concevoir et construire des ouvrages plus sécuritaires et économiques en tenant en compte des facteurs et conditions environnementales spécifiques à notre pays, Algérie, et d'éviter de recourir à d'autres codes étrangers.

5. Pour le calcul des différentes pertes, on commande :
 - a. Etablir une formule de calcul des pertes par retrait et fluage en s'inspirant de celle du code JSCE-SSCE qui est simple et tient compte des conditions climatiques (humidité relative) car notre pays, l'Algérie, est vaste et connaît des variations climatiques différentes de région en région.
 - b. Etablir une formule de calcul des pertes par relaxation en s'inspirant de l'approche du code BPEL qui introduit divers facteurs influents .

Références bibliographiques

[1] HENRY THONIER. « Le béton précontraint aux états limites ». Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1992).

[2] Dr. SILINE Mohammed Béton Précontraint, Cours et applications

[3] JGC15_Standard_Specifications_for-concrete-structures

[4] Règles BPEL 91. « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint, suivant la méthode des états-limites ».

[5] Dreux, G., Pratique de béton précontrainte, Eyrolles 1975.

[6] Zaidi, A., Pertes de précontrainte - étude comparative des codes BPEL-BS ACI", Thèse de magistère, Université de Msila, juin 1995.

[7] JIS G3536-2008-kupdf.net

[8] JIS G3536 Bare_strand_r1

[9] DTU règles BPEL 91