

PERTES DE PRÉCONTRAINTE ETUDE COMPARATIVE DES CODES BPEL - BS - ACI

I INTRODUCTION

La force de précontrainte dans les armatures d'un élément en béton précontraint tend à diminuer au cours du temps, cette diminution est due à plusieurs phénomènes inévitables qui sont attribuables au comportement du matériau, au mode de précontrainte et au procédé de mise en tension.

En ce qui concerne les matériaux les phénomènes qui produisent les pertes de précontrainte sont le raccourcissement élastique, retrait et fluage du béton et la relaxation d'acier.

Quant au mode de précontrainte, notons que dans le cas de la post-tension, le frottement de l'armature sur sa gaine lors de la mise en tension cause une réduction de la force de traction dans l'armature.

Enfin les pertes par recul d'ancrage dépendent du procédé de mise en tension.

2 COMPARAISON DES PERTES DE PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION

2.1 Pertes instantanées

2.1.1 Pertes par frottement

Par comparaison des formules de calcul des pertes par frottement selon ces règlements, Tableau 2.1, on constate qu'elles sont basées sur la *même fondement théorique* avec cependant une légère différence dans les valeurs des coefficients de frottement

BPEL	ACI	BS
$-(f\sigma + \varphi \lambda)$	$-(\mu\alpha + kx)$	$-(\mu\alpha + kx)$
$\sigma_{p.o}(x) = \sigma_{p.o} \cdot e$	$P(x) = P_0 \cdot e$	$P(x) = P_0 \cdot e$
		$\alpha = \lambda / r_{pm}$

Tableau 2.1

et une limitation de la tension de vérinage propre à chaque règlement. En ce qui concerne les coefficients de frottement il est difficile de les comparer vu que ces coefficients dépendent de plusieurs facteurs. Néanmoins on essaye de comparer quelques valeurs de ces coefficients dans le cas où les câbles propres sont logés dans des gaines métalliques qui ne présentent ni oxydation ni dégrafage du feuillard ni déchirure comme indiqué dans les tableaux

2.2 et 2.3. D'après ces tableaux on remarque que:

- L'intervalle de variation du coefficient de frottement selon le code BPEL n'est pas important car il est utilisable uniquement dans le cas où les gaines métalliques ne présentent aucune déformation ou ovalisation locale et que les armatures comportent un revêtement de protection provisoire ainsi que le tracé réel des câbles est conforme au plan;
- L'intervalle de variation du coefficient de frottement selon le code ACI est plus large comparé à celui du code BPEL notamment pour le frottement en ligne, car il est utilisable même dans le cas où la gaine métallique est flexible;
- En ce qui concerne le code BS, il propose une valeur extrême du coefficient de frottement en courbe pour chaque type de gaine sans qu'il exige des conditions d'application. Pour le coefficient de frottement en ligne, il précise qu'il ne doit pas être pris inférieur à 0,0033 mais dans le cas où la gaine est rigide ou elle est attentivement chargée afin qu'elle ne puisse pas être déplacée pendant le bétonnage, ce coefficient est pris égal à 0,0017.

Si les relations de calcul sont très similaires pour les 3 codes, le code BPEL offre un intervalle assez réduit pour le choix des coefficients de frottement comme cela est conditionné par des précautions et une exécution soignée de la précontrainte, il va de soi qu'on obtient ainsi des résultats assez proches de la réalité.

Si les relations de calcul sont très similaires pour les 3 codes, le code BPEL offre un intervalle assez réduit pour le choix des coefficients de frottement comme cela est conditionné par des précautions et une exécution soignée de la précontrainte, il va de soi qu'on obtient ainsi des résultats assez proches de la réalité.

Coefficients de frottement en courbe (rd^{-1})				
Code	BPEL	ACI	BS	
	f	μ	Nature de la gaine	μ
Fils	0,16 - 0,21	0,15 - 0,25	Acier	0,30
Torons	0,18 - 0,23	0,15 - 0,25	Acier couvert en molybdène	0,10
			Plomb	0,25

2.1.2 Pertes par recul d'ancrage

La comparaison des pertes par recul d'ancrage selon ces règlements nous permet de constater que:

N. CHIKH
R. BENMERLAOUI
I.G.C, université de
Constantine
A. ZAIDI
S.U.C El-Méniaa
(W. de Ghardaia)

RÉSUMÉ

La présente étude consiste à comparer les pertes de précontrainte par post-tension en considérant les trois règlements suivants:

- le code américain (ACI318-83)
- le code français (BPEL91)
- le code britannique (BS8110)

L'objectif de cette étude est de mettre en relief les points concordants entre les règlements considérés et les différences marquantes dans leur approche respective. L'ensemble de ces résultats permet de conclure par des propositions comme contribution pour l'élaboration d'une réglementation algérienne dans ce domaine.

MOTS CLÉS

Précontrainte, recul d'ancrage, déformations instantanées du béton, retrait, fluage, relaxation.

Tableau 2.2

Règlements et Normes

Coefficients de frottement en ligne (m ⁻¹)			
Code	BPEL	ACI	BS
	ψ	K	k
Fils et Torons	0,0020 - 0,0030	0,0016 - 0,0066	général $\geq 0,0033$ pour certains cas : 0,0017

Tableau 2.3

BPEL	ACI - ASCE	BS
$\Delta\sigma_{pl} = \frac{E_p}{2.E_{bl}} \sigma_b$	$ES = \frac{E_m}{2.E_{01}} f_{air}$	$\delta f_m = \frac{E_m}{2.E_{01}} f_o$

Tableau 2.4

NOTATIONS

1) Notations relatives au code BPEL

E_{bi}	Module de déformation longitudinale instantanée du béton.
E_{ij}	Module de déformation instantanée du béton à j jours.
E_p	Module de déformation longitudinale des aciers de précontrainte.
f	Coefficient de frottement en courbe.
f_{prg}	Contrainte de rupture garantie des aciers précontraints.
K_{f1}	Coefficient de fluage.
r_m	Rayon moyen de la pièce.
α	Déviation angulaire.
ϵ_r	Déformation par retrait.
ρ_{1000}	Valeur relative de la perte par relaxation à 1000 heures.
ρ_h	Humidité relative.
m	Rapport de la section du béton à la section d'armatures.
σ_b	Contrainte dans le béton.
σ_{pi}	Contrainte dans l'acier précontraint après les pertes instantanées.
σ_{po}	Tension initiale à l'origine.
ψ	Coefficient de frottement en ligne.

2) Notations relatives aux codes ACI et BS

CR	Perte par fluage.
E_m	Module d'élasticité du béton à 28 jours.
E_{ci}	Module d'élasticité instantané du béton au moment d'application de la précontrainte.
E_m	Module d'élasticité des aciers.
ES	Perte par raccourcissements élastiques du béton (code ACI).
f_o	Contrainte dans le

- Le calcul des pertes par recul d'ancrage présente le **même fondement théorique** dans les 3 codes considérés;
- Selon les différents règlements, le recul d'ancrage est mieux établi par essais, sa valeur est obtenue à partir de la valeur fixée par l'arrêté d'agrément du procédé de la précontrainte utilisée.

2.1.3 Pertes par déformations instantanées du béton

Par comparaison des formules de calcul des pertes par déformations instantanées du béton selon ces règlements, Tableau 2.4, on constate qu'elles sont basées sur le **même fondement théorique**. La différence entre elles résulte des différents valeurs attribuées par chaque code au rapport des modules d'élasticité acier-béton et à la contrainte dans le béton.

Il est à souligner que le rapport des modules d'élasticité acier-béton (E_m/E_{ci}) adopté par le code ACI est supérieur à ceux proposés par les codes BS et notamment le BPEL.

2.2 Pertes différées

2.2.1 Pertes par retrait

BPEL	ACI - ASCE	BS
$\Delta\sigma_x = \epsilon_x(x) \cdot E_p$ $\epsilon_x(x) = \epsilon_x \cdot [1 - r(t_0)]$ $\epsilon_x = k_m \cdot \epsilon_0$ $\epsilon_0 = \text{dans l'air est:}$ $\epsilon_0 = 10^{-6} (100 - p_h)$ $(6+80(10+3r_m))$ $k = \frac{1}{1+20p_m}$ $r(t_0) = \frac{1}{t_0 + 9r_m}$	$SH = \epsilon_{mh} \cdot E_m$ $\epsilon_{mh} = 8,2 \cdot 10^{-6} k_{mh}$ $(1-0,06 \cdot V/S)$ $(100 - RH)$	$\delta f_m = \epsilon_{0m} \cdot E_m$

Tableau 2.5

Par comparaison des formules de calcul des pertes par retrait selon ces règlements, Tableau 2.5, on constate qu'elles sont basées sur le **même fondement théorique**. Elles diffèrent entre elles par rapport aux valeurs du retrait et du module d'élasticité d'acier.

Du tableau 2.5 on remarque que pour tenir compte de la part du retrait qui se produit avant mise en tension le code BPEL introduit une loi d'évolution $r(t_0)$ qui permet de retrancher cette

part de retrait de sa valeur finale, que le code ACI procède par un coefficient K_{mh} qui est en fonction de l'âge du béton à sa mise en précontrainte, alors que le code BS l'introduit indirectement dans la valeur du retrait (Tableau 2.6), il propose néanmoins pour un calcul plus précis de se référer à une littérature spécialisée.

Système	Retrait par unité de longueur	
	Humidité relative RH = 90%	Humidité relative RH = 70%
Post-tension : transfert entre 7 et 14 jours après bétonnage	70 . 10 ⁻⁶	200 . 10 ⁻⁶

Tableau 2.6

Il est très intéressant de constater qu'on fait intervenir directement dans l'approche du code ACI l'influence des paramètres de l'humidité relative (RH) et de dimensions de l'élément (V/S). Le code BPEL fait également intervenir dans le calcul de la valeur du retrait (ϵ_r) l'influence de ces paramètres mais d'une manière plus complexe. On peut conclure que le code BS peut sous-estimer ou surestimer la valeur de la perte par retrait pour des situations particulières d'environnement et de dimensions de la pièce.

2.2.2 Pertes par fluage

Par comparaison des formules de calcul des pertes par fluage selon ces règlements, Tableau 2.7, on constate qu'elles sont basées sur le **même fondement théorique**. Ces formules sont en fonction du coefficient de fluage, du rapport des modules d'élasticité acier-béton et de la contrainte dans le béton.

Si l'on compare les formules simplifiées selon le code BPEL et le code ACI (ACI-ASCE), Tableau 2.7, on constate que:

- le module d'élasticité du béton selon le code ACI est calculé à 28 jours alors que selon le code BPEL il est calculé à l'âge du béton lors de sa mise en tension. Ceci s'explique par le fait que le coefficient de fluage selon le code BPEL (K_{f1}) est remplacé par le terme $2.E_{i28}/E_{ij}$ alors que selon le code ACI, ce coefficient (K_{of}) est fixé à 1,6;

BPEL	ACI - ASCE	BS
Formule générale : $\Delta\sigma_{rt} = k_{rt} \cdot \frac{\sigma_b}{E_{ls}} \cdot E_p$	$CR = k_{or} \cdot \frac{E_m}{E_c} \cdot (f_{oir} - f_{odm})$	$\sigma_{f_{or}} = \epsilon_{oo} \cdot E_m$
Formule simplifiée : $\Delta\sigma_{rt} = (\sigma_b + \sigma_m) \cdot \frac{E_p}{E_{ls}}$	$k_{or} = 1,6 \text{ pour les éléments en post-tension.}$	ou
si $\sigma_m \leq 1,5\sigma_b \implies$ $\Delta\sigma_{rt} = 2,5 \sigma_b \cdot \frac{E_p}{E_{ls}}$		$\sigma_{f_{or}} = \phi \cdot \frac{f_c}{E_c} \cdot E_m$

Tableau 2.7

- la contrainte dans le béton selon le code ACI est évaluée immédiatement après transfert. Alors que le code BPEL considère une moyenne de la contrainte finale et de la contrainte maximale dans le béton.
 Pour le code BS la perte par fluage est évaluée soit en multipliant la déformation de fluage, Tableau 2.8, par le module d'élasticité des aciers, soit par une autre formule développée par la littérature d'analyse[4] en utilisant le coefficient de fluage, cette formule est presque semblable à celle du comité ACI.

mature. La différence qu'on peut constater entre ces formules est que la formule proposée par le code ACI (ACI-ASCE) tient compte directement de l'effet des déformations instantanées du béton ainsi que l'effet du retrait et fluage du béton sur la relaxation de l'armature au cours du temps. Pour le code BPEL cette concomitance des effets est prise en compte forfaitairement en multipliant la valeur de la perte par relaxation par le coefficient 5/6;
 - pour le code BS, dans l'absence des données expérimentales et quand la tension initiale

	Résistance sur cube au transfert (N/mm ²)	Fluage de béton (par N/mm ²)
Pour la mise en post-tension entre 7 et 14 jours après bétonnage	≤ 40	$36 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{40}{f_{ci}}$
	≤ 40	$36 \cdot 10^{-6}$

Tableau 2.8

De cette comparaison, on constate que les formules des codes ACI et BS sont d'une utilisation simple et directe d'application, alors que celle donnée par le code BPEL est relativement plus longue, car elle nécessite au préalable la connaissance de toutes les pertes pour évaluer la contrainte dans le béton, mais elle conduit à des résultats relativement proches de la réalité.

2.2.3 Pertes par relaxation

Par comparaison des pertes par relaxation selon ces règlements, on constate que:

- les formules de calcul des pertes par relaxation selon les codes BPEL et ACI, Tableau 2.9, sont en fonction de la relaxation à 1000 heures et des coefficients qui tiennent compte de la nature des armatures et du rapport de la tension initiale à la résistance de rupture garantie de l'ar-

maturation. La différence qu'on peut constater entre ces formules est que la formule proposée par le code ACI (ACI-ASCE) tient compte directement de l'effet des déformations instantanées du béton ainsi que l'effet du retrait et fluage du béton sur la relaxation de l'armature au cours du temps. Pour le code BPEL cette concomitance des effets est prise en compte forfaitairement en multipliant la valeur de la perte par relaxation par le coefficient 5/6;
 - pour le code BS, dans l'absence des données expérimentales et quand la tension initiale $f_{pi} < 70\%$ de la résistance caractéristique des armatures f_{pu} , on peut supposer que la relaxation diminue linéairement: de 8% pour $f_{pi} = 70\% f_{pu}$, à 0% pour $f_{pi} = 50\% f_{pu}$.

Il est très intéressant de constater que l'expression de calcul développée par le code ACI (ACI-ASCE) a le mérite d'être simple et directe d'application mais le plus important encore est de tenir compte de la concomitance des phénomènes différés.

BPEL	ACI - ASCE	BS
$\Delta\sigma_r = 6 \cdot 10^{-3} (\mu - \mu_0) p 1000 \sigma_{pi}$ $\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{ps}}$ <p>μ_0 tient compte de la nature des armatures (RN; BR OU TBR)</p>	$RE = [K_{ro} - J(ES + CR + CH)]C$ <p>C: tient compte du rapport (f_{pi}/f_{pu}) et de la nature des armatures J: tient compte des effets de déformations inst., retrait et fluage du béton</p>	<p>Quand $f_{pi} \leq 70\% f_{pu}$ on suppose que la relaxation diminue linéairement de 8% pour $f_{pi} = 70\% f_{pu}$ à 0% pour $f_{pi} = 50\% f_{pu}$</p>

Tableau 2.9

2.3 Applications numériques

La comparaison des pertes de précontrainte par post-tension selon ces règlements est illustrée par des applications numériques traitées par ordinateur en utilisant le programme CPEP qu'on a élaboré à cet effet [8].

- béton au cdg des aciers précontraints due aux charges permanentes y compris la précontrainte immédiatement après transfert.
- Fodm** Contrainte dans le béton au cdg des aciers précontraints due aux charges permanentes additionnelles.
- Foir** Contrainte dans le béton immédiatement après transfert.
- fpi** Contrainte initiale dans l'armature de précontrainte.
- fpu** Résistance ultime garantie des aciers précontraints.
- K** Coefficient de frottement en ligne.
- K_{or}** Coefficient de fluage.
- K_{rm}** Valeur de la relaxation.
- P** Force de précontrainte après pertes.
- P_σ** Force de précontrainte initiale dans l'élément.
- RE** Perte par relaxation (code ACI).
- RH** Humidité relative en%.
- SH** Perte par retrait (code ACI).
- E_{σσ}** Déformation par fluage.
- ese** Déformation par retrait (code BS).
- E_{σm}** Déformation par retrait (code ACI).
- μ** Coefficient de frottement en courbe.
- φ** Coefficient de fluage.

BIBLIOGRAPHIE:

- [1] «Building code requirements for reinforced concrete ACI 318-83», Edition: ACI, 1983.
- [2] «Code of practice for the structural use of concrete» Part 1 Edition: BSI, 1981.
- [3] Dreux, G., Mazars, J. et Rimboeuf, M. «Cours pratique de béton précontraint - Règles BPEL83», Editions: Eyrolles 1984.
- [4] Kong and Evans «Reinforced and prestressed concrete», 3rd edition, Incorporating BS811U and microcomputer application, Edition: VAN NOSTRAND REINHOLD, 1989.
- [5] Lin, T.Y. and Burns, Ned.H. «Design of prestressed concrete structures» (Edition: John WILEY, 1982. [6] Picard, A. «Béton précontraint principes fondamentaux et dimensionnement» (Editions: Gaëtan MORIN.
- [7] «Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites-Règles BPEL91», Editions: Eyrolles, 1992.
- [8] Zaïdi, A. «Pertes de précontrainte-étude comparative des codes: BPEL-BS-ACI», Thèse de magister: centre universitaire de M'Sila, 1995.

3 CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS

L'étude comparative réglementaire révèle les constatations suivantes:

- les formules de calcul des différentes pertes contenues dans les 3 codes présentent **des fondements théoriques similaires**.

- Ces formules font intervenir les caractéristiques du béton et acier qui en sont d'ailleurs les facteurs principaux pour certaines pertes.

L'analyse des différents résultats de cette étude permet de développer des recommandations comme contribution pour l'élaboration d'une réglementation algérienne sur le calcul des pertes de précontrainte. Ces propositions peuvent se résumer comme suit:

1) Adopter pour ce règlement deux approches de calcul des pertes: La première méthode basée sur le concept de sommation des pertes finales. Une seconde à utiliser pour des situations particulières qui permet de déterminer les pertes différées en fonction du paramètre temps. Pour la prise en compte de ce facteur, on peut s'inspirer: de l'approche développée par le comité PCI.

2) Etablir une carte de zonage climatique plus raffinée indiquant notamment les valeurs de température et humidité relative.

3) Vu leur influence sur l'intensité des pertes, les caractéristiques du béton doivent être établies en fonction des paramètres principaux et des conditions climatiques.

4) Pour le calcul des pertes instantanées, on peut puiser directement les formules données par les 3 codes considérés.

5) Pour le calcul des différentes pertes, on recommande:

a) Etablir une formule de calcul des pertes par retrait en s'inspirant de celle du code ACI qui couvre des conditions climatiques similaires à notre pays, et encore elle fait intervenir directement l'influence de l'humidité relative, de dimensions de la pièce et de l'âge du béton au transfert.

b) Etablir une formule de calcul des pertes par fluage en se basant sur l'approche développée par le code BPEL qui introduit les différents facteurs influents.

(c) Etablir une formule de calcul des pertes par relaxation en s'inspirant de celle donnée par le code ACI qui a le mérite d'être simple et directe d'application, mais le plus important est encore de tenir compte de la concomitance des phénomènes différés ■

À PARAÎTRE DANS LE PROCHAIN NUMÉRO**Analyse non-linéaire des structures planes en B.A.**

S. LOURDJANE (*Institut de Génie Civil, Université de Tizi-Ouzou*) - A. CHARIF (*Institut d'hydraulique, Université de Batna*)

Détermination de la teneur en eau d'un sol dans un sachet en plastique

Z. DERRICHE (*I.G.C, USTHB Bab Ezzouar*)

Géotechnique et monuments historiques. Aspects méthodiques

M.A. ALLAL (*I.G.C, Université de Tlemcen*)

L'eau en Algérie du Nord : Une urgence, un défi, un enjeu...

A. BOUDJAJA (*I.G.C, Université de Blida*)