

ANALYSE ET NUMÉRISATION DES PERTES DE PRÉCONTRAINTÉ PAR POST-TENSION SELON LES CODES CSA ET BPEL

ZAIDI A.¹, AZIEZ M.N.¹, AMARA S.¹, BOUZIANI T.¹

¹T.Laboratoire de matériaux et réhabilitation de structures, université de Laghouat, B.P 37G,
Laghouat (03000), Email : azaidi12@yahoo.fr

Résumé : *Durant les dernières décennies, l'utilisation de la précontrainte en génie civil a connu une ascension remarquable 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 voie de développement souffrent toujours de l'absence de codes respectant les conditions environnementales de leurs propres pays. Cet article présente une étude qui consiste à analyser et numériser les pertes de précontrainte par post-tension en considérant le code Canadien (CSA-S6-06) et le code Français (BPEL91). L'analyse comparative des pertes de précontrainte selon ces deux codes est concrétisée par des applications numériques en utilisant un programme de langage fortran que l'on a élaboré à cet effet. Les résultats d'analyse obtenus de cette étude permettent de conclure par des propositions et recommandations qui s'ajoutent à la banque de données que l'on a fondé pour l'établissement d'un code algérien dans ce domaine.*

Mots-Clefs : Pertes, Précontrainte, Analyse, Numérisation, Codes.

1. Introduction

L'utilisation de la précontrainte dans les structures en béton a gagné une grande popularité à travers le monde en raison de ses avantages en termes d'économie et d'esthétique. Néanmoins, le problème majeur en béton précontraint est la perte de tension dans les aciers tendus qui engendrent des diminutions assez importantes de la tension initiale. Ces pertes sont dues à plusieurs phénomènes dépendant des propriétés des matériaux utilisés ainsi que des conditions atmosphériques du milieu environnant. Ces facteurs, qui diffèrent d'un pays à l'autre, peuvent donc modifier certains paramètres et influencer par conséquent sur l'intensité des pertes de précontrainte. 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. Il est à noter que, dans le cas de la post-tension, le frottement de l'armature sur sa gaine lors de la mise en tension cause aussi une diminution de la tension appliquée dans l'armature. Enfin, le recul et la déformation du corps d'ancrage dépendant du procédé de mise en tension, produit également des pertes de précontrainte que l'on doit tenir en ligne de compte [1], [2], [5-8], [11]. Bien que des normes et des règles ont été établies dans les pays développés afin d'évaluer les pertes de précontrainte, les ingénieurs dans les pays en voie de développement se trouvent en situation inconfortable en ce qui concerne le choix du code à utiliser à cause des conditions environnementales influençant ces pertes et qui sont différentes de celles de leurs propres pays. La présente étude consiste à analyser et numériser les pertes de précontrainte par post-tension en considérant le code Canadien (CSA-S6-06) [3], [4] et le code Français (BPEL91) [10]. Des applications numériques ont été présentées en utilisant un programme de langage fortran que l'on a élaboré afin de comparer les pertes de précontrainte par post-tension selon ces deux codes étudiés. Les résultats de cette analyse comparative permettent de conclure par des propositions et recommandations enrichissant la banque de données que l'on a fondée pour l'établissement d'un code algérien dans ce domaine.

2. Analyse comparative des pertes de précontrainte par post-tension

2.1. Pertes instantanées

2.1.1. Pertes par frottement

Par comparaison des formules de calcul de perte par frottement selon les deux codes CSA [3] et BPEL [10], Tableau 1, on constate qu'elles sont basées sur le même fondement théorique avec cependant une légère différence dans les valeurs des coefficients de frottement et la tension à l'origine.

Tableau 1: Comparaison des formules de perte par frottement

Selon le code BPEL	Selon le code CSA
$\sigma_p(x) = \sigma_{po} \cdot e^{-(f \cdot \alpha + \varphi \cdot x)}$	$\sigma_p(x) = \sigma_{po} \cdot e^{-(\mu \cdot \alpha + K \cdot x)}$

Notons que σ_{po} : Tension à l'origine ; φ , K : Coefficient de frottement par unité de longueur ;

f , μ : Coefficient de frottement en courbe ; α : Déviation angulaire

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 sains (non oxydés) sont logés dans des gaines métalliques qui ne présentent ni oxydation, ni dégrafée du feuillard et ni déchirure, comme indiqué dans les Tableaux 2 et 3.

D'après ces tableaux on remarque que l'intervalle de variation du coefficient de frottement selon le code BPEL [10] 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.

En ce qui concerne le code Canadien CSA [3], l'intervalle de variation du coefficient de frottement proposé pour chaque type de gaine sans exigence des conditions d'application,

est utilisable même dans le cas où la gaine est plus déformable. C'est pour cette raison qu'il est plus large comparé à celui du code Français BPEL.

Tableau 2 : Comparaison des coefficients de frottement en courbe (rd^{-1})

Selon le code BPEL		Selon le code CSA	
Nature des armatures	f (rd^{-1})	Nature de la gaine	μ (rd^{-1})
Fils	0,16-0,21	Conduits intérieurs et extérieurs	0,14-0,20
Torons	0,18-0,23	Conduits intérieurs et extérieurs	0,14-0,25

Tableau 3 : Comparaison des coefficients de frottement en ligne (m^{-1})

Selon le code BPEL		Selon le code CSA	
Nature des armatures	ϕ (m^{-1})	Nature de la gaine	K (m^{-1})
Fils et Torons	0,0020 - 0,0030	Conduits intérieurs et extérieurs	0,0010 - 0,0050

D'après ces remarques, on constate que le code BPEL offre un intervalle assez réduit pour le choix des coefficients de frottements 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.

2.1.2. Pertes par recul d'ancrage

La comparaison des pertes par recul d'ancrage selon les deux règlements CSA et BPEL nous permet de constater que :

- le calcul des pertes par recul d'ancrage présente le même fondement théorique dans les deux codes considérés;
- selon les deux codes CSA et BPEL, les valeurs de recul d'ancrage sont obtenues à partir de la valeur fixée par l'arrêté d'agrément du procédé de la précontrainte utilisée.

2.1.3. Perte par déformations instantanées du béton

Le tableau 4 compare les formules de calcul des pertes par déformations instantanées du béton selon les deux codes CSA et BPEL. D'après ce tableau, on constate que ces formules sont basées sur le même fondement théorique. La différence entre elles résulte des différentes valeurs du module d'élasticité et de la contrainte dans le béton. Cependant, les valeurs de module d'élasticité des aciers de précontrainte adoptées par ces deux codes sont approximativement similaires.

Il est à souligner que le module d'élasticité du béton E_{ij} adopté par le code BPEL donne des valeurs plus grandes que celui E_{ci} du code CSA.

Tableau 4: Comparaison des formules de perte par raccourcissement élastique du béton

Selon le code BPEL		Selon le code CSA	
$\Delta\sigma_{pi}(x) = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_{ij}} \cdot \sigma_b$		$ES = \left[\frac{N-1}{2N} \right] \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir}$	

Notons que E_p : Module d'élasticité des aciers précontraints ; E_{ij} ; E_{ci} : Modules de déformation instantanée du béton des codes BPEL et CSA, respectivement ; σ_b : Contrainte dans le béton au niveau du centre de gravité (cdg) du câble moyen dans la section considérée sous l'effet de toutes les actions de longue durée y compris la précontrainte, selon le code BPEL ; f_{cir} : Contrainte dans le béton immédiatement après le transfert de la précontrainte au béton ; N : nombre de câbles ; γ_c : la masse volumique du béton kg/m^3 ; f'_c , f_{ci} : la résistance du béton à la compression, en MPa, des codes BPEL et CSA, respectivement.

2.2. Pertes différées

2.2.1. Pertes par retrait

Par comparaison des expressions de calcul des pertes par retrait selon les deux codes BPEL et CSA, on remarque qu'elles sont basées sur le même fondement théorique, et que la perte de tension due au retrait correspond seulement à la part du retrait produite après la mise en tension des câbles. La différence entre elles dépend des paramètres utilisés par chaque code comme le montre le tableau 5.

D'après le tableau 5, 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 t et par conséquent la perte par retrait à un temps t . Cependant, le code CSA utilise une formule simple qui estime la perte par retrait, indépendamment du temps, en fonction de l'humidité relative (RH) uniquement.

Il est très important de constater que la perte par retrait selon le code CSA tient compte uniquement de l'effet des conditions climatiques canadiennes particulièrement d'humidité relative (RH). Le code BPEL fait également intervenir dans le calcul de la valeur du retrait (ϵ_r) l'influence des paramètres

de l'humidité relative ρ_h (Notation du BPEL) et des dimensions de la pièce r_m mais de manière plus complexe.

Tableau 5 : Comparaison des formules de perte par retrait

Selon le code BPEL	Selon le code CSA
Perte finale à temps : $t \rightarrow \infty$	SH=(94 - 0,85.RH)
$\Delta\sigma_{ram}(t) = \varepsilon_r(\infty) \cdot [1 - r(t_0)] \cdot E_p$	
Perte à temps : t	
$\Delta\sigma_r(t) = \varepsilon_r(\infty) \cdot [r(t) - r(t_0)] \cdot E_p$	

Notons que $\varepsilon_r(\infty)$: Retrait total du béton ;

t_0 : âge du béton au moment de sa mise en précontrainte ;

$r(t_0) = \frac{t_0}{t_0 + 9 \cdot r_m}$: fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps, avec

$r_m = \frac{\text{aire de la section de la pièce}}{\text{périmètre de cette section}}$, rayon moyen en cm.

La comparaison des formules de calcul des pertes par fluage selon ces deux règlements (CSA et BPEL), montre qu'elles sont basées sur le même fondement théorique. Ces formules sont en fonction des modules d'élasticité des aciers et béton, de la contrainte dans le béton et du coefficient de fluage comme le montre le tableau 6. Si on compare les formules simplifiées selon le code BPEL et le code CSA, on constate que la différence entre-elles est due à l'influence des paramètres suivants :

- module d'élasticité du béton : le module d'élasticité du béton selon le code CSA 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 explique par le fait que le coefficient de fluage selon le code BPEL (K_{η}) est remplacé par le terme ($2 \cdot E_{i28} / E_{ij}$), alors que pour le code CSA, ce coefficient est pris égal à $(1,37 - 0,77(0,01RH)^2) K_{cr}$.
- contrainte dans le béton : la contrainte dans le béton selon le code CSA est évaluée immédiatement après le transfert. D'après le code BPEL la contrainte doit être calculée après toutes les pertes.
- module d'élasticité des aciers : les valeurs du module d'élasticité des aciers adoptées par les codes CSA et BPEL sont presque similaires.

De cette comparaison, on constate que la formule de perte par fluage proposée par le code CSA est

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 plus proches de la réalité.

Tableau 6 : Comparaison des formules de perte par fluage.

Selon le code BPEL	Selon le code CSA
Expression générale : $\Delta\sigma_{\eta}(x) = K_{\eta} \cdot \frac{\sigma_b}{E_{i28}} \cdot E_p$	$CR = [1,37 - 0,77(0,01RH)^2] K_{cr} \frac{E_p}{E_c} (t_{cir} - t_{cbs})$
Expression simplifiée : $\Delta\sigma_{\eta} = (\sigma_b + \sigma_M) \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$	$K_{cr} = 1,6$ pour les éléments en post-tension RH : humidité relative.
Si $\sigma_M \leq 1,5 \cdot \sigma_b$: $\Delta\sigma_{\eta} = 2,5 \cdot \sigma_b \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$	

Notons que :

σ_b : contrainte finale du béton au niveau du cdg des armatures de précontrainte sous les actions de longue durée y compris la précontrainte;

E_{ij} : module de déformation instantanée du béton à j jours, l'âge du béton lors de sa mise en tension;
 σ_M : contrainte maximale dans béton, au niveau du câble moyen, généralement obtenue à la mise en précontrainte;

f_{cir} : contrainte du béton au cdg des câbles de précontrainte, due à la force de précontrainte immédiatement après le transfert;

f_{cbs} : contrainte du béton au cdg des câbles de précontrainte, due à toutes les charges permanentes sauf celles qui s'exercent au transfert à la même ou aux mêmes sections pour lesquelles est calculée;

E_c : module d'élasticité du béton à 28 jours.

2.2.3. Pertes par relaxation

Les formules de calcul des pertes par relaxation, selon les deux codes CSA et BPEL, sont basées sur le même fondement théorique et sont en fonction de la relaxation à 1000 heures, de la nature des aciers utilisées et du rapport de la contrainte dans les armatures de précontrainte après les pertes instantanées à la résistance de rupture garantie, comme le montre le tableau 7. La différence que l'on peut constater entre ces formules est que la formule proposée par le code CSA tient compte directement de l'effet du retrait et du fluage sur la relaxation de l'armature au cours de temps. Aussi, cette formule est utilisable uniquement dans le cas des torons à basse relaxation. Cependant, pour les barres à haute résistance, la relaxation doit être établie à l'aide de données d'essai approuvées.

Pour le code BPEL, les effets du retrait et fluage du béton sur la relaxation sont pris en compte forfaitairement en multipliant la perte par relaxation par la valeur 5/6 (BPEL91 article 3.3.24). La formule du code BPEL est applicable pour tous les types d'aciers de précontrainte.

Tableau 7: Comparaison des formules de la perte par relaxation

Les codes	Les expressions de la perte par relaxation
Selon le code BPEL	$\Delta\sigma_p = 6 \cdot 10^{-2} \cdot (\mu - \mu_0) \cdot \rho_{1000} \cdot \sigma_{pi}(x)$ $\mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}}$; μ_0 : tient compte de la nature des armatures (RN, BN ou TBR).
Selon le code CSA	Pour torons à basse relaxation : $REL_2 = \left[\frac{f_{st}}{f_{pu}} - 0,55 \right] \left[0,34 - \frac{CR + SH}{1,25 f_{pu}} \right] f_{pu} \geq 0,002 \cdot f_{pu}$ CR : perte de précontrainte due au fluage du béton ; SH : perte de précontrainte due au retrait du béton.

Notons que ρ_{1000} : valeur maximale de la relaxation à 1000 heures; σ_{pi} : contrainte dans les armatures de précontrainte après les pertes instantanées; f_{prg} : résistance de rupture garantie des aciers de précontrainte; f_{st} : tension dans l'acier de précontrainte au transfert selon le code CSA; f_{pu} : contrainte de rupture des aciers de précontrainte selon le code CSA.

Enfin, il est très important de constater que la formule développée par le code CSA est d'une utilisation simple et directe, mais le plus important encore est qu'elle tient compte d'une manière directe et précise de la concomitance existante entre les phénomènes de relaxation des aciers, du retrait et du fluage du béton.

2.3. Application numérique

Le calcul des pertes de précontrainte selon les codes BPEL et CSA se fait en utilisant le programme CPEP (en fortran) établi par ZAIDI en 1995 [11], modifié et amélioré dans cette étude afin de se limiter aux calculs des pertes selon les codes CSA et BPEL. Le programme modifié et amélioré CPEPM [2] en utilisant le langage fortran [9] permet de calculer les pertes de précontrainte par post-tension d'un câble moyen, de tracé parabolique symétrique, à la section de mi-travée d'une poutre en béton précontraint simplement appuyée de section rectangulaire ou de forme T.

En utilisant le programme modifié CPEPM, on peut évaluer les pertes de précontrainte dans le câble moyen qui représente les 4 câbles 12Ø7 de type TBR traversant la section de la figure 1 située à mi-travée d'une poutre en béton armé simplement appuyée de longueur L. Dans cet exemple, on

considère que la mise en tension se fait au niveau des deux extrémités de chaque câble.

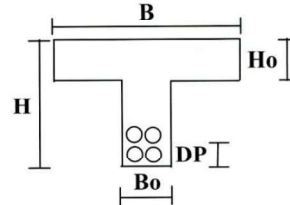


Figure 1: Section en T de la poutre en béton armé simplement appuyée.

Les résultats du calcul des caractéristiques géométriques de la section T, sont donnés dans le Tableau 8. Cependant, les résultats de calcul des pertes de précontrainte par post-tension, en MPa et en % de la tension à l'origine σ_{po} , sont donnés respectivement par les tableaux 9 et 10.

Tableau 8: Résultats de calcul des caractéristiques géométrique de la section

CARACTERISTIQUES DE LA SECTION	
SECTION NETTE DU BETON (SB) en m ²	0.4350
COORDONNEES DE LA SECTION NETTE (VP et V) en m	0.633
	0.367
RAYON MOYEN (R) en cm	10.9
MOMENT D'INERTIE (IG) en m ⁴	0.0393
RAYON DE GIRATION (RG) en m	0.30
EXCENTRICITE DU CABLE MOYEN (EXO) en m	0.533
ROTATION DU CABLE MOYEN (TI)	0.06406

Tableau 9: Résultats de calcul des pertes de précontrainte en MPa

pertes en MPa	code	BPEL	CSA
frottement		69.4	73.3
recul d'ancrage		0.0	0.0
déformations instantanées du béton		22.2	26.5
total des pertes instantanées		91.6	99.8
retrait		35.0	34.5
relaxation		47.3	30.1
fluage		96.6	102.1
total des pertes différées		171.0	166.7
total des pertes		262.6	266.6

Tableau 10: Résultats de calcul des pertes de précontrainte en %

pertes en %	code	BPEL	CSA
frottement		5.2	5.7
recul d'ancrage		0.0	0.0
déformations instantanées du béton		1.7	2.0
total des pertes instantanées		6.8	7.7
retrait		2.6	2.7
relaxation		3.5	2.3
fluage		7.2	7.9
total des pertes différées		12.7	12.9
total des pertes		19.6	20.6

D'après le tableau 10 on remarque que :

-le pourcentage de perte par frottement selon le code CSA est légèrement supérieur à celui du code BPEL (plus de 10%), cette différence revient aux valeurs des coefficients de frottement adoptées par le code CSA qui sont supérieures à celles du code BPEL ;

-la perte par recul d'ancrage est nulle pour les deux codes. Donc, on constate que la distance sur laquelle s'effectue le recul d'ancrage est inférieure à $L/2$;

-le pourcentage de la perte par déformation instantanée du béton selon le code CSA est plus élevé que celui du code BPEL (plus de 18%). Cette augmentation est due à la faible valeur du module d'élasticité du béton adoptée par le code CSA ;

-le pourcentage des pertes instantanées selon le code CSA est relativement élevé par rapport au code BPEL (plus de 14%). Cette supériorité est due aux valeurs élevées de la perte par frottement et perte par déformation instantanée du béton discutées aux paragraphes précédents ;

-le pourcentage de la perte par retrait selon le code BPEL est presque similaire que celui du code CSA (3,8% d'écart) car les valeurs du retrait finales considérées par les deux codes sont des valeurs moyennes approximatives ;

-le pourcentage de perte par relaxation selon le code CSA est très faible par rapport au code BPEL (moins de 34%). Cette faible valeur est due à l'influence de retrait et fluage du béton sur la relaxation d'acier au cours du temps. Cependant, le code BPEL néglige l'effet de ces phénomènes dans la formule de calcul de cette perte, bien qu'il soit tenu en compte forfaitairement dans l'expression de la somme des pertes différées ;

-le pourcentage de la perte par fluage selon le code CSA est légèrement supérieur à celui du code BPEL (plus de 10%). Cette augmentation est due principalement à la faible valeur du module d'élasticité du béton adoptée par le code CSA ;

-le pourcentage des pertes différées selon le code BPEL est presque similaire à celui du code CSA (1% d'écart) ;

-le pourcentage total des pertes selon le code CSA est légèrement élevé par rapport à celui du code BPEL. Cette légère supériorité estimée à 4,5% est quasiment négligeable.

3. Conclusion et propositions

L'étude comparative réglementaire relève les constatations suivantes :

- les formules de calcul des différentes pertes adoptées par les deux codes sont basées sur le même fondement théorique ;

-ces formules sont fondées principalement sur les caractéristiques physiques et mécaniques des deux matériaux acier-béton.

Les résultats de l'étude comparative des pertes de précontrainte selon les deux codes BPEL et CSA, permet de suggérer quelques recommandations comme contribution pour l'élaboration d'un guide algérien sur le calcul des pertes de précontrainte.

Ces recommandations se résument comme suit :

1) Adopter pour ce règlement deux approches de calcul des pertes : une première méthode basée sur le concept de sommation des pertes finales et une seconde à utiliser pour des situations particulières qui permet de déterminer 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 températures et de l'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 deux codes considérés car elles sont presque similaires.

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

a) d'établir une formulation pour le calcul des pertes par retrait en s'inspirant de celle du code CSA qui est simple et tient compte des conditions climatiques (humidité relative) vu que notre pays est vaste et connaît des variations climatiques différentes d'une région à une autre.

b) d'établir 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 (âge du béton, humidité relative, rayon moyen de la pièce).

c) d'établir une formule de calcul des pertes par relaxation en s'inspirant de celle donnée par le code CSA qui a le mérite d'être simple et directe d'application.

Références bibliographiques

- [1] André, P., *Béton précontraint principes fondamentaux et dimensionnement*, Gâetan Morin, 2001.
- [2] Aziez, M.N., *Etude comparative des pertes de précontrainte par post-tension selon les codes BPEL – CSA, mémoire de Master, Université de Laghouat*, juin 2011
- [3] Canadian Standards Association, *Canadian Highway Bridge Design Code, CAN/CSA-S6-06*, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2006.
- [4] Canadian Standards Association, *Steel for prestressed concrete tendons, CSA standard G279-M1982*, Rexdale, Ontario.
- [5] Dreux, G., Mazars, J. et Rimboeuf, M., *Cours pratique de béton précontraint Règles BPEL*, Eyrolles, 1984.
- [6] Dreux, G., *Pratique de béton précontrainte*, Eyrolles 1975.
- [7] Lacroix et Fuentes, *Projet du béton précontraint*, Collection de l'ENPC, 1981.
- [8] Naaman, A.E., *Prestressed Concrete Analysis and design: Fundamentals*, Second Edition, Techno Press 3000, 2004.
- [9] Nacera et Taiba, S., *Pratique du Fortran 77*, Berti, 1991.
- [10] *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites-Règles BPEL*, Eyrolles, 1992.
- [11] Zaidi, A., *Pertes de précontrainte - étude comparative des codes BPEL-BS ACI*, Thèse de magistère, Université de Msila, juin 1995.

Notations :

- Notations relatives au code BPEL:

E_p : Module de déformation longitudinale du béton.
 E_{ij} : Module de déformation longitudinale du béton à l'âge de j jours.
 E_p : Module d'élasticité des armatures de précontrainte.
 f : Coefficient de frottement en courbe.
 f_{peg} : Contrainte limite élastique garantie des aciers précontraints.

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

K_R : Coefficient de fluage.

l : Longueur ou portée.

r_m : Rayon moyen d'une pièce ($= B / u$)

α : Déviations angulaire.

ε : Déformation relative (pour le béton, pour le retrait du béton, pour l'acier passif, pour l'acier actif).

ρ_{1000} : Valeur relative de la perte par relaxation à 1000 heures.

ρ_h : Valeur d'humidité relative.

σ : Contrainte normale.

σ_b : Contrainte dans le béton.

σ_p : Contrainte normale de l'acier de précontrainte.

σ_{po} : Tension à l'origine.

φ : Coefficient de frottement par unité de longueur.

- Notations relatives au code CSA :

CR: Perte de précontrainte due au fluage de béton.

E_c : Module d'élasticité du béton à 28 jours.

E_{ci} : Module d'élasticité du béton au moment d'application de la précontrainte initiale

E_p : Module d'élasticité des armatures de précontrainte

ES : Perte de précontrainte due aux raccourcissements élastique du béton.

f'_c : Résistance à la compression du béton à 28 jours.

f_{cds} : Contrainte du béton au centre de gravité des câbles de précontrainte, due à toutes les charges permanentes sauf celles qui s'exercent au transfert à la même ou aux mêmes sections pour lesquelles est calculée.

f_{cir} : Contrainte dans le béton immédiatement après le transfert de la précontrainte au béton.

f_{pu} : Contrainte de rupture de l'acier de précontrainte

f_{py} : Contrainte limite élastique de l'acier de précontrainte

f_{sj} : Contrainte dans l'acier de précontrainte à la mise en tension, MPa

f_{st} : Tension dans l'acier de précontrainte au transfert.

K: Coefficient de frottement en ligne.

l : Longueur de l'armature de précontrainte.

REL2: Perte totale de précontrainte due à la relaxation des aciers précontraints

RH: Humidité relative en %.

SH: Perte de précontrainte due au retrait du béton.

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

μ : Coefficient de frottement en courbe