



Flexion longitudinale et transversale

ENPC – MSGCE – Projet d'ouvrage d'art 2024
Mathieu MULS

Contenu du cours



1. Hypothèses de calcul, charges et combinaisons
2. Flexion longitudinale
3. Flexion transversale

Hypothèses de calcul



Note d'hypothèses

1. Description de l'ouvrage
2. Durabilité
 - Formulation béton => NF EN 206/CN
 - Résistance minimale (NF EN 1992 et NF EN 206+A2/CN)
 - Enrobages
3. Matériaux
 - Béton => retrait, fluage
 - Précontrainte => caractéristiques, calcul des pertes
 - Acier passif
4. Charges
5. Combinaisons d'actions

Attention au pays du projet

Les Annexes Nationales peuvent fixer des règles très différentes !

Durabilité



1. Conditions d'environnement
 - Vis-à-vis des enrobages
 - Vis-à-vis de la formulation du béton

2. Rappel des conditions
 - Carbonatation (exposition à l'humidité) – XC
 - Chlorures – XD et XS
 - Gel-dégel – XF
 - Attaque chimique – XA

3. Conséquences sur la formulation du béton

Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France en fonction de la classe d'exposition pour la composition et les propriétés du béton contenant des ciments listés en colonne A du Tableau NA.10 de NA.5.3.2 (à l'exception des ciments des bétons d'ingénierie contenant du laitier) et des mélanges de ciment à l'exception de ceux cités en NA.F.2

		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3 o)	XD1	XD2	XD3 o)	XF1 a)	XF2 a)	XF3 a) b)	XF4 a) b)	XA1	XA2	XA3
	Rapport E_{rel}/L_{rel} maximal c)		0,65	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50	0,60	0,55	0,50	0,60	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45
	Classe de résistance minimale		C20/25	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
	Teneur mini en L_{rel} (kg/m ³) c) d)	150	260	260	280	280	330	330	350	280	330	350	280	300	315	340	330	350	360

Matériaux



1. Béton

- Résistance
- Paramètres de retrait et fluage

2. Précontrainte

- Type de torons, caractéristiques
- Paramètres de pertes

Précontrainte



Calcul des pertes

- Coefficients de frottement: EN 1992-1-1 §5.10.5.2
- Utiliser en priorité valeur des agréments techniques européens
- À défaut Tableau 5.1 de l'EN 1992-1-1

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max} (1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$$

Tableau 5.1 : Coefficients de frottement μ pour les armatures de précontrainte par post-tension — Armatures intérieures et armatures extérieures non-adhérentes

	Armatures intérieures ¹⁾	Armatures extérieures (non-adhérentes)			
		Gaine en acier / non graissé	Gaine en PEHD / non graissé	Gaine en acier / graissé	Gaine en PEHD / graissé
Fil tréfilé à froid	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Toron	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Barre non lisse	0,65	—	—	—	—
Barre lisse	0,33	—	—	—	—

1) Dans le cas d'armatures remplissant environ la moitié de la gaine.

NOTE PEHD — polyéthylène haute densité.

(3) À défaut de données fournies par un Agrément Technique Européen, les valeurs des déviations angulaires parasites pour les armatures intérieures seront généralement telles que $0,005 < k < 0,01$ par mètre.

(4) Pour les armatures de précontrainte extérieures, les pertes de précontrainte dues aux déviations angulaires parasites peuvent être négligées.

Précontrainte



Tableau 5.1 : Coefficients de frottement μ pour les armatures de précontrainte par post-tension — Armatures intérieures et armatures extérieures non-adhérentes

	Armatures intérieures ¹⁾	Armatures extérieures (non-adhérentes)			
		Gaine en acier / non graissé	Gaine en PEHD / non graissé	Gaine en acier / graissé	Gaine en PEHD / graissé
Fil tréfilé à froid	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Toron	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Barre non lisse	0,65	—	—	—	—
Barre lisse	0,33	—	—	—	—

1) Dans le cas d'armatures remplissant environ la moitié de la gaine.

NOTE PEHD — polyéthylène haute densité.

Exemple - agrément technique européen

Use	Duct Type	Friction Coefficient μ (rad ⁻¹)		Wobble factor k (rad/m)
		Lubricated Strand	Unlubricated Strand	
Internal Prestressing	Corrugated steel sheath	0,17	0,19 ¹	0,007 ¹
	LFC ³ Corrugated steel sheath	0,10	0,12	0,007 ¹
	Corrugated plastic sheath	0,10	0,12	0,007 ¹
External Prestressing	Steel pipe	0,16	0,24	0,007 ¹
	HDPE pipe	0,10	0,12	0
	Steel pipe	0,16	0,24	0
Unbonded Prestressing	Single Monostrands embedded in the concrete	0,05 ²		0,007 ²
	Group of Pre-Grouted Monostrands (external or internal prestressing)	0,05		0,012

Table 7. Friction and Wobble Coefficient

Précontrainte



Calcul en fourchette

-
- $P_{k,\text{sup}} = r_{\text{sup}} P_{m,t}(x)$ et $P_{k,\text{inf}} = r_{\text{inf}} P_{m,t}(x)$
 - Câbles intérieurs : $r_{\text{sup}} = 1,10$ et $r_{\text{inf}} = 0,90$ /
valeurs ramenées à 1,05 et 0,95 en construction (EN1992-1-1/NA)
et même à 1,0 si dispositions spéciales (EN1992-2/NA)
 - Câbles extérieurs : $r_{\text{sup}} = 1,05$ et $r_{\text{inf}} = 0,95$
 - Valeurs calibrées pour les pertes à l'infini (d'où la réduction en construction)

Charges et combinaisons



1. Poids propre et charges d'équipements
2. Charges de trafic
 - Dépend du type de pont (routier, ferroviaire, passerelle...)
 - Modèles de charges => NF EN 1991-2
 - Groupes de charges de trafic => NF EN 1990 / A1
3. Charges thermiques
 - Température uniforme
 - Gradient thermique
4. Autres charges variables
 - Vent
 - Tassement d'appui
 - ...

Charges et combinaisons



1. Actions permanentes

- $\{ G + P_m \}(t)$: état de la structure sous poids propre à l'instant t sous précontrainte probable
- $\{ G_k + P_k \}(t)$: enveloppe des états de la structure sous poids propre à l'instant t avec fourchette de précontrainte et enveloppe de charges permanentes
- $\{ G + P_m \}$: enveloppe des états $\{ G + P_m \}(t)$ depuis la mise en service jusqu'à $t = 120$ ans
- $\{ G_k + P_k \}$: enveloppe des états $\{ G + P_k \}(t)$ depuis la mise en service jusqu'à $t = 120$ ans
- $\{ G \}$: effet du poids propre appliqué à la structure en service, sans phasage de construction et sans précontrainte (utilisé pour calcul ELU)

2. Actions variables

- T_k : enveloppe des effets thermiques
- $gr1a, gr2, gr5_{\text{modifié}}$: groupes de charge de trafic
- F_{Wk} : enveloppe des effets du vent cinquantenal en service
- $F_{Wk,trafic}$: enveloppe des effets du vent compatible avec les charges de trafic

Charges et combinaisons



1. Combinaison ELS quasi-permanente

$$\{G_k + P_k\} + 0,5 T_k$$

2. Combinaison ELS fréquente

- Action principale = trafic
- Action principale = température
- Action principale = vent

$$\{G_k + P_k\} + \begin{cases} gr1a_{fr\acute{e}q} + 0,5T_k \\ 0,6T_k \\ 0,2F_{Wk} \end{cases}$$

3. Combinaison ELS caractéristique

$$\{G_k + P_k\} + \begin{cases} gr1a & + & 0,6T_k \\ gr1a & + & 0,6F_{Wk,trafic} \\ gr2 & + & 0,6T_k \\ gr5_{modifi\acute{e}} & + & 0,6T_k \\ T_k & + & gr1a_{fr\acute{e}q} \\ F_{Wk} & & \end{cases}$$

Charges et combinaisons



1. Combinaison ELU fondamentale

$$\{G + P_m\} + 0,35 \{G\} + \begin{cases} 1,35 gr1a + 1,5 \cdot 0,6 F_{Wk,trafic} \\ 1,35 gr2 \\ 1,35 gr5 \\ 1,5 T_k + 1,35 gr1a_{fr\acute{e}q} \\ 1,5 F_{Wk} \end{cases}$$

Flexion longitudinale - Critères



1. Limites en compression du béton

- Sous combinaison quasi-permanente : § 7.2(3)

$$\sigma_c \leq 0,45 f_{ck}$$

Au-delà, prise en compte du fluage non-linéaire

- Sous combinaison caractéristique, en présence d'environnements de classe XD, XF, XS : § 7.2(2)

$$\sigma_c \leq 0,60 f_{ck}$$

2. Critères sur la précontrainte

- Art. 7.2(5) : limitation tension en service (y compris effet des surcharges)

$$\sigma_{pm} \leq k_5 f_{pk} \quad \text{avec } k_5 = 0,75 \quad (\text{A.N : } k_5 = 0,80)$$

3. Critères sur le ferrailage

- Art. 7.2(5) : limitation sous combinaison caractéristique

$$\sigma_s \leq k_3 f_{yk} \quad \text{avec } k_3 = 0,8$$

$$\sigma_s \leq k_4 f_{yk} \quad \text{avec } k_4 = 1,0 \text{ pour les tractions causées par déformation imposée}$$

Flexion longitudinale - Critères



1. Dimensionnement de la précontrainte

Valeurs minimales à respecter en fonction des conditions d'environnement

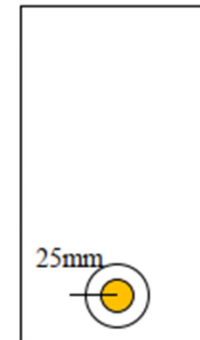
Classe d'exposition	Éléments en béton armé et éléments en béton précontraint à armatures non adhérentes	Éléments en béton précontraint à armatures adhérentes
X0, XC1	<ul style="list-style-type: none">• $w < 0,3\text{mm}$ sous ELS fréquent si exigence d'aspect	<ul style="list-style-type: none">• $w < 0,2\text{mm}$ sous ELS fréquent
XC2, XC3, XC4	<ul style="list-style-type: none">• $w < 0,3\text{mm}$ sous ELS fréquent	<ul style="list-style-type: none">• $w < 0,2\text{mm}$ sous ELS fréquent• $\sigma > 0$ sous ELS QP en zone d'enrobage
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	<ul style="list-style-type: none">• $w < 0,2\text{mm}$ sous ELS fréquent	<ul style="list-style-type: none">• $\sigma > 0$ sous ELS fréquent en zone d'enrobage

Flexion longitudinale - Critères

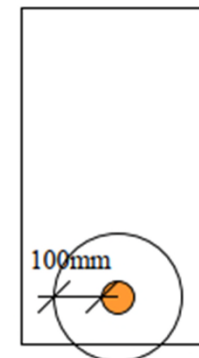


1. Précontrainte – zone d’enrobage

- EN1992-1-1 : 25mm autour de la gaine



- EN1992-2 : 100mm autour de la gaine
Attention, cela n’implique pas un enrobage mini de 100mm !



Flexion longitudinale - Critères



1. Critères additionnels possibles

$\sigma_c > 0$ sous ELS fréquent dans toute la section, en P_m
=> dispense du calcul en fatigue des aciers

EN1992-2/NA 6.8.1(102)g et h

$\sigma_c > -f_{ctm}$ sous ELS caractéristique, en P_k
=> permet de considérer les sections comme non fissurées pour le calcul des contraintes, et de limiter le ferrailage passif

EN1992-1-1 7.1(2)