

Chapitre 3 : Les poteaux mixtes

1. Définitions et différents types de poteaux mixtes :

Les poteaux mixtes sont classés en deux types principaux, les poteaux partiellement ou totalement enrobés de béton et les profils creux remplis de béton. La figure 1 présente différents types de poteaux mixtes et les symboles utilisés dans cette rubrique.

a) **Les poteaux partiellement enrobés de béton** sont des profils en I ou H dont l'espace entre les semelles est rempli de béton. Dans les poteaux totalement enrobés de béton, les semelles et les âmes sont enrobées d'une épaisseur minimale de béton.

b) **Les profils creux remplis de béton** peuvent être circulaires ou rectangulaires. Le béton confiné à l'intérieur du profil voit sa résistance en compression augmenter, la résistance en compression du poteau augmente également.

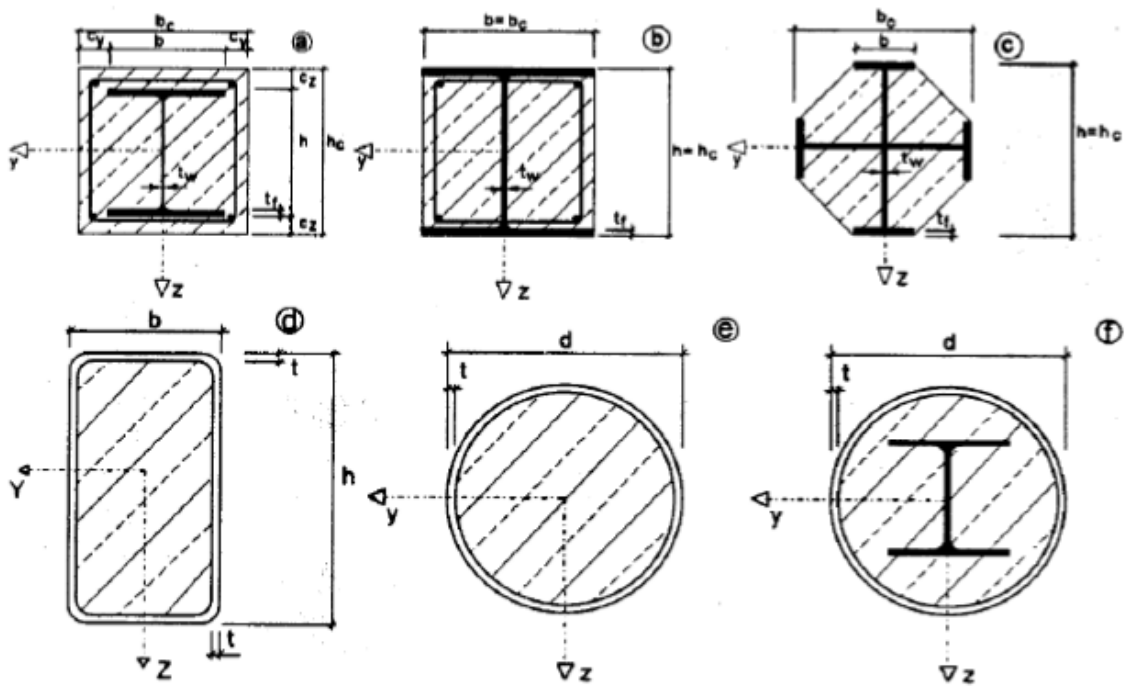


Figure 1 : Exemple type de section transversale de poteaux

Par ailleurs, pour les deux types de poteaux, la résistance vis-à-vis de l'incendie peut être fortement augmentée par rapport à celle des seuls poteaux en acier.

2. Méthodes de calcul :

L'Eurocode 4 présente **deux méthodes** de dimensionnement des poteaux mixtes. La première est une **Méthode Générale** qui impose de prendre explicitement en compte les effets du second ordre et les imperfections. Cette méthode peut notamment s'appliquer à des sections de poteaux qui ne sont pas symétriques ainsi qu'à des poteaux de section variable sur leur hauteur. Elle nécessite l'emploi d'outils de calcul numérique et ne peut être envisagée que si l'on dispose des logiciels appropriés.

La seconde est une **Méthode Simplifiée** utilisant **les courbes de flambement européennes des poteaux en acier** qui tiennent implicitement compte des imperfections affectant ces poteaux. Cette méthode est en pratique limitée au calcul des poteaux mixtes présentant une section doublement symétrique et uniforme sur leur hauteur.

Les deux méthodes sont fondées sur les hypothèses classiques suivantes :

- Il y a une interaction complète entre la section en acier et la section de béton et ce, jusqu'à la ruine;
- Les imperfections géométriques et structurales sont prises en compte dans le calcul;
- Les sections droites restent planes lors de la déformation du poteau.

3. Voilement local des parois des éléments structuraux en acier :

La présence de béton correctement tenu en place dans les sections totalement enrobées prévient le voilement local des parois du profil en acier si l'épaisseur d'enrobage de béton est suffisante.

Celle-ci ne peut dès lors être inférieure au maximum des deux valeurs suivantes:

- 40 mm;
- $1/6$ de la largeur b de la semelle du profil en acier.

Cet enrobage destiné à empêcher tout éclatement prématuré du béton doit être armé transversalement.

Pour les autres types de poteaux mixtes, à savoir les sections partiellement enrobées et les sections creuses remplies de béton, l'élancement des parois du profil en acier doit satisfaire les conditions suivantes:

- $d/t \leq 90\epsilon^2$ pour les profils creux ronds remplis de béton de diamètre d et d'épaisseur t ;

- $d / t \leq 52\varepsilon$ pour l'âme des profils creux rectangulaires remplis de béton d'axe d et d'épaisseur t .
- $b / t_f \leq 44 \varepsilon$ pour les semelles de largeur b et d'épaisseur t_f des profils en H partiellement enrobés ;

Avec $\varepsilon = \sqrt{235/f_{y,k}}$ où $f_{y,k}$ est la limite d'élasticité de l'acier constituant le profil.

4. Condition d'utilisation de la méthode simplifiée de calcul

L'application de la méthode simplifiée comporte les limitations suivantes :

- La section transversale du poteau est constante et présente une double symétrie sur toute la hauteur du poteau.
- Le rapport de contribution relative de la section en acier à la résistance de calcul de la section complète, à savoir $\delta = (A_a f_y) / N_{pl,Rd}$, est compris entre 0,2 et 0,9 ;
- L'élanement réduit l du poteau mixte, ne dépasse pas la valeur de 2,0 ;
- Pour les sections totalement enrobées, l'aire des armatures doit au moins être égale à 0,3% de l'aire de béton et les armatures présentent des épaisseurs d'enrobage de béton satisfaisant les conditions suivantes :
- dans le sens y : $40 \text{ mm} < c_y < 0,4 bc$; dans le sens z : $40 \text{ mm} < c_z < 0,3 hc$ avec bc et hc définis à la figure 1

5. Dimensionnement des poteaux soumis à une compression axiale

5.1. Résistance de la section :

La résistance en section vis-à-vis d'une charge axiale de compression est obtenue en additionnant les résistances plastiques des éléments constitutifs de cette section, suivant les formules suivantes:

Pour les **sections enrobées de béton**:

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

Pour les **sections creuses remplies de béton** :

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

A_a , A_c et A_s sont les aires respectives de la section transversale de la section en acier, du béton et de l'armature. Le confinement du béton remplissant un profil creux, quelle que soit la forme de celui-ci, est source d'une augmentation de la résistance du béton; celle-ci est prise en compte en remplaçant la valeur $0,85 f_{ck}$ par f_{ck}

5.2. Elancement réduit :

La charge élastique critique N_{cr} d'un poteau mixte est calculée en utilisant la formule d'Euler :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff.k}}{L_{fl}^2}$$

Où (EI) est la rigidité flexionnelle du poteau mixte relative au plan de flambement considéré et L_{fl} la longueur de flambement correspondante de ce poteau. Si ce poteau appartient à une ossature rigide, cette longueur de flambement peut, de manière sécuritaire, être prise égale à la longueur d'épure L .

Pour les charges de courte durée, la rigidité élastique de flexion effective $(EI)_{eff.k}$ de la section transversale d'un poteau mixte vaut :

$$(EI)_{eff.k} = E_a I_a + E_{cd} I_c + E_s I_s$$

Avec :

I_a , I_c et I_s inerties flexionnelles respectives, pour le plan de flexion considéré, du profil en acier, du béton (supposé non fissurer) et de l'armature.

E_a , E_{cd} et E_s modules d'élasticité respectifs du matériau constituant le profil en acier et de l'acier d'armature.

$$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_c$$

E_{cm} Module sécant du béton ;

L'élancement réduit λ , pour le plan de flexion considéré, dépasse 0,8 pour les sections enrobées de béton et $0,8 / (1 - \delta)$ pour les sections creuses remplies de béton avec :

$$\delta = \frac{A_{afy}}{Y_{Ma} N_{plRd}}$$

δ Qui représente la contribution de la section métallique à la résistance axiale totale du poteau.

L'élanement réduit $\bar{\lambda}$ du poteau mixte pour le plan de flexion considéré est donné par :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Pl,Rk}}{N_{Cr}}}$$

Où $N_{pl,rk}$ est la valeur de l'effort normal résistant plastique $N_{pl,Rd}$ calculé en posant tous les facteurs partiels de sécurité γ_a , γ_c et γ_{γ} égaux à 1,0 (c'est à dire en utilisant les résistances caractéristiques des matériaux).

5.3. Résistance au flambement :

Le poteau mixte présente une résistance au flambement suffisante si, pour chacun des plans de flambement, l'effort axial de calcul N_{Sd} est tel que :

$$N_{Sd} \leq \chi N_{Pl,Rd}$$

Où la valeur de χ , coefficient de réduction relatif au plan de flambement considéré est donnée en fonction de l'élanement $\bar{\lambda}$ et de la courbe européenne de flambement appropriée. Les courbes européennes s'appliquant aux poteaux mixtes sont données au Tableau 1

Courbe de flambement	Type de section	Imperfection
Courbe a : ($\alpha = 0,21$)	Sections creuses remplies de béton, armée ($A_s/A_c < 3\%$) ou non et sans profilé en I additionnel.	L/300
Courbe b : ($\alpha = 0,34$)	Section en H totalement ou partiellement enrobées de béton flambant par flexion autour de l'axe fort (y-y); Sections creuses remplies de béton, armée ($3\% < A_s/A_c < 6\%$) ou avec un profilé en I additionnel.	L/210
Courbe c ($\alpha = 0,49$)	Sections en H totalement ou partiellement enrobées de béton flambant par flexion autour de l'axe faible du profil en acier.	L/170

Le coefficient de réduction au flambement est calculé suivant:

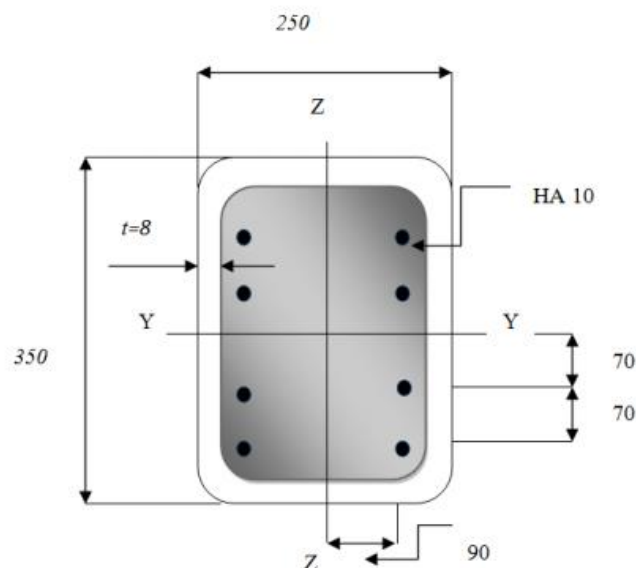
$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Avec :

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

Exercice d'application :

Vérifier la stabilité d'une colonne mixte (poteau mixte : Profil creux remplis de béton) appartenant à un bâtiment industrielle vis-à-vis de la compression simple pour une longueur de flambement $L=5m$ et ayant les caractéristiques suivantes : $Nsd = 3000 KN$.



Profil : 350*250*8	$f_y = 275 N/mm^2$	$E_a = 210\ 000 N/mm^2$
Béton : C40/50	$f_{ck} = 27.5 N/mm^2$	$E_{cm} = 35\ 000 N/mm^2$
Armateurs 8 ϕ 10	$f_{sk} = 400 N/mm^2$	$E_s = 210\ 000 N/mm^2$

Solution de l'exercice d'application :

1- Vérification :

$$\frac{h}{t} = \frac{350}{8} = 43.75 < 52\varepsilon = 48.07 \text{ Avec } \varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

2. Caractéristiques géométriques de la section :

Les sections :

- Armatures : 8HA10 $\rightarrow A_s = 628.32 \text{ mm}^2$
- Béton : $A_c = (b - 2t) \cdot (h - 2t) - A_s = (250-16) \cdot (350-16) - 628.32 = 77527.68 \text{ mm}^2$
- Aciers : $A_a = b \times h - A_s - A_c = (250 \times 350) - 628.32 - 77527.68 = 9344 \text{ mm}^2$

Les inerties:

Suivant l'axe fort YY:

- Aciers : $I_{a,yy} = \frac{bh^3}{12} - \frac{b_c h_c^3}{12} = \frac{250 \cdot 350^3}{12} - \frac{234 \cdot 334^3}{12} = 1,667 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$
- Armatures : $I_{s,yy} = \sum A_s d_{sz}^2 = \frac{4\pi \cdot 10^2}{4} 70^2 + \frac{4\pi \cdot 10^2}{4} 140^2 = 7,70 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
- Béton : $I_{c,yy} = \frac{bh^3}{12} - I_{a,yy} - I_{s,yy} = \frac{250 \cdot 350^3}{12} - 1,667 \cdot 10^8 - 7,70 \cdot 10^6 = 7.188 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Suivant l'axe faible ZZ:

- Aciers : $I_{a,zz} = \frac{hb^3}{12} - \frac{h_c b_c^3}{12} = \frac{350 \cdot 250^3}{12} - \frac{334 \cdot 234^3}{12} = 0,991 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$
- Armatures : $I_{s,zz} = \sum A_s d_{sy}^2 = \frac{8\pi \cdot 10^2}{4} 90^2 = 5,09 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$
- Béton : $I_{c,zz} = \frac{hb^3}{12} - I_{a,zz} - I_{s,zz} = \frac{350 \cdot 250^3}{12} - 0,991 \cdot 10^8 - 5,09 \cdot 10^6 = 3,516 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

3. Résistance de la section transversale à la charge axiale :

$$N_{pl.Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{9344 \cdot 275}{1.10} + \frac{77527,68 \cdot 40}{1.5} + \frac{628.32 \cdot 400}{1.15} = 4,622 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\text{Le coefficient de participation de l'acier} = \left(\frac{A_a f_y}{\gamma_a} \right) N_{pl.Rd} = \frac{\frac{9344 \cdot 275}{1.10}}{4.622 \cdot 10^6} = 0,505.$$

$0.2 < \delta = 0.505 < 0.9$ d'ou la méthode simplifier est applicable.

4. Rigidité en flexion avec prise en compte éventuelle du fluage :

$$(EI)_e = E_a I_a + E_{cd} \cdot I_c + E_s I_s$$

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_c} = \frac{35000}{1.35} = 25925.92 \text{ N/mm}^2$$

Suivant l'axe fort YY :

$$(EI)_{e,yy} = 210000 * 1,667.10^8 + 25925,92 * 7,188 * 10^6 + 210000 * 7.70.10^6 \\ = 3,68.10^{13} N.mm^2$$

Suivant l'axe faible ZZ :

$$(EI)_{e,zz} = 210000 * 0,991.10^8 + 25925,92 * 3,516 * 10^6 + 210000 * 5,09.10^6 \\ = 2,2.10^{13} N.mm^2$$

5. Calcul de l'effort normal résistant plastique :

$$N_{pl,r} = A_a \frac{f_y}{1} + A_c \frac{f_{ck}}{1} + A_s \frac{f_{sk}}{1} = \frac{9344*275}{1} + \frac{77527,68*40}{1} + \frac{628.32*400}{1} = 5,922.10^6 N$$

6. La charge élastique critique :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(EI)_e}{L_{fl}^2}$$

Suivant l'axe fort YY :

$$N_{cr,yy} = \frac{\pi^2(EI)_{e,yy}}{L_{fl}^2} = \frac{\pi^2 * 3,68.10^{13}}{5^2} = 14,53.10^6 N$$

Suivant l'axe faible ZZ :

$$N_{cr,zz} = \frac{\pi^2(EI)_{e,zz}}{L_{fl}^2} = \frac{\pi^2 * 2,2.10^{13}}{5^2} = 8,68.10^6 N$$

7. Les élancements réduits :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,r}}{N_{cr}}}$$

Suivant l'axe fort YY :

$$\bar{\lambda}_{yy} = \sqrt{\frac{N_{pl,r}}{N_{cr,yy}}} = \sqrt{\frac{5,922.10^6}{14,53.10^6}} = 0,63$$

Suivant l'axe faible ZZ :

$$\bar{\lambda}_{zz} = \sqrt{\frac{N_{pl,r}}{N_{cr,zz}}} = \sqrt{\frac{5,922 \cdot 10^6}{8,68 \cdot 10^6}} = 0,83$$

8. Le coefficient de réduction au flambement est calculé suivant :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

Avec :

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

Suivant l'axe fort YY :

$\alpha = 0.21$ (Voir Tableau 1 $A_s < A_c = 628.32/77527,68 = 0.008 < 3\%$)

$$\phi_{yy} = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{yy} - 0.2) + \bar{\lambda}_{yy}^2] = 0.5(1 + 0.21(0.63 - 0.2) + 0.63^2) = 0,744$$

$$\chi_{yy} = \frac{1}{\phi_{yy} + \sqrt{\phi_{yy}^2 - \bar{\lambda}_{yy}^2}} = \frac{1}{0.744 + \sqrt{0.744^2 - 0.63^2}} = 0.916$$

Suivant l'axe faible ZZ :

$\alpha = 0.21$ (Voir Tableau 1 $A_s < A_c = 628.32/77527,68 = 0.008 < 3\%$)

$$\phi_{zz} = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{zz} - 0.2) + \bar{\lambda}_{zz}^2] = 0.5(1 + 0.21(0.83 - 0.2) + 0.83^2) = 0,911$$

$$\chi_{zz} = \frac{1}{\phi_{zz} + \sqrt{\phi_{zz}^2 - \bar{\lambda}_{zz}^2}} = \frac{1}{0.911 + \sqrt{0.911^2 - 0.83^2}} = 0.88$$

9. Calcul de la résistance au flambement sous charge centrée :

$$N_{sd} \leq \chi N_{pl,Rd}$$

Suivant l'axe fort YY :

$$N_{sd} \leq \chi_{yy} N_{pl,Rd} \rightarrow 3000000N \leq 0,916 \cdot 4,622 \cdot 10^6 = 4233752 N \quad \text{Condition vérifiée}$$

Suivant l'axe faible ZZ :

$$N_{sd} \leq \chi_{zz} N_{pl,Rd} \rightarrow 3000000N \leq 0,88 \cdot 4,622 \cdot 10^6 = 4067360 N \quad \text{Condition vérifiée}$$

Le poteau est vérifié vis-à-vis de la compression axiale.

