

Général

Pour vérifier les exigences en matière de résistance d'une structure au feu normalisé (courbe d'échauffement ISO 834), une analyse par éléments est suffisante. [§ 2.4.1]

Seuls les effets des déformations thermiques dues aux gradients thermiques sur la section droite sont à prendre en compte. Les effets des dilatations thermiques axiales peuvent être négligés. [§ 2.4.2]

Les actions indirectes dues à des éléments adjacents ne doivent pas être prises en compte lorsque les exigences de sécurité au feu se réfèrent à des éléments soumis à la courbe d'échauffement standard. Cela veut dire qu'il est admis de supposer qu'il n'y a pas d'entrave aux appuis. Cependant, les actions indirectes dues à des contraintes thermiques internes doivent de toute façon être prises en compte. [§ 4.2.2, NBN EN 1991-1-2:2003 + ANB:2008]

Il est admis de supposer que les conditions d'appui sont invariables et identiques à celle à l'état froid. Dès lors, le moment complémentaire (produit par les gradients thermiques) d'une colonne, sur laquelle s'appuie par encastrement une poutre, peut donc être négligé pour le calcul de cette poutre.

Dans le cas d'une poutre, la courbure thermique (dus aux gradients thermiques) n'entraîne pas d'effet de second ordre.

Les ruines par effort tranchant dues au feu sont très rares. [annexe D]

Lorsque les dimensions minimales données par les valeurs tabulées sont respectées, il n'est pas nécessaire d'effectuer d'autres vérifications vis à vis de l'effort tranchant, de la torsion et de l'ancrage des armatures. [§ 4.4]

Les méthodes de calcul pour l'effort tranchant, la torsion et l'ancrage des armatures peuvent être utilisées si elles sont étayées par des informations provenant d'essais. [§ 4.4 et annexe D]

Méthode de calcul simplifiée: méthode de l'isotherme à 500 °C

• Domaine d'application

Cette méthode est applicable à une exposition au feu normalisé et à tout autre régime température-temps entraînant des champs de température similaires dans la poutre. [§ B.1.1]

Cette méthode peut être utilisée pour le calcul de la résistance aux moments fléchissants et aux efforts normaux. [§ 4.2.1]

Cette méthode est applicable aux poutres en béton armé et précontraint. [§ 4.2.3]

Cette méthode est valable pour les largeurs minimales du poutre données dans le tableau ci-dessous. [§ B.1]

Résistance au feu	R60	R90	R120	R180	R240
Largeur minimale (mm)	90	120	160	200	280

• Principe

Utiliser des méthodes de calcul conventionnelles pour déterminer la capacité portante ultime selon la section droite réduite du béton et la résistance réduite de l'armature, et le comparer au moment fléchissant. [§ B.1]

Les valeurs de calcul des propriétés mécaniques des matériaux: $X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot X_k / \gamma_{M,fi}$. [§ 2.3]

Les coefficients partiels de sécurité pour les propriétés des matériaux: $\gamma_{s,fi} = \gamma_{c,fi} = 1,0$. [§ 2.3]

La combinaison d'actions pour situations de projet accidentelles:

$$E_{d,fi} = E(G_{k,j}; A_d; (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}; \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \quad [§ 6.4.3.3, NBN EN 1990:2002 + ANB:2013]$$

avec: A_d = la valeur de calcul des effets indirectes de l'action thermique = 0

$Q_{k,1}$ = la valeur caractéristique de l'action variable dominante ($\psi_{1,1}$ en cas de vent)

• Distribution de température

[annexe A]

Les figures A.3 à A.10 sont uniquement valables pour le béton avec des granulats calcaires.

Sont considérés comme granulats calcaires ceux contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires. Par granulats, il faut entendre les gros granulats, à l'exclusion du sable ($D_{max} \leq 4 \text{ mm}$). [3.2.2.1]

Pour les poutres en I: rapport ULg dd. 26/9/2017 (téléchargeable sur www.febefast.be).

• Section droite réduite

[§ B.1]

Le béton à des températures supérieures à 500 °C est supposé ne pas contribuer à la capacité portante, le béton plus froid que 500 °C conserve sa résistance initiale à 20 °C ($f_{cd,fi}(20) = \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$; $\epsilon_{cu,fi}(20) = \epsilon_{cu} = 0,0035$ pour un béton < C55/67).

$\alpha_{cc} = 0,85$ [§ 5.3.2]

La nouvelle largeur b_{fi} et la nouvelle hauteur effective d_{fi} doivent être déterminées en excluant le béton situé en dehors de l'isotherme à 500 °C (figure B.1-a et b).

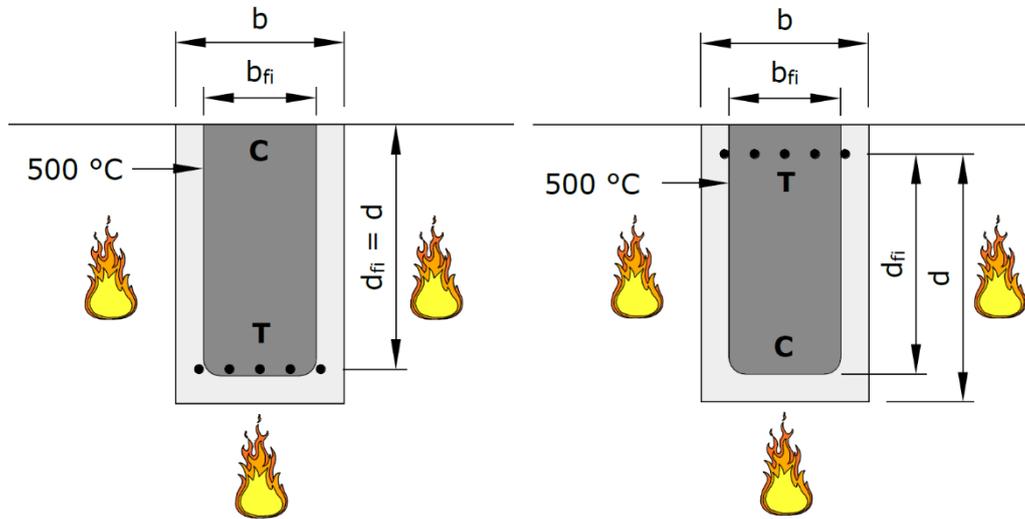


Figure B.1-a (gauche) et b (droite)

- Résistance réduite de l'armature**

Les armatures situées en dehors la section droite réduite peuvent être prises en compte dans le calcul de la capacité portante ultime. [§ B.1.2]

Armatures de béton armé: $f_{sy,\theta} = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ [figure 4.2a]

$\epsilon_{st,\theta} = 0,15$ [figure 3.3, classe B ($\epsilon_{uk} \geq 5,0 \%$)]

Acier de précontrainte: $f_{py,\theta} = k_p(\theta) \cdot (0,95 \cdot f_{pk})$ [figure 4.3, classe A est normative]

$\epsilon_{pt,\theta} = 0,05$ à 20 °C et 0,10 à 1200 °C [tableau 3.3]

Valeurs tabulées

• Domaine d'application

Les tableaux sont applicables aux poutres en béton armé et précontraint. [§ 5.2]

Les tableaux s'appliquent aux poutres qui peuvent être exposées au feu sur 3 côtés, dont la face supérieure est protégée. [§ 5.6.1]

Les tableaux s'appliquent aux bétons réalisés à partir de granulats siliceux. Si des granulats calcaires sont utilisés, les dimensions minimales de la section droite peuvent être réduites de 10 %. [§ 5.1]

Les tableaux sont valables pour les sections illustrées à la figure 5.4. [§ 5.6.1]

• Général

Les tableaux sont fondés sur une température critique de 500 °C, sur un niveau de chargement de référence $\eta_{fi} = E_{d,fi}/E_d = 0,7$ et sur une quantité d'armatures $A_{s,prov} = A_{s,req}$. [§ 5.2]

Les tableaux indiquent les valeurs minimales de la largeur de poutre 'b', de l'épaisseur d'âme 'b_w', des distances de l'axe des armatures 'a' aux parements inférieurs et latéraux en fonction de la résistance au feu (figures 5.2 et 5.4). Il est possible d'effectuer des interpolations linéaires entre les valeurs. Les distances de l'axe des armatures 'a' sont des valeurs nominales. [§ 5.2]

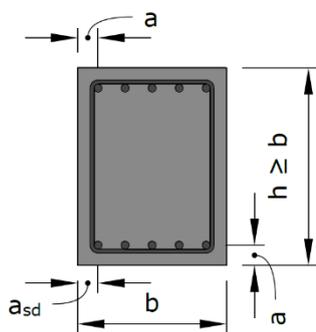


Figure 5.2

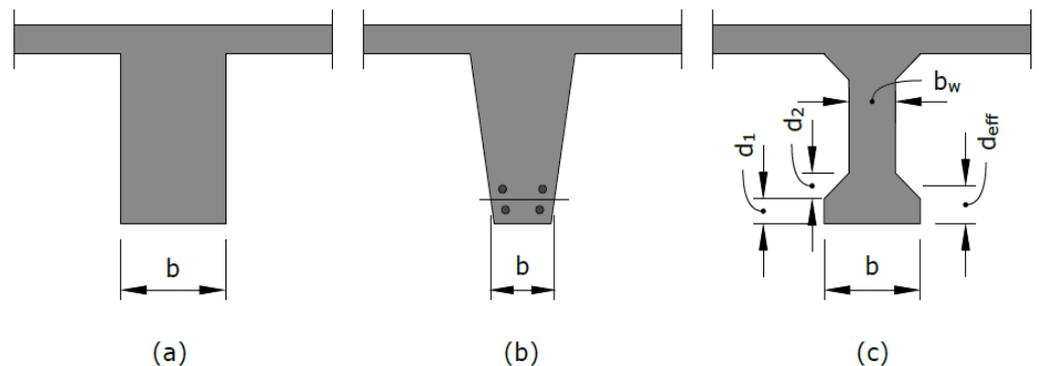


Figure 5.4

Lorsque $\eta_{fi} = E_{d,fi}/E_d = 0,7$ et $A_{s,prov} = A_{s,req}$:

- la température critique des armatures de béton armé est 500° C
- la température critique des fils et les torons de précontrainte est 350°C, nécessitant la prise en compte d'une augmentation de l'axe des armatures de 15 mm par rapport aux valeurs reprises au sein des tableaux. [§ 5.2]

Pour les poutres présentant une largeur variable, la valeur minimale 'b' se rapporte au niveau du centre de gravité des armatures tendues (figure 5.4-b). [§ 5.6.1]

Il convient que la hauteur efficace d_{eff} de la membrure inférieure des poutres en I ne soit pas inférieure à $d_{eff} = d_1 + 0,5 \cdot d_2 \geq b_{min}$ (figure 5.4-c). [§ 5.6.1]

Lorsque la largeur réelle de la membrure inférieure 'b' des poutres en I est supérieure à 1,4 fois l'épaisseur d'âme réelle 'b_w', et lorsque $b \cdot d_{\text{eff}} < 2 \cdot b_{\text{min}}^2$, il convient de porter la distance minimale de l'axe des armatures 'a_{min}' à la valeur $a_{\text{eff}} = a_{\text{min}} \cdot \left(1,85 - \frac{d_{\text{eff}}}{b_{\text{min}}} \cdot \sqrt{\frac{b_w}{b}} \right) \geq a_{\text{min}}$. [§ 5.6.1]

Lorsque le ferrailage est organisé en plusieurs lits, il convient que la distance moyenne de l'axe des armatures 'a_m' aux parements inférieurs et latéraux ne soit pas inférieure à la distance minimale de l'axe des armatures 'a_{min}'. [§ 5.2]

Pour les poutres dont la partie inférieure présentant un seul lit d'acier, la valeur minimale de la distance de l'axe de la barre d'acier (ou du fil ou toron de précontrainte) dans l'angle au côté de la poutre est: $a_{\text{sd,min}} = a_{\text{min}} + 10 \text{ mm}$ (figure 5.2). [§ 5.6.1]

Les ouvertures au travers des âmes des poutres n'affectent pas la résistance au feu pour autant que la section droite restante de l'élément dans la zone tendue ne soit pas inférieure à $A_c = 2 \cdot b_{\text{min}}^2$. [§ 5.6.1]

• Tableau pour les poutres sur appuis simples sans moment sur appuis

[tableau 5.5, classe WC est normative]

Le tableau ci-dessous n'est qu'une partie du tableau 5.5.

R	b _{min} (mm)/a _{min} (mm)				b _{w,min} (mm)
	2	3	4	5	
R60	120/40	160/35	200/30	300/25	100
R90	150/55	200/45	300/40	400/35	100
R120	200/65	240/60	300/55	500/50	120

L'augmentation de 10 mm de a_{min} de la barre d'acier (ou du fil ou toron de précontrainte) dans l'angle est omise pour les largeurs de poutre supérieures à celles données dans la colonne 4.

Lorsque $\eta_{\text{fi}} = E_{\text{d,fi}}/E_{\text{d}} < 0,7$ et/ou que $A_{\text{s,prov}} > A_{\text{s,req}}$, la température critique des armatures augmente. Cela a pour conséquence que la distance minimale de l'axe des armatures 'a_{min}' peut diminuer. Cette diminution est de $\Delta a = 24 \cdot (1 - \zeta) \leq 20 \text{ mm}$ pour le béton armé et le béton précontraint avec fils et torons (adhérent), où $\zeta = \left(\frac{A_{\text{s,req}}}{A_{\text{s,prov}}} \right) \cdot \left(\frac{\eta_{\text{fi}}}{0,7} \right)$. [§ 5.2]

• Tableau pour les poutres continues

[tableau 5.6, classe WC est normative]

Le tableau ci-dessous n'est qu'une partie du tableau 5.6.

R	b _{min} (mm)/a _{min} (mm)				b _{w,min} (mm)
	2	3	4	5	
R60	120/25	200/12	/	/	100
R90	150/35	250/25	/	/	100
R120	200/45	300/35	450/35	500/30	120

L'augmentation de 10 mm de a_{min} de la barre d'acier (ou du fil ou toron de précontrainte) dans l'angle est omise pour les largeurs de poutre supérieures à celles données dans la colonne 3.

Méthode simplifiée selon l'annexe E

• Domaine d'application [§ E.1]

Cette méthode s'applique uniquement lorsque la charge est globalement répartie de manière uniforme et que le calcul à température ambiante s'est appuyé sur une analyse linéaire.

Cette méthode permet une extension de l'utilisation de la méthode des valeurs tabulées pour les poutres exposées sur trois côtés.

• Général [§ E.1]

La méthode permet de déterminer l'influence, sur la résistance à la flexion, d'une distance 'a' de l'axe des armatures inférieures plus faible que celle demandée par les tableaux.

Il convient de ne pas réduire les dimensions minimales de la section droite (b_{\min} en $b_{w,\min}$) données dans les tableaux.

• Poutres sur appuis simples sans moment sur appuis [§ E.2]

Le principe: $M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}$

$$M_{Ed,fi} = w_{Ed,fi} \cdot l_{eff}^2 / 8$$

$$M_{Rd,fi} = \left(\gamma_s / \gamma_{s,fi} \right) \cdot k_s(\theta) \cdot M_{Ed} \cdot (A_{s,prov} / A_{s,req}) \text{ pour le béton armé}$$

$$M_{Rd,fi} = \left(\gamma_s / \gamma_{s,fi} \right) \cdot k_p(\theta) \cdot M_{Ed} \cdot (A_{s,prov} / A_{s,req}) \text{ pour le béton précontraint}$$

avec: $k_s(\theta)$ selon figure 4.2a, $k_p(\theta)$ selon figure 4.3 (classe A)

$$1 \leq A_{s,prov} / A_{s,req} \leq 1,3$$

• Poutres continues [§ E.3]

Le principe: $M_{Ed,fi,span} \leq M_{Rd,fi,span}$ en $M_{Ed,fi,support} \leq M_{Rd,fi,support}$

$$M_{Rd,fi,span} = \left(\gamma_s / \gamma_{s,fi} \right) \cdot k_s(\theta) \cdot M_{Ed} \cdot (A_{s,prov} / A_{s,req}) \text{ pour le béton armé}$$

$$M_{Rd,fi,span} = \left(\gamma_s / \gamma_{s,fi} \right) \cdot k_p(\theta) \cdot M_{Ed} \cdot (A_{s,prov} / A_{s,req}) \text{ pour le béton précontraint}$$

$M_{Rd,fi,support} = \left(\gamma_s / \gamma_{s,fi} \right) \cdot M_{Ed} \cdot (A_{s,prov} / A_{s,req}) \cdot (d-a) / d$ lorsque la température des aciers supérieurs au-dessus des appuis n'est pas supérieure à 350 °C pour les armatures de béton armé ou n'est pas supérieure à 100 °C pour les armatures de précontrainte. Pour des températures plus élevées, il convient de réduire $M_{Rd,fi,support}$ par le facteur $k_s(\theta_{cr})$ pour les armatures de béton armé et $k_p(\theta_{cr})$ pour les armatures de précontrainte conformément à la figure 5.1.

avec: $k_s(\theta)$ selon figure 4.2a, $k_p(\theta)$ selon figure 4.3 (classe A)

$$1 \leq A_{s,prov} / A_{s,req} \leq 1,3$$

a = la distance requise de l'axe des armatures donné dans le tableau 5, colonne 5

Éclatement explosif

[§ 4.5.1]

L'éclatement explosif doit être évité, ou son incidence sur les exigences de performance doit être prise en compte.

L'éclatement explosif est improbable lorsque la teneur en eau du béton est inférieure à 3 % du poids. Pour l'application dans les classes d'exposition X_o et XC₁, la teneur en eau peut être considérée comme conforme.

Lorsque les valeurs tabulées sont utilisées, il n'est pas nécessaire d'effectuer d'autres vérifications pour le béton de densité normale.

Si la teneur en eau du béton est supérieure à 3 % du poids, l'influence de l'éclatement explosif sur la fonction porteuse peut être évaluée en supposant une perte locale d'enrobage et en vérifiant ensuite la capacité portante réduite de la section droite. La température des autres armatures peut être supposée identique à celle d'une section sans éclatement. Cette vérification n'est pas nécessaire si l'éclatement explosif a été vérifié expérimentalement.

Pour les poutres d'une largeur supérieure à 400 mm et contenant plus de 8 barres, fils ou torons dans la zone tendue, il peut être supposé qu'une redistribution acceptable des contraintes est possible sans perte de résistance mécanique.

Règles complémentaires pour le béton à haute résistance

- **Méthode de calcul simplifiée: méthode de l'isotherme à 500 °C**

La méthode s'applique également au béton à haute résistance. [§ 6.4.2]

Le moment résistant calculé doit être multipliée avec le facteur 'k_m'. [§ 6.4.2.2]

$$k_m = 0,98 \text{ pour } C_{55/67} \text{ et } C_{60/75} \text{ et } 0,95 \text{ pour } C_{70/85} \text{ et } C_{80/95}$$

- **Valeurs tabulées**

La méthode s'applique également au béton à haute résistance si la distance minimale de l'axe des armatures est pondérée par le facteur 'k' et si les dimensions minimales de la section droite sont augmentées de $2 \cdot (k - 1) \cdot a_{\min}$ [§ 6.4.3]

avec: $k = 1,1$ pour $C_{55/67}$ et $C_{60/75}$ et $1,3$ pour $C_{70/85}$ et $C_{80/95}$

a_{\min} = la distance minimale de l'axe des armatures selon tableau 5.5 ou 5.6

- **Éclatement explosif** [§ 6.2]

Pour les classes de béton $C_{55/67}$ à $C_{80/95}$, les règles pour le béton de densité normale s'appliquent, pour autant que la teneur maximale en fumées de silice soit inférieure à 6 % du poids de ciment.

Pour des teneurs en fumées de silice supérieures et pour la classe de béton $C_{90/105}$, des mesures doivent être prises. La méthode la plus évidente consiste à ajouter au moins 2 kg/m^3 de fibres de propylène en monofilaments au mélange de béton.



Une poutre rectangulaire, correctement conçue à l'état froid, atteint facilement une résistance au feu de R60 et plus sans mesures particulières.

Disclaimer

Le contenu de cette publication est uniquement destiné à l'information de l'utilisateur. La FEBE apporte le plus grand soin à la compilation des informations contenues dans cette publication. Néanmoins, la FEBE ne peut garantir que ces informations sont entièrement correctes, complètes et à jour. Par conséquent, la FEBE ne peut être tenue responsable de son utilisation. Pour l'application correcte d'un produit, il faut tenir compte du cadre juridique, des normes du produit, des prescriptions du fabricant, de la situation locale et des plans détaillés du concepteur.