

Nomogrammes

Méthode graphique pour déterminer la résistance au feu des structures en acier, selon EN 1993-1-2:2005

1 INTRODUCTION

Les exigences en matière de résistance au feu des structures en acier – allant de 15 à 120 minutes – sont fixées par la réglementation nationale. Cette réglementation tient compte du nombre de niveaux du bâtiment, de sa fonction, de la présence de matériaux inflammables, du nombre de personnes présentes et de l'effet favorable d'éventuelles mesures actives (sprinklers, détection, ...).

La résistance au feu des éléments de construction est évaluée soit par un essai au feu standard dans un four, soit par un calcul.

Cette note technique décrit les méthodes de calcul pour les structures en acier dans les bâtiments, avec ou sans protection au feu. Elle se base sur la norme européenne EN 1993-1-2:2005 avec l'annexe nationale belge.

2 BASES DU CALCUL

2.1 Principes de base

L'instant de la ruine de la structure en acier dépend de :

- **La température critique θ_{cr}** : les propriétés de l'acier dépendent de la température – voir figure 1. La température critique est la température de ruine de la structure en acier. Celle-ci dépend du taux d'utilisation μ_0 :

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

$E_{fi,d}$ L'effet d'actions de calcul en cas d'incendie ;

$R_{fi,d,0}$ La résistance de calcul en cas d'incendie au temps $t = 0$. Pour des poutres et des éléments tendus, $R_{fi,d,0}$ est égal à la résistance à froid R_d puisque $\gamma_M = \gamma_{M,fi} = 1,0$. Pour des colonnes continues sur plusieurs étages, dans le cas où chaque étage est un compartiment d'incendie distinct, la longueur de flambement peut être réduite pour le calcul à une valeur de $l_{fi} = \alpha \cdot L_{cr}$, par rapport au dimensionnement à froid : $\alpha = 0,5$ pour les colonnes situées à un étage intermédiaire ; $\alpha = 0,7$ pour les colonnes à l'étage supérieur ;

Dans tous les autres cas, la longueur de flambement reste équivalente à celle-ci du dimensionnement à froid ($\alpha = 1$).

- **La vitesse d'échauffement** qui dépend de trois facteurs :
 - L'évolution de la température de l'incendie ;
 - Le facteur de massivité P [m^{-1}]. Il s'agit du rapport entre la surface exposée au feu (A) et le volume d'acier (V) ;
 - La contribution à la résistance au feu d'éventuels matériaux de protection. Cette influence est déterminée par l'épaisseur d_p et les caractéristiques thermiques :
 - conductivité thermique λ_p [W/mK]
 - chaleur spécifique c_p [J/kgK]
 - densité ρ_p [kg/m³]

L'influence sur la résistance au feu doit être déterminée selon ENV 13381-4 ou ENV 13381-8, ou selon la norme nationale.

2.2 Domaine d'application

La méthode de calcul est valable dans le domaine suivant :

- **Structure statique** :
 - Eléments tendus soumis à traction ;
 - Poutres isostatiques et hyperstatiques soumises à flexion ;
 - Colonnes soumises exclusivement à une charge axiale ;
 - Les éléments sensibles au moment de déversement ou soumis à une combinaison de charges axiales, transversales et/ou de moments, n'entrent pas dans le cadre de cette méthode. Il n'y a pas de risque de déversement lorsque l'âme comprimée de la poutre est soutenue latéralement, par une dalle de plancher par exemple ;
- **Qualité de l'acier** : Toutes qualités selon EN 10025 ;
- **Sections d'acier** : Classe 1, 2 ou 3, voir tableau 1 pour la classification. Pour les sections de classe 4, la température critique standard est de 350 °C. Le facteur de massivité doit être supérieur à 10 m⁻¹.

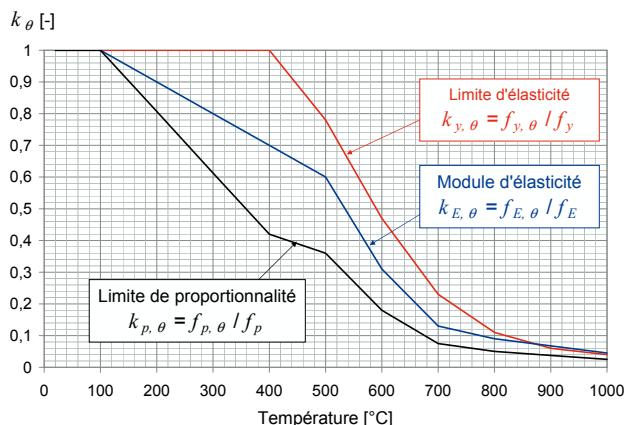
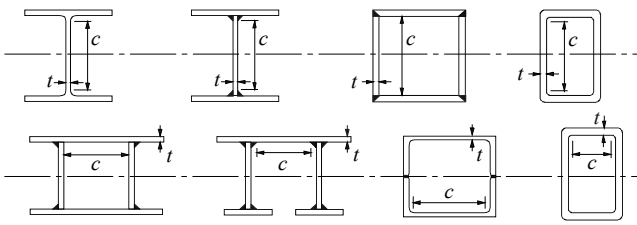
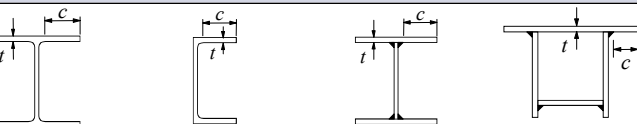
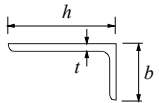
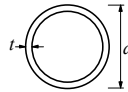


Figure 1 : Coefficients de réduction des caractéristiques mécaniques de l'acier en fonction de la température.

Tableau 1 : Classification des sections soumises à compression.

| Parois comprimées internes | | | | | |
|---|----------------------------------|--|------|------|------|
|  | | | | | |
| Classe de section | Flexion | Compression | | | |
| 1 | $c/t \leq 72 \cdot \varepsilon$ | $c/t \leq 33 \cdot \varepsilon$ | | | |
| 2 | $c/t \leq 83 \cdot \varepsilon$ | $c/t \leq 38 \cdot \varepsilon$ | | | |
| 3 | $c/t \leq 124 \cdot \varepsilon$ | $c/t \leq 42 \cdot \varepsilon$ | | | |
| Parois en console | | | | | |
|  | | | | | |
| Classe de section | Compression | | | | |
| 1 | $c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$ | | | | |
| 2 | $c/t \leq 10 \cdot \varepsilon$ | | | | |
| 3 | $c/t \leq 14 \cdot \varepsilon$ | | | | |
| Autres profils | | | | | |
| Cornières | | Tubes | | | |
|  | |  | | | |
| Classe de section | Compression | Compression et/ou flexion | | | |
| 1 | - | $d/t \leq 50 \cdot \varepsilon^2$ | | | |
| 2 | - | $d/t \leq 70 \cdot \varepsilon^2$ | | | |
| 3 | $h/t \leq 15 \cdot \varepsilon$ | $d/t \leq 90 \cdot \varepsilon^2$ Pour $d/t \geq 90 \cdot \varepsilon^2$, voir EN 1993-1-6 | | | |
| Valeurs de ε et ε^2 en cas d'incendie | | | | | |
| f_y | S235 | S275 | S355 | S420 | S460 |
| ε | 0,85 | 0,79 | 0,69 | 0,64 | 0,61 |
| ε^2 | 0,72 | 0,62 | 0,48 | 0,40 | 0,37 |

2.3 Hypothèses

- L'évolution de la température de l'incendie suit la courbe d'incendie standard [ISO 834].
- Les charges mécaniques sont constantes durant l'incendie. Les effets de la dilatation thermique sont négligés.
- La température dans la structure en acier est uniforme. Une répartition non uniforme de la température est compensée par le coefficient de correction $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$. κ est égal à 0,6 / 0,7 / 0,85 ou 1,0 avec :
 - κ_1 : pour tenir compte d'une répartition de température non uniforme dans la section de la poutre :
 - $\kappa_1 = 0,70$: poutre non protégée, chauffée de trois côtés ;
 - $\kappa_1 = 0,85$: poutre protégée, chauffée de trois côtés ;
 - $\kappa_1 = 1,00$: poutre chauffée de toutes parts ;
 - κ_2 : pour tenir compte d'une répartition de température non uniforme sur la longueur de la poutre :
 - $\kappa_2 = 0,85$: à l'appui d'une poutre hyperstatique ;
 - $\kappa_2 = 1,00$: dans tous les autres cas.

3 ACTIONS EN CAS D'EXPOSITION AU FEU

Selon l'Eurocode 1, y compris l'annexe nationale, en cas d'incendie, la charge verticale variable $Q_{k,i}$ doit être ramenée à une valeur quasi-permanente à partir de la valeur extrême du dimensionnement à froid grâce au coefficient de réduction $\psi_{2,i}$. En outre, les coefficients de sécurité appliqués aux charges doivent être égaux à 1.

$$E_{fi,d} = \sum_j G_{k,j} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Les charges variables $Q_{k,i}$, ainsi que les valeurs de $\psi_{2,i}$ représentant la part quasi-permanente de celles-ci sont reprises à la tableau 2 en fonction de la destination du bâtiment. Suivant le rapport entre $Q_{k,i}$ et les charges permanentes $G_{k,j}$, et suivant le nombre d'étages n supportés par la colonne, la charge totale en cas d'incendie sera réduite par rapport au dimensionnement à froid – voir tableau 2. Le coefficient de réduction des charges peut être utilisé comme coefficient de sécurité du taux d'utilisation, à condition que le dimensionnement à froid soit correct. Dans le tableau 2, on considère qu'aucune réduction des charges variables n'a été appliquée pour le dimensionnement à froid des poutres supportant des surfaces importantes.

Tableau 2 : Charges verticales et coefficients de réduction afférents en cas d'incendie, en fonction du rapport entre Q_k et G_k .

| Destination du bâtiment | Q_k kN/m ² | Q_k/G_k $\psi_{2,i}$ | poutres colonnes ($n < 2$) | | | colonnes ($n > 2$) | | |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|------|------|----------------------|------|------|
| | | | 0,5 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | 2 |
| A: Logement | 2,0 | 0,3 | 0,55 | 0,46 | 0,37 | 0,61 | 0,53 | 0,45 |
| B: Bureau | 3,0 | 0,3 | 0,55 | 0,46 | 0,37 | 0,61 | 0,53 | 0,45 |
| C: Espace de réunion | 5,0 | 0,6 | 0,62 | 0,56 | 0,51 | 0,69 | 0,65 | 0,62 |
| D: Commerce | 5,0 | 0,6 | 0,62 | 0,56 | 0,51 | 0,69 | 0,65 | 0,62 |
| E: Stockage | 7,5 | 0,8 | 0,67 | 0,63 | 0,60 | 0,67 | 0,63 | 0,60 |
| F: Parking: voitures < 3 T | 2,5 | 0,6 | 0,62 | 0,56 | 0,51 | 0,69 | 0,65 | 0,62 |
| G: Parking: voitures 3-16 T | 5,0 | 0,3 | 0,55 | 0,46 | 0,37 | 0,61 | 0,53 | 0,45 |
| H: Toitures*) | | 0,0 | 0,48 | 0,35 | 0,23 | 0,57 | 0,46 | 0,33 |

*) Surcharge de neige (EN 1991-1-3) et surcharge due à l'entretien.

4 MÉTHODE DE CALCUL

4.1 Calcul de la température critique

La méthode simple peut être utilisée pour les poutres et les éléments tendus. Elle peut également être appliquée aux colonnes, mais les résultats seront fortement du côté de la sécurité. Un dimensionnement plus économique sera obtenu avec la méthode décrite au point 4.1.2.

4.1.1 Méthode simple

Etape 1a : Déterminer le taux d'utilisation en cas d'incendie

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

Selon l'Eurocode, on peut considérer des valeurs situées du côté de la sécurité de $\mu_0 = 0,70$ pour les planchers de catégorie E dans EN 1990 (entrepôts) ou de $\mu_0 = 0,65$ dans tous les autres cas. Pour les éléments soumis à compression, on peut calculer le taux d'utilisation par approximation sur la base de la résistance du dimensionnement à froid :

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_d$$

Etape 2a : Pour les poutres, déterminer le coefficient de correction κ en fonction de l'uniformité de la répartition de température. Pour les colonnes, calculer le coefficient de réduction de la longueur de flambement en cas d'incendie α de l'étage considéré et des liaisons entre les colonnes des différents étages.

Etape 3a : Déterminer graphiquement la température critique d'après la figure 2.

4.1.2 Méthode avancée pour éléments en compression

Etape 1b : Des valeurs plus précises peuvent être obtenues en calculant le coefficient de réduction admissible de l'effort plastique :

$$\mu_{pl} = E_{fi,d} / (A_a \cdot f_y)$$

Où A_a est l'aire de section transversale et f_y la limite d'élasticité à froid.

Etape 2b : Calculer l'élançement au temps $t = 0$, en tenant compte de la réduction de la longueur de flambement :

$$\lambda_{fi,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{93,9 \cdot \varepsilon}, \text{ où } \varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

Etape 3b : Trouver la température critique dans le tableau 4 à partir des valeurs de μ_{pl} et de $\lambda_{fi,0}$.

4.2 Calcul de la température de l'acier

Etape 4 : Calculer le facteur de massiveté. Celui-ci vaut

$$P = A/V$$

Dans le cas d'un profil non protégé ou d'un profil avec une protection rectangulaire, on prend le périmètre rectangulaire du profil comme valeur de la surface exposée au feu A – voir tableau 3. Pour un profil avec protection suivant le contour du profil, c'est la surface de celle-ci qui doit être prise comme valeur pour A . Les facteurs de massiveté pour une exposition de toutes parts ou de 3 côtés sont reprises au tableau 6.

Etape 5 : Corriger le facteur de massiveté. Les valeurs du tableau 6 doivent être multipliées par un coefficient de 0,9 dans le cas d'un profil en I non protégé.

Pour les profils protégés, l'échauffement se calcule en partant d'un facteur de massiveté modifié comme suit :

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3}, \text{ où } \phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V}$$

ϕ représente l'inertie thermique relative du matériau isolant, ρ_a la densité de l'acier (égale à 7850 kg/m³), et c_a la chaleur spécifique de l'acier. Pour le calcul, on peut approximer c_a par 600 J/kgK. Par sécurité, on peut également négliger ϕ ($\phi = 0$).

Etape 6 : Déterminer graphiquement – figure 2 – le temps pour lequel la température critique est atteinte, en fonction du facteur de massiveté corrigé. Ce temps est la valeur de la résistance au feu.

Tableau 3 : Facteurs de massiveté en fonction du type de profil et du mode d'échauffement.

| Profil en I non protégé et chauffé de toutes parts | Profil en I protégé et chauffé de toutes parts : protection rectangulaire | Profil en I protégé et chauffé de toutes parts : protection suivant le contour du profil |
|---|---|--|
| | | |
| $P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (2 \cdot b + 2 \cdot h)/V$ | $P = A/V = (2 \cdot b + 2 \cdot h)/V$ | $P = A/V$ |
| Profil en I non protégé et chauffé de 3 côtés | Profil en I protégé et chauffé de 3 côtés : protection rectangulaire | Profil en I protégé et chauffé de 3 côtés : protection suivant le contour du profil |
| | | |
| $P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (b + 2 \cdot h)/V$ | $P = A/V = (b + 2 \cdot h)/V$ | $P = (A-b)/V$ |
| Profil en L non protégé et chauffé de toutes parts | Tube creux non protégé et chauffé de toutes parts | Profil massif non protégé et chauffé de toutes parts |
| | | |
| $P = A/V \approx 2/t$ | $P = A/V \approx 1/t$ | $P = A/V = 4/d$ |

Tableau 4 : Températures critiques pour éléments en compression.

| $\lambda_{fi,0}$ | μ_{pl} | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
|------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | | 950 | 820 | 767 | 725 | 692 | 671 | 650 | 629 | 608 | 590 | 574 | 558 | 542 |
| 0,2 | | 918 | 796 | 745 | 697 | 673 | 649 | 625 | 601 | 582 | 564 | 546 | 528 | 509 |
| 0,4 | | 892 | 777 | 714 | 678 | 650 | 622 | 595 | 574 | 553 | 532 | 512 | 485 | 452 |
| 0,6 | | 867 | 747 | 685 | 651 | 617 | 588 | 564 | 539 | 515 | 483 | 441 | 391 | 164 |
| 0,8 | | 829 | 699 | 657 | 615 | 581 | 552 | 522 | 486 | 430 | 320 | 117 | | |
| 1 | | 784 | 674 | 621 | 578 | 542 | 506 | 437 | 316 | 124 | | | | |
| 1,2 | | 738 | 645 | 585 | 541 | 492 | 385 | 197 | | | | | | |
| 1,4 | | 694 | 611 | 552 | 495 | 346 | 127 | | | | | | | |
| 1,6 | | 674 | 582 | 516 | 364 | 116 | | | | | | | | |
| 1,8 | | 652 | 554 | 436 | 169 | | | | | | | | | |
| 2 | | 628 | 524 | 294 | | | | | | | | | | |
| S235 | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | 950 | 820 | 767 | 725 | 692 | 671 | 650 | 629 | 608 | 590 | 574 | 558 | 542 |
| 0,2 | | 921 | 797 | 747 | 698 | 675 | 651 | 627 | 603 | 584 | 566 | 548 | 530 | 512 |
| 0,4 | | 894 | 780 | 718 | 680 | 653 | 625 | 598 | 578 | 557 | 536 | 516 | 493 | 460 |
| 0,6 | | 871 | 752 | 688 | 655 | 622 | 592 | 568 | 544 | 520 | 494 | 453 | 411 | 246 |
| 0,8 | | 835 | 703 | 660 | 619 | 585 | 557 | 528 | 499 | 444 | 367 | 186 | | |
| 1 | | 788 | 677 | 625 | 582 | 547 | 512 | 452 | 353 | 177 | | | | |
| 1,2 | | 743 | 648 | 589 | 545 | 502 | 407 | 234 | | | | | | |
| 1,4 | | 695 | 614 | 556 | 503 | 370 | 162 | | | | | | | |
| 1,6 | | 676 | 585 | 520 | 384 | 147 | | | | | | | | |
| 1,8 | | 654 | 557 | 447 | 195 | | | | | | | | | |
| 2 | | 630 | 527 | 312 | | | | | | | | | | |
| S275 | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | 950 | 820 | 767 | 725 | 692 | 671 | 650 | 629 | 608 | 590 | 574 | 558 | 542 |
| 0,2 | | 924 | 798 | 749 | 700 | 677 | 653 | 630 | 606 | 587 | 569 | 551 | 533 | 515 |
| 0,4 | | 897 | 783 | 724 | 684 | 657 | 630 | 603 | 582 | 562 | 542 | 522 | 502 | 472 |
| 0,6 | | 878 | 758 | 692 | 660 | 628 | 598 | 575 | 552 | 529 | 506 | 470 | 431 | 356 |
| 0,8 | | 845 | 713 | 666 | 627 | 591 | 564 | 537 | 509 | 466 | 413 | 278 | | |
| 1 | | 795 | 681 | 632 | 588 | 555 | 521 | 474 | 403 | 250 | | | | |
| 1,2 | | 752 | 653 | 594 | 552 | 511 | 430 | 288 | 101 | | | | | |
| 1,4 | | 698 | 620 | 562 | 511 | 403 | 213 | | | | | | | |
| 1,6 | | 679 | 589 | 526 | 409 | 191 | | | | | | | | |
| 1,8 | | 658 | 562 | 465 | 230 | | | | | | | | | |
| 2 | | 634 | 532 | 337 | | | | | | | | | | |
| S355 | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | 950 | 820 | 767 | 725 | 692 | 671 | 650 | 629 | 608 | 590 | 574 | 558 | 542 |
| 0,2 | | 926 | 799 | 750 | 702 | 678 | 654 | 631 | 608 | 588 | 571 | 553 | 535 | 517 |
| 0,4 | | 899 | 786 | 727 | 686 | 660 | 633 | 607 | 585 | 566 | 546 | 526 | 506 | 479 |
| 0,6 | | 881 | 762 | 694 | 663 | 632 | 602 | 579 | 556 | 534 | 511 | 481 | 442 | 404 |
| 0,8 | | 851 | 719 | 669 | 631 | 595 | 569 | 542 | 515 | 479 | 428 | 329 | 144 | |
| 1 | | 800 | 683 | 636 | 592 | 559 | 527 | 488 | 419 | 292 | 117 | | | |
| 1,2 | | 757 | 656 | 597 | 556 | 516 | 444 | 318 | 143 | | | | | |
| 1,4 | | 700 | 623 | 565 | 515 | 416 | 241 | 292 | 111 | | | | | |
| 1,6 | | 681 | 591 | 530 | 422 | 216 | 217 | | | | | | | |
| 1,8 | | 660 | 564 | 475 | 250 | 194 | | | | | | | | |
| 2 | | 636 | 535 | 351 | 395 | 171 | | | | | | | | |
| S420 | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | 950 | 820 | 767 | 725 | 692 | 671 | 650 | 629 | 608 | 590 | 574 | 558 | 542 |
| 0,2 | | 927 | 799 | 751 | 703 | 678 | 655 | 632 | 609 | 589 | 571 | 554 | 536 | 518 |
| 0,4 | | 900 | 787 | 729 | 687 | 661 | 635 | 609 | 587 | 567 | 548 | 528 | 509 | 483 |
| 0,6 | | 883 | 764 | 695 | 665 | 635 | 604 | 581 | 559 | 536 | 514 | 486 | 448 | 411 |
| 0,8 | | 853 | 722 | 670 | 633 | 597 | 571 | 545 | 519 | 485 | 435 | 354 | 181 | |
| 1 | | 803 | 685 | 638 | 594 | 562 | 530 | 495 | 426 | 312 | 145 | | | |
| 1,2 | | 759 | 657 | 598 | 558 | 519 | 451 | 332 | 164 | | | | | |
| 1,4 | | 702 | 625 | 567 | 518 | 423 | 255 | | | | | | | |
| 1,6 | | 682 | 592 | 532 | 428 | 228 | | | | | | | | |
| 1,8 | | 661 | 566 | 481 | 260 | | | | | | | | | |
| 2 | | 637 | 536 | 358 | 241 | | | | | | | | | |
| S460 | | | | | | | | | | | | | | |

5 PROPRIÉTÉS DE L'ISOLATION

Des valeurs indicatives des caractéristiques thermiques de différents matériaux isolants – voir tableau 5 – peuvent être utilisées pour un premier calcul de l'échauffement de l'acier. Pour une détermination définitive de l'épaisseur nécessaire se référer aux attestations des fournisseurs de matériaux isolants.

Tableau 5 : Valeurs indicatives des caractéristiques thermiques de différents matériaux d'isolation.

| Matériau isolant | ρ_p [kg/m ³] | λ_p [W/mK] | C_p [J/kgK] |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------|
| Isolant projeté, faible densité : | | | |
| - fibres minérales | 300 | 0,12 | 1200 |
| - ciment vermiculite ou perlite | 350 | 0,12 | 1200 |
| Isolant projeté, haute densité : | | | |
| - vermiculite ou perlite avec ciment | 550 | 0,12 | 1100 |
| - vermiculite ou perlite avec plâtre | 650 | 0,12 | 1100 |
| Isolant en panneaux : | | | |
| - vermiculite ou perlite avec ciment | 800 | 0,20 | 1200 |
| - fibres de silicate (de calcium) | 600 | 0,15 | 1200 |
| - fibro-ciment | 800 | 0,15 | 1200 |
| - plâtre | 800 | 0,20 | 1700 |
| Laine minérale, laine de roche | 150 | 0,20 | 1200 |
| Peinture intumescente | 0 | 0,005 - 0,012 | 0 |

6 SYMBOLES

| | | |
|-------------------|---|----------------------|
| α | Coefficient de réduction de la longueur de flambement pour des colonnes en cas d'incendie | [-] |
| ε | Quantité adimensionnelle pour instabilité locale et globale | [-] |
| ϕ | Inertie thermique relative du matériau isolant | [-] |
| γ_M | Coefficient partiel du matériau à froid = 1 | [-] |
| $\gamma_{M,fi}$ | Coefficient partiel du matériau en cas d'incendie = 1 | [-] |
| κ | Produit des coefficients correctifs du gradient de température | [-] |
| κ_I | Coefficient correctif du gradient de température dans la section | [-] |
| κ_{Σ} | Coefficient correctif du gradient de température sur la longueur | [-] |
| λ | Elancement relatif à froid | [-] |
| $\lambda_{fi,0}$ | Elancement relatif en cas d'incendie au temps $t = 0$ | [-] |
| λ_p | Conductivité thermique du matériau isolant | [W/mK] |
| μ_0 | Taux d'utilisation | [-] |
| μ_{pl} | Taux d'utilisation plastique | [-] |
| ρ_a | Densité de l'acier = 7850 | [kg/m ³] |
| ρ_p | Densité du matériau isolant | [kg/m ³] |
| θ_{cr} | Température critique | [°C] |
| $\psi_{2,i}$ | Coefficient de réduction de la charge quasi-permanente i | [-] |
| A | Surface du profil en acier exposé au feu | [m ²] |
| A_a | Aire de la section transversale du profil en acier | [m ²] |
| $E_{fi,d}$ | Effet d'actions de calcul en cas d'incendie | |
| $G_{k,i}$ | Valeur caractéristique des charges permanentes i | |
| L_{cr} | Longueur de flambement à froid | [m] |
| $M_{fi,Ed}$ | Valeur de calcul du moment de flexion en cas d'incendie | [kNm] |
| $M_{fi,Rd}$ | Valeur de calcul du moment résistant en cas d'incendie | [kNm] |
| P | Facteur de massivité | [m ⁻¹] |
| P_{mod} | Facteur de massivité modifié pour un profil protégé | [W/m ³ K] |
| $Q_{k,i}$ | Valeur caractéristique des charges variables i | |
| R_d | Valeur de calcul de la résistance à froid | |
| $R_{fi,d,0}$ | Valeur de calcul de la résistance en cas d'incendie au temps $t = 0$ | |
| V | Volume du profil en acier | [m ³] |
| b | Largeur du profil | [m] |
| c | Longueur de l'âme pour la classification des sections | [m] |
| c_a | Chaleur spécifique de l'acier ≈ 600 | [J/kgK] |
| c_p | Chaleur spécifique du matériau isolant | [J/kgK] |
| d | Diamètre du tube | [mm] |
| d_p | Épaisseur sèche du matériau isolant | [m] |
| f_y | Limite d'élasticité de l'acier à froid | [N/mm ²] |
| h | Hauteur du profil | [m] |
| i | Rayon d'inertie du profil suivant axe faible ou axe fort | [m] |
| $k_{E,\theta}$ | Coefficient de réduction du module d'élasticité en cas d'incendie | [-] |
| $k_{p,\theta}$ | Coefficient de réduction de la limite de proportionnalité en cas d'incendie | [-] |
| $k_{y,\theta}$ | Coefficient de réduction de la limite d'élasticité en cas d'incendie | [-] |
| l_{fi} | Longueur de flambement en cas d'incendie | [m] |
| n | Nombre d'étages supportés par la colonne | |
| $q_{fi,Ed}$ | Charge linéaire uniformément répartie en cas d'incendie | [kN/m] |
| t | Temps écoulé depuis le début de l'incendie | [min] |
| t | Épaisseur de la paroi pour la classification du section | [m] |

7 RÉFÉRENCES

- EN 10025-1: 2005, *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 1: Conditions générales techniques de livraison*, CEN, Bruxelles, Belgique
- EN 1990: 2005, *Eurocode 0: Basis of design*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1991-1-2: 2002, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1991-1-3: 2003, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1993-1-1: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1993-1-2: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- ISO 834: 1999, *Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*, ISO, Genève, Suisse.

8 CONTACT

Centre Information Acier
12 Chaussée de Zellik
1082 Bruxelles
helpdesk@infosteel.be
www.infosteel.be



9 EXEMPLES DE CALCUL

9.1 Poutre isostatique

Données : Poutre IPE300 en acier S235 supportant un plancher collaborant dans un immeuble de bureaux. Le moment plastique à température normale est de $M_{fi,0,Rd} = 147,7$ kNm. La poutre est protégée par une peinture intumescente d'une épaisseur sèche d'1 mm. Portée de 6 m. L'entre-axe des poutres est égal à 3 m. Le poids propre du plancher, y compris les finitions, est de $G_k = 3$ kN/m². Le poids propre de la poutre est de 0,4 kN/m'. Les charges variables pour un immeuble de bureaux en Belgique sont de $Q_k = 3$ kN/m².

Inconnue : Déterminer la résistance au feu.

9.1.1 Calcul simple

Etape 1 : Déterminer le taux d'utilisation. L'approximation la plus simple est l'approche du côté de la sécurité : $\mu_0 = 0,65$.

Etape 2 : Déterminer le coefficient de correction. L'âme supérieure n'est pas soumise au moment de déversement, puisqu'elle est retenue par la dalle : les coefficients κ sont donc applicables. Pour une poutre isostatique protégée avec une dalle de béton sur la face supérieure : $\kappa = 0,85$.

Etape 3 : Déterminer la température critique d'après la figure 2. $\theta_{cr} = 573$ °C.

Etape 4 : Déterminer le facteur de massiveté d'après le tableau 6. Pour une protection suivant le contour du profil, on obtient $P = 188$ m⁻¹.

Etape 5 : Corriger le facteur de massiveté, avec $\lambda_p = 0,01$ W/mK. L'inertie thermique de la peinture intumescente est négligeable ($\phi = 0$).

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 188 \cdot \frac{0,01}{0,001} \cdot \frac{1}{1 + 0} = 1880 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Etape 6 : Déterminer graphiquement la résistance au feu d'après la figure 2 : $t = 50$ min. La poutre satisfait à R30.

9.1.2 Calcul précis

Etape 1 : Déterminer le taux d'utilisation :

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

La charge en cas d'incendie est égale à :

$$q_{fi,Ed} = 1,0 \cdot (3 \cdot 3 + 0,4) + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 3 \cdot 3 = 12,1 \text{ kN/m}$$

$$M_{fi,Ed} = \frac{1}{8} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 54,5 \text{ kNm}$$

$$\mu_0 = \frac{54,5}{147,7} = 0,37$$

Etape 2 : Voir 9.1.1 : $\kappa = 0,85$.

Etape 3 : Voir figure 2 : $\theta_{cr} = 665$ °C.

Etapes 4 et 5 : Voir 9.1.1 : $P_{mod} = 1880$ W/m³K.

Etape 6 : La résistance au feu est de 66 minutes, la poutre satisfait donc à R60.

9.2 Poutre hyperstatique

Données : Même poutre qu'en 9.1, mais hyperstatique.

Inconnue : Déterminer l'épaisseur d'isolation (panneaux en silicate de calcaire) nécessaire pour une résistance au feu de 120 minutes.

Etape 1 : Par approximation, le moment de flexion est de :

$$M_{fi,Ed} = \frac{1}{12} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 36,3 \text{ kNm}$$

On obtient donc $\mu_0 = 36,3 / 147,7 = 0,25$.

Etape 2 : Il s'agit d'une poutre hyperstatique protégée et chauffée de trois côtés, donc $\kappa = 0,85 \cdot 0,85 = 0,7$.

Etape 3 : Voir figure 2 : $\theta_{cr} = 748$ °C.

Etape 4 : Pour une protection isolante rectangulaire, le tableau 6 nous donne $P = 139$ m⁻¹.

Pour satisfaire à R120, nous voyons à la figure 2 qu'un facteur de massiveté modifié $P_{mod} = 1350$ W/m³K est nécessaire. En première approximation, nous négligeons l'inertie thermique de l'isolation ($\phi = 0$). Avec $\lambda_p = 0,15$ W/mK, il faut une épaisseur de :

$$d_p = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{P_{mod}} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 139 \cdot \frac{0,15}{1350} \cdot \frac{1}{1 + 0} = 15,4 \text{ mm}$$

Evaluons la différence d'épaisseur en tenant compte de l'inertie thermique de l'isolant. Avec $d_p = 15,4$ mm et le tableau 5, on obtient :

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{600 \cdot 1200}{600 \cdot 7850} \cdot 0,0154 \cdot 139 = 0,33$$

Avec cette valeur, on obtient une épaisseur minimale de :

$$d_p = 15,4 / (1 + 0,33 / 3) = 13,9 \text{ mm}$$

9.3 Poutre hyperstatique non protégée

Données : Poutre du point 9.2 sans protection, mais en acier de qualité supérieure.

Inconnue : Vérifier si la poutre satisfait à R30.

Etape 1 : En utilisant de l'acier S355, le taux d'utilisation devient :

$$\mu_0 = 235 / 355 \cdot 0,25 = 0,16$$

Etape 2 : Il s'agit d'une poutre hyperstatique non protégée et chauffée de trois côtés, donc :

$$\kappa = 0,7 \cdot 0,85 = 0,6$$

Etape 3 : Voir figure 2 : $\theta_{cr} = 825$ °C.

Etape 4 : On se base sur le facteur de massiveté pour protection rectangulaire :

$$P = 139 \text{ m}^{-1}$$

Etape 5 : Le facteur de massiveté d'un profil en I non protégé doit être modifié par un coefficient de 0,9 : $P = 0,9 \cdot 139 = 125$ m⁻¹.

Etape 6 : La résistance au feu est de 32 minutes. La poutre satisfait donc à R30.

9.4 Colonne soumise à une charge axiale

Données : Colonne HEA 200 en acier S235, soumise exclusivement à des forces axiales. Le rayon d'inertie le long de l'axe faible est de $i = 49,8$ mm et l'aire de la section transversale est de $A_a = 5383$ mm². La colonne est protégée par des plaques de plâtre de 20 mm d'épaisseur. La hauteur de l'étage est de 3 m. La capacité portante pour le dimensionnement à froid vaut $R_d = 962$ kN. On considère une colonne continue située à un étage intermédiaire. La colonne porte 5 étages avec, de chaque côté de la colonne, la poutre de l'exemple 9.1.

Inconnue : Déterminer la résistance au feu.

9.4.1 Méthode simple avec estimation du taux d'utilisation

Etape 1 : Déterminer le taux d'utilisation. Le rapport Q_k / G_k est égal à :

$$Q_k / G_k = (3 \cdot 3) / (3 \cdot 3 + 0,4) \approx 1.$$

Le tableau 2 indique que les charges en cas d'incendie sont réduites à 0,53. Cette valeur de μ_0 se situe du côté de la sécurité.

Etape 2 : Déterminer le coefficient de correction. Pour une colonne située à un étage intermédiaire, la longueur de flambement peut être réduite de moitié : $\alpha = 0,5$.

Etape 3 : Déterminer la température critique d'après la figure 2. $\theta_{cr} = 560$ °C.

Etape 4 : Déterminer le facteur de massiveté. Pour un profil avec protection rectangulaire, le tableau 6 donne $P = 145$ m⁻¹.

Etape 5 : Corriger le facteur de massiveté :

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{800 \cdot 1700}{600 \cdot 7850} \cdot 0,02 \cdot 145 = 0,84$$

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 145 \cdot \frac{0,2}{0,02} \cdot \frac{1}{1 + 0,84/3} = 1134 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Etape 6 : Déterminer graphiquement la résistance au feu d'après la figure 2 : $t = 70$ minutes. La colonne satisfait à R60.

9.4.2 Méthode simple avec calcul précis du taux d'utilisation

Etape 1 : La colonne supporte $5 \cdot 2 = 10$ poutres, décrites au point 9.1.

$$E_{fi,d} = 10 \cdot 12,1 \cdot 6 / 2 = 363 \text{ kN}$$

Pour appliquer les courbes de la figure 2 ($\alpha = 0,5 / 0,7$ et 1), le taux d'utilisation de la colonne doit être calculé :

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_d = 363 / 962 = 0,38$$

Etape 2 : Voir 9.4.1 : $\alpha = 0,5$.

Etape 3 : Voir figure 2 : $\theta_{cr} = 618$ °C.

Etapes 4 et 5 : Voir 9.4.1 : $P_{mod} = 1134$ W/m³K.

Etape 6 : La résistance au feu est de 83 minutes. La colonne satisfait donc à R60.

9.4.3 Méthode précise

Etape 1 : Déterminer le taux d'utilisation plastique :

$$\mu_{pl} = E_{fi,d} / (A_a \cdot f_y) = 363 / (5383 \cdot 235) = 0,29$$

Etape 2 : Calculer l'élançement au temps $t = 0$:

$$\lambda_{fi,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{93,9 \cdot \sqrt{235/f_y}} = 0,5 \cdot \frac{3000}{49,8} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,32$$

Etape 3 : Déterminer la température critique d'après le tableau 4 : $\theta_{cr} = 639$ °C.

Etapes 4 et 5 : voir 9.4.1 : $P_{mod} = 1134$ W/m³K.

Etape 6 : La résistance au feu est de 88 minutes. La colonne satisfait donc à R60.

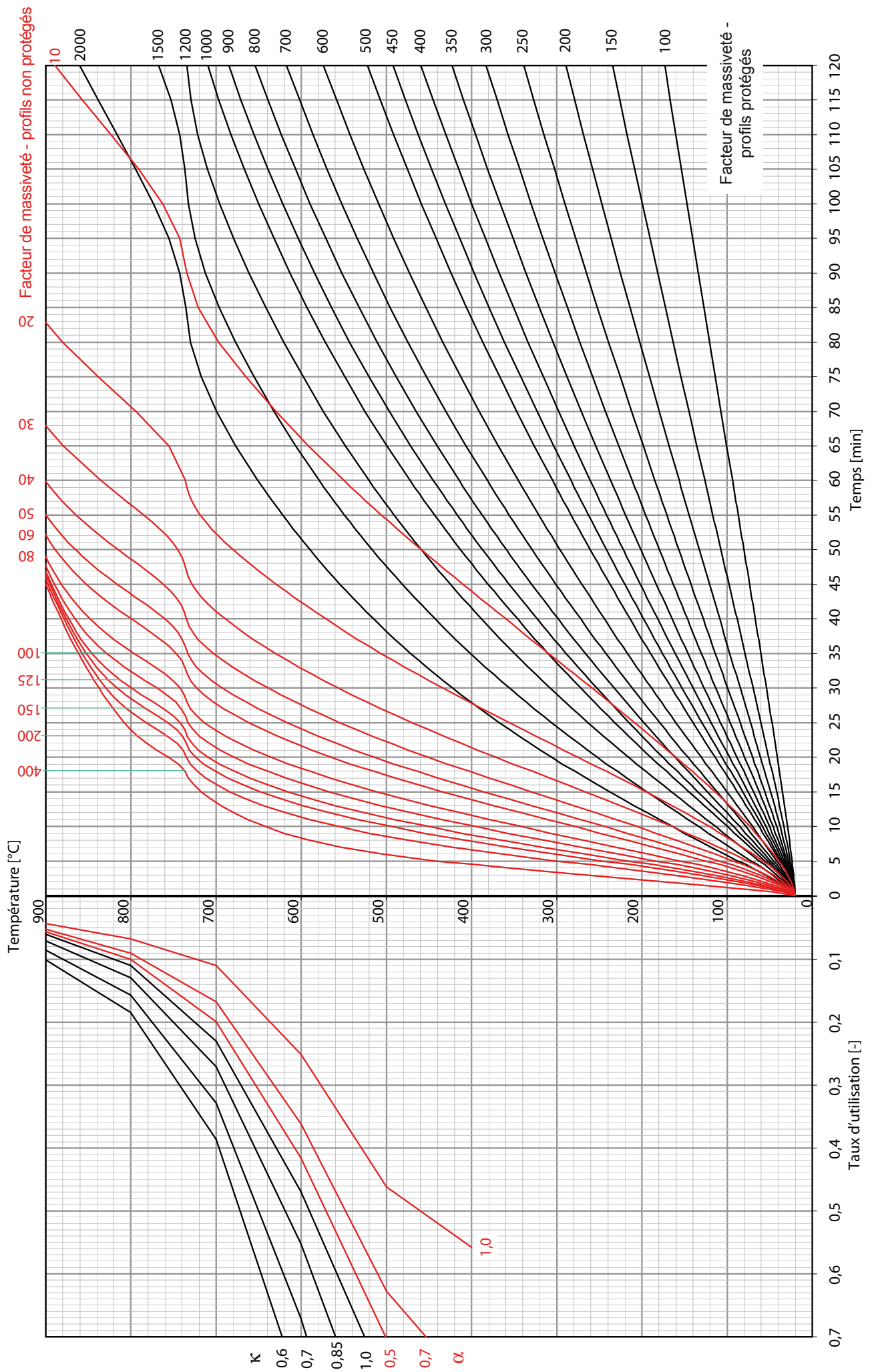


Figure 2 : Nomogramme pour déterminer la température critique et la résistance au feu.