

Sécurité incendie des ouvrages en structures métalliques : partie 1

par Joël KRUPPA
Département Incendie et Essais
Centre technique industriel de la construction métallique CTICM

1.	Contexte réglementaire	C 2 506 - 2
1.1	Exigences réglementaires.....	— 2
1.2	Moyens de justifications	— 3
1.3	Ingénierie de la sécurité incendie.....	— 3
2.	Actions sur les structures en situation d'incendie	— 4
2.1	Actions mécaniques	— 4
2.2	Actions thermiques	— 4
2.2.1	Incendies nominaux	— 5
2.2.2	Modèles simplifiés de calcul.....	— 5
2.2.3	Modèles numériques.....	— 6
3.	Évolution des températures des éléments de structure.....	— 7
3.1	Caractéristiques thermiques des matériaux.....	— 7
3.1.1	Acier	— 7
3.1.2	Acier inoxydable	— 7
3.1.3	Béton.....	— 8
3.2	Éléments en acier non protégé.....	— 8
3.2.1	Éléments internes au bâtiment.....	— 8
3.2.2	Éléments externes au bâtiment.....	— 9
3.3	Éléments protégés en acier	— 11
3.3.1	Par protection directe	— 11
3.3.2	Par écrans.....	— 13
3.3.3	Par eau.....	— 13
3.4	Éléments mixtes acier et béton	— 13
3.4.1	Planchers	— 13
3.4.2	Poutres.....	— 14
3.4.3	Poteaux.....	— 14
	Tableau des notations et symboles	— 15
	Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 508

La vérification du comportement au feu d'une structure métallique peut, conformément aux parties « feu » des Eurocodes, être effectuée selon trois méthodes différentes :

- par référence à des tableaux de valeurs (principalement contenus dans l'Eurocode 4 partie 1.2) ;
- par utilisation de méthodes de calcul simplifiées faisant référence à des formules analytiques et ne concernant que des éléments de structure individuels ;
- par utilisation de méthodes de calcul dites « avancées », permettant une estimation plus précise et plus globale du comportement au feu des structures, mais nécessitant le recours à des modèles numériques, fondés généralement sur la méthode des éléments finis.

Mis à part le cas des méthodes de calcul avancées qui nécessitent l'autorisation du ministère de l'Intérieur et le recours à des logiciels thermoélastoplastiques aux éléments finis, l'utilisation des tableaux de valeurs ou de méthodes de calcul simplifiées est effectuée sous la responsabilité des projeteurs et ingénieurs de bureau d'étude.

Nous présentons dans les parties 1 et 2 les différentes méthodes de calcul permettant l'estimation du comportement au feu des structures en acier ou mixte (acier + béton), en faisant référence, lorsque nécessaire, à des ouvrages, documents ou parties d'Eurocodes présentant de façon plus détaillée certaines étapes. Le lecteur doit être averti que, en ce qui concerne les Eurocodes, en 2004 et 2005 se situe une période de transition entre les premières versions (notées ENV) et les versions définitives (notées EN ou prEN lorsque le document n'a pas encore fait l'objet d'un vote formel) ; c'est pourquoi il peut être fait référence, dans le texte ci-après, à l'une ou l'autre de ces versions.

Toutefois, la sécurité incendie étant un domaine fortement réglementé, il est souhaitable de situer dans cette première partie, tout d'abord, ces méthodes dans le contexte réglementaire français. Puis sont abordées les actions sur les structures, en situation d'incendie, c'est-à-dire plus particulièrement la partie « feu » de l'Eurocode 1 et ensuite la détermination de l'échauffement des éléments de structure qu'ils soient en acier ou mixtes.

1. Contexte réglementaire

Le risque incendie dans les constructions est régi en France par des textes réglementaires émanant de divers ministères. Ils se divisent en deux groupes :

- les exigences, généralement descriptives, auxquelles doivent répondre les matériaux et éléments de construction afin de limiter, à un niveau acceptable, les risques liés à l'incendie ;
- les méthodes permettant de justifier que ces matériaux et éléments de construction présentent, effectivement, le niveau de performance requis.

En ce qui concerne le comportement au feu des matériaux et éléments de construction, on distingue deux notions principales :

- **la réaction au feu** qui caractérise l'aliment qu'un matériau peut apporter au démarrage et au développement du feu [18] ;
- **la résistance au feu** qui concerne l'aptitude des éléments de construction à assurer leur fonction porteuse ou de compartimentage malgré l'action de l'incendie [19].

1.1 Exigences réglementaires

Le rôle de la structure porteuse en cas d'incendie est de continuer à assurer la stabilité du bâtiment pendant une certaine durée ; cela impose aux éléments d'ossature un degré de stabilité au feu.

Le rôle des éléments de compartimentage en cas d'incendie est de limiter la propagation de l'incendie au sein d'un bâtiment et, le cas échéant, vers le voisinage ; cela impose à ces éléments un degré pare-flammes ou coupe-feu.

Bien que ces différents degrés s'expriment en heures et fraction d'heures, ce n'est pas un temps réel de performance à partir du début d'un incendie réel, mais un indice de résistance au feu jugé nécessaire par les pouvoirs publics en fonction de l'importance du risque et de la sévérité estimée du feu.

En matière de résistance au feu, les exigences imposées aux bâtiments sont définies dans le code de la construction et de l'habitation, le code du travail, les textes sur la protection de l'environnement et les décrets et arrêtés les accompagnant.

Selon la destination des bâtiments, les exigences réglementaires (cf. [Doc. 2508]) sont différentes et placées sous la responsabilité de divers ministères.

■ Établissements recevant du public - ERP (ministère de l'Intérieur) [20]

Les ERP sont classés en fonction du nombre d'occupants potentiels, de leur activité et de la hauteur du plancher haut.

Les degrés de résistance au feu sont définis dans les articles CO11 à CO15 de l'arrêté du 25 juin 1980 [20] ; ils varient entre 1/2 h et 1 h 1/2. Ils ne concernent que les éléments de structure principaux, c'est-à-dire ceux dont la ruine a une incidence sur la stabilité de la structure porteuse. Des exigences de résistance au feu de 2 h à 3 h peuvent être requises pour les locaux présentant des risques particuliers d'incendie.

Aucune exigence de stabilité au feu n'est imposée aux structures des bâtiments à simple rez-de-chaussée (article CO 14) et aux derniers étages des immeubles (article CO 13) lorsque certaines conditions spécifiques sont remplies, telles que l'utilisation de structures en acier ou mixtes, visibles du plancher et ne présentant pas de risque d'effondrement en chaîne.

■ Habitations (ministère de la Construction et du Logement) [21]

Les bâtiments d'habitation sont classés en distinguant l'habitat individuel de l'habitat collectif et en prenant en compte l'indépendance de structures contiguës, le nombre de niveaux et la hauteur.

L'arrêté du 31 janvier 1986 [21] requiert des degrés de résistance au feu suivant un classement en 4 familles. Ils varient entre 1/4 h et 1 h 1/2.

■ Immeubles de grande hauteur - IGH (ministère de l'Intérieur) [22]

Les exigences imposées en matière de résistance au feu sont, principalement, un degré de résistance de 2 h et, d'autre part, une limitation de la charge combustible à 680 MJ par mètre carré de surface de plancher.

■ Bâtiments industriels entrant dans le cadre des installations classées (ministère de l'Environnement) [23]

Pour ces catégories d'immeubles, des exigences de résistance au feu peuvent être imposées lorsque les activités exercées présentent des risques pour l'environnement ou le voisinage, ou

lorsque la hauteur du bâtiment rend difficile l'évacuation rapide du personnel.

C'est le cas pour :

- les **entrepôts renfermant des matériaux combustibles**. Une résistance au feu de 1 h est demandée pour les bâtiments de plus de 12,5 m de hauteur et ceux ayant plus d'un niveau. En outre, une résistance au feu de 2 h est demandée pour les planchers intermédiaires. Toutefois, pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée, l'exigence de stabilité au feu 1 h n'est pas exigée si le bâtiment est doté d'un dispositif d'extinction automatique d'incendie et qu'une étude spécifique d'ingénierie incendie conclut à une cinématique de ruine démontrant le non-effondrement de la structure vers l'extérieur de la première cellule en feu et l'absence de ruine en chaîne, et une cinétique d'incendie compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours [24] ;

- les **parcs à voitures**, qu'ils soient enterrés ou aériens. Une résistance au feu de 1/2 h est demandée pour les parcs ayant au plus un niveau au-dessus du sol, 1 h pour les parcs ayant au plus 2 niveaux au-dessus ou en dessous du sol, jusqu'à 2 h pour les parcs de plus de 28 m au-dessus ou en dessous du sol [25]. Toutefois, pour les parcs aériens largement ouverts sur l'extérieur, il est de plus en plus admis de tenir compte de la spécificité des incendies de véhicules et de pouvoir justifier de la stabilité au feu de ces bâtiments par une étude d'ingénierie de la sécurité incendie (cf. article [C 2 507] [32]).

■ **Bâtiments de bureaux** et assimilés régis par le code du travail (ministère du Travail) [26]

Une résistance au feu de 1 h est demandée pour les bâtiments ayant un plancher situé à plus de 8 m du niveau du sol.

1.2 Moyens de justifications

En matière de réaction au feu, les matériaux sont classés en cinq catégories suivant leur combustibilité. L'acier en tant que matériau incombustible est classé dans la meilleure catégorie (M0). Les autres catégories sont M1 à M4, les matériaux trop combustibles ou très rapidement inflammables, situés au-delà de M4, n'étant pas classés (cf. arrêté du 21 novembre 2002 [18]). Dans le cadre de l'harmonisation européenne, le classement des produits vis-à-vis de leur comportement au feu fera appel à de nouvelles catégories allant de A1, A2, B jusqu'à E, voire F pour les matériaux non classés ; l'acier ayant le classement A1 [7] [27] [28] [29].

En matière de résistance au feu [19], les trois classements requis sont définis comme suit :

- la **stabilité au feu (SF)** qui concerne la stabilité mécanique des éléments de construction n'ayant qu'un rôle structurel porteur (poutre, poteau, tirant) ;

- le **pare-flammes (PF)** qui concerne principalement des éléments de compartimentage au contact desquels des matériaux combustibles ne sont pas entreposés (porte, cloison vitrée, couverture...). Il est demandé que ces éléments ne laissent pas passer de gaz chauds ni inflammables ;

- le **coupe-feu (CF)** qui concerne également des éléments de compartimentage, qu'ils soient porteurs ou non (plancher, mur, cloison, plafond...). Les qualités pare-flammes et, pour les éléments porteurs, une stabilité mécanique suffisante doivent être assurées et l'élévation des températures sur la face non exposée à l'incendie doit être en moyenne inférieure à 140 K et ne doit excéder en aucun point 180 K.

Le classement attribué est exprimé en degrés liés à une durée d'incendie pendant laquelle l'élément doit répondre aux critères imposés.

■ **Exemple** : un poteau peut être classé SF 1 h 30, une porte PF 1/2 h ou un plancher CF 1 h.

Il faut toutefois savoir que l'incendie de référence utilisé pour établir ces classements est représenté par une évolution temporelle

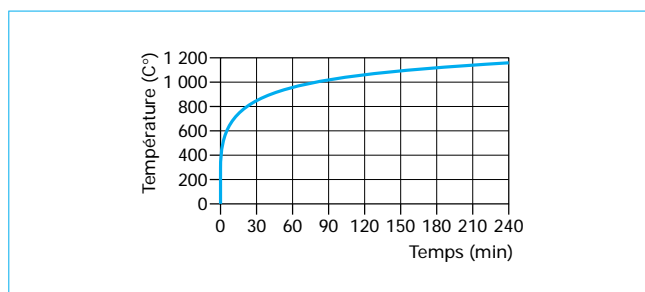


Figure 1 – Incendie conventionnel (ou normalisé)

ture-temps conventionnelle (figure 1), ce qui signifie que les degrés de résistance au feu que doivent présenter les éléments de construction ne peuvent pas refléter le comportement qu'ils auront lors d'un incendie réel. À la différence de l'incendie conventionnel, l'incendie naturel (également dénommé « réel ») dépend du local dans lequel le feu démarre. Cette dépendance est fonction des caractéristiques de ce local et des matériaux combustibles présents (cf. § 2.2.2 et 2.2.3) :

- nature des parois ;
- nature et quantité du combustible ;
- surface d'échange gazeux avec l'extérieur (du local) ;
- etc.

Dans le cadre de l'harmonisation des approches européennes [8] [27] [28] [30], de nouvelles dénominations seront utilisées pour exprimer les capacités de résistance au feu des éléments de construction ; elles font référence à des critères très proches de ceux utilisés actuellement en France :

- stabilité mécanique (R) ;
- étanchéité aux gaz chauds (E) ;
- isolation thermique (I).

■ **Exemple** : à partir des symboles indiqués ci-dessus, les classements seront alors :

- pour une poutre stable au feu 1 h : R 60 ;
- pour une porte pare-flamme 1/2 h : E 30 ;
- pour un mur coupe-feu 1 h 30 : REI 90.

Conformément à l'arrêté du 3 août 1999 [19], la résistance au feu d'un élément peut être justifiée à partir :

- **a.** du résultat d'un essai au feu effectué sur un échantillon représentatif de l'élément concerné ;

- **b.** d'une analyse spécifique (extension de classement, procès-verbal par analogie...) délivrée par un laboratoire agréé par le ministère de l'Intérieur ;

- **c.** d'un calcul conformément à une méthode agréée par le CECMI (Comité d'études et de classification des matériaux vis-à-vis du danger d'incendie), tels que les DTU (documents techniques unifiés) spécialisés en comportement au feu [9] [10] ou par les parties « feu » des Eurocodes (versions ENV + document d'application national) (Eurocodes 1, 3 et 4 en [Doc C 2 508] [1] [2] [3]).

Seuls les laboratoires agréés par le ministère de l'Intérieur [31] peuvent fournir les justifications conformément aux cas **a** et **b**.

En ce qui concerne les Eurocodes, il y a lieu de considérer deux groupes (cf. Doc [C 2 508]).

1.3 Ingénierie de la sécurité incendie

L'ingénierie de la sécurité incendie s'appuie sur différentes disciplines pour permettre l'évaluation des risques et des mesures de protection présents dans un bâtiment. Il est maintenant possible d'apprécier globalement le comportement au feu d'un bâtiment, et non plus de se limiter à ne considérer que celui de ses composants

pris indépendamment les uns des autres, de le comparer aux besoins liés aux objectifs de sécurité imposés à cet ouvrage.

L'objectif est d'adapter les moyens de protection incendie aux risques réellement encourus dans un bâtiment ou un ouvrage de génie civil. Dans ces conditions, il est alors possible de concevoir des ouvrages avec une plus grande liberté d'expression, parfaitement adaptés à leur finalité, mettant en œuvre les moyens de protection les plus appropriés et donc présentant une meilleure rentabilité des investissements, tout en assurant un haut niveau de sécurité pour les occupants, les biens et l'environnement.

En ce qui concerne spécifiquement la fonction porteuse d'une structure ou d'un élément de structure, elle est supposée assurée, après un temps t d'exposition à un incendie donné, si :

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

avec $E_{fi,d}$ valeur de calcul de l'effet des actions pour la situation d'incendie de calcul, selon l'ENV 1991-2-2 [1],

$R_{fi,d,t}$ résistance de calcul correspondante de l'élément en acier ou mixte, pour la situation d'incendie de calcul, au temps t .

Pour vérifier cette condition il faut évaluer d'une part les actions agissant sur la structure en cas d'incendie (§ 2) et d'autre part la réponse thermomécanique de cette structure (évolution des températures, § 3) et comportement mécanique (article [C 2 507]).

2. Actions sur les structures en situation d'incendie

Les actions à prendre en compte sont :

- les actions thermiques, représentant l'action de l'incendie ;
- les actions mécaniques qui agissent sur les structures en cas d'incendie.

2.1 Actions mécaniques

Pour les actions mécaniques, la formule générale pour déterminer l'effet des actions [9] est :

$$\Sigma \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

avec G_k valeur caractéristique de l'action permanente,
 $Q_{k,1}$ valeur caractéristique d'une (la principale) action variable,
 $Q_{k,i}$ valeur caractéristique des autres actions variables,
 $\gamma_{GA} = 1$ facteur partiel de sécurité pour situation accidentelle,
 $\psi_{1,1}, \psi_{2,i}$ combinaison de coefficients pour les bâtiments.

Étant donné que la probabilité d'occurrence d'un incendie conjointement avec des niveaux de charges élevés est extrêmement faible, les facteurs partiels de sécurité à appliquer sont fortement réduits en comparaison de ceux utilisés pour le dimensionnement à froid.

Le coefficient ψ associé représente l'aspect cumulatif des combinaisons d'actions variables et/ou accidentelles, impliquant une action dominante et des actions variables non dominantes réduites.

Dans le cadre de l'action accidentelle incendie, seuls les coefficients associés ψ_1 et ψ_2 interviennent. Leurs valeurs sont fixées dans l'Eurocode « EN 1990 » [11] [53], en fonction de l'action variable considérée et la catégorie du bâtiment.

Le tableau 1 récapitule les valeurs fixées pour différentes catégories de bâtiments.

Tableau 1 – Coefficients ψ associés

Actions	ψ_1	ψ_2
Charges d'exploitation		
Catégorie A : habitation, résidentiels.....	0,5	0,3
Catégorie B : bureaux.....	0,5	0,3
Catégorie C : lieux de réunion.....	0,7	0,6
Catégorie D : commerces.....	0,7	0,6
Catégorie E : stockage.....	0,9	0,8
Charges de circulation		
Catégorie F : véhicules de poids < 30 kN.....	0,7	0,6
Catégorie G : véhicules de poids compris entre 30 kN et 160 kN.....	0,5	0,3
Catégorie H : toits.....	0	0
Charges dues à la neige		
	0,2	0
Charges dues au vent		
	0,5	0

Il faut noter que la valeur de ψ_1 due au vent sur les bâtiments est ramenée à la valeur de 0,2 dans le cadre du document d'application national de l'ENV 1991-1 (partie d'Eurocode ayant précédé l'EN 1990).

Étant donné que deux actions accidentelles différentes sont considérées ne pas pouvoir se produire simultanément, il n'est pas fait état des autres actions accidentelles telles que l'explosion ou le séisme.

Pour simplifier le nombre de combinaisons à étudier, une formulation simplifiée des effets des combinaisons d'actions peut être déduite des effets des actions déterminés dans le calcul à température normale.

Cette formulation simplifiée est donnée dans l'Eurocode 1 partie 2.2 [1] :

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d$$

avec E_d valeur de calcul des effets des actions à partir de la combinaison fondamentale selon l'ENV 1991-1 (y compris les coefficients partiels de sécurité),
 $E_{fi,d,t}$ valeur de calcul des effets des actions correspondant à la situation d'incendie,
 η_{fi} facteur de réduction du niveau de chargement en situation d'incendie.

Selon le document d'application national des Eurocodes 3 et 4, par mesure de simplification, pour des bâtiments courants en construction métallique ou mixte, on peut prendre $\eta_{fi} = 0,64$ et pour des bâtiments de catégorie E [stockage ($\psi_{1,1} = 0,9$)] $\eta_{fi} = 0,69$.

2.2 Actions thermiques

Les actions thermiques prises en compte réglementairement sont principalement les incendies « nominaux », c'est-à-dire des évolutions de température en fonction du temps, indépendantes de l'activité ou de la géométrie du bâtiment et définies par une formule analytique. Toutefois les nouvelles possibilités offertes par les Eurocodes conduisent de plus en plus à considérer des développements d'incendies plus en harmonie avec la réalité. Ces actions thermiques plus réalistes font appel soit à des modèles de calcul simplifiés soit à des modèles numériques.

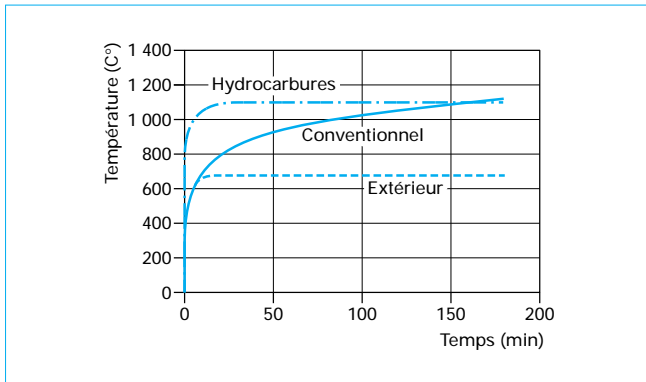


Figure 2 – Différents feux nominaux

2.2.1 Incendies nominaux

Les normes internationales sont fondées principalement sur l'incendie conventionnel défini par la norme ISO-834, repris en France par l'arrêté du ministère de l'Intérieur du 3 août 1999 [19] et en Europe par l'ENV 991-2-2 [1] (cf. figure 1).

L'équation analytique est :

$$\theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1)$$

avec t temps (min),

θ_g température ambiante (donc des gaz chauds) autour de l'élément de structure considéré. Cette température, dans le cas des incendies nominaux, est considérée comme homogène dans tout le local où l'incendie a lieu.

Il est également possible d'utiliser une évolution température-temps spécifique pour les incendies alimentés par des hydrocarbures (figure 2) [1] :

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$

avec t temps (min)

ainsi que la courbe relative à une exposition par l'extérieur des murs de façades :

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20$$

Ces modèles sont d'une utilisation aisée, surtout dans le cas où des essais doivent être effectués, mais ils ne constituent qu'une représentation très grossière des phénomènes réels.

Avec ces feux nominaux, le flux thermique transmis aux éléments de structure est déterminé par la somme du flux convectif et du flux radiatif :

$$\dot{h}_{\text{net},d} = \dot{h}_{\text{net},c} + \dot{h}_{\text{net},r} \quad (\text{en W/m}^2)$$

■ Le **flux convectif**, $\dot{h}_{\text{net},c}$, par unité de surface de l'élément échauffé est donné par :

$$\dot{h}_{\text{net},c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

avec α_c coefficient de transfert thermique par convection, égal à 25 W/(m² · K) pour l'incendie conventionnel et le feu externe, à 50 W/(m² · K) pour le feu d'hydrocarbures et à 4 W/(m² · K) (ou 9 W/(m² · K) si le rayonnement est négligé) en face non exposée des éléments séparatifs,

θ_g température des gaz au voisinage de l'élément (°C),

θ_m température de surface de l'élément (°C).

■ Le **flux radiatif**, $\dot{h}_{\text{net},r}$, par unité de surface de l'élément échauffé est donné par :

$$\dot{h}_{\text{net},r} = \Phi \varepsilon_{\text{res}} \times 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

avec Φ facteur de vue, pris égal à 1 à défaut de valeur plus précise,

ε_{res} émissivité résultante, qui peut être estimée par $\varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$,

ε_f émissivité du four (généralement égale à 0,7, toutefois les nouveaux dispositifs d'essais européens [12] conduisent à une valeur de 1,0),

ε_m émissivité du matériau considéré comme étant égal à 0,8 à défaut de valeur plus précise [4],

θ_r température de rayonnement représentatif de l'environnement de l'élément (°C),

θ_m température de surface de l'élément (°C).

La température de rayonnement θ_r est généralement prise égale à la température des gaz θ_g .

2.2.2 Modèles simplifiés de calcul

Dans certains cas, il est possible de faire référence à des évolutions températures-temps plus réalistes (incendies naturels) prenant en compte la décroissance du feu lorsque la majeure partie de la charge combustible (environ 70 %) est consumée (figures 3 et 4) [33] [34].

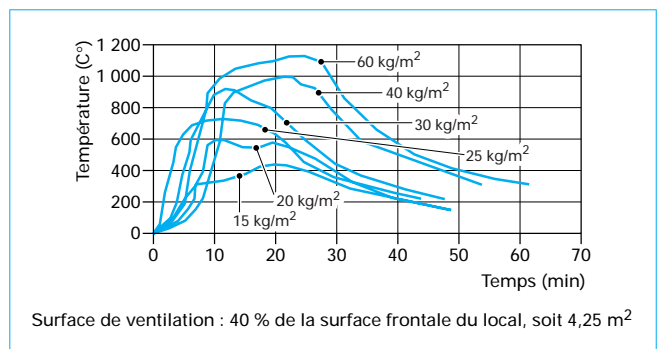


Figure 3 – Évolution de la température d'un local de 30 m³ en fonction du temps et de la charge calorifique exprimée en équivalent bois par m² de surface au sol

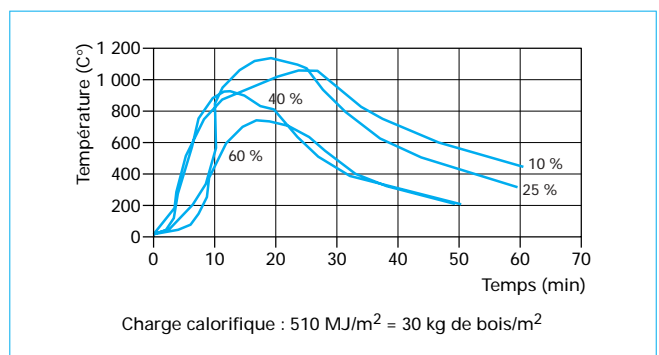


Figure 4 – Évolution de la température d'un local de 30 m³ en fonction du temps et de la surface de ventilation exprimée en fonction de la surface frontale du local

Cette méthode s'applique aux compartiments en feu de dimensions réduites tels que ceux rencontrés dans les hôtels, bureaux, écoles, habitations, avec une distribution uniforme de la charge incendie. L'hypothèse d'une distribution uniforme de la température dans le compartiment en feu est alors admise. Cette méthode prend en compte les principaux facteurs suivants :

- la somme des matériaux combustibles distribués dans le compartiment incendié, exprimée en termes de densité moyenne de la charge incendie (permanente et mobile) ;
- la vitesse de combustion des différents matériaux combustibles ;
- la géométrie du compartiment incendié ;
- la ventilation (dimensions des baies en façade) du compartiment incendié ;
- la réponse thermique des murs et des planchers limitant le compartiment incendié.

L'influence de la densité de la charge incendie et de la ventilation sur la température des gaz du compartiment est représentée sur les figures 3 et 4. La grande majorité des modèles actuels de feu de compartiment néglige la période de préembrasement généralisé, puisque le comportement mécanique des structures est principalement gouverné par l'évolution de température post-embrasement généralisé.

L'Eurocode 1 – 2.2 [1] donne une représentation analytique des incendies généralisés pour des locaux ne dépassant pas 100 m² :

$$\theta_g = 1\,325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$$

$$t^* = t \Gamma \text{ et } \Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1\,160)^2}$$

avec t temps (h),

$O = A_v \sqrt{h}/A_t$ facteur de ventilation (m^{1/2}),

A_v surface des ouvertures verticales (m²),

h hauteur des ouvertures verticales (m),

A_t surface totale des parois (m²),

et $b = \sqrt{\rho c \lambda}$

avec ρ masse volumique des parois (kg/m³),

c capacité thermique des parois (J/kg/K),

λ conductivité thermique des parois (W/m/K).

Cette formule est à utiliser jusqu'à une température maximale donnée par :

$$t^* = (0,13 \times 10^{-3} q_{t,d} \Gamma)/O$$

avec $q_{t,d}$ valeur de calcul de la charge incendie rapportée à la surface totale des parois (MJ/m²).

L'incendie paramétré est également utilisé pour évaluer la température des éléments de structure situés à l'extérieur des bâtiments. En effet, par opposition aux éléments internes, pour lesquels on suppose une action uniforme des gaz chauds, les éléments externes sont soumis à des conditions variables de flux thermique venant des baies et des flammes sortant par ces baies. Le concept d'incendie nominal ne peut donc plus s'appliquer dans ce cas. L'Eurocode 1 – 2.2 [1] permet (annexe C) de déterminer :

- la température maximale dans le compartiment :

$$\theta_g = 6\,000 \frac{1 - e^{0,1\eta}}{\eta^{1/2}} (1 - e^{-0,05\psi}) + 20$$

où :

$$\eta = A_t / (A_v h^{1/2}) \text{ (m}^{-1/2}\text{)} \text{ et } \psi = A_f \cdot Q_{f,k} / (A_v A_t)^{1/2} \text{ (kg d'équivalent bois/m}^2\text{)}$$

avec A_f surface au sol du compartiment en feu,
 $Q_{f,k}$ densité de charge incendie en kg d'équivalent bois rapportée à la surface au sol ;

- la taille et la température des flammes sortant par les ouvertures ;
- les coefficients de convection et de rayonnement, nécessaires au calcul du flux de chaleur transmis aux éléments de structure.

L'annexe de l'Eurocode 3 – 1.2 [2] permet ensuite de connaître la température maximale susceptible d'être atteinte par des éléments de structure en acier. Cette méthode est fondée sur des conditions de transfert de chaleur stationnaires, ce qui conduit généralement à une certaine surestimation des températures, surtout pour les éléments massifs.

Le tableau 2 donne les valeurs de charge incendie relatives à certaines activités.

Globalement, la densité totale de charge incendie peut être répartie dans les classes du tableau 3.

2.2.3 Modèles numériques

Ces modèles permettent d'évaluer l'évolution de l'incendie en tant que phénomène non stationnaire pour un compartiment donné et une charge d'incendie connue. La température est définie par :

- l'emplacement d'un foyer initial ;
- la croissance de l'incendie (débit de pyrolyse en fonction du temps) ;
- la taille, la géométrie, l'inertie thermique et la ventilation du compartiment incendié ;
- éventuellement, la taille et l'emplacement des ouvertures dans les parois du compartiment, ainsi que la géométrie des compartiments adjacents.

Tableau 2 – Valeur de la charge calorifique pour différentes activités

Habitations	330 à 780 MJ/m ²
Hôpitaux	100 à 330 MJ/m ²
Hôtels	310 à 330 MJ/m ²
Bureaux (à l'exception des archivages, stockages, bibliothèques et pièces spéciales)	80 à 550 MJ/m ²
Écoles (à l'exception des couloirs, salles de réunion, locaux techniques, stockages)	215 à 340 MJ/m ²
Centres commerciaux	400 à 900 MJ/m ²
Parcs à voitures	200 à 300 MJ/m ²

Tableau 3 – Classification en fonction de la charge calorifique

Faible	Moins de 250 MJ/m ² (pas d'embrasement généralisé)	Parkings
Moyenne	500 à 1 000 MJ/m ²	Habitations, hôpitaux, maisons, écoles, bureaux...
Élevée	1 000 à 2 000 MJ/m ²	Fabrication, stockage de biens combustibles < 150 kg/m ²
Très élevée	plus de 2 000 MJ/m ²	Stockage, entrepôts (magasins)

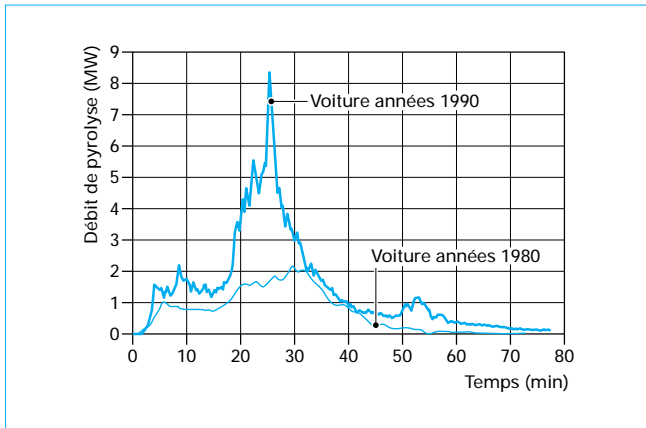


Figure 5 – Débit de pyrolyse de deux voitures (R18 et véhicule équivalent de la fin des années 1990)

L'évolution de la température des éléments de structure dépend :

- du temps ;
- de la localisation de l'élément dans le compartiment.

Ces méthodes demandent l'utilisation de modèles de calcul, parfois analytiques, mais surtout numériques (modèles de zones ou modèles fondés sur la mécanique des fluides par exemple).

Quelques essais ont été menés sur des grandes halles [35] ou dans des installations d'essai avec de grands compartiments qui permettent de mesurer, en différents points, l'évolution de la température des feux naturels. Ces résultats expérimentaux sont utiles pour tous les cas d'incendies localisés dans de grands compartiments ou de grands volumes.

Des essais ont également été effectués sur des voitures afin d'estimer le besoin de protection de parcs de stationnement. La figure 5 présente une comparaison entre le débit de pyrolyse d'une voiture (type R18) des années 1980 et celui d'une voiture de même type des années 1990.

3. Évolution des températures des éléments de structure

3.1 Caractéristiques thermiques des matériaux

La connaissance des caractéristiques thermiques, principalement capacité thermique et conductivité thermique qui, pour tous les matériaux, dépendent de leur température, est nécessaire pour l'estimation du champ de température des éléments soumis à un incendie.

3.1.1 Acier

■ La **capacité thermique de l'acier** c_a (J/(kg · K)) est donnée par les formules suivantes, où θ_a est la température de l'acier (°C) (figure 6) :

- pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$$

- pour $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 721 + \frac{5\,371}{738 - \theta_a}$$

- pour $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 605 + \frac{7\,624}{\theta_a - 731}$$

- pour $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1\,200^\circ\text{C}$:

$$c_a = 650$$

■ La **conductivité thermique de l'acier** λ_a (W/(m · K)) est donnée par les formules suivantes où θ_a est la température de l'acier (°C) (figure 7) :

- pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a$$

- pour $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1\,200^\circ\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ (W/(m · K))}$$

3.1.2 Acier inoxydable

■ La **capacité thermique de l'acier inoxydable** c_a (J/(kg · K)) est donnée par (figure 8) :

$$c_a = 450 + 0,280 \times \theta_a - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3$$

■ La **conductivité thermique de l'acier inoxydable** λ_a (W/(m · K)) est donnée par (figure 9) :

$$\lambda_a = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta_a$$

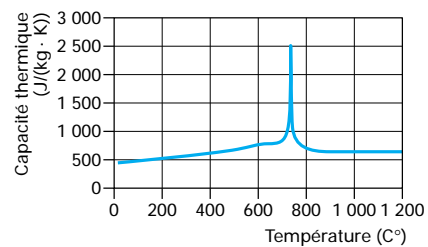


Figure 6 – Capacité thermique de l'acier en fonction de la température

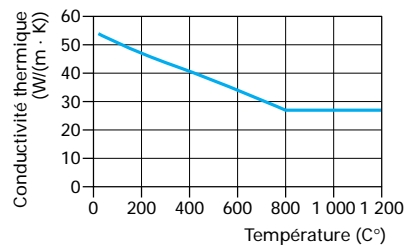


Figure 7 – Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température

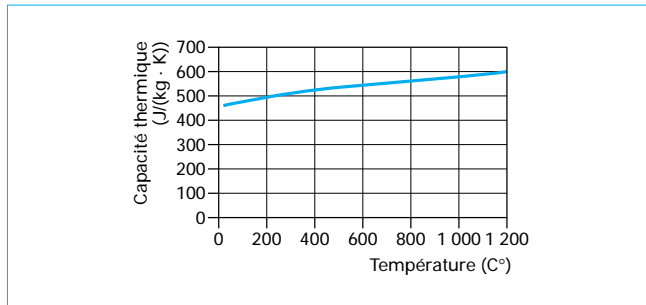


Figure 8 – Capacité thermique de l'acier inoxydable en fonction de la température

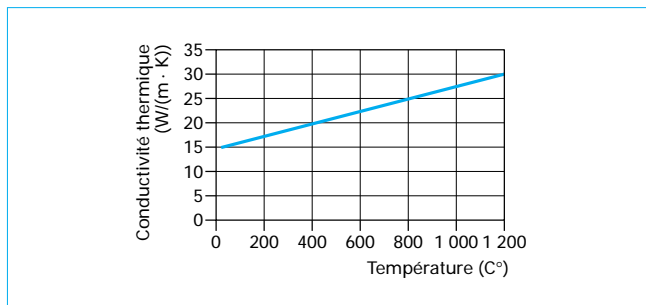


Figure 9 – Conductivité thermique de l'acier inoxydable en fonction de la température

3.1.3 Béton

■ La **masse volumique du béton** est voisine de $\rho_c = 2\,400\text{ kg/m}^3$ pour du béton normal et de $1\,600\text{ kg/m}^3$ pour du béton léger.

■ La **capacité thermique du béton** c_c (J/(kg · K)) de masse volumique courante ($\rho_c = 2\,400\text{ kg/m}^3$) est donnée par la formule suivante où θ_c est la température du béton (°C) :

— pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1\,200^\circ\text{C}$:

$$c_c = 900 + 80 (\theta_c/120) - 4 (\theta_c/120)^2$$

Il est possible de tenir compte de la présence d'eau libre dans le béton égale à la teneur en eau d'équilibre. Si cette valeur n'est pas disponible, la teneur en eau peut généralement être prise égale à 4 % de la masse du béton.

Dans le cas où la teneur en eau n'est pas explicitement prise en compte dans le modèle de transfert thermique, la fonction donnée pour la capacité thermique peut être complétée par un pic à 130°C , dont les deux branches prennent naissance à 100°C et à 200°C (cf. figure 10) :

— $c_c^* = 1\,875\text{ J/(kg · K)}$ pour une teneur en eau de 2 % de la masse du béton ;

— $c_c^* = 2\,750\text{ J/(kg · K)}$ pour une teneur en eau de 4 % de la masse du béton ;

— $c_c^* = 5\,600\text{ J/(kg · K)}$ pour une teneur en eau de 10 % de la masse du béton.

Le dernier cas de teneur en eau peut se produire pour des profils creux en acier remplis de béton.

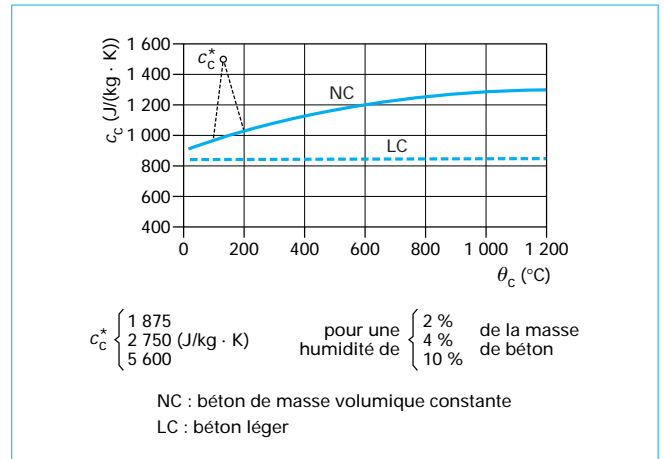


Figure 10 – Capacité thermique du béton de masse volumique courante (NC) et du béton léger (LC) en fonction de la température

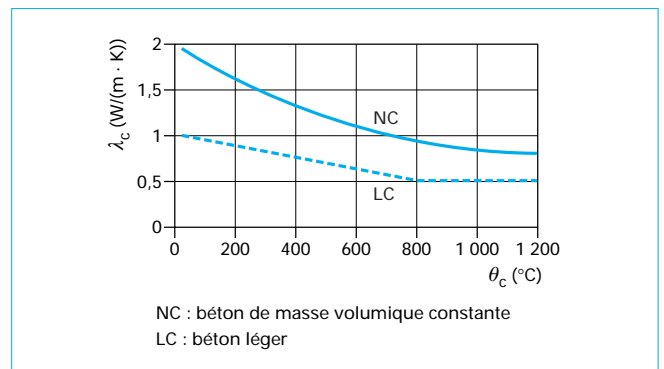


Figure 11 – Conductivité thermique du béton de masse volumique courante (NC) et du béton léger (LC) en fonction de la température

La conductivité thermique du béton de masse volumique courante est donnée par :

$$\lambda_c = 2 - 0,24 (\theta_c/120) + 0,012 (\theta_c/120)^2 \text{ (W/(m · K))}$$

pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1\,200^\circ\text{C}$

Les figures 10 et 11 montrent la variation de la capacité thermique et de la conductivité thermique du béton de densité courante en fonction de la température. Les caractéristiques du béton léger sont également indiquées.

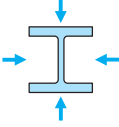
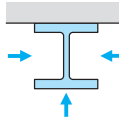
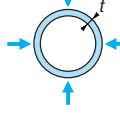
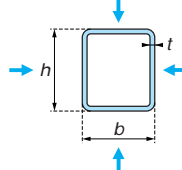
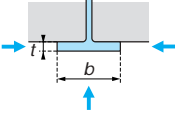
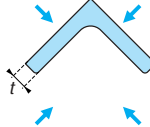
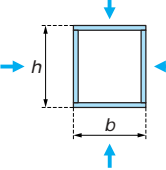
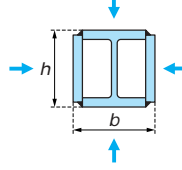
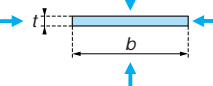
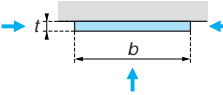
Les propriétés indiquées sont valables pour toutes les qualités de béton siliceux. Avec des qualités de béton calcaire, les mêmes paramètres peuvent être utilisés car ils permettent de se placer normalement en sécurité.

3.2 Éléments en acier non protégé

3.2.1 Éléments internes au bâtiment

Pour déterminer la vitesse d'échauffement des éléments de structure en acier, il y a lieu de prendre en compte la présence ou non d'une protection thermique et la position de l'élément par rapport au foyer d'incendie [2].

Tableau 4 – Formules pour le calcul du facteur de massiveté (A_m/V en m^{-1}) d'éléments en acier non protégés

Profilé exposé au feu sur tous les côtés	Profilé exposé au feu sur trois côtés	Profil creux circulaire exposé au feu sur tout le pourtour	Profil creux (ou caisson reconstitué soudé d'épaisseur constante) exposé au feu sur tous les côtés
$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Périmètre}}{\text{Aire de la section}}$ 	$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Périmètre exposé au feu}}{\text{Aire de la section d'acier}}$ 	$A_m/V = 1/t$ 	Si $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$ 
Semelle de profilé I exposée au feu sur trois côtés	Cornière (ou tout profilé ouvert d'épaisseur constante) exposée au feu sur tous les côtés	Caisson reconstitué soudé exposé au feu sur tous les côtés	Profilé I avec renforts formant caisson, exposé au feu sur tous les côtés
$A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ Si $t \ll b$: $A_m/V = 1/t_f$ 	$A_m/V = 2/t$ 	$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{Aire de la section d'acier}}$ 	$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{Aire de la section d'acier}}$ 
Plat exposé au feu sur tous les côtés		Plat exposé au feu sur trois côtés	
$A_m/V = 2(b + t)/(bt)$ si $t \ll b$: $A_m/V = 2/t$ 		$A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ si $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$ 	

Pour une distribution de température supposée uniforme dans la section, l'augmentation de température $\Delta\theta_{a,t}$ dans un élément en acier non protégé, situé à l'intérieur d'un local en feu, pendant un intervalle de temps Δt , peut être déterminée par :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{\text{net},d} \Delta t$$

avec A_m surface exposée de l'élément par unité de longueur (m^2),
 V volume de l'élément par unité de longueur (m^3),
 c_a capacité thermique de l'acier (de l'ordre 700 ($J/(kg \cdot K)$)),
 $\dot{h}_{\text{net},d}$ valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface (W/m^2),
 Δt intervalle de temps (s),
 ρ_a masse volumique de l'acier (kg/m^3).

La valeur de $\dot{h}_{\text{net},d}$ est obtenue à partir de l'ENV 1991-2-2.

Le facteur de massiveté (A_m/V) est le rapport entre la surface effective exposée au feu et le volume de l'acier par unité de longueur. Le tableau 4 donne quelques formules pour calculer le facteur de massiveté pour des profilés non protégés.

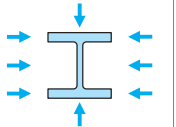
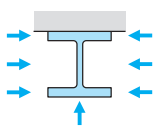
Les valeurs du facteur de massiveté des profilés laminés figurent dans de nombreuses publications [29] [36] ; quelques-unes sont données dans le tableau 5.

La figure 12 indique la température atteinte par des sections d'acier nu, de massivetés différentes après 15, 30, ..., 120 min d'incendie conventionnel [52].

3.2.2 Éléments externes au bâtiment

La température d'une structure située à l'extérieur d'un bâtiment (ENV 1993-1-2 – annexe C [2] [62]) est déterminée en tenant compte :

- du flux thermique rayonnant venant du compartiment ;
- des flux thermiques radiatif et convectif venant des flammes sortant des ouvertures ;
- des pertes de chaleur par rayonnement et par convection de la structure en acier vers l'atmosphère ambiante ;
- des dimensions et de la localisation des éléments de structure.

Tableau 5 – Exemples de facteurs de massiveté (m ⁻¹) pour quelques profilés courants		
Type de profil		
IPE 100	389	336
IPE 300	216	188
IPE 600	130	115
HEA 100	265	218
HEA 300	153	126
HEA 600	102	89
HEB 100	218	180
HEB 300	116	96
HEB 600	86	75
HEM 100	116	96
HEM 300	60	50
HEM 600	65	57
Profil creux carré 180 × 3,6	282	208
Profil creux carré 180 × 6,3	163	120
Profil creux carré 180 × 10	105	78

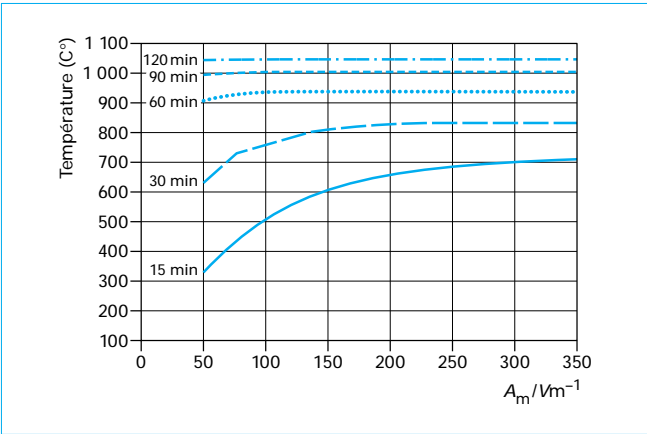


Figure 12 – Température de profilés en acier en fonction de leur facteur de massiveté (en m⁻¹) et de la durée d'échauffement sous incendie conventionnel

Des écrans thermiques peuvent être mis en place sur un, deux ou trois côtés d'un élément extérieur en acier pour le protéger du rayonnement.

L'une des hypothèses de cette méthode est de considérer un état stationnaire :

La température de l'élément en estimant la valeur d'équilibre entre le flux thermique reçu par les flammes et l'ouverture du compartiment incendié et celui perdu par rayonnement de l'élément de structure vers le milieu ambiant.

Cette hypothèse limite donc l'application de la méthode à des éléments de structure à faible inertie thermique.

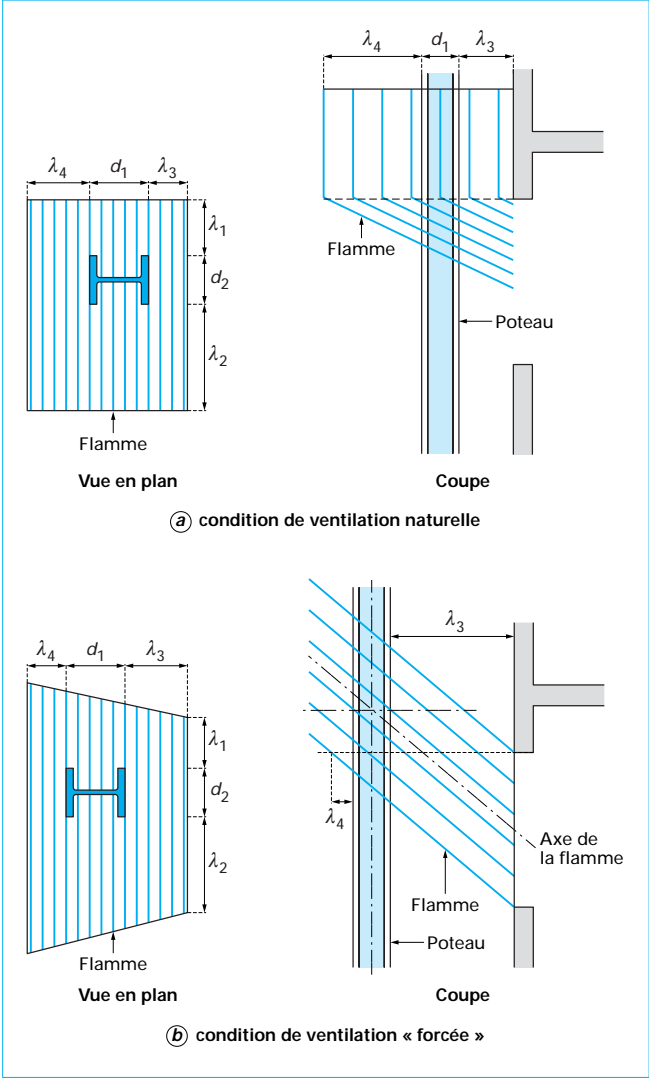


Figure 13 – Poteau dans les flammes

Tout élément de façade n'ayant aucun degré en résistance au feu doit être considéré comme une ouverture potentielle. Les flammes sont alors caractérisées par leur forme et leurs dimensions. Deux situations sont possibles :

- ventilation naturelle : compartiment n'ayant pas d'ouvertures sur l'extérieur sur deux faces opposées ;
- ventilation forcée : compartiment dont deux faces opposées ont des ouvertures possibles sur l'extérieur.

La figure 13 montre la forme des flammes dans les situations de ventilation naturelle ou de ventilation forcée et leur configuration par rapport à un poteau situé dans les flammes.

Dans le cas d'une ventilation naturelle, l'effet du vent parallèle à la façade est pris en compte en considérant trois situations (représentées sur la figure 14) :

- flamme non déviée (sortie perpendiculaire à la façade) ;
- flamme déviée de + 45° par rapport au plan de la façade ;
- flamme déviée de - 45° par rapport au plan de la façade.

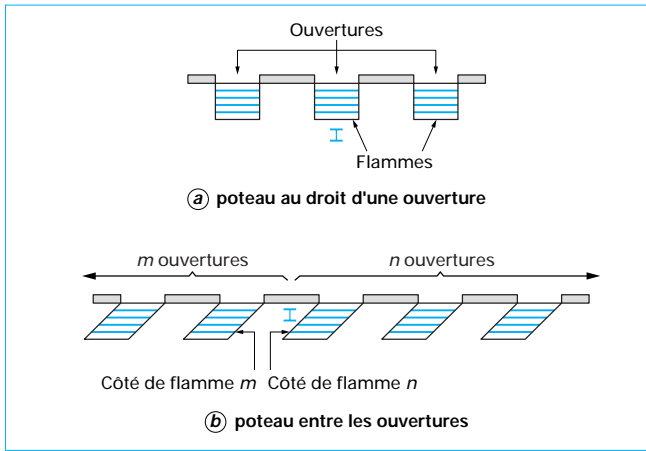
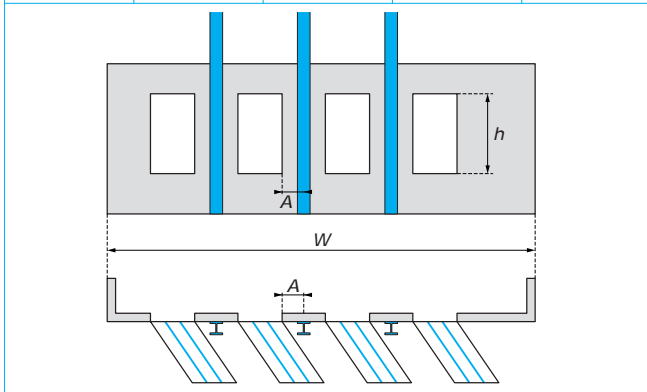


Figure 14 – Effet d'un vent latéral

Tableau 6 – Valeur minimale de la demi-largeur d'un trumeau pour avoir une température du poteau inférieure à sa température critique [37]

Hauteur de fenêtre h (m)	Valeurs minimales de A (m) pour un compartiment de largeur W de			
	9 m	18 m	36 m	72 m
1	1,4	2,3	2,3	2,3
2	0,8	1,1	1,1	1,1
3	0,6	0,8	1,0	1,0
4	0,3	0,7	0,9	0,9
5	0,3	0,7	0,8	0,8



La méthode prend en compte, pour la détermination de la température de l'élément et de la forme des flammes extérieures, la présence de déflecteur ou de balcon et d'écrans thermiques pouvant protéger une ou plusieurs faces d'un élément de structure extérieure.

Trois types d'éléments peuvent être étudiés :

- poteaux ;
- poutres parallèles à la façade ;
- poutres perpendiculaires à la façade.

La température de l'élément est déterminée à partir de sa position par rapport aux flammes : l'élément peut se trouver dans les flammes en tout ou partie ou bien hors des flammes.

Le tableau 6 donne, par exemple, la demi-largeur minimale A d'un trumeau, qui doit nécessairement être supérieure à la largeur du poteau, en fonction de la hauteur des fenêtres avoisinantes et de la largeur du compartiment, pour permettre un faible échauffement du poteau (c'est-à-dire inférieure à la température critique forfaitaire (cf. article [C 2 507] § 1.3.2).

3.3 Éléments protégés en acier

3.3.1 Par protection directe

L'augmentation de la température $\theta_{a,t}$ d'un élément en acier protégé, pendant un intervalle de temps Δt , soit $\Delta\theta_{a,t}$, peut être déterminée par :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \text{avec } \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

et

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

avec A_p/V facteur de massivité pour l'élément en acier isolé par un matériau de protection contre le feu (m^{-1}),

A_p surface concernée de la protection contre le feu par unité de longueur d'élément (m),

V volume de l'élément par unité de longueur (m^2),

c_a capacité thermique de l'acier ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$),

c_p capacité thermique du matériau de protection contre le feu ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$),

d_p épaisseur du matériau de protection contre le feu (m),

Δt intervalle de temps (s),

$\theta_{a,t}$ température de l'acier au temps t ,

$\theta_{g,t}$ température ambiante des gaz au temps t ,

$\Delta\theta_{g,t}$ augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps Δt ,

λ_p conductivité thermique (fonction de la température) du matériau de protection contre le feu ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),

ρ_a masse volumique de l'acier (kg/m^3),

ρ_p masse volumique du matériau de protection contre l'incendie (kg/m^3).

Le tableau 7 donne les facteurs de massivité de profilés protégés par des produits appliqués selon le contour (projetés et intumescents) et appliqués en caisson (produits en plaques), échauffés sur trois ou quatre côtés.

Des valeurs de facteurs de massivité pour quelques profilés laminés à chaud sont donnés dans le tableau 8.

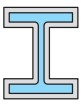
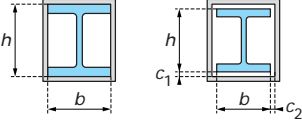
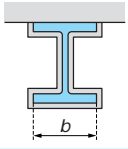
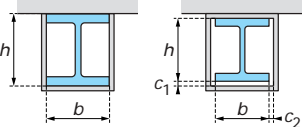
Il y a trois grands groupes de produits de protection [38] :

- produits projetés (fibreuse ou pâteux) ;
- produits en plaques ;
- peintures intumescents.

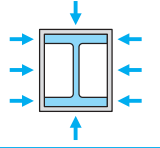
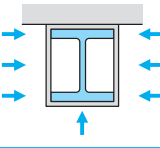
Les caractéristiques souhaitables pour ces systèmes de protection sont :

- une bonne isolation thermique, c'est-à-dire une faible conductivité thermique ou une forte capacité thermique ;
- une résistance mécanique aux chocs et aux impacts satisfaisante ;
- une bonne adhérence à l'élément pour éviter une chute du matériau de protection lors de l'augmentation de la température et de la déformation de l'élément de structure.

Tableau 7 – Formules pour le calcul du facteur de massiveté d'éléments en acier isolés par un matériau de protection contre le feu (1)

Cas	Facteur de massiveté (A_p/V)
	$\frac{\text{Périmètre de l'acier}}{\text{Aire de la section d'acier}}$
	$\frac{2(b+h)}{\text{Aire de la section d'acier avec } c_1 \text{ et } c_2 < h/4}$
	$\frac{\text{Périmètre de l'acier} - b}{\text{Aire de la section d'acier}}$
	$\frac{2h+b}{\text{Aire de la section d'acier avec } c_1 \text{ et } c_2 < h/4}$

(1) c_1 et c_2 représentent l'espace entre le profilé et la protection.**Tableau 8 – Exemples de facteur de massiveté de profilés protégés (en m^{-1})**

Type de profil		
IPE 100	301	248
IPE 300	167	139
IPE 600	105	91
HEA 100	185	138
HEA 300	105	78
HEA 600	79	65
HEB 100	154	115
HEB 300	81	60
HEB 600	67	56
HEM 100	85	65
HEM 300	43	33
HEM 600	51	42
Profil creux carré $180 \times 3,6$	282	208
Profil creux carré $180 \times 6,3$	163	120
Profil creux carré 180×10	105	78

Les principaux matériaux de protection utilisés sont :

— le **plâtre**, qui peut se présenter sous forme de plâtre à projeter, directement ou sur une armature (treillis, lattis, grillage) fixée au support, de carreaux et plaques pour encoffrage de poutres et poteaux. Il est possible d'améliorer sa tenue au feu en y incorporant des adjuvants (vermiculite, perlite) ;

— la **vermiculite**, roche minérale, et la **perlite**, roche volcanique, peuvent prendre une forme expansée sous l'action de la chaleur. On les trouve en vrac ou sous forme d'enduit à projeter, plaques et panneaux ;

— les **fibres de roche**, d'origine minérale, sont obtenues à partir d'un bain de roche en fusion. Mélangées à un liant, elles peuvent être projetées ou utilisées sous forme de panneaux ;

— les **produits intumescents** (peintures ou enduits) gonflent sous l'action de la chaleur (entre 180 et 300 °C) et forment une « meringue » épaisse qui retarde l'échauffement des éléments. Certaines peintures peuvent être appliquées à l'extérieur ou encore en atelier avant montage des structures ; le procédé comprend généralement trois couches : anti-rouille (primaire), peinture intumescence proprement dite et couche de finition.

La température d'échauffement d'un élément métallique protégé par des produits projetés ou des produits en plaques peut être déterminée :

— soit par des calculs, avec la formule précédente pour les géométries et conditions d'exposition au feu simples, ou à l'aide de modèles numériques aux éléments ou différences finis ;

— soit, pour les cas simples, par l'utilisation d'abaques livrés par les laboratoires agréés à la suite des essais de caractérisation [9] [13]. Ces abaques donnent l'épaisseur d'un matériau spécifique en fonction du facteur de massiveté, de la température de l'élément en acier et de la durée de résistance au feu nécessaire (figure 15).

Pour des structures protégées par des peintures intumescents, leur échauffement est déterminé principalement par des abaques construits à partir d'une procédure expérimentale particulière, étant donné la difficulté de connaître leurs propriétés physiques en fonction de la température (figure 16).

Exemple d'utilisation de ces abaques : pour un élément de facteur de massiveté de $150 m^{-1}$, d'une température critique de 600 °C (cf. article [C 2 507], § 1.3.2) et devant répondre à une stabilité au feu de 1 h, avec le matériau de protection de l'abaque de la figure 16, il faut 1 mm de produit. Pour la même température critique, mais avec un profilé ayant un facteur de massiveté de $315 m^{-1}$, il faudrait environ 2 mm de produit.

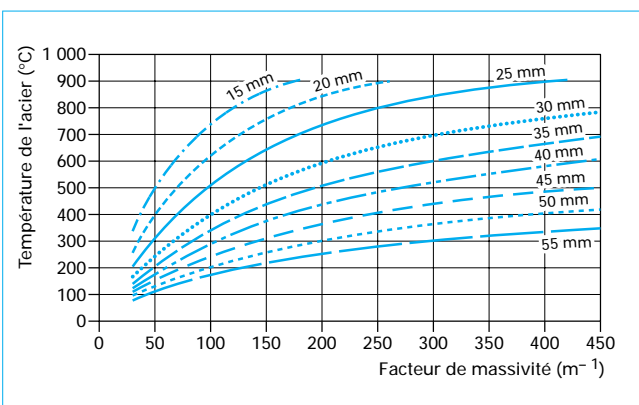


Figure 15 – Exemple d'abaque donnant la température de l'acier en fonction de l'épaisseur d'un type de protection après 1 h 30 d'incendie conventionnel en fonction du facteur de massiveté d'élément

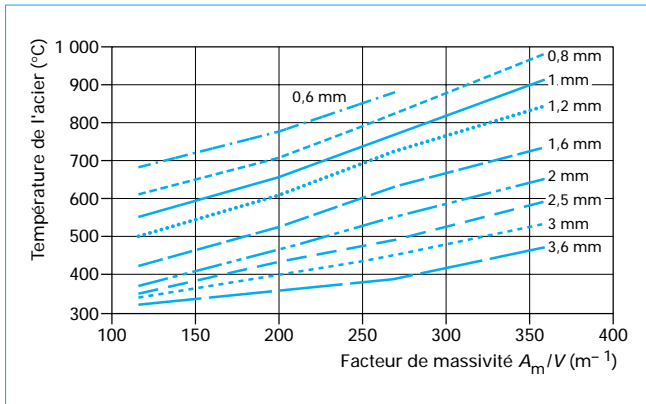


Figure 16 – Abaque donnant la température de profilés en acier en fonction de l'épaisseur d'une peinture intumescente, après 1 h d'incendie conventionnel

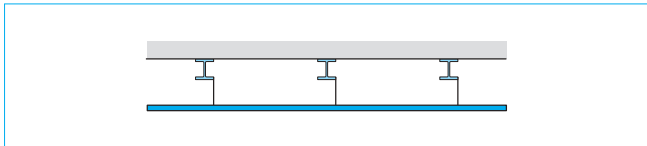


Figure 17 – Exemple de protection par plafond suspendu

Pour pouvoir être utilisés, les produits de protection doivent avoir fait l'objet d'essais de caractérisations validés par un procès-verbal valable dans le pays d'application.

3.3.2 Par écrans

L'échauffement d'éléments en acier peut également être réduit s'ils sont :

- dans un plénum délimité en partie supérieure par un plancher et en partie inférieure par un écran thermique horizontal (figure 17) ;
- dans un volume délimité de chaque côté par un écran thermique vertical.

Les propriétés et les performances des écrans thermiques doivent être déterminées par un essai.

■ **Protection par plafonds suspendus** : les essais doivent être effectués conformément à l'annexe II de l'arrêté du 3 août 1999 [12] ou de la future norme européenne ENV 13381-1 [14]. Le résultat de tels essais est exprimé en termes d'évolution de température dans le plénum (entre plafond et plancher où sont situés les éléments de structure) en fonction du temps (figure 18). À partir de la connaissance de cette température caractéristique, il est alors possible de déterminer celle des éléments structuraux en application des DTU ou Eurocodes (figure 19).

■ **Éléments en acier situés dans un volume délimité de chaque côté par un écran thermique vertical** : l'évolution de la température dans le volume doit être déterminée à partir d'un essai d'essai normalisé conforme aux dispositions de l'ENV 13381-2 [15].

3.3.3 Par eau

La protection par circulation d'eau interne dans les éléments creux ou par refroidissement externe est une solution technique acceptable s'il peut être prouvé qu'il y a une réserve suffisante

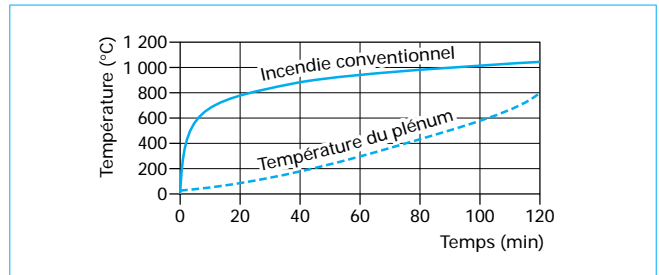


Figure 18 – Exemple d'évolution de température dans le plénum d'un plafond suspendu

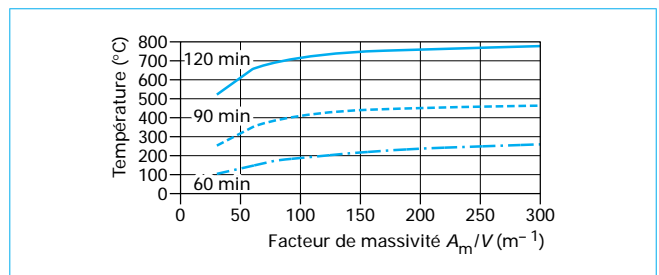


Figure 19 – Températures de profilés en acier situés dans le plénum (figure 18), après 60, 90 et 120 min

d'eau pour la durée prévue de l'incendie. Des méthodes de calcul existent pour déterminer le débit d'eau nécessaire, dans le cas du refroidissement externe [39]. Toutefois cette technique est peu employée en raison de son coût de mise en œuvre et de maintenance.

3.4 Éléments mixtes acier et béton

3.4.1 Planchers

Pour les planchers nervrés à bac en acier collaborant, le respect du critère d'isolation thermique (cf. § 1.2) est vérifié en comparant l'épaisseur efficace de la dalle à des valeurs minimales requises.

L'épaisseur efficace h_{eff} est donnée par la formule suivante :

$$h_{\text{eff}} = h_1 + 0,5h_2 \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_1 + \ell_3} \right) \quad \text{pour } h_2/h_1 \leq 1,5 \text{ et } h_1 > 40 \text{ mm}$$

$$h_{\text{eff}} = h_1 \left[1 + 0,75 \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_1 + \ell_3} \right) \right] \quad \text{pour } h_2/h_1 > 1,5 \text{ et } h_1 > 40 \text{ mm}$$

Les dimensions transversales de la dalle h_1 , h_2 , ℓ_1 , ℓ_2 et ℓ_3 sont indiquées (figure 20).

Le tableau 9 donne l'épaisseur efficace minimale de la dalle pour des degrés de résistance au feu usuels, h_3 étant l'épaisseur d'une éventuelle chape.

La relation entre la température θ_s des armatures et la durée d'échauffement est obtenue à partir du tableau 10 en employant la formule suivante :

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}}$$

avec u_1 , u_2 et u_3 distances (mm) axiales des armatures aux parois en tôle nervrée, comme indiqué (figure 21).

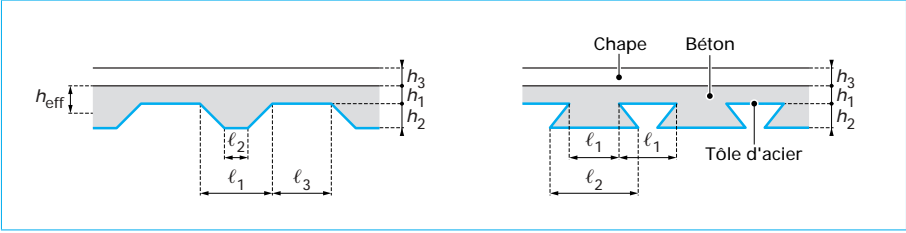


Figure 20 – Dimensions transversales des dalles

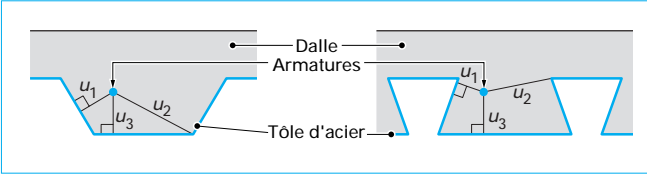


Figure 21 – Position des armatures

Tableau 9 – Épaisseur efficace minimale en fonction de la résistance au feu normalisé (entre 30 et 240 min)	
Résistance au feu normalisé	Épaisseur efficace h_{eff} minimale (mm)
I30	60
I60	80
I90	100
I120	120
I180	150
I240	175

Tableau 10 – Relation durée d'incendie – température des armatures	
Résistance au feu normalisée	Température des armatures (°C)
R60	$\theta_s = 1\,170 - (275 + 65\, u_3/h_2)\, z$
R90	$\theta_s = 1\,255 - (255 + 65\, u_3/h_2)\, z$
R120	$\theta_s = 1\,330 - (235 + 65\, u_3/h_2)\, z$
R180	$\theta_s = 1\,375 - (200 + 65\, u_3/h_2)\, z$
R240	$\theta_s = 1\,390 - (165 + 65\, u_3/h_2)\, z$

Si une protection thermique est appliquée sous la tôle d'acier nervurée, on considère que le critère de résistance mécanique « R » est satisfait tant que la température de la tôle d'acier est inférieure ou égale à 350 °C. Les caractéristiques de protections répondant à ce critère sont obtenues, par exemple, suite à des essais selon la norme ENV 13381-5 [16].

3.4.2 Poutres

Les poutres en acier avec dalles (béton ou mixtes) collaborantes sont évaluées en utilisant le modèle d'échauffement présenté dans l'Eurocode 3 – 1.2 (cf. § 3.2.1 et 3.3). Pour les poutres avec béton entre les semelles (cf. article [C 2 507] § 1.4), la méthode de calcul présentée dans l'Eurocode 4 – 1.2 [3] permet de déterminer la résistance résiduelle après certaines durées d'exposition à l'incendie conventionnel.

3.4.3 Poteaux

Dans la grande majorité des cas, l'exposition à l'incendie conventionnel est prise en compte sur toutes les faces du poteau et l'on suppose généralement une répartition uniforme de la température sur la hauteur du poteau. En revanche, il doit être tenu compte de la répartition de la température dans le béton, dans la section droite, qui présente une forme parabolique dont la valeur minimale est au centre de la section.

Par conséquent, pour estimer le champ de température en section de ces poteaux mixtes, il faut utiliser des modèles de transfert thermique en deux dimensions. Dans la pratique, cela signifie que l'on doit effectuer une analyse thermique particulière pour chaque section concernée. Toutefois, il existe des documents qui regroupent des résultats de calcul pour de nombreux cas courants [10].

Si une protection thermique est appliquée sur le tube acier, on considère que le critère de résistance mécanique « R » est satisfait tant que la température de l'acier est inférieure ou égale à 350 °C. Les caractéristiques des protections répondant à ce critère sont obtenues, par exemple, suite à des essais selon la norme ENV 13381-6 [17].

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Désignation
A	m	distance entre l'axe d'un poteau et le nu extérieur d'un meneau (cas des poteaux extérieurs)
A_f	m ²	surface au sol du compartiment en feu
A_m	m ²	surface exposée d'un élément en acier par unité de longueur
A_m/V	m ⁻¹	facteur de massiveté d'un élément en acier non protégé
A_p	m ²	surface exposée interne de la protection par unité de longueur
A_p/V	m ⁻¹	facteur de massiveté pour un élément en acier isolé par un matériau de protection contre le feu
A_t	m ²	surface totale des parois
A_v	m ²	surface des ouvertures verticales
b	m	largeur de la section droite d'un profil en acier
b	$\sqrt{\rho c \lambda}$	
c	J/(kg · K)	capacité thermique des parois
c_1 ou c_2	m	espace entre un profil en acier et une protection
c_a	J/(kg · K)	capacité thermique de l'acier
c_c	J/(kg · K)	capacité thermique du béton
c_p	J/(kg · K)	capacité thermique d'un matériau de protection contre le feu
d_p	m	épaisseur d'un matériau de protection contre le feu
E_d		valeur de calcul des effets des actions à partir de la combinaison fondamentale selon l'Eurocode 1, partie 1 (y compris les coefficients partiels de sécurité)
$E_{fi,d,t}$		valeur de calcul des effets des actions correspondant à la situation d'incendie
G_k		valeur caractéristique de l'action permanente
h	m	hauteur des ouvertures verticales
h	m	hauteur de fenêtre
h	m	hauteur de la section droite d'un profil en acier
h_1	m	épaisseur de béton au-dessus des ondes d'un plancher nervuré

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Désignation
h_2	m	hauteur d'onde d'un plancher nervuré
h_3	m	épaisseur d'une chape au-dessus d'un plancher nervuré
h_{eff}	m	épaisseur efficace d'un plancher nervuré
$h_{net,c}$	W/m ²	flux convectif par unité de surface
$\dot{h}_{net,d}$	W/m ²	densité de flux thermique par unité de temps
$h_{net,r}$	W/(m ² · K)	flux radiatif par unité de surface de l'élément
ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3	m	dimensions caractéristiques d'une tôle profilée en acier
O	m ^{1/2}	facteur de ventilation ($A_v \sqrt{\bar{h}} / A_t$)
$Q_{f,k}$	kg	densité de charge incendie d'équivalent bois rapportée à la surface au sol
$Q_{k,1}$		caractéristique d'une (la principale) action variable
$Q_{k,i}$		caractéristique de l'action variable i
$q_{t,d}$	MJ/m ²	valeur de calcul de la charge incendie rapportée à la surface totale des parois
$R_{fi,d,t}$		résistance de calcul correspondante de l'élément en acier ou mixte pour la situation d'incendie de calcul, au temps t
t	min	temps
t	m	épaisseur d'une semelle ou d'un plat en acier
t^*		temps corrigé ($t^* = t \cdot I^*$)
u_1, u_2, u_3	mm	distances minimales d'un acier d'armature à chacun des trois côtés exposés au feu d'une onde de plancher nervuré
V	m ³	volume d'un élément par unité de longueur
W	m	largeur d'un compartiment (cas des poteaux extérieurs)
z	mm	paramètre dépendant de u_1, u_2, u_3
α_c	W/(m ² · K)	coefficient transfert thermique par convection
$\gamma_{GA} = 1$		facteur partiel de sécurité pour situation accidentelle
Γ		$\frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2}$

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Désignation
$\Delta\theta_{a,t}$	K	augmentation de température de l'acier pendant un intervalle de temps
$\Delta\theta_{g,t}$	°C	augmentation de température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps Δt
Δt	s	intervalle de temps
ε_f		émissivité du four
ε_m		émissivité du matériau
ε_{res}		émissivité résultante
η_{fi}		facteur de réduction du niveau de chargement en situation d'incendie
λ	W/(m · K)	conductivité thermique des parois
λ_a	W/(m · K)	conductivité thermique de l'acier
λ_c	W/(m · K)	conductivité thermique du béton
λ_p	W/(m · K)	conductivité thermique d'un matériau de protection contre le feu
Φ		facteur de vue
$\Psi_{1,1}$		combinaison de coefficients pour les bâtiments selon l'ENV 1991-1-1

Notations et symboles		
Symbole	Unité	Désignation
$\Psi_{2,i}$		combinaison de coefficients pour les bâtiments selon l'ENV 1991-1-1
ρ	kg/m ³	masse volumique des parois
ρ_c	kg/m ³	masse volumique du béton
ρ_p	kg/m ³	masse volumique d'un matériau de protection contre l'incendie
θ_a	°C	température de l'acier
$\theta_{a,t}$	°C	température de l'acier au temps t
θ_c	°C	température du béton
θ_g	°C	température des gaz au voisinage de l'élément
$\theta_{g,t}$	°C	température ambiante des gaz au temps t
θ_m	°C	température de surface de l'élément
θ_r	°C	température de rayonnement représentatif de l'environnement de l'élément (généralement prise égale à la température des gaz θ_g)
θ_s	°C	température d'armature