

ICS 13.220.50; 91.010.30; 91.080.10

Version Française

Eurocode 9: Calcul des structures en alliage d'aluminium - Partie 1-2: Calcul du comportement au feu

Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von
Aluminiumbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln -
Tragwerksbemessung für den Brandfall

Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-2:
General rules - Structural fire design

La présente Prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 26 octobre 1997 comme norme expérimentale pour application provisoire.

La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en Norme européenne.

Il est demandé aux membres du CEN d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.



COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

Centre de Gestion: rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

Sommaire

Avant-propos.....	3
1 Généralités.....	6
1.1 Objet.....	6
1.2 Distinction entre principes et règles d'application.....	6
1.3 Références normatives.....	7
1.4 Définitions.....	7
1.5 Symboles.....	9
1.6 Unités.....	10
2 Principes de base et règles.....	11
2.1 Performances exigées.....	11
2.2 Actions.....	11
2.3 Valeurs de calcul des propriétés des matériaux.....	11
2.4 Méthodes de justification.....	12
3 Propriétés des matériaux.....	14
3.1 Généralités.....	14
3.2 Caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium.....	14
3.3 Propriétés thermiques.....	16
3.4 Matériaux de protection contre le feu.....	18
4 Calcul du comportement au feu.....	18
4.1 Généralités.....	18
4.2 Modèles de calcul simplifiés.....	19
4.3 Méthodes de calcul générales.....	28
Annexe A (informative) Propriétés des alliages d'aluminium ne figurant pas dans l'ENV 1999-1-1.....	30
Annexe B (informative) Transfert thermique aux structures extérieures en aluminium.....	31
B.1 Généralités.....	31
B.2 Poteaux hors des flammes.....	34
B.3 Poutre hors des flammes.....	40
B.4 Poteau dans les flammes.....	43
B.5 Poutre totalement ou partiellement dans les flammes.....	46
Annexe C (informative) Facteur de forme.....	50

Avant-propos

La présente prénorme européenne a été élaborée par le Comité Technique CEN/TC 250 "Eurocodes structuraux" dont le secrétariat est tenu par la BSI.

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus d'annoncer cette prénorme européenne: Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

Objectifs des Eurocodes

Les Eurocodes structuraux constituent un ensemble de normes pour le calcul structural et géotechnique des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

Ils sont destinés à servir de documents de référence pour :

- a) prouver la conformité des bâtiments et des ouvrages de génie civil aux exigences essentielles de la Directive sur les Produits de Construction (DPC) ;
- b) servir de cadre pour établir des spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction.

Ils ne traitent de l'exécution et du contrôle que dans la mesure où il est nécessaire de préciser la qualité des produits de construction et le niveau de réalisation nécessaire pour être conforme aux hypothèses adoptées dans les règles de calcul.

Jusqu'à ce que l'ensemble des spécifications techniques harmonisées concernant les produits et les méthodes de contrôle de leurs performances soient disponibles, certains Eurocodes structuraux traitent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme Eurocodes

La Commission des Communautés Européennes (CCE) a initié le travail d'élaboration d'un ensemble de règles techniques harmonisées concernant le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil, règles destinées, au début, à être utilisées en alternative aux différents règlements en vigueur dans les divers Etats Membres et à les remplacer ultérieurement. Ces règles techniques sont connues sous le nom d'« Eurocodes structuraux ».

En 1990, après consultation de ses Etats Membres, la CCE a transféré au CEN la charge de poursuivre le travail d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes structuraux, et le secrétariat de l'AELE a accepté de soutenir le CEN dans son travail.

Le Comité technique CEN/TC 250 est responsable de tous les Eurocodes structuraux.

Programme Eurocodes

Le travail est en cours sur les Eurocodes structuraux suivants, chacun étant généralement constitué de plusieurs parties :

ENV 1991	Eurocode 1	Bases de calcul et actions sur les structures
ENV 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton
ENV 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier
ENV 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier-béton
ENV 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois
ENV 1996	Eurocode 6	Calcul des structures en maçonneries
ENV 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique
ENV 1998	Eurocode 8	Résistance des structures aux séismes
ENV 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en alliage d'aluminium.

Des sous-comités séparés, chargés des différents Eurocodes énoncés ci-dessus, ont été constitués par le CEN/TC 250.

Cette partie de l'Eurocode structural concernant la conception et le dimensionnement des structures en alliage d'aluminium, est publiée par le CEN comme prénorme européenne (ENV) pour une durée initiale de trois ans.

Cette prénorme européenne est destinée à une application expérimentale dans le cadre du dimensionnement des bâtiments et des ouvrages de génie civil relevant du domaine d'application défini en 1.1, et au recueil d'observations.

Dans deux ans environ, les Membres du CEN seront invités à formuler des observations officielles qui seront prises en compte pour déterminer les actions futures.

En attendant, les réactions et les observations sur cette prénorme européenne devront être adressées au secrétariat du sous-comité CEN/TC 250/SC 9 à l'adresse suivante :

Secrétariat du CEN/TC 250/SC 9
c/o Norwegian Council for Building Standardization
Postboks 129 Blindern
N-0314 OSLO

ou à votre organisme national de normalisation.

Document d'Application Nationale (DAN)

Etant données les responsabilités des autorités dans les Etats Membres en matière de sécurité, santé et autres points couverts par les exigences essentielles de la DPC, des valeurs indicatives ont été attribuées à certains éléments de sécurité dans cette ENV qui sont identifiées par [...]. Il incombe aux autorités de chaque Etat Membre d'attribuer des valeurs définitives à ces éléments de sécurité.

Nombre de normes d'accompagnement harmonisées, y compris les Eurocodes donnant les valeurs des actions à prendre en compte ainsi que les mesures requises pour la protection contre l'incendie, ne seront pas disponibles au moment de la publication de cette prénorme européenne. Il est par conséquent prévu qu'un « Document d'Application Nationale » (DAN) donnant les valeurs définitives des éléments de sécurité, faisant référence aux normes d'accompagnement compatibles et précisant les directives nationales d'application de cette prénorme européenne, soit publié par chaque Etat Membre ou son organisme de normalisation.

Il est prévu que cette prénorme européenne sera utilisée conjointement avec le DAN en vigueur dans le pays où est situé le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil.

Points spécifiques à cette prénorme

Généralités

L'objet de l'Eurocode 9 est défini en 1.1.1 de l'ENV 1999-1-1 et l'objet de la présente partie de l'Eurocode 9 est défini en 1.1.

Lors de l'utilisation de la présente prénorme européenne dans la pratique, il convient de prêter une attention particulière aux hypothèses et conditions sous-jacentes indiquées en 1.4 de la Partie 1-1.

Lors de l'élaboration de la présente prénorme européenne, des documents de base ont été établis, qui contiennent des observations et des justifications relatifs à certaines dispositions de la prénorme européenne.

Annexes

La présente prénorme européenne est complétée par trois annexes, toutes de nature informative.

Notion de norme de référence

Lors de l'utilisation de cette prénorme européenne, il est nécessaire de faire référence à diverses normes CEN ou ISO. Ces dernières servent à définir les caractéristiques de produit et les procédés jugés par hypothèse applicables dans la formulation des règles de calcul.

Cette prénorme européenne mentionne certaines « Normes de référence ». Lorsqu'aucune norme CEN ou ISO n'est encore disponible, il convient de consulter le Document d'Application Nationale pour connaître la norme à utiliser. Il est présupposé que seules les nuances et qualités données dans la section 3 du PrENV 1999-1-1 seront utilisées pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil dimensionnés selon la présente prénorme européenne.

Exigences de sécurité

Les objectifs généraux de la protection contre l'incendie sont de limiter les risques auxquels sont exposés en cas d'incendie les personnes, individuelles ou en groupe, les biens avoisinants et, lorsque cela est exigé, les biens directement exposés.

Les Eurocodes Structuraux traitent des aspects spécifiques de la protection incendie passive en termes de dimensionnement de structures et de parties de structures en vue d'assurer une capacité portante adéquate et de limiter la propagation du feu si cela est nécessaire.

Les fonctions et les niveaux de performance exigés sont généralement spécifiés par les autorités nationales – le plus souvent en termes de degré de résistance à l'incendie normalisé. Là où l'ingénierie du feu est acceptée pour justifier les mesures de protection passives et actives, les exigences des autorités peuvent être moins prescriptives et permettre des stratégies alternatives.

Cette Partie 1-2, avec l'ENV 1991-2-2, fournit les compléments à l'ENV 1999-1-1 nécessaires pour que les structures dimensionnées selon cet ensemble d'Eurocodes Structuraux satisfassent également aux exigences de résistance au feu.

Des exigences supplémentaires concernant, par exemple :

- la possibilité d'installer et d'entretenir des systèmes de sprinkleurs ;
- les conditions d'occupation du bâtiment ou d'un compartiment d'incendie ;
- l'emploi de matériaux d'isolation ou de revêtement agréés, y compris leur entretien ;

ne figurent pas dans ce document, car elles font l'objet de spécifications émanant de l'autorité nationale.

Les structures en alliage d'aluminium pour lesquelles une résistance au feu est exigée doivent normalement être protégées. La présente Partie 1-2 comporte cependant aussi des règles de calcul pour les structures en alliage d'aluminium non protégées exposées au feu. Ces dernières peuvent être utilisées pour :

- les structures extérieures (les parois et le toit du bâtiment protègent la structure) ;
- les conditions d'occupation du bâtiment ou d'un compartiment d'incendie ;
- les structures exposées à une charge thermique inférieure à la charge normalisée.

Méthodes de calcul

Une méthode analytique complète pour le calcul du comportement au feu de structures prendra en compte le comportement du système structural à température élevée, l'exposition potentielle à la chaleur et les effets bénéfiques des systèmes de protection incendie actifs, ainsi que les incertitudes propres à ces trois facteurs et l'importance de la structure (conséquences d'une défaillance).

A ce jour, il est possible de définir une procédure pour déterminer la performance adéquate englobant certains de ces paramètres, si ce n'est tous, et de démontrer que la structure, ou ses composants, donnera une réponse correcte dans un incendie réel. Cependant, en Europe, la procédure la plus couramment utilisée reste celle qui est fondée sur les résultats d'essais au feu normalisé. Les systèmes de classement des règlements nationaux, qui demandent des durées spécifiques de résistance au feu, prennent en compte les facteurs précédents et leurs incertitudes.

Etant donné les limites de la méthode d'essai, d'autres essais ou analyses peuvent être utilisés. Néanmoins, les résultats d'essais à l'incendie normalisé constituent le corps des données pour les méthodes de calcul du comportement au feu de structures. Par conséquent, cette prénorme européenne traite principalement du calcul de la résistance à l'incendie normalisé.

Aides au dimensionnement

Des modèles de calcul simplifié pour les structures en alliage d'aluminium sont donnés dans ce document et, par conséquent, des données tabulées ne sont pas incluses. Il est escompté que des tableaux et d'autres aides au dimensionnement, fondés sur les modèles de calcul donnés dans cette prénorme européenne, seront préparés par des organismes extérieurs concernés.

1 Généralités

1.1 Objet

(1)P La présente prénorme européenne traite du calcul de structures en alliage d'aluminium en cas de situation accidentelle d'exposition au feu ; elle est conçue pour être utilisée conjointement avec l'ENV 1993-1-1:1997 et l'ENV 1991-2-2:1995. La présente prénorme ne fait qu'identifier les différences avec le calcul à température normale, ou lui apporte des compléments.

(2)P Ce document ne traite que des méthodes passives de protection contre l'incendie. Les méthodes actives ne sont pas traitées.

(3)P Cette prénorme européenne s'applique à des structures pour lesquelles, pour des raisons de sécurité incendie globale, il faut éviter une ruine prématurée lors d'une exposition au feu (fonction porteuse).

(4)P Ce document ne s'applique qu'à des structures ou des parties de structures qui entrent dans le domaine d'application de l'ENV 1999-1-1 et qui sont dimensionnées en conséquence.

(5)P Les méthodes présentées dans ce document sont applicables à n'importe quel alliage d'aluminium spécifié en 3.1 (1).

(6)P Les propriétés de l'alliage d'aluminium données dans ce document s'appliquent aux nuances d'alliage d'aluminium suivantes :

EN AW-5052 EN AW-5454 EN AW-6063

EN AW-5083 EN AW-6061 EN AW-6082

1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1) En fonction du caractère de chaque clause, une distinction est faite dans cette partie entre les principes et les règles d'application.

(2) Les principes comprennent :

- des énoncés généraux et des définitions pour lesquels il n'y a pas d'alternative ;
- des exigences et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée, sauf mention spécifique.

(3) Les principes sont repérés par la lettre P suivant le numéro du paragraphe.

(4) Les règles d'application sont généralement des règles reconnues qui suivent les principes et satisfont leurs exigences.

(5) Il est permis d'utiliser d'autres règles de calcul que celles indiquées dans l'Eurocode, à condition de montrer que ces autres règles sont en accord avec les principes correspondants et sont au moins équivalentes en termes de résistance, d'aptitude au service et de durabilité de la structure.

(6) Dans le présent Eurocode, les règles d'application sont repérées par un nombre entre parenthèses, comme dans ce paragraphe.

1.3 Références normatives

(1) Cette prénorme européenne contient, par référence datée ou non datée, des dispositions d'autres publications. Ces références aux normes sont faites aux endroits appropriés du texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication en référence s'applique.

(2)(P) Il est fait référence aux normes suivantes du CEN :

EN 1363-1, *Essais de résistance au feu — Partie 1 : Exigences générales.*

EN 1363-2, *Essais de résistance au feu — Partie 2 : Modes opératoires de substitution ou additionnels.*

ENV 1991-1:1994, *Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 1 : Bases du calcul.*

ENV 1991-2-2:1994, *Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-2 : Actions sur les structures — Actions sur les structures exposées au feu.*

ENV 1999-1-1:1997, *Eurocode 9 : Conception et dimensionnement des structures en aluminium — Partie 1 : Règles générales — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.*

ENV 1999-2:1997, *Eurocode 9 : Conception et dimensionnement des structures en aluminium — Partie 2 : Structures sensibles à la fatigue.*

NOTE Un prENV «Essais au feu des éléments de construction de bâtiment » est en préparation. Les parties suivantes sont importantes pour la présente prénorme européenne :

Partie 0 : Méthode d'essais pour la détermination de la contribution à la résistance au feu des éléments de construction ; exigences générales des propriétés des matériaux de protection contre le feu.

Partie 2 : Méthode d'essais pour la détermination de la contribution à la résistance au feu des éléments de construction par écrans protecteurs.

(3) Il est fait référence à la norme ISO suivante :

ISO 1000:1981, *Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.*

1.4 Définitions

(1)P Les définitions suivantes s'appliquent pour l'utilisation de cette pré-norme européenne :

1.4.1

actions indirectes du feu

dilatations et déformations d'origine thermique provoquant des forces et des moments

1.4.2

actions thermiques

actions sur la structure représentées par le flux thermique net agissant sur les éléments

1.4.3

analyse par élément (en cas d'incendie)

analyse thermique et mécanique d'un élément de structure exposé au feu dans laquelle l'élément est considéré individuellement, avec des conditions aux appuis et aux limites appropriées. Les actions indirectes du feu ne sont pas prises en compte, exceptées celles résultant des gradients thermiques

1.4.4

analyse par sous-ensembles (en cas d'incendie)

analyse de parties de structure exposée au feu dans laquelle chaque partie concernée est considérée individuellement, avec des conditions d'appuis et aux limites appropriées. Les actions indirectes du feu dans le sous-ensemble sont prises en compte, mais non les interactions avec les autres parties de structure dépendantes du temps

1.4.5

analyse globale de structure (en cas d'incendie)

analyse de la structure complète lorsque la structure entière, ou seulement une partie de celle-ci, est soumise au feu. Les actions indirectes du feu sont prises en considération dans l'ensemble de la structure

1.4.6

analyse thermique

méthode de détermination de l'évolution de la température dans des éléments à partir des actions thermiques et des propriétés thermiques des matériaux constituant ces éléments et, éventuellement, des surfaces de protection

1.4.7

calcul à température normale

calcul à l'état limite ultime à température ambiante selon l'Eurocode 9 : Partie 1-1 pour la combinaison fondamentale de charge

1.4.8

coefficient de transfert thermique par convection

coefficient relatif au flux thermique entrant par convection dans l'élément en fonction de la différence entre la température des gaz entourant la surface concernée de l'élément et la température de cette surface

1.4.9

compartiment

espace à l'intérieur d'un bâtiment, s'étendant sur un ou plusieurs niveaux et délimité par des éléments séparatifs tels que l'extension du feu au delà soit empêchée pendant l'exposition au feu considérée

1.4.10

courbes température-temps

températures des gaz à proximité des surfaces de l'élément en fonction du temps. Elles peuvent être

1.4.11

nominales

courbes conventionnelles adoptées pour la classification et la vérification de la résistance au feu ; par exemple, la courbe température-temps normalisée

1.4.12

paramétrées

déterminées à partir de modèles de feu et de paramètres physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur du compartiment

1.4.13

courbe température-temps normalisée

courbe température-temps nominale conforme à l'ENV 1991-2-2:1995

NOTE Une expression de la courbe température-temps normalisée est donnée dans l'ENV 1991-2-2:1995.

1.4.14

élément extérieur

élément de structure situé à l'extérieur du bâtiment, susceptible d'être exposé au feu sortant par les ouvertures de la façade

1.4.15

élément protégé

élément pour lequel des dispositions sont prises pour limiter dans cet élément l'élévation de température due au feu

1.4.16

éléments de structure

éléments porteurs d'une structure, y compris les contreventements

1.4.17

exposition au feu normalisé

exposition aux gaz d'un four dont la température varie en fonction du temps selon la courbe température-temps normalisée

1.4.18

facteur de forme

angle solide à l'intérieur duquel le milieu rayonnant peut être vu d'un point particulier de la surface de l'élément, divisé par 2π .

NOTE Des informations sur les facteurs de forme sont données dans l'annexe C.

1.4.19

facteur de massivité

pour un élément en alliage d'aluminium non protégé ou avec protection suivant le contour, rapport entre la surface exposée au feu et le volume d'aluminium ; pour des éléments avec protection rapportée, rapport entre la surface interne de la protection exposée et le volume d'aluminium

1.4.20

feu de calcul

développement d'un feu donné pris comme hypothèse pour les calculs

1.4.21

fonction porteuse

aptitude d'une structure ou d'un élément à résister aux actions pendant l'exposition au feu donné, selon des critères définis

1.4.22

matériau de protection contre le feu

matériau pour lequel il a été démontré par des essais au feu conformes à des ENV et prENV, qu'il est capable de rester en place et de procurer une isolation thermique suffisante pendant l'exposition à un feu donné

NOTE Voir 1.3.

1.4.23

résistance effective à la charge d'épreuve de 0,2 %

pour une température donnée, le niveau de contrainte auquel le rapport contrainte-déformation est tronqué pour donner un plateau d'élasticité (de calcul)

1.4.24

résistance au feu

aptitude d'une structure, d'une partie de structure ou d'un élément de structure à remplir les fonctions exigées (fonction porteuse et/ou séparative) pour une exposition au feu donnée

1.4.25

résistance au feu normalisé

résistance au feu pour l'exposition au feu normalisé pendant une durée définie

NOTE Les exigences de résistance au feu sont généralement exprimées en termes de durée, telles que 30, 60 minutes ou plus.

1.4.26

température critique de l'alliage d'aluminium

température à laquelle la ruine est présumée se produire dans un élément en alliage d'aluminium de température uniforme et pour un niveau de chargement donné

1.5 Symboles

(1) Outre les symboles donnés dans l'ENV 1999-1-1, les symboles suivants sont employés :

A_M	surface d'un élément par unité de longueur (m^2/m)
A_p	surface interne de la protection contre le feu par unité de longueur d'élément (m^2/m)
E_{al}	module d'élasticité de l'alliage d'aluminium dans le calcul à température normale (MPa)
$E_{al,\theta}$	pente du domaine élastique linéaire de l'alliage d'aluminium à température élevée θ_{al} (MPa)
$E_{fi,d}$	valeur de calcul de l'effet des actions en situation d'incendie

$R_{d,\theta}$	résistance de calcul à température élevée et uniforme du matériau
$R_{fi,d}$	résistance de calcul en situation d'incendie
$R_{fi,d,t}$	résistance de calcul en situation d'incendie, au temps t
T	température (K) (cf. θ température (°C))
V	volume d'un élément par unité de longueur (m^3/m)
$X_{fi,d}$	propriété de calcul d'un matériau en situation d'incendie
X_k	valeur caractéristique d'une propriété d'un matériau
$X_{k,\theta}$	valeur caractéristique d'une propriété d'un matériau à une température élevée θ
c	chaleur spécifique (J/kgK)
d_p	épaisseur d'un matériau de protection contre le feu (m)
$f_{0,2}$	limite de proportionalité de l'alliage d'aluminium
$f_{p,\theta}$	limite de proportionalité de l'alliage d'aluminium à température élevée θ_{al} (MPa)
$f_{y,\theta}$	limite d'élasticité efficace de l'alliage d'aluminium à température élevée θ_{al} (MPa)
$h_{net,d}$	valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface (W/m^2)
k_θ	valeur relative d'une propriété de l'alliage d'aluminium (contrainte ou déformation) à une température élevée θ_{al}
$k_{0,2,\theta}$	rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% à température élevée θ_{al}
l	longueur à 20°C (m)
Δl	dilatation thermique (m)
t	temps écoulé d'exposition au feu (min)
Δt	intervalle de temps (s)
η_{fi}	facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie
θ	température (°C) (cf. t température (K))
κ	facteur d'adaptation
λ	conductivité thermique (W/mK)
μ_0	taux d'utilisation au temps $t = 0$
ρ_{al}	masse unitaire de l'aluminium (kg/m^3)

(2) Outre les indices donnés dans l'ENV 1993-1-1, les indices suivants sont employés :

al	alliage d'aluminium
c	assemblage
fi	valeur relative à la situation d'incendie
m	élément
p	matériau de protection contre le feu
t	lié au temps
θ	lié à la température

(3) D'autres symboles sont utilisés dans les annexes A à C; ils sont définis au fur et à mesure.

1.6 Unités

(1) Le système SI sera utilisé, en conformité avec l'ISO 1000:1981.

2 Principes de base et règles

2.1 Performances exigées

(1)P Lorsqu'en cas d'incendie, une résistance mécanique est exigée, les structures en alliage d'aluminium doivent être dimensionnées et réalisées de manière à assurer leur fonction porteuse pendant l'exposition au feu appropriée – critère « *R* ».

(2)P Lorsque la compartimentalisation est exigée, les éléments respectifs doivent être dimensionnés et construits de façon à maintenir leur fonction de séparation durant l'exposition au feu concernée, à savoir :

- aucune défaillance de l'intégrité due à des fissures, trous ou autres ouverture assez grandes pour permettre la pénétration de l'incendie par des gaz chauds ou des flammes – critère « *E* » ;
- aucune défaillance de l'isolation due à des températures de la surface non exposée supérieures aux températures d'allumage – critère « *I* ».

(3)P Le critère « *I* » peut être supposé satisfait lorsque l'augmentation moyenne de température durant l'exposition au feu normalisé ne dépasse pas 140 °C sur la surface non exposée et l'augmentation maximale de la température en tout point de la surface non exposée ne dépasse pas 180°C .

(4)P Les éléments doivent être conformes aux critères *R*, *E* et *I* comme suit :

- éléments uniquement séparateurs : *E* et *I* ;
- éléments uniquement porteurs : *R* ;
- éléments séparateurs et porteurs : *R*, *E* et *I*.

(5) Lorsque des méthodes de calcul générales sont utilisées (voir 4.4), il est nécessaire de calculer les déformations lorsque les éléments séparateurs ou les mesures de protection sont affectées par la déformation des structures porteuses. Il convient de faire référence aux spécifications de produits pertinentes.

NOTE Le présent code ne traite que du critère *R*. Les propriétés des matériaux données dans le présent code peuvent être utilisées lors du calcul des températures pour le critère *I*.

2.2 Actions

(1)P Les actions thermiques et mécaniques doivent être prises dans la prénorme européenne ENV 1991-2-2:1995.

(2) Lorsque les règles données dans cette prénorme européenne ne sont applicables que pour le cas d'exposition à l'incendie normalisé, mention en est faite dans les clauses concernées.

2.3 Valeurs de calcul des propriétés des matériaux

(1)P Les valeurs de calcul des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux $X_{fi,d}$ sont définies comme suit :

- propriétés thermiques pour l'analyse thermique :

- si un accroissement de la propriété favorise la sécurité :

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2.1a)$$

- si un accroissement de la propriété ne favorise pas la sécurité :

$$X_{fi,d} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta} \quad (2.1b)$$

— résistance et propriétés de déformation pour analyse structurelle :

$$X_{f_i,d} = k_{\theta} \cdot X_k / \gamma_{M,f_i} \quad (2.1c)$$

où :

$X_{k,\theta}$ est la valeur caractéristique de la propriété du matériau pour le calcul au feu ; elle dépend généralement de la température du matériau, voir la section 3 ;

X_k est la valeur caractéristique d'une résistance ou d'une propriété de déformation (généralement f_k ou E_k) pour le calcul à température normale selon la prENV 1999-1-1 ;

k_{θ} est le facteur de réduction d'une résistance ou d'une propriété de déformation ($X_{k,\theta}/X_k$), qui dépend de la température du matériau, voir 3.2.1 ;

γ_{M,f_i} est le facteur partiel de sécurité relatif à la propriété du matériau en situation d'incendie.

(2) Pour les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium, on doit adopter le coefficient partiel de sécurité en situation d'incendie :

$$\gamma_{M,f_i} = \boxed{1,0}$$

(3) Pour les propriétés thermiques de l'alliage d'aluminium, on doit adopter le coefficient partiel de sécurité en situation d'incendie :

$$\gamma_{M,f_i} = \boxed{1,0}$$

2.4 Méthodes de justification

2.4.1 Généralités

(1) Le modèle de structure adopté pour la conception et le calcul selon cette prénorme européenne doit refléter le comportement attendu de la structure en cas d'incendie.

(2) L'analyse de la structure doit être effectuée avec l'une des méthodes suivantes :

- analyse globale de la structure, voir 2.4.2 ;
- analyse de parties de la structure, voir 2.4.3 ;
- analyse par éléments, voir 2.4.4.

2.4.2 Analyse globale de la structure

(1) L'analyse globale de la structure en situation d'incendie doit être effectuée en prenant en compte le mode de ruine vis à vis de l'exposition au feu, les propriétés des matériaux et la rigidité des éléments, qui dépendent de la température.

(2) On doit vérifier que, pour la durée d'exposition au feu concernée t :

$$E_{f_i,d,t} \leq R_{f_i,d,t} \quad (2.2)$$

où :

$E_{f_i,d,t}$ est l'effet des actions en cas d'incendie pris dans le calcul et déterminé à partir de l'ENV 1991-2-2:1995, y compris les effets des dilatations et des déformations thermiques ;

$R_{f_i,d,t}$ est la résistance de calcul correspondante à température élevée.

2.4.3 Analyse de parties de la structure

(1) Comme alternative à l'analyse globale de la structure complète pour différentes situations d'incendie, des analyses structurales de sous-ensembles comprenant les parties appropriées de la structure peuvent être effectuées selon 2.4.2.

(2) Les réactions d'appuis, les forces et les moments internes aux limites des sous-ensembles appliqués au temps $t = 0$, peuvent être supposés rester inchangés pendant toute l'exposition au feu.

(3) Au lieu d'effectuer une analyse globale de la structure en situation d'incendie au temps $t = 0$, les réactions d'appuis, les forces et les moments internes aux limites des sous-ensembles peuvent être obtenus à partir d'une analyse globale de la structure propre au dimensionnement à température normale en utilisant :

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (2.3)$$

où :

E_d est la valeur de calcul de la force ou du moment propre au dimensionnement à température normale, pour la combinaison fondamentale des actions donnée en 2.2.2.5 de l'ENV 1999-1-1 ;

η_{fi} est le facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie.

(4) Le facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie η_{fi} est donné par :

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} \quad (2.4)$$

où :

$Q_{k,1}$ est le chargement variable de base ;

γ_{GA} est le coefficient partiel pour les actions permanentes dans les situations accidentelles de calcul ;

$\psi_{1,1}$ est le coefficient de combinaison pour les valeurs fréquentes, voir le Tableau 9.3 dans l'ENV 1991-1:1994.

NOTE La Figure 2.1 montre la variation du facteur de réduction η_{fi} en fonction du rapport de chargement $Q_{k,1}/G_k$ et pour différentes valeurs du coefficient $\psi_{1,1}$ pour $\gamma_{GA} = 1,0$, avec $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$.

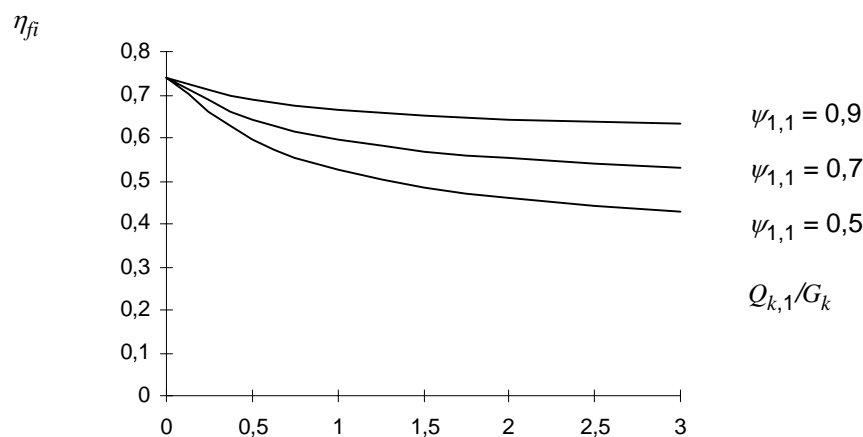


Figure 2.1 — Variation du facteur de réduction η_{fi} en fonction de $Q_{k,1}/G_k$

2.4.4 Analyse par éléments

(1) Comme alternative à l'analyse globale de la structure, il est possible d'analyser des éléments individuels en situation d'incendie. Les conditions de liaison aux appuis et aux extrémités des éléments applicables à $t = 0$ peuvent être généralement supposées inchangées pendant toute l'exposition au feu. Lorsque d'autres hypothèses sont applicables, mention en est faite dans les clauses appropriées.

(2) Les forces et moments internes aux appuis et aux extrémités des éléments effectifs au temps $t = 0$, peuvent être supposés inchangés pendant toute la durée d'exposition au feu.

(3) Comme alternative à une analyse globale de la structure en situation d'incendie au temps $t = 0$, les réactions d'appuis, les forces et les moments internes aux extrémités des éléments peuvent être obtenus à partir d'une analyse globale de la structure propre au dimensionnement à température normale en utilisant l'expression (2.3).

(4) Seuls les effets des déformations dues aux gradients thermiques sont à prendre en compte. Les effets de la dilatation thermique des éléments peuvent être négligés.

2.4.5 Calcul assisté par essais

(1) Comme alternative à l'utilisation de méthodes de calcul, la conception et le dimensionnement peuvent être fondés sur les résultats d'essais.

3 Propriétés des matériaux

3.1 Généralités

(1) Les propriétés mécaniques et thermiques des alliages d'aluminium doivent être déterminées à partir des clauses qui suivent ou conformément à des normes de produits EN, prEN ou ISO existantes.

(2) Les propriétés thermiques des matériaux de protection contre le feu doivent être déterminées conformément à des normes de produits EN, prEN ou ISO existantes.

(3) Les valeurs des propriétés de matériaux indiquées dans le prENV 1999-1-1 Section 3 doivent être prises comme des valeurs caractéristiques.

3.2 Caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium

3.2.1 Propriétés de résistance

(1) Il convient d'obtenir la résistance à la charge d'épreuve de 0,2% de certains alliages d'aluminium pour une durée d'exposition allant jusqu'à deux heures à température élevée $f_{y,\theta}$ à partir du rapport de contrainte $k_{0,2,\theta}$ donné dans le Tableau 3.1 et de la résistance à la charge d'épreuve de 0,2% du matériau à température ambiante $f_{0,2}$ de la Partie 1-1 Section 3, où :

Charge d'épreuve effective de 0,2% à la température θ : $f_{y,\theta} = k_{0,2,\theta} f_{0,2}$

(2) Pour les valeurs intermédiaires de la température de l'aluminium, il est possible d'utiliser une interpolation linéaire.

Tableau 3.1 — Rapports de contrainte $k_{0,2,\theta}$ à la charge d'épreuve de 0,2% pour les alliages d'aluminium pour une durée d'exposition thermique jusqu'à deux heures à température élevée

Alliage	Etat de dureté	Température de l'alliage d'aluminium °C							
		20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW-5052	O	1,00	1,00	0,96	0,82	0,68	0,48	0,23	0
EN AW-5052	H34	1,00	1,00	0,92	0,52	0,33	0,22	0,13	0
EN AW-5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,42	0,22	0
EN AW-5083	H113	1,00	1,00	0,89	0,78	0,63	0,47	0,29	0
EN AW-5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0
EN AW-5454	H32	1,00	1,00	0,92	0,78	0,36	0,23	0,14	0
EN AW-6061	T6	1,00	1,00	0,92	0,79	0,62	0,32	0,10	0
EN AW-6063	T6	1,00	1,00	0,90	0,74	0,38	0,20	0,10	0
EN AW-6082	T6	1,00	1,00	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0

(3) Il convient d'obtenir la résistance à la charge d'épreuve de 0,2% de certains alliages d'aluminium, non couverts par le Tableau 3.1a du prENV 1999-1-1 Section 3, pour une durée d'exposition allant jusqu'à deux heures à température élevée, à partir du rapport de contrainte $k_{0,2,\theta}$ donné dans l'annexe A et de la résistance à la charge d'épreuve de 0,2% du matériau à température ambiante $f_{0,2}$ des références normatives données dans le prENV 1999-1-1 Section 3, où :

Charge d'épreuve effective de 0,2% à la température θ : $f_{y,\theta} = k_{0,2,\theta} f_{0,2}$

3.2.2 Module d'élasticité

(1) Il convient de se reporter au Tableau 3.2 pour obtenir le module d'élasticité de tous les alliages d'aluminium après deux heures d'exposition thermique à température élevée $E_{al,\theta}$.

Tableau 3.2 — Module d'élasticité des alliages d'aluminium pour une exposition thermique de deux heures à température élevée

Température de l'alliage d'aluminium, θ (°C)	Module d'élasticité, $E_{al,\theta}$ (N/mm ²)
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

3.2.3 Masse unitaire

(1) Il convient de considérer la masse unitaire de l'aluminium ρ_{al} comme indépendante de la température. Il convient d'adopter la valeur suivante :

$$\rho_{al} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

3.3 Propriétés thermiques

3.3.1 Dilatation thermique

(1) Il convient de déterminer la dilatation thermique relative de l'alliage d'aluminium, $\Delta l/l$, comme suit :

pour $0 \text{ °C} \leq \theta_{al} < 500 \text{ °C}$:

$$\Delta l/l = 0,1 \cdot 10^{-7} \theta_{al}^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} \theta_{al} - 4,5 \cdot 10^{-4}$$

où :

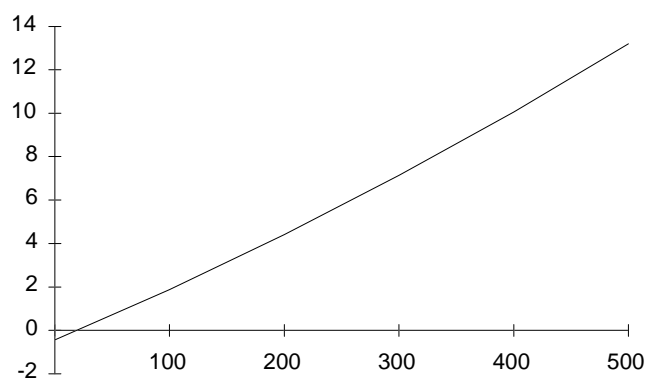
l est la longueur à 20°C ;

Δl est la dilatation due à la température ;

θ_{al} est la température de l'alliage d'aluminium (°C).

(2) La variation de la dilatation thermique relative avec la température est montrée par la Figure 3.1.

Dilatation $\Delta l / l$ ($\times 10^{-3}$)



Température (°C)

Figure 3.1 — Dilatation thermique relative de l'alliage d'aluminium en fonction de la température

(3)P Dans les modèles de calcul simplifiés, la relation entre la dilatation thermique relative et la température de l'alliage d'aluminium peut être considérée comme constante. Dans ce cas, la dilatation relative peut être déterminée par :

$$\frac{\Delta l}{l} = 2,5 \cdot 10^{-5} (\theta_{al} - 20)$$

3.3.2 Chaleur spécifique

(1)P Il convient de déterminer la chaleur spécifique de l'aluminium, c_{al} , comme suit :

pour $0 \text{ °C} \leq \theta_{al} < 500 \text{ °C}$:

$$c_{al} = 0,41 \cdot \theta_{al} + 903 \text{ (J/kg °C)}$$

où :

θ_{al} est la température de l'alliage d'aluminium.

(2) La variation de la chaleur spécifique avec la température est illustrée par la Figure 3.2.

Chaleur spécifique (J/kg °C)

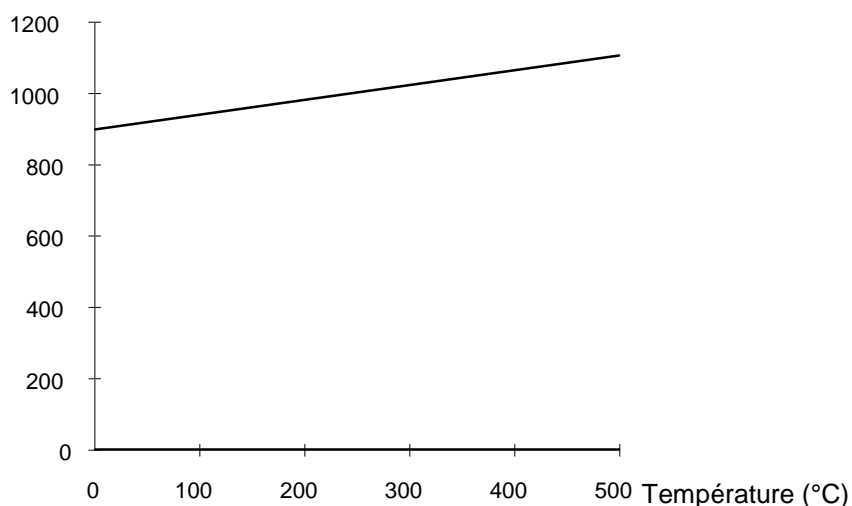


Figure 3.2 — Chaleur spécifique de l'alliage d'aluminium en fonction de la température

3.3.3 Conductivité thermique

(1) PII convient de déterminer la conductivité thermique de l'alliage d'aluminium, λ_{al} , pour $0^\circ\text{C} < \theta_{al} < 400^\circ\text{C}$ comme suit :

pour les alliages des séries 1000, 3000 et 6000 :

$$\lambda_{al} = 0,07 \cdot \theta_{al} + 190 \text{ (W/m }^\circ\text{C)}$$

pour les alliages des séries 2000, 4000, 5000 et 7000 :

$$\lambda_{al} = 0,1 \cdot \theta_{al} + 140 \text{ (W/m }^\circ\text{C)}$$

où :

θ_{al} est la température de l'alliage d'aluminium

(2) La variation de la conductivité thermique avec la température est illustrée par la Figure 3.3.

Conductivité thermique (W/m °C)

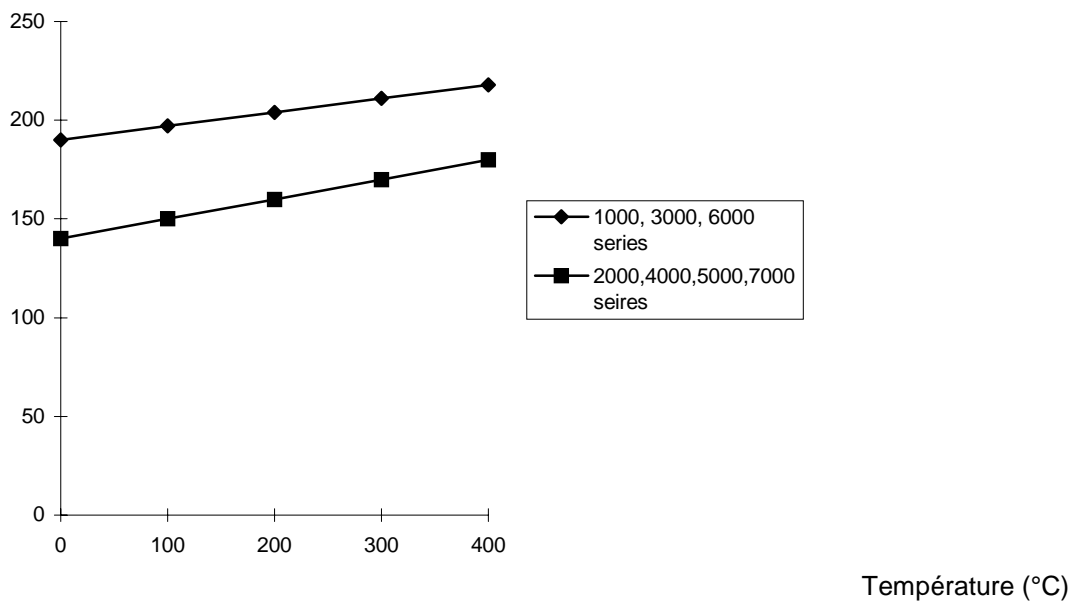


Figure 3.3 — Conductivité thermique de l'alliage d'aluminium en fonction de la température

3.4 Matériaux de protection contre le feu

(1) Les propriétés et les performances des matériaux de protection contre le feu doivent être évaluées en utilisant les méthodes d'essais appropriées données dans les prEN ou les EN (lorsqu'ils sont disponibles).

NOTE Cela suppose que ces normes comporteront une clause exigeant que les matériaux de protection contre le feu demeurent cohérents et restent en place sur leurs supports pendant toute la durée de l'exposition au feu appropriée. Dans le cas contraire, cet élément sera revu.

4 Calcul du comportement au feu

4.1 Généralités

(1) L'alliage d'aluminium peut être isolé par un matériau de protection contre le feu, protégé par des écrans ou par tout autre moyen qui limite l'augmentation de température de l'alliage d'aluminium.

(2) PL'évaluation du comportement des structures en situation d'incendie de calcul doit être basée sur l'une des approches suivantes, ou sur l'une de leurs combinaisons :

- méthodes de calcul simples appliquées à des éléments individuels ;
- méthodes de calcul générales

(3) P Les méthodes de calcul simples sont des méthodes de calcul simplifiées dont les résultats sont du côté de la sécurité.

(4) P Les modèles de calcul avancés sont des méthodes de calcul dans lesquelles les principes de l'ingénierie sont appliqués de manière réaliste à des cas spécifiques.

(5) P Lorsqu'aucun modèle de calcul simplifié n'est donné, il faut utiliser soit une méthode basée sur des résultats d'essais, soit une méthode basée sur un modèle de calcul général.

4.2 Modèles de calcul simplifiés

4.2.1 Généralités

(1) P La fonction porteuse d'une structure ou d'un élément de structure en alliage d'aluminium est supposée assurée après un temps t d'exposition à un feu donné, si :

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

où :

$E_{fi,d}$ est la valeur de calcul de l'effet des actions pour la situation d'incendie de calcul, selon l'ENV 1991-2-2 (forces et moments internes $M_{fi,Ed}$, $N_{fi,Ed}$, $V_{fi,Ed}$ pris séparément ou en combinaison) ;

$R_{fi,d,t}$ est la résistance de calcul correspondante de la structure ou de l'élément de structure en alliage d'aluminium, pour la situation d'incendie de calcul, au temps t ($M_{fi,t,Rd}$, $N_{b,fi,t,Rd}$, $V_{fi,t,Rd}$ pris séparément ou en combinaison).

(2) P La résistance de calcul $R_{fi,d,t}$ doit être déterminée pour la distribution de température au temps t dans les éléments de structure, en modifiant la détermination de la résistance de calcul à température normale selon le prENV 1999-1-1, par la prise en compte des propriétés mécaniques des alliage d'aluminium à température élevée, voir 3.2.1 et 3.2.2.

4.2.2 Résistance

NOTE Dans la présente section, le symbole de la résistance de calcul devient M_{Rd} , N_{Rd} , V_{Rd} selon que l'effet des actions en question est, respectivement, le moment fléchissant, la force axiale ou la force de cisaillement.

4.2.2.1 Classification des sections

(1) P En situation d'incendie de calcul, les sections peuvent être classées comme pour le calcul à la température normale, sans aucun changement, conformément à 5.4 du prENV 1999-1-1.

4.2.2.2 Eléments tendus

(1) P La résistance de calcul $N_{fi,t,Rd}$ au temps t d'un élément tendu, avec une distribution de température non-uniforme en section, peut être déterminée par :

$$N_{fi,t,Rd} = \sum A_i k_{0,2,\theta,i} f_{0,2} / \gamma_{M,fi} \quad (4.2)$$

où :

A_i est une surface élémentaire de la section brute avec une température θ_i , y compris la déduction requise lorsqu'il faut prévoir l'effet du radoucissement de la zone affectée par la chaleur (HAZ). La déduction est fondée sur l'épaisseur réduite de $k_{HAZ} \cdot t$;

$k_{0,2,\theta_i}$ est le facteur de réduction de la résistance effective à la charge d'épreuve de 0,2% à la température θ_i , qui est la température de la surface élémentaire A_i ;

(2) P Il convient de déterminer la résistance de calcul $N_{f_i,\theta,Rd}$ d'un élément dont la température θ_{al} est uniforme par :

$$N_{f_i,\theta,Rd} = k_{0,2,\theta} N_{Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,f_i}) \quad (4.3)$$

où :

$k_{2,0,\theta}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% de l'alliage d'aluminium à la température θ_{al} , voir 3.2.1 ;

N_{Rd} est la résistance de calcul de la section brute pour le dimensionnement à la température normale, selon l'ENV 1999-1-1.

(3) Les dispositions de 4.2.2.1 peuvent être supposées satisfaites pour un élément tendu si, au temps t , la température de l'alliage d'aluminium θ_{al} dans toutes les sections n'est pas supérieure à 170 °C .

4.2.2.3 Poutres

(1) P Le moment résistant de calcul $M_{f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une section de Classe 1 ou de Classe 2, soumise à une distribution de température non-uniforme, peut être déterminé par :

$$M_{f_i,t,Rd} = \sum A_i z_i k_{0,2,\theta_i} f_{0,2} / \gamma_{M,f_i} \quad (4.4)$$

où :

A_i est une surface élémentaire de la section brute avec une température θ_i , y compris la déduction requise lorsqu'il faut prévoir l'effet du ramollissement de la zone affectée par la chaleur (HAZ). La déduction est fondée sur l'épaisseur réduite de $k_{HAZ} \cdot t$, selon l'ENV 1999-1-1 ;

Z_i est une surface élémentaire de la section brute avec une température θ_i , y compris la déduction requise lorsqu'il faut prévoir l'effet du ramollissement de la zone affectée par la chaleur (HAZ). La déduction est fondée sur l'épaisseur réduite de $k_{HAZ} \cdot t$, selon l'ENV 1999-1-1 ;

$k_{0,2,\theta_i} f_{0,2}$ est la limite d'élasticité pour une surface élémentaire A_i à la température θ_{al} ;

(2) P L'axe neutre plastique d'une section soumise à une distribution de température non-uniforme, est l'axe perpendiculaire au plan de flexion qui satisfait au critère suivant :

$$\sum A_i k_{0,2,\theta_i} f_{0,2} = 0 \quad (4.5)$$

(3) P Le moment résistant de calcul $M_{f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une section de Classe 3 dans un élément soumis à une distribution de température non-uniforme, peut être déterminé par :

$$M_{f_i,t,Rd} = M_{f_i,\theta_i,Rd} \quad (4.6)$$

où :

$M_{f_i,\theta,Rd}$ est le moment résistant de calcul de la section pour une température uniforme θ_{al} égale à la température maximale $\theta_{al,max}$ atteinte au temps t .

(4) P Le moment résistant de calcul $M_{f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une section de Classe 4 soumise à une distribution de température non-uniforme peut être déterminé par :

$$M_{f_i,t,Rd} = k_{0,2,\theta_{max}} M_{Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,f_i}) \quad (4.7)$$

où :

$k_{0,2,\theta_{max}}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% pour la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium à température θ_{al} égale à la température maximale $\theta_{al,max}$ de la section atteinte au temps t ;

M_{Rd} est le moment résistant de calcul de la section à température normale pour les poutres de la classe 4, selon l'ENV 1999-1-1.

(5) P Le moment résistant de calcul $M_{f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une section de Classe 1, 2, 3 ou 4 soumise à une distribution de température uniforme peut être déterminé par :

$$M_{f_i,t,Rd} = k_{0,2,\theta} M_{Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,f_i}) \quad (4.8)$$

où :

$k_{0,2,\theta}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% pour la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium à température θ_{al} , voir 3.2.1 ;

M_{Rd} est le moment résistant de calcul de la section à température normale.

(6) Pour les poutres soumises à un flambement de torsion latéral, le moment résistant de calcul au déversement $M_{b,f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une poutre sans maintien latéral, peut être déterminé par :

$$M_{b,f_i,t,Rd} = k_{0,2,\theta_{max}} M_{b,Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,f_i}) \quad (4.9)$$

où :

$k_{0,2,\theta_{max}}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% à la température θ_{al} égale à la température maximale de l'alliage d'aluminium $\theta_{al,max}$;

$M_{b,Rd}$ est le moment résistant de calcul au déversement à température normale, selon l'ENV 1999-1-1.

(7) La résistance de calcul au cisaillement $V_{f_i,t,Rd}$ au temps t , d'une poutre peut être déterminée par :

$$V_{f_i,t,Rd} = k_{0,2,\theta} V_{Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,f_i}) \quad (4.10)$$

où :

$k_{0,2,\theta}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% pour la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium à température θ_{al} , qui est la température maximale de la partie de la section qui supporte la force de cisaillement ;

V_{Rd} est la résistance au cisaillement de la section brute dans le calcul à la température normale, selon l'ENV 1999-1-1.

(8) Les dispositions de 4.2.2.3 peuvent être supposées satisfaites pour une poutre si, au temps t , la température de l'alliage d'aluminium θ_{al} dans toutes les sections n'est pas supérieure à 170 °C .

4.2.2.4 Poteaux

(1) La résistance de calcul au flambement $N_{b,fi,t,Rd}$ au temps t d'un élément comprimé peut être déterminé par :

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{0,2,\theta,max} N_{b,Rd} (\gamma_{M1}/1,2\gamma_{M,fi}) \quad (4.10)$$

où :

$N_{b,Rd}$ est la résistance au flambement pour le calcul à la température normale selon le prENV 1999-1-1 ;

$k_{0,2,\theta,max}$ est le rapport de contrainte à la charge d'épreuve de 0,2% à la température θ_{al} égale à la température maximale $\theta_{al,max}$ de l'alliage d'aluminium.

NOTE La constante 1,2 de cette expression est un facteur de réduction de la résistance de calcul dû au fluage des alliages d'aluminium, qui est fonction de la température.

(2) Pour la détermination du rapport d'élancement, les dispositions du prENV 1991-1-1 s'appliquent.

(3) Dans les palées non stables, les longueurs de poteau raccordées de façon continue ou semi-continue à des longueurs de poteau dans d'autres compartiments peuvent être considérée comme ayant une direction fixe à ces raccords, à condition que la résistance au feu des éléments de construction qui séparent ces compartiments soit au moins égale à celle du poteau.

(4) La résistance de calcul au flambement $R_{fi,t,d}$ au temps t , d'un élément soumis simultanément à la flexion et à la compression axiale peut être déterminée par

$$R_{b,fi,t,d} = k_{0,2,\theta,max} R_d \quad (4.11)$$

où :

R_d représente une combinaison de compression axiale et de moments fléchissants $N_{fi,Ed}$, $M_{y,fi,Ed}$ et $M_{z,fi,Ed}$ tels que pour le calcul à la température normale les dispositions du prENV 1999-1-1 sont satisfaites pour tous les types d'éléments lorsque :

$$N_{Sd} = 1,2 N_{fi,Ed}$$

$$M_{y,Sd} = M_{y,fi,Ed}$$

$$M_{z,Sd} = M_{z,fi,Ed}$$

(5) Les dispositions de 4.2.2.4 peuvent être supposées satisfaites pour un poteau si, au temps t , la température de l'alliage d'aluminium θ_{al} dans toutes les sections n'est pas supérieure à 170 °C .

4.2.2.5 Liaisons

(1) PII n'est pas nécessaire de vérifier la résistance des liaisons entre éléments, à condition de la résistance thermique $(d_p/\lambda_p)_c$ de la protection contre le feu de la liaison ne soit pas inférieure à la valeur minimale de la résistance thermique $(d_p/\lambda_p)_M$ de la protection contre le feu de l'un quelconque des éléments en alliage d'aluminium assemblés par cette liaison :

où :

d_p est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu ;

λ_p est la conductivité thermique effective du matériau de protection contre le feu.

(2) Pour les liaisons soudées, il convient de prendre en compte l'élasticité réduite dans les zones affectées par la chaleur.

4.2.3 Echauffement de l'alliage d'aluminium

4.2.3.1 Eléments intérieurs en alliage d'aluminium non protégés

(1) Pour une distribution de température supposée uniforme dans la section, il convient de déterminer l'augmentation de température $\Delta\theta_{al(t)}$ dans un élément non protégé, pendant un intervalle de temps Δt , par :

$$\Delta\theta_{al(t)} = \frac{1}{c_{al} \cdot \rho_{al}} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t$$

où :

c_{al} est la chaleur spécifique de l'alliage d'aluminium, voir 3.3.2 (J/kg°C) ;

ρ_{al} est la masse volumique de l'aluminium (kg/m³) ;

A_m/V est le facteur de massiveté pour les éléments en alliage d'aluminium non protégés (m⁻¹) ;

A_m est la surface exposée de l'élément par unité de longueur (m²/m) ;

V est le volume de l'élément par unité de longueur (m³/m) ;

$h_{net,d}$ est la valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface, voir (2) ;

Δt est l'intervalle de temps (s).

(2) Il convient d'obtenir les valeurs de $h_{net,d}$ à partir de l'ENV 1991-2-2:1995 en prenant :

$\varepsilon_m = \boxed{0,3}$ pour des surfaces propres non recouvertes, et

$\varepsilon_m = \boxed{0,7}$ pour des surfaces peintes et recouvertes (par exemple de noir de fumée),

ε_m et ε_{res} étant définis dans l'ENV 1991-2-2 :1995.

(3) Il convient de choisir la valeur de Δt au plus égale à 5 secondes.

(4) Il convient de choisir la valeur du facteur de massiveté A_m/V au moins égale à 10 m⁻¹.

(5) Lors du calcul de la surface exposée de l'élément, A_m , il convient de ne pas y inclure les rainures dont l'entaille à la surface est inférieure à 20 mm. Voir la Figure 4.1.

(6) Quelques expressions permettant de calculer les valeurs du facteur de massiveté A_m/V pour des éléments en alliage d'aluminium non protégés, sont données dans le Tableau 4.1.

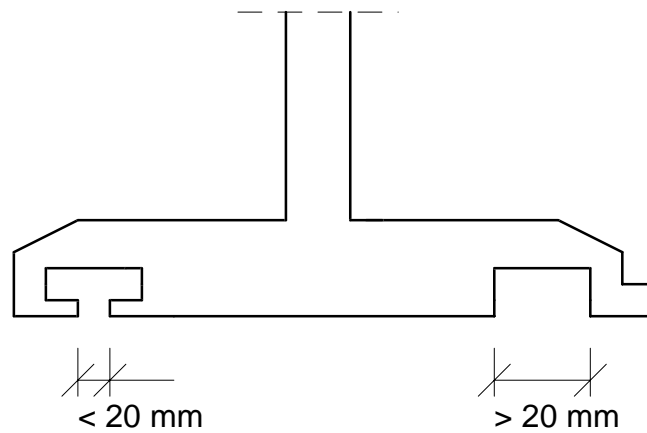
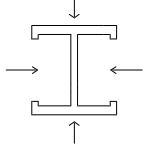
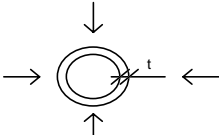
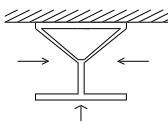
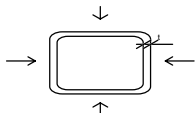
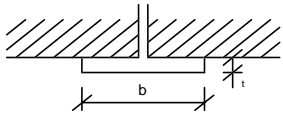
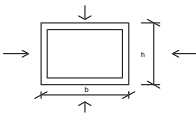
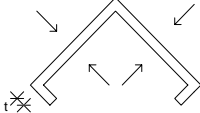
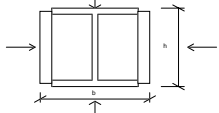
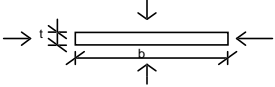
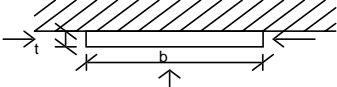


Figure 4.1 — Ne pas inclure dans la surface exposée les rainures dont l’entaille à la surface est inférieure à 20 mm. Inclure dans la surface exposée les rainures dont l’entaille à la surface est supérieure à 20 mm.

Tableau 4.1 — Facteur de massiveté A_m/V pour des éléments de structure en alliage d’aluminium non protégés lorsque la méthode de la masse localisée est utilisée

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

4.2.3.2 Structures intérieures en alliage d'aluminium isolées avec un matériau de protection contre le feu

(1) Pour une distribution uniforme de température dans la section, il convient de déterminer l'augmentation de température $\Delta\theta_{al(t)}$ dans un élément protégé, pendant un intervalle de temps Δt , par :

$$\Delta\theta_{al(t)} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_{al} \cdot \rho_{al}} \cdot \frac{A_p}{V} \left[\frac{1}{1+\varphi/3} \right] (\theta_t - \theta_{al}) \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{(t)}$$

mais $\Delta\theta_{al(t)} \geq 0$

avec :

$$\varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_{al} \rho_{al}} d_p \frac{A_p}{V}$$

où :

- A_p/V est le facteur de massiveté pour l'élément en alliage d'aluminium isolé par un matériau de protection contre le feu (m^{-1});
- A_p est l'aire de la face intérieure du matériau de protection contre le feu par unité de longueur d'élément (m^2/m);
- V est le volume de l'élément par unité de longueur (m^3/m);
- c_{al} est la chaleur spécifique de l'alliage d'aluminium, voir 3.3.2 ($J/kg^\circ C$) ;
- c_p est la chaleur spécifique du matériau de protection contre le feu, voir 3.4 ($J/kg^\circ C$) ;
- d_p est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu (m) ;
- Δt est l'intervalle de temps (s) ;
- $\theta_{(t)}$ est la température ambiante des gaz au temps t ($^\circ C$) ;
- $\theta_{al(t)}$ est la température de l'alliage d'aluminium au temps t ($^\circ C$) ;
- $\Delta\theta_{(t)}$ est l'augmentation de la température ambiante pendant l'intervalle de temps Δt ($^\circ C$) ;
- λ_p est la conductivité thermique du matériau de protection contre le feu, voir 3.4 ($W/m^\circ C$) ;
- ρ_{al} est la masse volumique de l'alliage d'aluminium (kg/m^3) ;
- ρ_p est la masse volumique du matériau de protection contre le feu, voir 3.4 (kg/m^3).

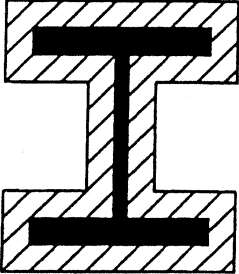
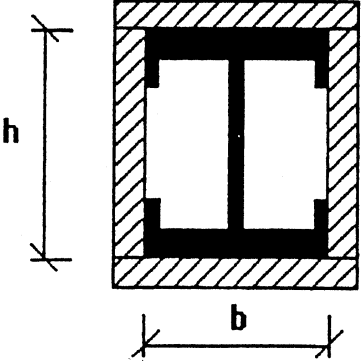
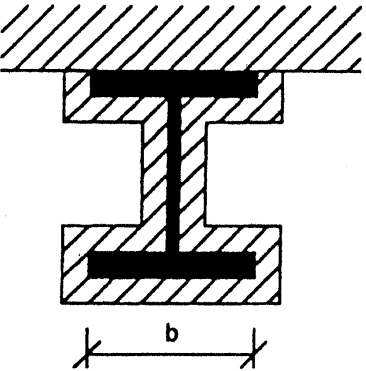
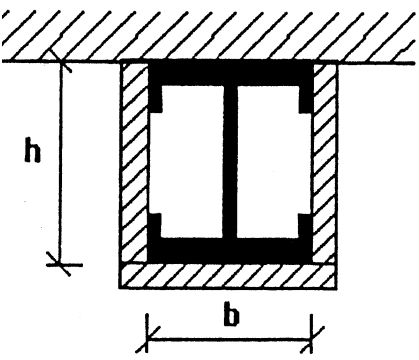
(2) Il convient de choisir la valeur de Δt au plus égale à 30 secondes.

(3) Quelques valeurs de calcul du facteur de massiveté A_p/V pour des éléments en alliage d'aluminium protégés sont indiquées dans le Tableau 4.2.4).

(4) Dans le cas de matériaux de protection contre le feu contenant de l'eau, le calcul de l'augmentation de température de l'alliage d'aluminium $\Delta\theta_{al(t)}$ peut être modifié pour tenir compte d'un palier dans l'accroissement de température de l'alliage d'aluminium lorsqu'il atteint $100^\circ C$. Ce palier doit être déterminé par une méthode conforme à un prENV ou à une ENV (lorsque disponibles).

NOTE Voir 1.3 et 3.4

Tableau 4.2 — Facteur de massivété A_p/V pour des éléments de structure en alliage d'aluminium isolés par un matériau de protection contre le feu lorsque la méthode de la masse localisée est utilisée

Schéma	Description	Facteur de massivété (A_p/V)
	<p>Matériau de protection d'épaisseur uniforme appliqué au contour</p>	$\frac{\text{périmètre de l'aluminium}}{\text{aire de la section de l'aluminium}}$
	<p>Matériau de protection d'épaisseur uniforme formant caisson</p>	$\frac{2(b + h)}{\text{aire de la section de l'aluminium}}$
	<p>Matériau de protection d'épaisseur uniforme appliqué au contour, exposé au feu de trois côtés</p>	$\frac{\text{périmètre de l'aluminium} - b}{\text{aire de la section de l'aluminium}}$
	<p>Matériau de protection d'épaisseur uniforme formant caisson, exposé au feu de trois côtés</p>	$\frac{2h + b}{\text{aire de la section de l'aluminium}}$

4.2.3.3 Structures intérieures en alliage d'aluminium dans un volume protégé par des écrans thermiques

(1) Les dispositions indiquées ci-après s'appliquent aux deux cas suivants :

- éléments en alliage d'aluminium situés dans un plénum délimité en partie supérieure par un plancher et en partie inférieure par un écran thermique horizontal ;
- éléments en alliage d'aluminium situés dans un volume délimité de chaque côté par un écran thermique vertical.

(2) Les propriétés et l'efficacité des écrans thermiques doivent être déterminés au moyen d'un mode opératoire conforme à un(e) prENV, ENV, prEN ou EN.

NOTE Voir 1.3

(3) L'évolution de la température dans le volume qui contient l'élément en alliage d'aluminium doit être déterminée à partir d'un essai d'incendie normalisé conforme à un(e) prENV, ENV, prEN ou EN, ou calculée au moyen d'une méthode approuvée.

NOTE Voir 1.3

(4) Pour des structures en alliage d'aluminium intérieures protégées par des écrans thermiques, il convient de baser le calcul de l'augmentation de température $\Delta\theta_{al}$ sur une des méthodes données en 4.2.3.1 ou 4.2.3.2 selon le cas, et en prenant la température ambiante des gaz θ égale à la température des gaz dans le volume.

(5) Les valeurs coefficients de transfert thermique α_c et α_r , déterminées par des essais conformes à un(e) prENV, ENV, prEN ou EN, peuvent être utilisées dans le calcul de $\Delta\theta_{al}$, en variante des valeurs données dans l'Eurocode 1 : Partie 2.2.

NOTE Voir 1.3

4.2.3.4 Structures extérieures en alliage d'aluminium

(1) La température dans une structure extérieure en alliage d'aluminium est déterminée en tenant compte :

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

(2) Des écrans thermiques peuvent être mis en place sur un, deux ou trois côtés d'un élément extérieur en alliage d'aluminium pour le protéger du flux thermique rayonnant.

(3) Il convient que les écrans thermiques soient :

- soit fixés directement sur le côté à protéger de l'élément en alliage d'aluminium ;
- soit suffisamment grands pour empêcher le flux thermique rayonnant d'atteindre ce même côté.

(4) Il convient que l'intégrité des écrans thermiques corresponde à la résistance au feu exigée pour l'élément en alliage d'aluminium.

(5) Il convient de déterminer la température d'une structure extérieure en alliage d'aluminium protégée par des écrans thermiques comme indiqué en (1), en supposant qu'il n'y a pas de transfert thermique par rayonnement vers les côtés protégés par les écrans.

(6) Les calculs peuvent être fondés sur des conditions de régime permanent résultant d'un équilibre thermique stationnaire, en utilisant les méthodes indiquées dans l'annexe B.

(7) Il convient de fonder les calculs qui utiliseront l'Annexe B sur le modèle donné dans l'Eurocode 1 : Partie 2-2, qui décrit les conditions du compartiment et les flammes sortant par les ouvertures, servant de base aux calculs des flux thermiques rayonnant et convectif.

4.3 Méthodes de calcul générales

4.3.1 Bases

(1) Les méthodes de calcul générales peuvent être utilisées pour des éléments individuels, pour des sous-ensembles ou pour des structures complètes.

(2) Les méthodes de calcul générales peuvent être utilisées pour tous les types de sections.

(3) Les méthodes de calcul générales doivent fournir une analyse réaliste des structures exposées au feu. Elles doivent être basées sur des comportements physiques fondamentaux de façon à obtenir une représentation fiable du comportement que l'on peut attendre du composant de structure concerné exposé au feu.

(4) Les méthodes de calcul avancées peuvent comporter des modèles de calcul séparés pour déterminer :

- a) le développement et la distribution de la température dans les éléments de structure (modèle de réponse thermique) ;
- b) le comportement mécanique de la structure ou d'une quelconque de ses parties (modèle de réponse mécanique).

(5) Tous les modes de ruine potentiels qui ne sont pas couverts par la méthode de calcul générale (y compris le flambement local ou la ruine par cisaillement), doivent être éliminés par des moyens appropriés.

(6) Les méthodes de calcul générales peuvent être utilisées avec n'importe quelle courbe d'échauffement à condition que les propriétés des matériaux soient connues dans la plage de température concernée.

(7) La validité d'une méthode de calcul générale retenue pour une situation particulière, doit faire l'objet d'un accord entre le client, le bureau d'études et l'autorité compétente.

4.3.2 Réponse thermique

(1) Les méthodes de calcul générales pour la réponse thermique doivent être fondées sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie du transfert thermique.

(2) Le modèle de réponse thermique doit prendre en considération :

- les actions thermiques concernées spécifiées dans l'ENV 1991-2-2:1995 ;
- la variation avec la température des propriétés thermiques des matériaux, voir 3.3.

(3) Les effets d'une exposition non uniforme à la chaleur et du transfert thermique vers des composants adjacents du bâtiment, peuvent être pris en compte quand il y a lieu.

(4) L'influence de l'humidité et de la migration de l'eau dans le matériau de protection contre le feu peut être négligée, ce qui place du côté de la sécurité.

4.3.3 Réponse mécanique

(1) Les méthodes de calcul générales pour la réponse mécanique doivent être fondées sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie de la mécanique des structures, prenant en compte les variations des propriétés mécaniques avec la température.

(2) Les effets des contraintes et déformations thermiques, dues tant à l'accroissement de température qu'aux gradients de température, doivent être pris en compte.

(3) Lorsqu'il y a lieu, le modèle de réponse mécanique doit également tenir compte des points suivants:

- effets combinés des actions mécaniques, des imperfections géométriques et des actions thermiques ;
- propriétés mécaniques du matériau dépendant de la température, voir 3.2 ;
- effets de non linéarité géométrique ;
- effets de non linéarité des propriétés des matériaux, incluant les effets bénéfiques du chargement et du déchargement sur la raideur des structures ;
- effets du fluage thermique transitoire.

(4) Les déformations à l'état limite ultime résultant du calcul doivent être autant que de besoin limitées afin d'assurer qu'elles demeurent compatibles avec toutes les autres parties de l'ouvrage.

(5) Si nécessaire, il convient que le dimensionnement soit rapporté à l'état limite ultime au delà duquel les déformations calculées de la structure entraîneraient la ruine par suite de la perte d'appui de l'un de ses éléments.

Annexe A (informative)

Propriétés des alliages d'aluminium ne figurant pas dans l'ENV 1999-1-1

Tableau A.1 — Rapports de contrainte $k_{0,2,\theta}$ à la charge d'épreuve de 0,2% pour les alliages d'aluminium pour une durée d'exposition thermique jusqu'à deux heures à température élevée

Alliage	Etat de dureté	Température °C						
		20	100	150	200	250	300	350
EN AW-3003	O	1,00	1,00	0,90	0,79	0,64	0,46	0,38
EN AW-3003	H14	1,00	1,00	0,76	0,51	0,26	0,16	0,10
EN AW-5086	O	1,00	1,00	0,89	0,78	0,63	0,47	0,29
EN AW-5086	H112	1,00	1,00	0,99	0,91	0,73	0,46	0,30
EN AW-7075	T6	1,00	1,00	0,79	0,43	0,24	0,16	0,10

En approximation de premier ordre, les valeurs de $k_{0,2,\theta}$ pour l'alliage EN AW-3003 peuvent être utilisées pour l'alliage EN AW-3103.

Annexe B (informative)

Transfert thermique aux structures extérieures en aluminium

B.1 Généralités

B.1.1 Bases

- (1) Dans la présente annexe B, on suppose que le compartiment est limité à un seul étage. Toutes les fenêtres ou ouvertures similaires dans le compartiment sont supposées être rectangulaires.
- (2) Il convient d'utiliser l'annexe C de l'ENV 1991-2-2:1995 pour déterminer la température du compartiment, les dimensions et températures des flammes sortant par les ouvertures, et les paramètres applicables au rayonnement et à la convection.
- (3) Il convient de faire une distinction entre les éléments qui sont dans les flammes et ceux qui ne le sont pas selon leur position par rapport aux ouvertures dans les parois du compartiment.
- (4) Il convient d'admettre qu'un élément qui n'est pas dans les flammes reçoit le transfert thermique par rayonnement issu de toutes les ouvertures du compartiment situées de son côté et émanant des flammes qui sortent par ces mêmes ouvertures.
- (5) Il convient d'admettre qu'un élément dans les flammes reçoit le transfert thermique par convection des flammes qui l'entourent et le transfert thermique par rayonnement des flammes qui l'entourent et de l'ouverture du compartiment par lesquelles elles sortent. Le transfert thermique par rayonnement venant d'autres flammes et d'autres ouvertures peut être négligé.

B.1.2 Dimensions des éléments et identification des faces

- (1) Les convention et notation utilisées pour les dimensions d_1 et d_2 d'un élément et pour l'identification de ses quatre faces sont indiquées par la Figure B.1.

B.1.3 Equilibre thermique

- (1) Pour un élément hors des flammes, il convient de déterminer sa température moyenne $T_m [K]$ par la résolution de l'équation de l'équilibre thermique suivante :

$$\sigma T_m^4 + \alpha T_m = \sum I_z + \sum I_f + 293\alpha \quad (\text{B.1})$$

où :

- σ est la constante de Stefan Boltzmann [$56,7 \times 10^{-12} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$];
- α est le coefficient de transfert thermique par convection [$\text{kW/m}^2\text{K}$];
- I_z est le flux thermique rayonnant d'une flamme [kW/m^2];
- I_f est le flux thermique rayonnant d'une ouverture [kW/m^2];

- (2) Il convient de prendre le coefficient de transfert thermique par convection α dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2:1995 pour les conditions de ventilation « forcée » ou « non-forcée », suivant les cas, et en utilisant une dimension équivalente d pour la section transversale, $d = (d_1 + d_2)/2$.

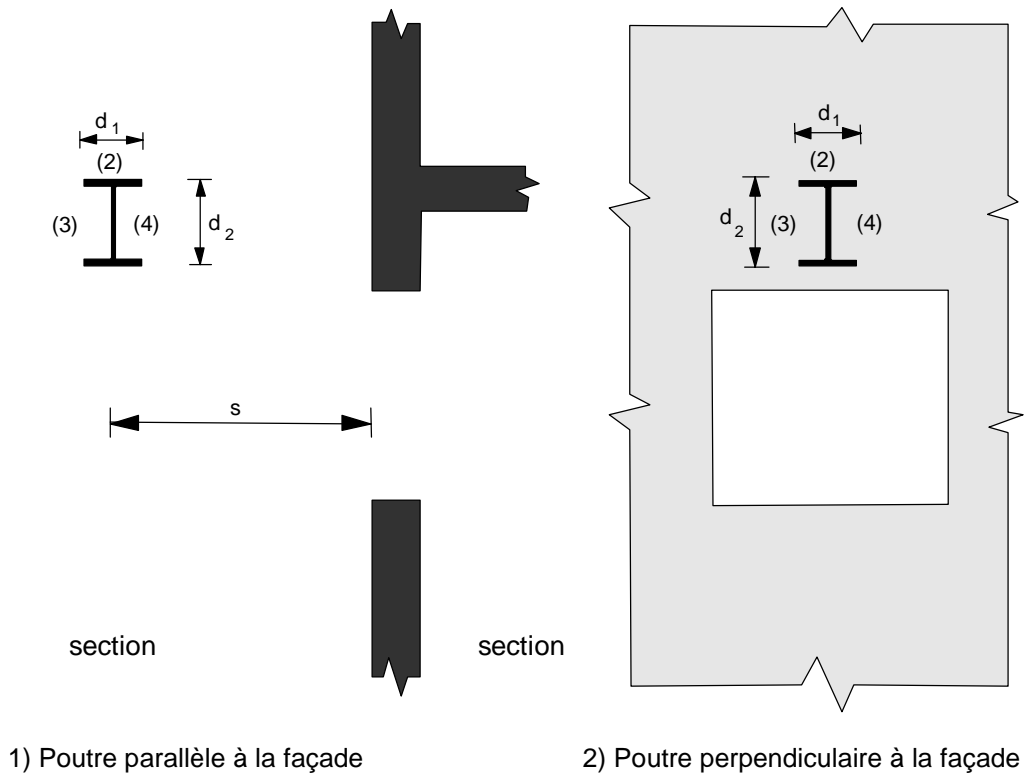
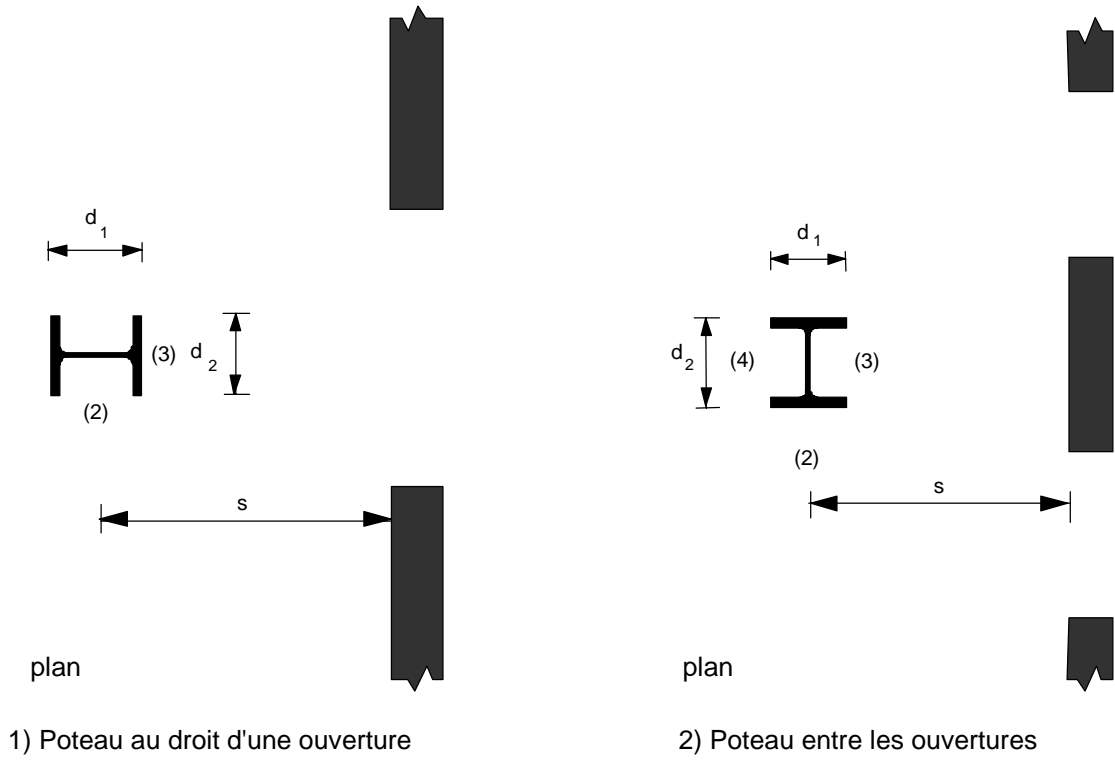


Figure B.1 — Dimensions des éléments et identification des faces

(3) Pour un élément dans les flammes, il convient de déterminer sa température moyenne T_m [K] par la résolution de l'équation de l'équilibre thermique suivante :

$$\sigma T_M^4 + \alpha T_M = I_z + I_f + a T_z \quad (\text{B.2})$$

où :

T_z est la température de la flamme [K] ;

I_z est le flux thermique rayonnant de la flamme [kW/m^2] ;

I_f est le flux thermique rayonnant de l'ouverture correspondante [kW/m^2] ;

(4) Il convient de déterminer le flux thermique rayonnant des flammes I_z , suivant la situation et le type d'élément, comme suit :

- poteaux hors des flammes : voir B.2 ;
- poutres hors des flammes : voir B.3 ;
- poteaux dans les flammes : voir B.4 ;
- poutres totalement ou partiellement dans les flammes : voir B.5.

Les autres cas peuvent être traités par analogie en adaptant de façon adéquate les méthodes données de B.2 à B.5.

(5) Il convient de déterminer le flux thermique rayonnant I_f venant d'une ouverture comme suit :

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma T_f^4 \quad (\text{B.3})$$

où :

ϕ_f est le facteur de forme global de l'élément pour le transfert thermique par rayonnement venant de cette ouverture ;

ε_f est l'émissivité de l'ouverture ;

a_z est l'absorptivité des flammes ;

T_f est la température du feu [K], conformément à l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

(6) Il convient de prendre l'émissivité ε_f d'une ouverture égale à l'unité, voir annexe C de l'ENV 1991-2-2.

(7) Il convient de déterminer l'absorptivité des flammes a_z à partir des sections B.2 à B.5 selon les cas.

B.1.4 Facteurs de forme globaux

(1) Il convient de déterminer le facteur de forme global ϕ_f d'un élément, pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une ouverture, par :

$$\phi_f = \frac{(C1\phi_{f,1} + C2\phi_{f,2})d1 + (C3\phi_{f,3} + C4\phi_{f,4})d2}{(C1 + C2)d1 + (C3 + C4)d2} \quad (\text{B.4})$$

où :

$\phi_{f,i}$ est le facteur de forme de la face i de l'élément relatif à cette ouverture, voir annexe C ;

d_i représente les dimensions de la section transversale de la face i de l'élément ;

C_i est le coefficient de protection de la face i de l'élément, comme suit :

- pour une face protégée : $C_i = 0$;
- pour une face non protégée : $C_i = 1$.

(2) Il convient de prendre le facteur de forme $\phi_{f,i}$ d'une face d'élément depuis laquelle l'ouverture n'est pas visible égal à zéro.

(3) Il convient de déterminer le facteur de forme global ϕ_z d'un élément, pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une flamme, par :

$$\phi_z = \frac{(C_1\phi_{z,1} + C_2\phi_{z,2})d_1 + (C_3\phi_{z,3} + C_4\phi_{z,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad (\text{B.5})$$

où :

$\phi_{z,i}$ est le facteur de forme de la face i de l'élément relatif à cette flamme, voir annexe C.

(4) Le facteur de forme $\phi_{z,i}$ de chaque face d'un élément individuel pour le transfert thermique par rayonnement à partir de flammes peut être déterminé à partir des dimensions d'une flamme rectangulaire équivalente. Dans ce but, il convient de déterminer les dimensions et les emplacements des rectangles équivalents représentant le front et les côtés d'une flamme comme indiqué en B.2 pour les poteaux et en B.3 pour les poutres. Dans tous les autres cas, il convient d'utiliser les dimensions de flamme de l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

(5) Le facteur de forme $\phi_{z,i}$ d'une face d'élément depuis laquelle la flamme n'est pas visible doit être pris égal à zéro.

(6) Une face d'élément peut être protégée par un écran thermique, voir 4.2.3.3. Une face d'élément qui est immédiatement adjacente à la paroi du compartiment peut également être considérée comme protégée, à condition qu'il n'y ait pas d'ouverture dans cette partie de la paroi. Il convient de considérer toutes les autres faces comme non protégées.

B.2 Poteaux hors des flammes

B.2.1 Transfert thermique par rayonnement

(1) Il convient de faire une distinction entre un poteau situé au droit d'une ouverture et un poteau situé entre des ouvertures, voir Figure B.2.

(2) Si le poteau est au droit d'une ouverture, voir Figure B.3, il convient de déterminer le flux thermique rayonnant I_z depuis la flamme par :

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma T_z^4 \quad (\text{B.6})$$

où :

ϕ_z est le facteur de forme global du poteau pour la chaleur provenant de la flamme, voir B.1.4 ;

ε_z est l'émissivité de la flamme, voir B.2.2 ;

T_z est la température de la flamme [K], selon B.2.3.

(3) Si le poteau est entre des ouvertures, voir Figure B.4, il convient de déterminer le flux thermique total par rayonnement I_z des flammes sur chaque côté par :

$$I_z = (\phi_{z,m} \varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \varepsilon_{z,n}) \sigma T_z^4 \quad (\text{B.7})$$

où :

$\phi_{z,m}$ est le facteur de forme global du poteau pour la chaleur provenant des flammes sur le côté m , voir B.1.4 ;

$\phi_{z,n}$ est le facteur de forme global du poteau pour la chaleur provenant des flammes sur le côté n , voir B.1.4 ;

$\varepsilon_{z,m}$ est l'émissivité totale des flammes sur le côté m , voir B.2.2 ;

$\varepsilon_{z,n}$ est l'émissivité totale des flammes sur le côté n , voir B.2.2.

B.2.2 Emissivité des flammes

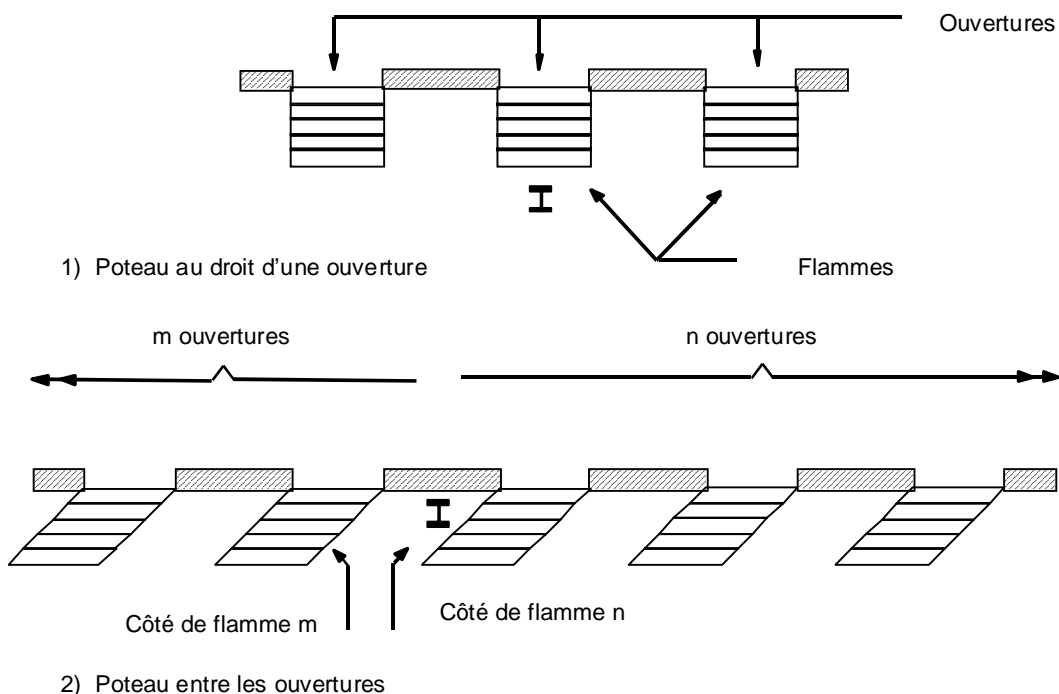
(1) Si le poteau est au droit d'une ouverture, il convient de déterminer l'émissivité de la flamme ε_z à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant l'épaisseur de flamme λ au niveau de la partie supérieure des ouvertures. A condition qu'il n'y ait pas d'avent ou de balcon au dessus de l'ouverture, λ peut être calculé comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » : $\lambda = 2h/3$ (B.8a)

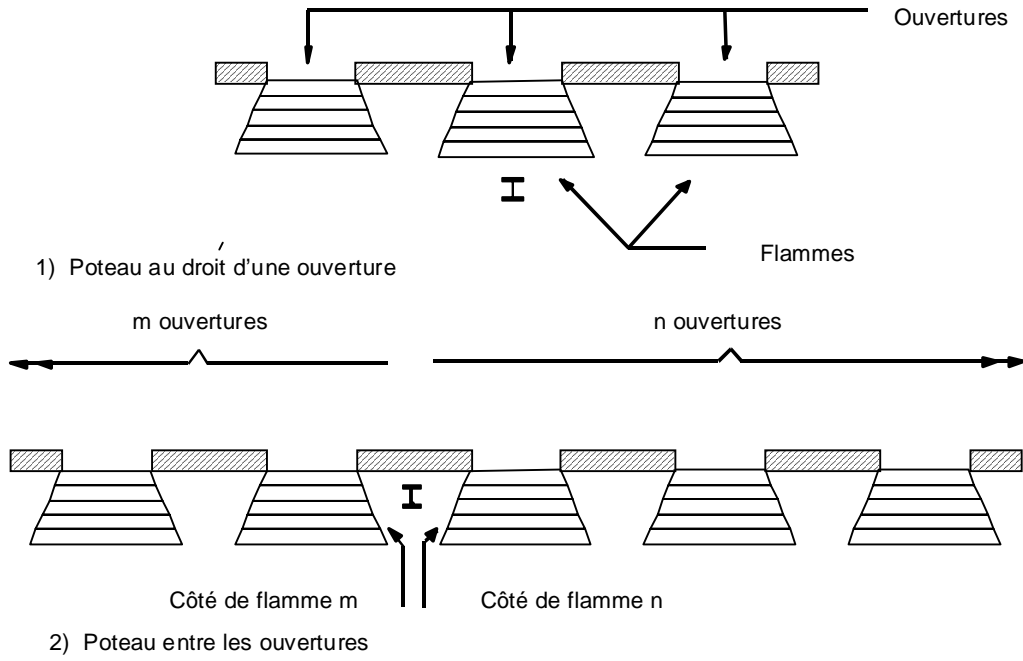
— pour la condition de ventilation « forcée » : $\lambda = x$ avec $\lambda \leq hx/z$ (B.8b)

où

h , x et z sont donnés dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

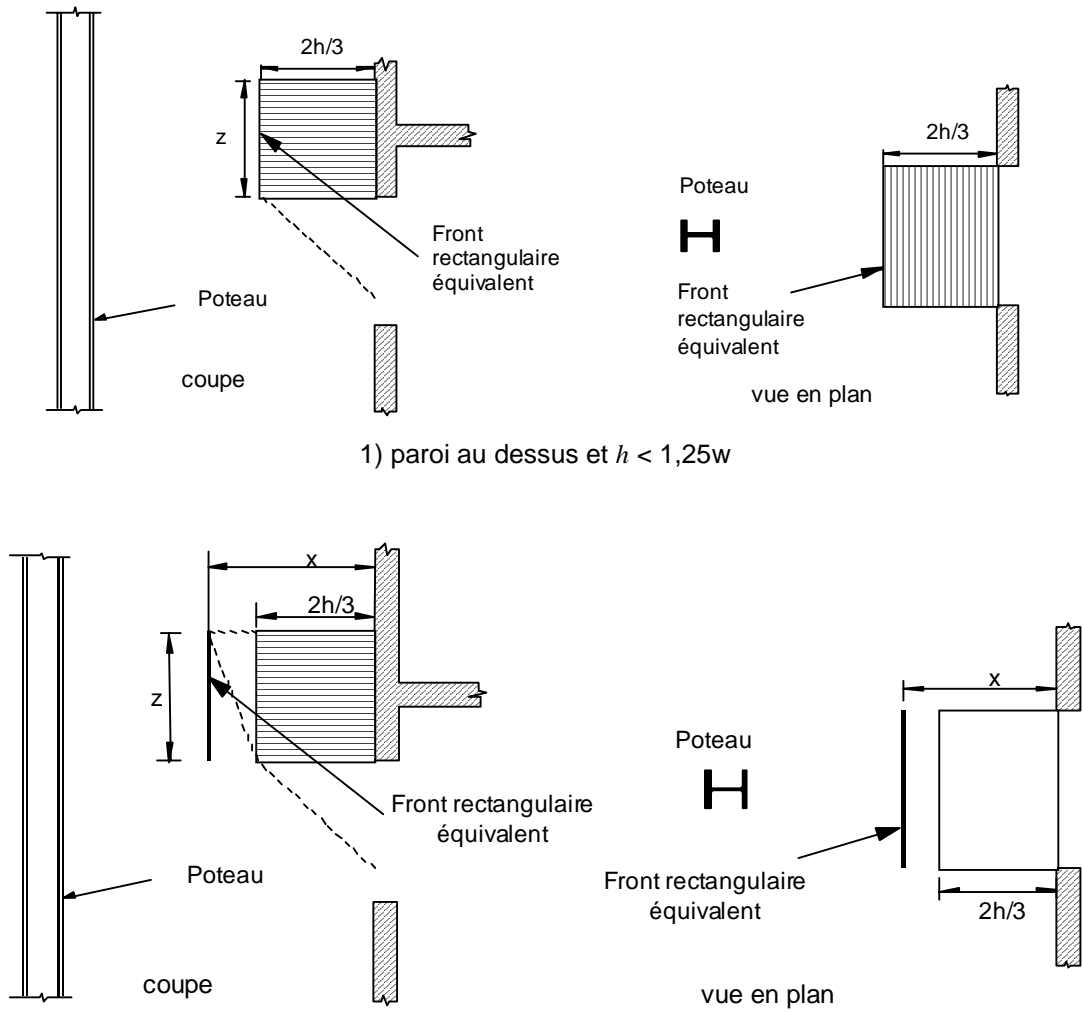


a) Condition de ventilation « non forcée »



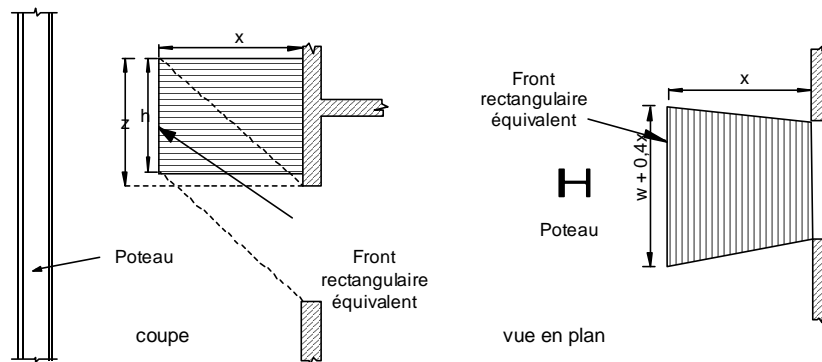
b) Condition de ventilation « forcée »

Figure B.2 — Positions du poteau



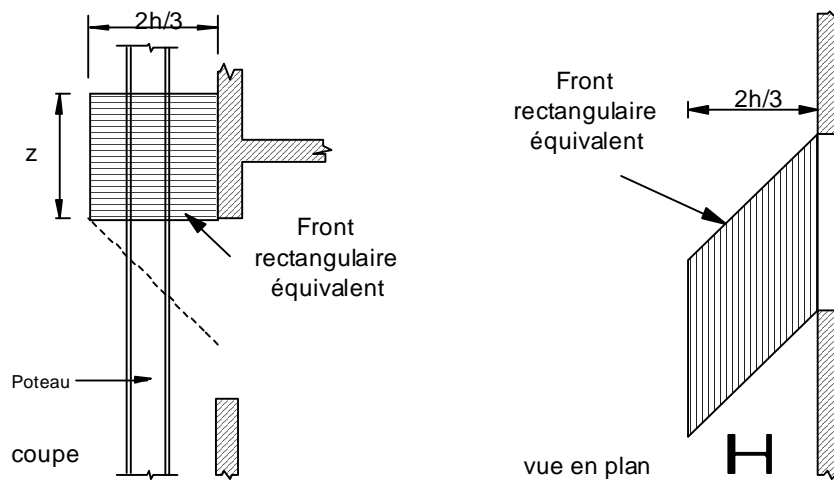
2) paroi au dessus et $h > 1,25 w$ ou aucune paroi au dessus

a) Condition de ventilation « non forcée »

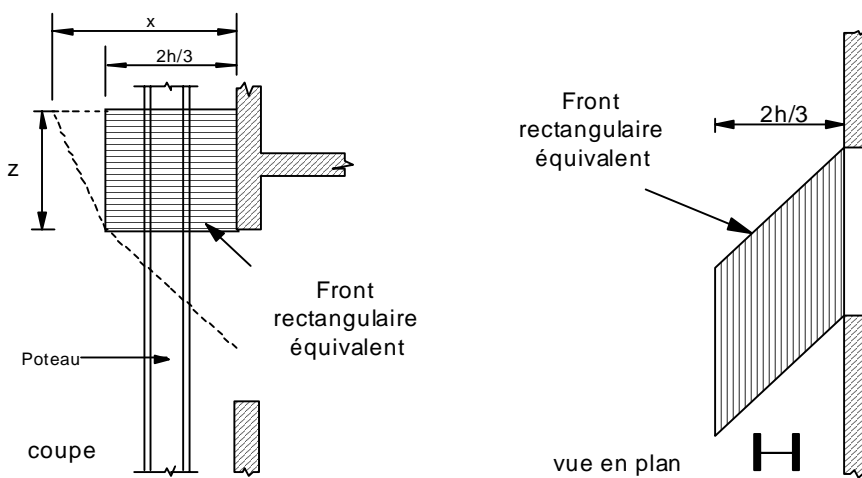


b) Condition de ventilation « forcée »

Figure B.3 — Poteau au droit d'une ouverture

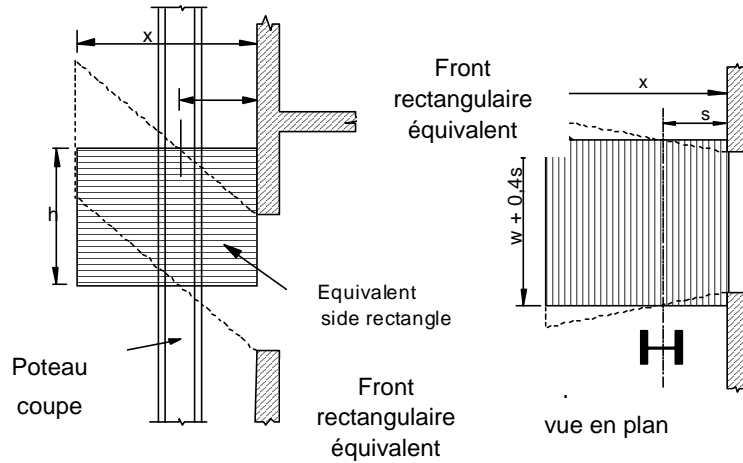


1) paroi au-dessus et $h < 1,25w$



2) paroi au dessus et $h > 1,25w$ ou aucune paroi au dessus

a) Condition de ventilation « non forcée »



b) Condition de ventilation « forcée »

Figure B.4 — Poteau entre les ouvertures

(2) Si le poteau est entre deux ouvertures, il convient de déterminer les émissivités totales $\varepsilon_{z,m}$ et $\varepsilon_{z,n}$ des flammes sur les côtés m et n à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant pour l'épaisseur de flamme totale λ la valeur suivante :

— pour le côté m : $\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i C$ (B.9a)

— pour le côté n : $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i D$ (B.9b)

où :

- m est le nombre d'ouvertures sur le côté m ;
- n est le nombre d'ouvertures sur le côté n ;
- λ_i est l'épaisseur de la flamme pour l'ouverture i .

(3) Il convient de prendre l'épaisseur de flamme λ_i comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » :

$\lambda_i = w_i$ (B.10a)

— pour la condition de ventilation « forcée » :

$\lambda_i = w_i + 0,4s$ (B.10b)

où :

- w_i est la largeur de l'ouverture ;
- s est la distance horizontale de l'axe du poteau à la paroi du compartiment, voir Figure B.1.

B.2.3 Température de flamme

(1) Il convient de prendre la température de flamme T_z égale à la température sur l'axe de la flamme à partir de l'expression de T_z donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, pour les conditions de ventilation « non forcée » ou « forcée » suivant les cas, à la distance ℓ de l'ouverture, mesurée le long de l'axe de la flamme, comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » : $\ell = h/2$ (B.11a)

— pour la condition de ventilation « forcée » :

— pour un poteau au droit d'une ouverture : $\ell = 0$ (B11.b)

— pour un poteau entre des ouvertures, ℓ est la distance, le long de l'axe de la flamme, à un point situé à une distance s de la paroi du compartiment. A condition qu'il n'y ait pas d'auvent ou de balcon au dessus de l'ouverture :

$$\ell = sX/x \quad (B.11c)$$

où X et x sont donnés dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

B.2.4 Absorptivité des flammes

(1) Pour la condition de ventilation « non forcée », il convient de prendre l'absorptivité a_z égale à zéro.

(2) Pour la condition de ventilation « forcée », il convient de prendre l'absorptivité a_z égale à l'émissivité ε_z de la flamme concernée, voir B.2.2.

B.3 Poutre hors des flammes

B.3.1 Transfert thermique par rayonnement

(1) Dans toute la section B.3, on suppose que le dessous de la poutre n'est pas plus bas que le haut des ouvertures du compartiment d'incendie.

(2) Il y a lieu de distinguer les poutres qui sont parallèles à la paroi extérieure du compartiment des poutres qui lui sont perpendiculaires, voir Figure B.5.

(3) Si la poutre est parallèle à la paroi extérieure du compartiment, il convient de déterminer la température moyenne de l'élément T_M pour un point situé sur la longueur de la poutre juste au-dessus du centre de l'ouverture. Dans ce cas, il convient de déterminer le flux thermique rayonnant I_z depuis la flamme par :

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma T_z^4 \quad (B.12)$$

où :

ϕ_z est le facteur de forme global pour la flamme directement au droit de la poutre, voir B.1.4 ;

ε_z est l'émissivité de la flamme, voir B.3.2 ;

T_z est la température de la flamme suivant B.3.3 [K].

(4) Si la poutre est perpendiculaire à la paroi extérieure du compartiment, il convient de déterminer la température moyenne pour une série de points pris tous les 100 mm sur la longueur de la poutre. Il convient alors de prendre la température moyenne T_m de l'élément en alliage d'aluminium égale à la plus grande de ces valeurs. Dans ce cas, il y a lieu de déterminer le flux thermique rayonnant I_z depuis la flamme par :

$$I_z = (\phi_{z,m} \varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \varepsilon_{z,n}) \sigma T_z^4 \tag{B.13}$$

où :

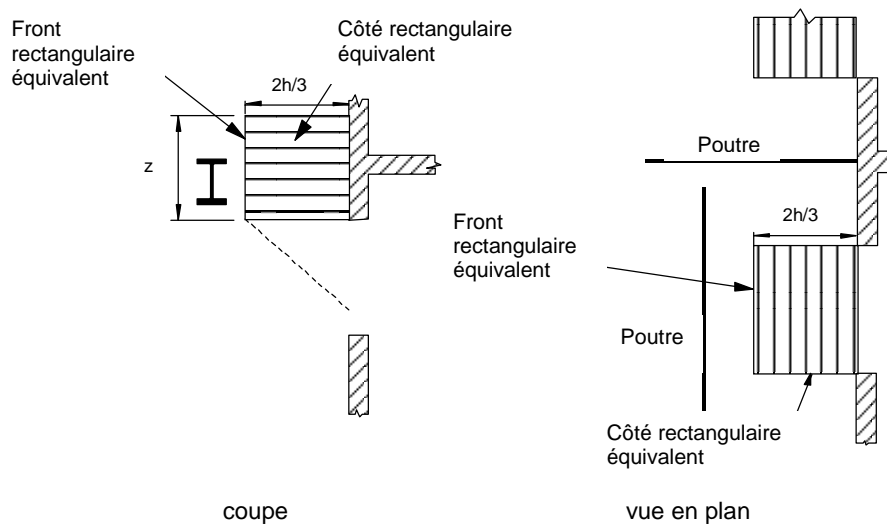
$\phi_{z,m}$ est le facteur de forme global de la poutre pour la chaleur provenant des flammes du côté m , voir B.3.2 ;

$\phi_{z,n}$ est le facteur de forme global de la poutre pour la chaleur provenant des flammes du côté n , voir B.3.2 ;

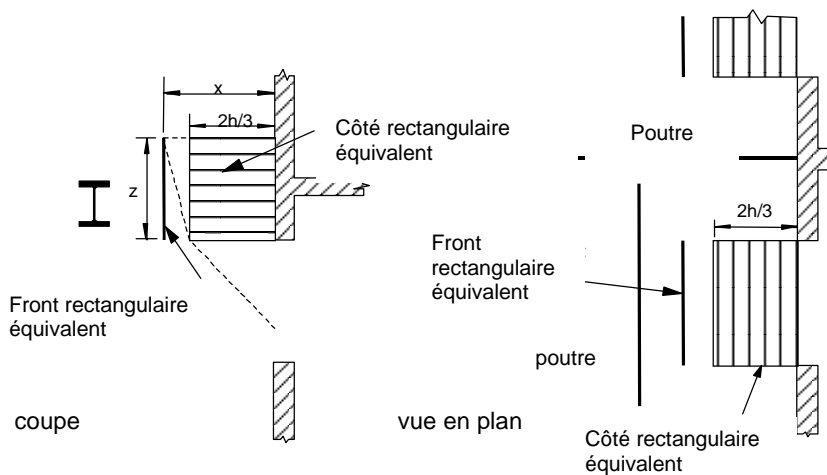
$\varepsilon_{z,m}$ est l'émissivité totale des flammes du côté m , voir B.3.3 ;

$\varepsilon_{z,n}$ est l'émissivité totale des flammes du côté n , voir B.3.3 ;

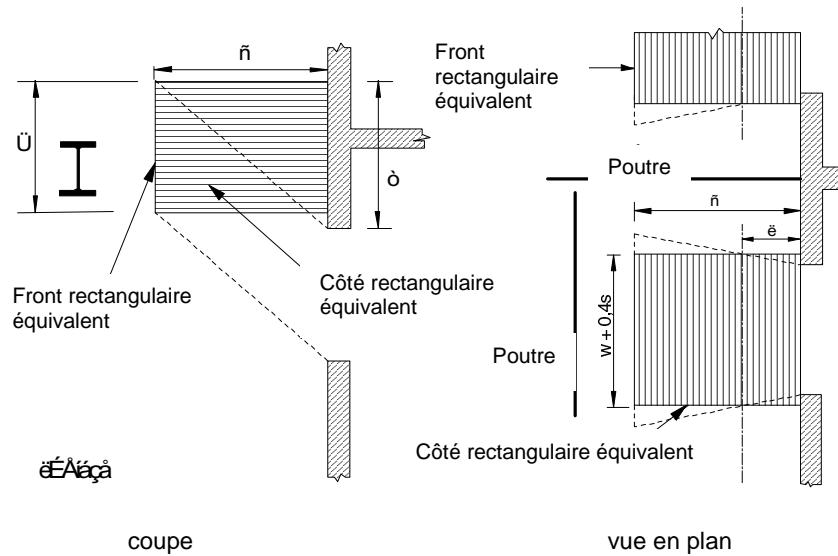
T_z est la température de flamme [K], voir B.3.4.



1) paroi au dessus et $h < 1,25w$



2) paroi au dessus et $h > 1,25w$ ou bien aucune paroi au dessus
a) condition de ventilation « non forcée »



b) condition de ventilation « forcée »
Figure B.5 — Poutre hors des flammes

B.3.2 Emissivité des flammes

(1) Si la poutre est parallèle à la paroi extérieure du compartiment, au-dessus d'une ouverture, il convient de déterminer l'émissivité de la flamme ε_z à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant l'épaisseur de flamme λ au niveau de la partie supérieure des ouvertures. A condition qu'il n'y ait pas d'auvent ou de balcon au-dessus de l'ouverture, λ peut être calculé comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » : $\lambda = 2h/3$ (B.14a)

— pour la condition de ventilation « forcée » : $\lambda = x$ avec $\lambda \leq hx/z$ (B.14b)

où h , x et z sont donnés en annexe C de l'ENV 1991-2-2.

(2) Si la poutre est perpendiculaire à la paroi extérieure du compartiment, entre deux ouvertures, il convient de déterminer les émissivités totales $\varepsilon_{z,m}$ et $\varepsilon_{z,n}$ des flammes sur les côtés m et n à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant pour l'épaisseur de la flamme λ la valeur suivante :

— pour le côté m : $\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ (B.15a)

— pour le côté n : $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ (B.15b)

où :

- m est le nombre d'ouvertures sur le côté m ;
- n est le nombre d'ouvertures sur le côté n ;
- λ_i est l'épaisseur de la flamme pour l'ouverture i .

(3) Il convient de prendre l'épaisseur de flamme λ_i comme suit :

— pour des conditions de ventilation « non forcée » : $\lambda_i = w_i$ (B.16a)

— pour des conditions de ventilation « forcée » : $\lambda_i = w_i + 0,4s$ (B.16b)

où :

w_i est la largeur de l'ouverture ;

s est la distance horizontale de la paroi du compartiment au point considéré de la poutre, voir Figure B.5.

B.3.3 Température de flamme

(1) Il convient de prendre la température de flamme T_z égale à la température sur l'axe de la flamme à partir de l'expression de T_z donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, pour les conditions de ventilation « non forcée » ou « forcée » suivant les cas, à la distance ℓ de l'ouverture, mesurée le long de l'axe de la flamme, comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » : $\ell = h/2$ (B.17a)

— pour la condition de ventilation « forcée » :

— pour une poutre parallèle à la paroi extérieure du compartiment, au-dessus d'une ouverture :

$\ell = 0$ (B.17.b)

— pour une poutre perpendiculaire à la paroi extérieure du compartiment, entre des ouvertures, ℓ est la distance, le long de l'axe de la flamme, à un point situé à une distance s de la paroi du compartiment. A condition qu'il n'y ait pas d'auvent ou de balcon au-dessus de l'ouverture :

$\ell = sX/x$ (B.17c)

où X et x sont donnés dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

B.3.4 Absorptivité des flammes

(1) Pour la condition de ventilation « non forcée », il convient de prendre l'absorptivité a_z égale à zéro.

(2) Pour la condition de ventilation « forcée », il convient de prendre l'absorptivité a_z égale à l'émissivité ε_z de la flamme concernée, voir B.3.2.

B.4 Poteau dans les flammes

(1) Il convient de déterminer le flux thermique rayonnant I_z des flammes par :

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (\text{B.18})$$

avec :

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_z^4$$

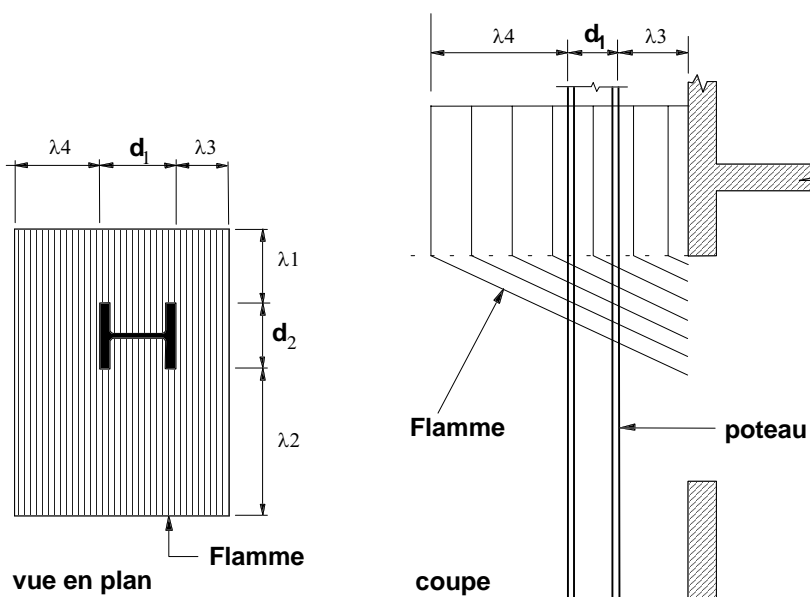
$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma T_z^4$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma T_0^4$$

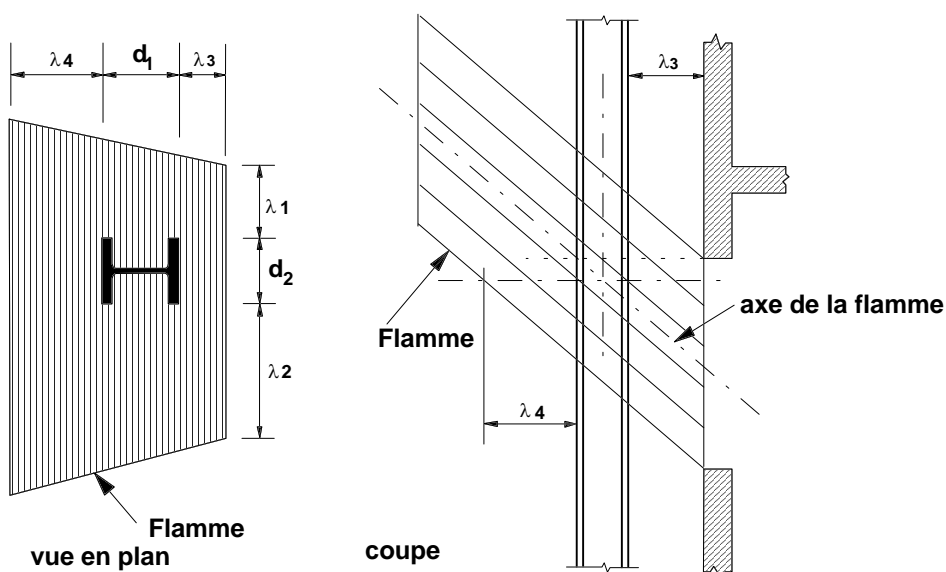
$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma T_z^4$$

où :

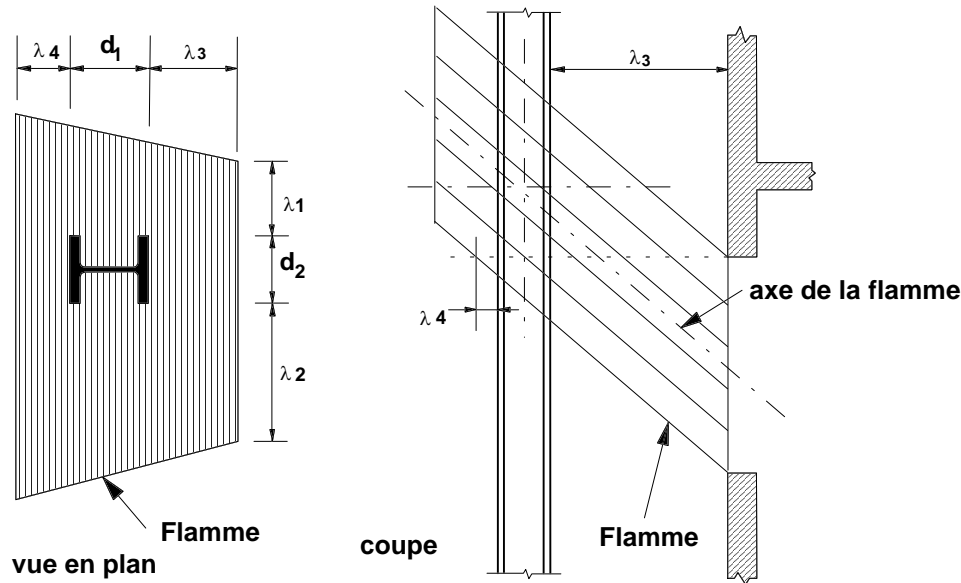
- $I_{z,i}$ est le flux thermique rayonnant des flammes vers la face i du poteau ;
- $\varepsilon_{z,i}$ est l'émissivité des flammes par rapport à la face i du poteau ;
- i est le repère de la face du poteau (1), (2), (3) ou (4) ;
- C_i le coefficient de protection de la face i de l'élément, voir B.1.4 ;
- T_z est la température de flamme [K] ;
- T_0 est la température de flamme à l'ouverture [K], selon l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.



a) condition de ventilation « non forcée »



1) L'axe de la flamme coupe l'axe du poteau en dessous du haut de l'ouverture



2) L'axe de la flamme coupe l'axe du poteau au dessus du haut de l'ouverture

b) condition de ventilation « forcée »

Figure B.6 — Poteau dans les flammes

(2) Il convient de déterminer l'émissivité des flammes $\varepsilon_{z,i}$ pour chacune des faces 1, 2, 3 et 4 du poteau à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant une épaisseur de flamme λ égale à la dimension λ_i indiquée dans la Figure B.6 et correspondant à la face i du poteau.

(3) Pour la condition de ventilation « non forcée », il convient de prendre les valeurs de λ_i au niveau de la partie supérieure de l'ouverture, voir Figure B.6(a).

(4) Pour la condition de ventilation « forcée », si le point d'intersection de l'axe de la flamme et de l'axe du poteau se trouve au-dessous du haut de l'ouverture, il convient de prendre les valeurs de λ_i au niveau de l'intersection, voir Figure B.6(b)(1). Autrement, il convient de prendre les valeurs de λ_i au niveau du haut de l'ouverture, voir Figure B.6(b)(2), mais si $\lambda_4 < 0$ à ce niveau, il y a lieu de prendre les valeurs correspondant au niveau où $\lambda_4 = 0$.

(5) Il convient de prendre la température de flamme T_z égale à la température sur l'axe de la flamme à partir de l'expression de T_z donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, pour les conditions de ventilation « non forcée » ou « forcée » suivant les cas, à la distance ℓ de l'ouverture, mesurée le long de l'axe de la flamme, comme suit :

— pour la condition de ventilation « non forcée » :

$$\ell = h/2 \tag{B.19a}$$

— pour la condition de ventilation « forcée », ℓ est la distance le long de l'axe de la flamme au niveau où λ_i est mesuré. A condition qu'il n'y ait pas d'auvent ou de balcon au-dessus de l'ouverture :

$$\ell = (\lambda_3 + 0,5d_1)X/x \text{ avec } \ell \leq 0,5 hX/z \tag{B.19b}$$

où h , X , x et z sont donnés dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2.

(6) L'absorptivité a_z des flammes doit être déterminée par :

$$a_z = \frac{\varepsilon_{z,1} + \varepsilon_{z,2} + \varepsilon_{z,3}}{3} \tag{B.20}$$

où $\varepsilon_{z,1}$, $\varepsilon_{z,2}$ et $\varepsilon_{z,3}$ sont les émissivités de la flamme pour les faces 1, 2 et 3 du poteau.

B.5 Poutre totalement ou partiellement dans les flammes

B.5.1 Transfert thermique par rayonnement

B.5.1.1 Généralités

(1) Dans toute la section B.5, on suppose que la face inférieure de la poutre n'est pas située au-dessous du niveau supérieur des ouvertures adjacentes du compartiment d'incendie.

(2) Il y a lieu de faire une distinction entre les poutres qui sont parallèles à la paroi extérieure du compartiment et celles qui lui sont perpendiculaires, voir Figure B.7.

(3) Si la poutre est parallèle à la paroi extérieure du compartiment, il convient de déterminer sa température moyenne T_M pour un point le long de la poutre situé à l'aplomb du centre de l'ouverture.

(4) Si la poutre est perpendiculaire à la paroi extérieure du compartiment, il convient de déterminer la température moyenne pour une série de points pris tous les 100 mm sur la longueur de la poutre. Il convient de prendre la plus grande de ces valeurs pour la température moyenne T_M de l'élément en alliage d'aluminium.

(5) Il convient de déterminer le flux thermique rayonnant I_z depuis la flamme par :

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (\text{B.21})$$

où :

$I_{z,i}$ est le flux thermique rayonnant de la flamme vers la face i de la poutre ;

i est le repère de la face de la poutre (1), (2), (3) ou (4).

B.5.1.2 B.5.1.2 Condition de ventilation « non forcée »

(1) Pour la condition de ventilation « non forcée », il y a lieu de faire une distinction entre les cas où le haut de la flamme est au dessus de la partie supérieure de la poutre, et ceux où il est en dessous.

(2) Si le haut de la flamme est au dessus de la partie supérieure de la poutre :

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{B.22a})$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{B.22b})$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{B.22c})$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_{z,2}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{B.22d})$$

où :

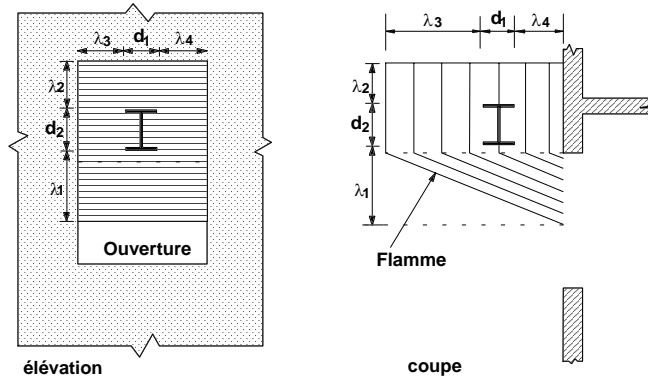
$\varepsilon_{z,i}$ est l'émissivité des flammes par rapport à la face i de la poutre, voir B.5.2 ;

T_0 est la température à l'ouverture [K], selon l'annexe C de l'ENV 1991-2-2 ;

$T_{z,1}$ est la température de flamme [K], selon l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, au niveau de la partie inférieure de la poutre ;

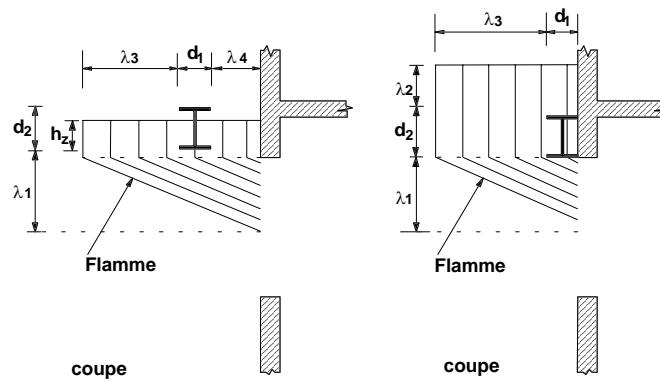
$T_{z,2}$ est la température de flamme [K], selon l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, au niveau de la partie supérieure de la poutre.

(3) Dans le cas d'une poutre parallèle à la paroi extérieure du compartiment, C_4 peut être pris égal à zéro si la poutre est immédiatement adjacente à la paroi, voir Figure B.7.



1) Poutre perpendiculaire à la paroi

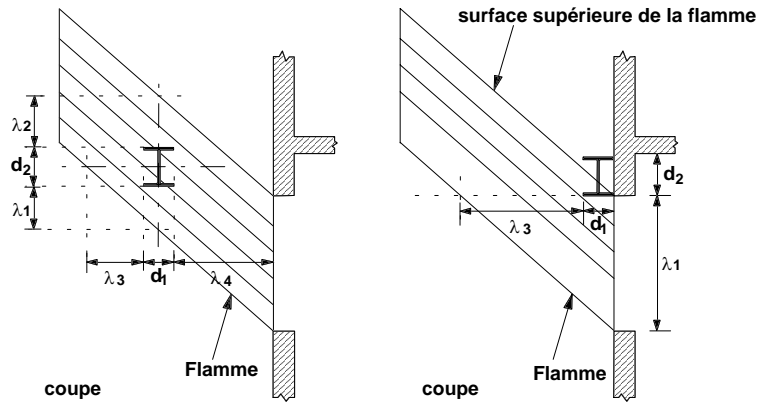
2) poutre parallèle à la paroi



3) haut de la flamme en dessous de la partie supérieure de la poutre

4) poutre immédiatement adjacente à la paroi

a) condition de ventilation « non forcée »



1) poutre décollée de la paroi

2) poutre immédiatement adjacente à la paroi

b) condition de ventilation « forcée »

Figure B.7 — Poutre dans les flammes

(4) Si le haut de la flamme est en dessous de la partie supérieure de la poutre :

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{B.23a})$$

$$I_{z,2} = 0 \quad (\text{B.23b})$$

$$I_{z,3} = (h_z/d_2) C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_x^4)/2 \quad (\text{B.23c})$$

$$I_{z,4} = (h_z/d_2) C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_{z,1}^4 + T_x^4)/2 \quad (\text{B.23d})$$

où :

T_x est la température en haut de la flamme [813 K] ;

h_z est la distance entre le haut de la flamme et le bas de la poutre.

B.5.1.3 Condition de ventilation « forcée »

(1) Pour la condition de ventilation « forcée » et dans le cas de poutres parallèles à la paroi extérieure du compartiment, il y a lieu de faire une distinction entre les poutres immédiatement adjacentes à la paroi et celles qui ne le sont pas, voir Figure B.7.

(2) Pour une poutre parallèle à la paroi, mais décollée de celle-ci, ou pour une poutre perpendiculaire à la paroi :

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{B.24a})$$

$$I_{z,2} = C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{B.24b})$$

$$I_{z,3} = C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad (\text{B.24c})$$

$$I_{z,4} = C_4 \varepsilon_{z,4} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad (\text{B.24d})$$

(3) Si la poutre est parallèle et immédiatement adjacente à la paroi extérieure, il convient de considérer que seule la partie inférieure est située "dans les flammes" et que l'un des côtés et la partie supérieure de la poutre sont exposés au rayonnement thermique venant de la surface supérieure de la flamme, voir Figure B.7(b)(2). Dans ce cas :

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{B.25a})$$

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{B.25b})$$

$$I_{z,3} = \phi_{z,3} C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad (\text{B.25c})$$

$$I_{z,4} = 0 \quad (\text{B.25d})$$

où :

$\phi_{z,i}$ est le facteur de forme relatif à la partie supérieure de la flamme, pour la face i de la poutre, selon l'annexe D.

B.5.2 Emissivité de la flamme

(1) Il convient de déterminer l'émissivité de la flamme $\varepsilon_{z,i}$ pour chaque face 1, 2, 3 et 4 de la poutre, à partir de l'expression de ε donnée dans l'annexe C de l'ENV 1991-2-2, en prenant une épaisseur de flamme λ égale à la dimension λ_i indiquée dans la Figure B.7 et correspondant à la face i de la poutre.

B.5.3 Absorptivité de la flamme

(1) Il convient de déterminer l'absorptivité de la flamme a_z par :

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad (\text{B.26})$$

Annexe C (informative)

Facteur de forme

(1) Le facteur de forme ϕ est défini en 1.3.1(P). Il exprime la fraction du rayonnement thermique total qui quitte une surface rayonnante donnée et atteint une surface réceptrice donnée. Sa valeur dépend des dimensions de la surface rayonnante, de la distance entre les deux surfaces rayonnante et réceptrice et de leur orientation relative.

(2) Dans la présente annexe, on suppose que toutes les surfaces rayonnantes sont de forme rectangulaire. Elles comprennent les fenêtres et les autres ouvertures dans les parois du compartiment d'incendie, ainsi que les surfaces rectangulaires équivalentes des flammes ; voir B.1.4.

(3) Pour calculer le facteur de forme pour une situation donnée, il y a lieu de commencer par tracer une enveloppe rectangulaire de la section de l'élément qui reçoit le rayonnement thermique, comme le montre la Figure C.1. Il convient de déterminer la valeur de ϕ pour le point central P de chaque face de ce rectangle.

(4) Il convient de calculer le facteur de forme de chaque surface réceptrice comme étant la somme des contributions de chacune des zones de la surface rayonnante (normalement quatre) qui sont visibles depuis le point P de la surface réceptrice, comme le montrent les Figures C.2 et C.3. Il convient de définir ces zones par rapport au point X qui est la projection du point P sur le plan contenant la surface rayonnante. Les zones qui ne sont pas visibles du point P , telles que les zones d'ombre de la Figure C.3, n'apportent pas de contribution.

(5) Si le point X se trouve en dehors de la surface rayonnante, il convient de déterminer le facteur de forme effectif en additionnant les contributions des deux rectangles qui s'étendent depuis X jusqu'au côté de la surface rayonnante le plus éloigné, puis en soustrayant les contributions des deux rectangles qui s'étendent depuis X jusqu'au côté de la surface rayonnante le plus proche.

(6) Il convient de déterminer la contribution de chaque zone comme suit :

— surface réceptrice parallèle à la surface rayonnante :

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{a}{(1+a^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{b}{(1+a^2)^{0,5}} \right) + \frac{b}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right) \right] \quad (C.1)$$

avec :

$$a = h/s$$

$$b = w/s$$

où :

s est la distance de P à X ;

h est la hauteur de la zone de la surface rayonnante ;

w est la largeur de cette zone ;

— surface réceptrice perpendiculaire à la surface rayonnante :

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{1}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right) \right] \quad (C.2)$$

— surface réceptrice dans un plan faisant un angle θ avec la surface rayonnante :

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{(1 - b \cdot \cos \theta)}{(1 + b^2 - 2b \cdot \cos \theta)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1 + b^2 - 2b \cdot \cos \theta)^{0,5}} \right) \right. \\
 \left. + \frac{a \cdot \cos \theta}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{(b - \cos \theta)}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{(a^2 + \sin^2 \theta)^{0,5}} \right) \right] \right] \quad (C.3)$$

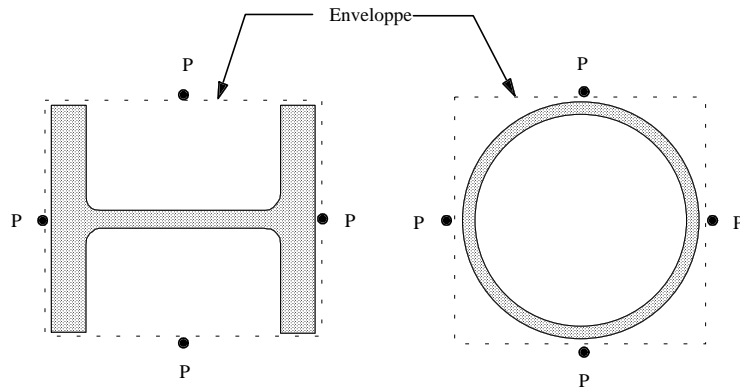


Figure C.1 — Enveloppe des surfaces réceptrices

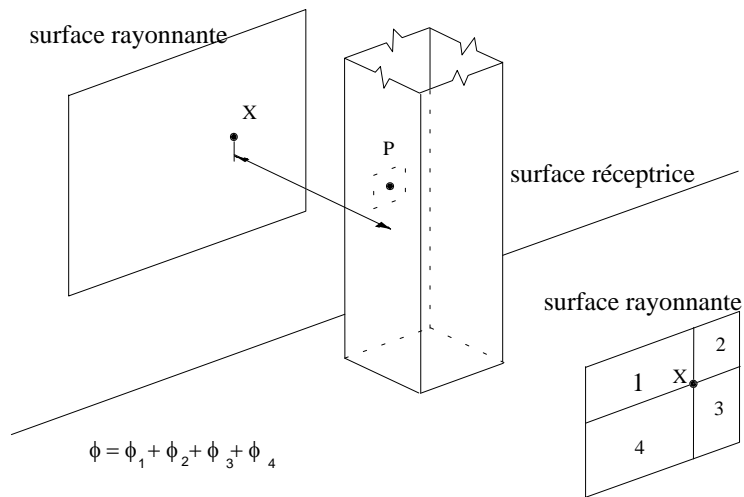


Figure C.2 — Surface réceptrice dans un plan parallèle à la surface rayonnante

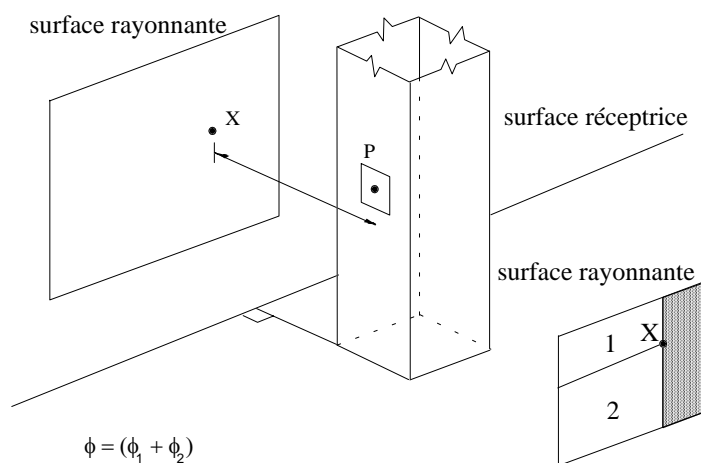


Figure C.3 — Surface réceptrice perpendiculaire au plan de la surface rayonnante

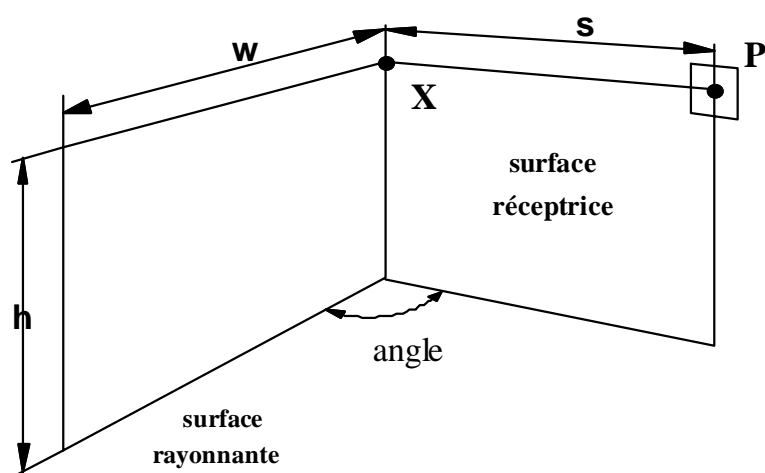


Figure C.4 — Surface réceptrice dans un plan faisant un angle avec la surface rayonnante