

Eurocode 1 : Actions sur les structures structures

Partie 1-2 : Actions générales

Actions sur les structures exposées au feu structures exposées au feu

Norme Marocaine homologuée

Par décision du Directeur de l'Institut Marocain de Normalisation N°.....du 2020,
publiée au B.O. N° du 2020.

Correspondance

La présente norme nationale est identique à l'EN 1991-1-2:2002 + NA:2007 + AC:2012 et est reproduite avec la permission du CEN, Avenue Marnix 17, B-1000 Bruxelles.

Tous droits d'exploitation des Normes Européennes sous quelque forme que ce soit et par tous moyens sont réservés dans le monde entier au CEN et à ses Membres Nationaux, et aucune reproduction ne peut être engagée sans permission explicite et par écrit du CEN par l'IMANOR.

Droits d'auteur

Droit de reproduction réservés sauf prescription différente aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé électronique ou mécanique y compris la photocopie et les microfilms sans accord formel. Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients de l'IMANOR, Toute mise en réseau, reproduction et rediffusion, sous quelque forme que ce soit, même partielle, sont strictement interdites.

Avant-Propos National

L'Institut Marocain de Normalisation (IMANOR) est l'Organisme National de Normalisation. Il a été créé par la Loi N° 12-06 relative à la normalisation, à la certification et à l'accréditation sous forme d'un Etablissement Public sous tutelle du Ministère chargé de l'Industrie et du Commerce.

Les normes marocaines sont élaborées et homologuées conformément aux dispositions de la Loi N° 12-06 susmentionnée.

La présente norme marocaine a été reprise de la norme européenne EN conformément à l'accord régissant l'affiliation de l'Institut Marocain de Normalisation (IMANOR) au Comité Européen de Normalisation (CEN).

Tout au long du texte du présent document, lire « ... la présente norme européenne ... » avec le sens de « ... la présente norme marocaine... ».

Toutes les dispositions citées dans la présente norme, relevant du dispositif réglementaire européen (textes réglementaires européens, directives européennes, étiquetage et marquage CE, ...) sont remplacés par les dispositions réglementaires ou normatives correspondantes en vigueur au niveau national, le cas échéant.

La présente norme marocaine NM EN 1991-1-2 a été examinée et adoptée par la Commission de Normalisation des bases de calcul des constructions (077).

Version française

**Eurocode 1 : Actions sur les structures —
Partie 1-2 : Actions générales —
Actions sur les structures exposées au feu**

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke —
Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen —
Brandeinwirkungen auf Tragwerke

Eurocode 1: Actions on structures —
Part 1-2: General actions —
Actions on structures exposed to fire

La présente norme européenne a été adoptée par le CEN le 1^{er} septembre 2002.

Les corrigenda ont pris effet respectivement le 4 mars 2009 et le 21 novembre 2012, pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de l'EN.

Les membres du CEN sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la norme européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Secrétariat Central ou auprès des membres du CEN.

La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version faite dans une autre langue par traduction sous la responsabilité d'un membre du CEN dans sa langue nationale, et notifiée au Secrétariat Central, a le même statut que les versions officielles.

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, Malte, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

Sommaire

	Page
Section 1 Généralités	9
1.1 Domaine d'application	9
1.2 Références normatives	9
1.3 Hypothèses	10
1.4 Distinction entre principes et règles d'application	10
1.5 Termes et définitions	10
1.5.1 Termes courants utilisés dans les parties des Eurocodes relatives au feu	10
1.5.2 Termes spéciaux relatifs au calcul en général	12
1.5.3 Termes relatifs aux actions thermiques	12
1.5.4 Termes relatifs à l'analyse du transfert thermique	14
1.6 Symboles	14
Section 2 Procédure de calcul structural au feu	19
2.1 Généralités	19
2.2 Scénario de feu de calcul	19
2.3 Feu de calcul	19
2.4 Analyse thermique	19
2.5 Analyse mécanique	20
Section 3 Actions pour l'analyse thermique (actions thermiques)	21
3.1 Règles générales	21
3.2 Courbes nominales température/temps	22
3.2.1 Courbe température/temps normalisée	22
3.2.2 Courbe de feu extérieur	22
3.2.3 Courbe d'hydrocarbure	22
3.3 Modèles de feu naturel	23
3.3.1 Modèles de feu simplifiés	23
3.3.2 Modèles de feu avancés	23
Section 4 Actions pour l'analyse structurale (actions mécaniques)	25
4.1 Généralités	25
4.2 Simultanéité des actions	25
4.2.1 Actions à partir d'un calcul à température normale	25
4.2.2 Actions additionnelles	25
4.3 Règles de combinaisons des actions	26
4.3.1 Règle générale	26
4.3.2 Règles simplifiées	26
4.3.3 Niveau de chargement	26
Annexe A (informative) Courbes paramétrées température/temps	27
Annexe B (informative) Actions thermiques pour les éléments extérieurs — Méthode de calcul simplifiée	30
B.1 Domaine d'application	30
B.2 Conditions d'utilisation	30
B.3 Effets du vent	31
B.3.1 Mode de ventilation	31
B.3.2 Déviation des flammes sous l'action du vent	31
B.4 Caractéristiques du feu et des flammes	32
B.4.1 Absence de ventilation forcée	32
B.4.2 Ventilation forcée	34
B.5 Facteurs de forme généraux	36
Annexe C (informative) Feux localisés	38

Sommaire (fin)

	Page
Annexe D (informative) Modèles de feu avancés	41
D.1 Modèles une zone	41
D.2 Modèles deux zones	42
D.3 Modèles de calcul de dynamique des fluides	42
Annexe E (informative) Densités de charge calorifique	43
E.1 Généralités	43
E.2 Détermination des densités de charge calorifique	44
E.2.1 Généralités	44
E.2.2 Définitions	44
E.2.3 Charges calorifiques protégées	45
E.2.4 Pouvoirs calorifiques inférieurs	45
E.2.5 Classement des charges calorifiques selon le type d'occupation	47
E.2.6 Évaluation individuelle des densités de charge calorifique	47
E.3 Conditions de combustion	47
E.4 Débit calorifique Q	48
Annexe F (informative) Temps équivalent d'exposition au feu	50
Annexe G (informative) Facteur de forme	52
G.1 Généralités	52
G.2 Effets d'ombre	53
G.3 Éléments extérieurs	53
Bibliographie	57

Avant-propos

Le présent document EN 1991-1-2:2002 a été élaboré par le Comité Technique CEN/TC 250 «Eurocodes structuraux», dont le secrétariat est tenu par la BSI.

Le Comité Technique CEN/TC 250/SC 1 est responsable de l'Eurocode 1.

Cette Norme européenne devra recevoir le statut de norme nationale, soit par publication d'un texte identique, soit par entérinement, au plus tard en mai 2003, et toutes les normes nationales en contradiction devront être retirées au plus tard en décembre 2009.

Le présent document remplace l'ENV 1991-2-2:1995.

Les annexes A, B, C, D, E, F et G sont informatives.

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

Origine du programme des Eurocodes

En 1975, la Commission des Communautés Européennes arrêta un programme d'actions dans le domaine de la construction, sur la base de l'article 95 du Traité. L'objectif du programme était l'élimination des obstacles aux échanges et l'harmonisation des spécifications techniques.

Dans le cadre de ce programme d'actions, la Commission prit l'initiative d'établir un ensemble de règles techniques harmonisées pour le dimensionnement des ouvrages ; ces règles, en un premier stade, serviraient d'alternative aux règles nationales en vigueur dans les États Membres et, finalement, les remplaceraient.

Pendant quinze ans, la Commission, avec l'aide d'un Comité Directeur comportant des représentants des États Membres, pilota le développement du programme des Eurocodes, ce qui conduisit au cours des années 80 à la première génération de codes européens.

En 1989, la Commission et les États Membres de l'Union Européenne et de l'AELE décidèrent, sur la base d'un accord ¹⁾ entre la Commission et le CEN, de transférer au CEN par une série de Mandats la préparation et la publication des Eurocodes, afin de leur donner par la suite un statut de Normes européennes (EN). Ceci établit de facto un lien entre les Eurocodes et les dispositions de toutes les Directives du Conseil et/ou Décisions de la Commission traitant de Normes européennes (par exemple, la Directive du Conseil 89/106/CEE sur les produits de la construction — DPC — et les Directives du Conseil 93/37/CEE, 92/50/CEE et 89/440/CEE sur les travaux et services publics ainsi que les Directives équivalentes de l'AELE destinées à la mise en place du marché intérieur).

Le programme des Eurocodes Structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de Parties :

EN 1990, Eurocode : Bases de calcul des structures.

EN 1991, Eurocode 1 : Actions sur les structures.

prEN 1992, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.

prEN 1993, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier.

prEN 1994, Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier béton.

prEN 1995, Eurocode 5 : Calcul des structures en bois.

prEN 1996, Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie.

prEN 1997, Eurocode 7 : Calcul géotechnique.

prEN 1998, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes.

prEN 1999, Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

1) Accord entre la Commission des Communautés Européennes et le Comité Européen pour la Normalisation (CEN) concernant le travail sur les EUROCODES pour le dimensionnement des ouvrages de bâtiment et de génie civil (BC/CEN/03/89).

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des autorités réglementaires dans chaque État Membre et ont sauvegardé le droit de celles-ci de déterminer, au niveau national, des valeurs relatives aux questions réglementaires de sécurité, là où ces valeurs continuent à différer d'un État à l'autre.

Statut et domaine d'application des Eurocodes

Les États Membres de l'UE et de l'AELE reconnaissent que les EUROCODES servent de documents de référence pour les usages suivants :

- comme moyen de prouver la conformité des bâtiments et des ouvrages de génie civil aux exigences essentielles de la Directive du Conseil 89/106/CEE, en particulier l'Exigence Essentielle n° 1 — Stabilité et résistance mécaniques — et l'Exigence Essentielle n° 2 — Sécurité en cas d'incendie ;
- comme base de spécification des contrats pour les travaux de construction et les services techniques associés ;
- comme cadre d'établissement de spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction (EN et ATE).

Les Eurocodes, dans la mesure où ils concernent les ouvrages de construction eux-mêmes, ont une relation directe avec les Documents Interprétatifs ²⁾ visés à l'article 12 de la DPC, quoiqu'ils soient d'une nature différente de celle des normes harmonisées de produits ³⁾. En conséquence, les aspects techniques résultant des travaux effectués pour les Eurocodes nécessitent d'être pris en considération de façon adéquate par les Comités Techniques du CEN et/ou les groupes de travail de l'EOTA travaillant sur les normes de produits en vue de parvenir à une complète compatibilité de ces spécifications techniques avec les Eurocodes.

Les normes Eurocodes fournissent des règles de conception structurale communes d'usage quotidien pour le calcul des structures entières et des produits composants de nature traditionnelle ou innovatrice. Les formes de construction ou les conceptions inhabituelles ne sont pas spécifiquement couvertes, et il appartiendra en ces cas au concepteur de se procurer des bases spécialisées supplémentaires.

Normes nationales transposant les Eurocodes

Les normes nationales transposant les Eurocodes comprendront la totalité du texte des Eurocodes (toutes annexes incluses), tel que publié par le CEN ; ce texte peut être précédé d'une page nationale de titres et d'un Avant-Propos National, et peut être suivi d'une annexe nationale.

L'annexe Nationale peut seulement contenir des informations sur les paramètres laissés en attente dans l'Eurocode pour choix national, sous la désignation de Paramètres Déterminés au niveau National, à utiliser pour les projets de bâtiments et ouvrages de génie civil à construire dans le pays concerné ; il s'agit :

- de valeurs et/ou des classes là où des alternatives figurent dans l'Eurocode ;
- de valeurs à utiliser là où seul un symbole est donné dans l'Eurocode ;
- de données propres à un pays (géographiques, climatiques, etc.), par exemple carte de neige ;
- de la procédure à utiliser là où des procédures alternatives sont données dans l'Eurocode ;

2) Selon l'article 3.3 de la DPC, les exigences essentielles (E.E.) doivent recevoir une forme concrète dans des Documents Interprétatifs (DI) pour assurer les liens nécessaires entre les exigences essentielles et les mandats pour Normes européennes (EN) harmonisées et guides pour les agréments techniques européens (ATE), et ces agréments eux-mêmes.

3) Selon l'article 12 de la DPC, les documents interprétatifs doivent :

- a) donner une forme concrète aux exigences essentielles en harmonisant la terminologie et les bases techniques et en indiquant, lorsque c'est nécessaire, des classes ou niveaux pour chaque exigence ;
- b) indiquer des méthodes pour relier ces classes ou niveaux d'exigences avec les spécifications techniques, par exemple méthodes de calcul et d'essai, règles techniques pour la conception, etc. ;
- c) servir de référence pour l'établissement de normes harmonisées et de guides pour agréments techniques européens.

Les Eurocodes, de facto, jouent un rôle similaire pour l'E.E.1 et une partie de l'E.E.2.

Ils peuvent aussi contenir :

- de décisions sur l'usage des annexes informatives ;
- de références à des informations complémentaires non contradictoires pour aider l'utilisateur à appliquer l'Eurocode.

Liens entre les Eurocodes et les spécifications techniques harmonisées (EN et ATE) pour les produits

La cohérence est nécessaire entre les spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction et les règles techniques pour les ouvrages⁴⁾. En outre, toute information accompagnant la Marque CE des produits de construction, se référant aux Eurocodes, doit clairement faire apparaître quels Paramètres Déterminés au niveau National ont été pris en compte.

Informations additionnelles spécifiques a l'EN 1991-1-2

L'EN 1991-1-2 décrit les actions thermiques et mécaniques pour le calcul structural de bâtiments exposés au feu, y compris les aspects suivants :

Exigences de sécurité

L'EN 1991-1-2 s'adresse aux clients (par exemple pour la formulation de leurs exigences spécifiques), concepteurs, entrepreneurs et autorités compétentes.

Les objectifs généraux de protection contre l'incendie sont de limiter les risques concernant les individus et la société, les propriétés voisines et, le cas échéant, l'environnement ou les biens directement exposés, en cas d'incendie.

La Directive sur les Produits de Construction 89/106/CEE fixe les exigences essentielles suivantes pour la limitation des risques d'incendie :

«Les ouvrages doivent être conçus et construits de telle manière qu'en cas d'incendie :

- la résistance des éléments porteurs de l'ouvrage puisse être présumée pendant une durée déterminée ;
- l'apparition et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de l'ouvrage soient limitées ;
- l'extension du feu à des ouvrages voisins soit limitée ;
- les occupants puissent quitter l'ouvrage ou être secourus d'une autre manière ;
- la sécurité des équipes de secours soit prise en considération».

Selon le Document interprétatif n° 2, «Sécurité en cas d'incendie⁵⁾», l'exigence essentielle peut être respectée en appliquant les diverses stratégies suivantes de sécurité incendie en vigueur dans les États membres, telles que les scénarios de feux conventionnels (feux nominaux) ou «naturels» (feux paramétrés), y compris des mesures actives ou passives de sécurité incendie.

Les parties «feu» des Eurocodes structuraux traitent d'aspects spécifiques de protection passive contre l'incendie en termes de calcul des structures et de parties de celles-ci en vue d'obtenir une résistance adéquate des éléments porteurs et une limitation de la propagation du feu s'il y a lieu.

Les fonctions et les niveaux de performances exigés peuvent être spécifiés soit en termes de degré de résistance au feu nominal (normalisé), généralement indiqués dans les réglementations de sécurité incendie nationales, soit, si ces dernières le permettent, par référence à l'ingénierie de la sécurité incendie pour l'évaluation des mesures passives et actives.

Les exigences supplémentaires concernant par exemple :

- l'installation et la maintenance éventuelles de systèmes d'extinction ;
- les conditions d'occupation du bâtiment ou du compartiment ;
- l'utilisation de matériaux isolants et de revêtement agréés, y compris leur maintenance ;

ne sont pas indiquées dans ce document, car elles sont soumises à spécification par l'autorité compétente.

4) Voir les articles 3.3 et 12 de la DPC, ainsi que les clauses 4.2, 4.3.1, 4.3.2 et 5.2 du DI 1.

5) Voir les clauses 2.2, 3.2(4) et 4.2.3.3 du DI 2.

Les valeurs numériques des facteurs partiels et autres éléments de fiabilité sont fournies en tant que valeurs recommandées garantissant un niveau de fiabilité acceptable. Elles ont été sélectionnées en présumant un niveau adéquat d'exécution des travaux et de gestion de la qualité.

Procédures de calcul

Une procédure analytique complète de calcul structural au feu devrait prendre en compte le comportement du système structural à des températures élevées, l'exposition potentielle à la chaleur et les effets bénéfiques des systèmes de protection incendie actifs et passifs, ainsi que les incertitudes associées à ces trois aspects et l'importance de la structure (conséquences d'effondrement).

Actuellement, il est possible de mettre en oeuvre une procédure pour déterminer les performances adéquates incorporant certains de ces paramètres, sinon tous, et de prouver que la structure, ou ses éléments, offriront des performances adéquates en cas d'incendie réel de l'ouvrage. Toutefois, dans le cas d'une procédure s'appuyant sur un feu nominal (normalisé), le système de classification, qui prévoit des durées spécifiques de résistance au feu, prend en compte (bien que ce ne soit pas de manière explicite) les aspects et incertitudes précédemment décrits.

L'application de cette partie 1-2 est illustrée ci-dessous. L'approche prescriptive et l'approche axée sur les performances sont identifiées. L'approche prescriptive utilise des feux nominaux pour générer les actions thermiques. L'approche axée sur les performances, utilisant l'ingénierie de la sécurité incendie, se réfère aux actions thermiques en fonction de paramètres physiques et chimiques.

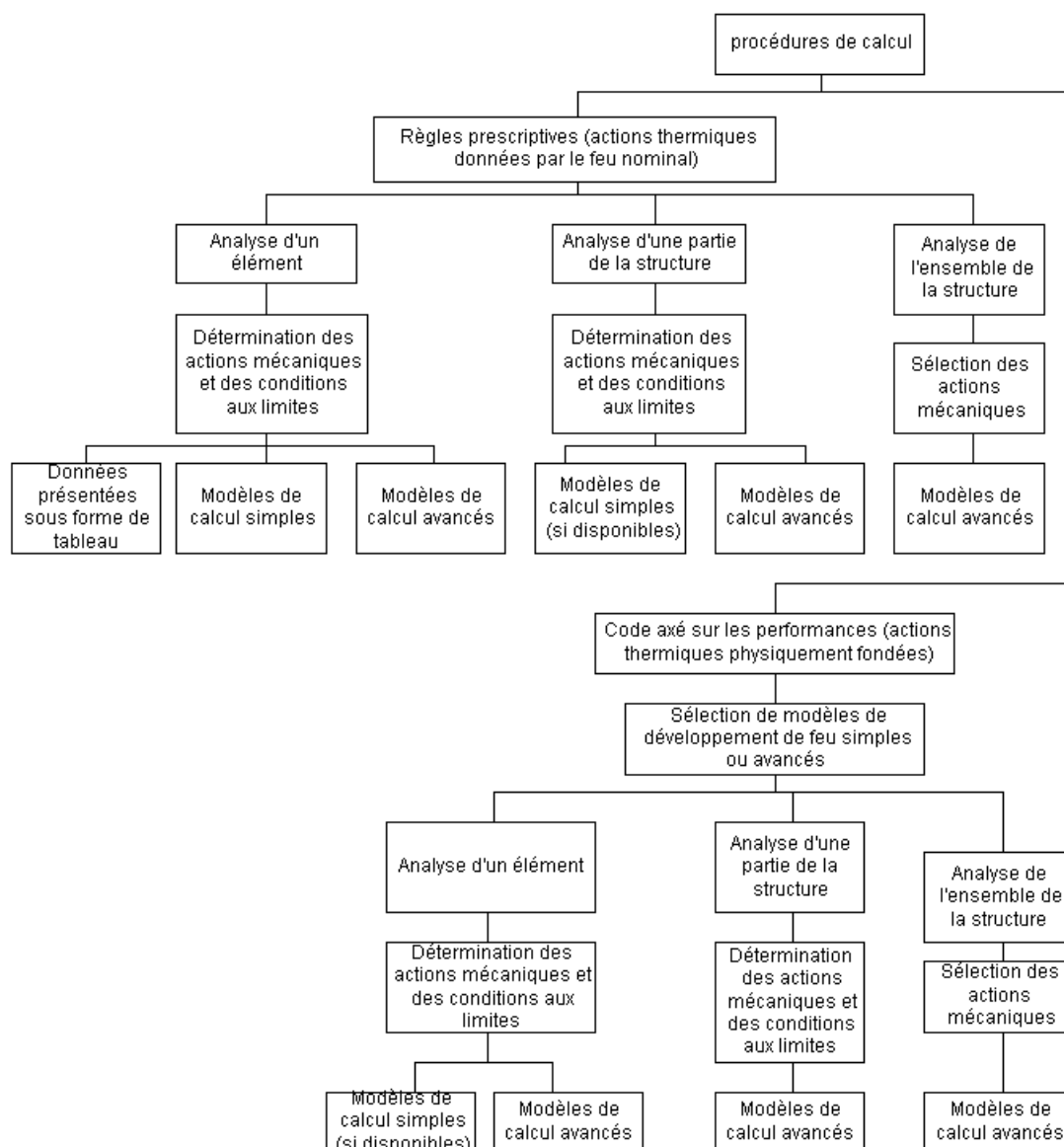


Figure 1 — Autres procédures de calcul

Aides au calcul

Il est prévu que des aides au calcul, fondées sur les modèles de calcul fournis dans l'EN 1991-1-2, soient élaborées par les organisations externes intéressées.

Le texte principal de l'EN 1991-1-2 indique la plupart des principaux concepts et règles nécessaires à la description des actions thermiques et mécaniques sur les structures.

Annexe Nationale de l'EN 1991-1-2

La présente norme donne des procédures alternatives et des valeurs, et recommande des classes, avec des notes indiquant où des choix nationaux doivent être faits. C'est pourquoi, il convient de doter la Norme Nationale transposant l'EN 1991-1-2 d'une annexe nationale contenant tous les Paramètres Déterminés au niveau national à utiliser pour le dimensionnement de bâtiments et d'ouvrages de génie civil à construire dans le pays concerné.

Un choix national est autorisé dans l'EN 1991-1-2 par les paragraphes :

- 2.4(4)
- 3.1(10)
- 3.3.1.2(1)

NOTE 1

- 3.3.1.3(1)
- 3.3.2(2)
- 4.2.2(2)
- 4.3.1(2)

Section 1 Généralités

1.1 Domaine d'application

- (1) Les méthodes indiquées dans la présente partie 1-2 de l'EN 1991 sont applicables aux bâtiments, en prenant en compte une charge calorifique liée au bâtiment et à son occupation.
- (2) La présente partie 1-2 de l'EN 1991 traite des actions thermiques et mécaniques sur les structures exposées au feu. Elle est destinée à être utilisée en association avec les parties relatives au calcul au feu des EN 1992 à 1996 et de l'EN 1999, qui fixent les règles de calcul de résistance au feu des structures.
- (3) La présente partie 1-2 de l'EN 1991 comporte les actions thermiques liées aux actions thermiques nominales et physiques. Les annexes présentent des données supplémentaires et des modèles pour des actions thermiques physiquement fondées.
- (4) La présente partie 1-2 de l'EN 1991 présente les principes généraux et les règles d'application liées aux actions thermiques et mécaniques à utiliser en association avec l'EN 1990, l'EN 1991-1-1, l'EN 1991-1-3 et l'EN 1991-1-4.
- (5) L'évaluation des dommages subis par une structure après un incendie n'est pas traitée dans le présent document.

1.2 Références normatives

(1) P Cette Norme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette Norme européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique (y compris les amendements).

NOTE Les Normes européennes suivantes qui sont publiées ou en cours d'élaboration sont citées dans les articles normatifs :

prEN 13501-2, *Classement au feu des produits et éléments de construction — Partie 2 : Classement à partir des données d'essais de résistance au feu (à l'exclusion des systèmes de ventilation)*.

EN 1990:2002, *Eurocode : Bases de calcul des structures*.

EN 1991, *Eurocode 1 : Actions sur les structures — Partie 1.1 : Actions générales — Densités, poids propre et charges imposées*.

prEN 1991, *Eurocode 1 : Actions sur les structures — Partie 1.3 : Actions générales — Charges de neige*.

prEN 1991, *Eurocode 1 : Actions sur les structures — Partie 1.4 : Actions générales — Charges de vent*.

prEN 1992, *Eurocode 2 : Calcul des structures en béton*.

prEN 1993, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier*.

prEN 1994, *Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier béton*.

prEN 1995, *Eurocode 5 : Calcul des structures en bois*.

prEN 1996, *Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie*.

prEN 1999, *Eurocode 9 : Calcul des structures en alliage d'aluminium*.

1.3 Hypothèses

(1) P Outre les hypothèses générales de l'EN 1990, les hypothèses suivantes s'appliquent :

- tout système de protection incendie actif ou passif pris en compte dans le calcul doit faire l'objet d'une maintenance adéquate ;
- le choix du scénario de feu de calcul pertinent est fait par un personnel possédant une qualification et une expérience appropriées, ou est indiqué par la réglementation nationale concernée.

1.4 Distinction entre principes et règles d'application

(1) Les règles indiquées dans le paragraphe 1.4 de l'EN 1990:2002 s'appliquent.

1.5 Termes et définitions

(1) P Pour les besoins de la présente Norme européenne, les termes et définitions donnés en 1.5 de l'EN 1990:2002 ainsi que les suivants s'appliquent.

1.5.1 Termes courants utilisés dans les parties des Eurocodes relatives au feu

1.5.1.1

temps équivalent d'exposition au feu

temps d'exposition à la courbe température/temps normalisée supposé avoir un effet thermique identique à celui d'un feu réel dans le compartiment

1.5.1.2

élément extérieur

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

1.5.1.3

compartiment

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

1.5.1.4

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 ou séparative) pour un niveau de chargement, une exposition au feu et une durée donnés

1.5.1.5

feu totalement développé

état où toutes les surfaces combustibles participent au feu, dans un espace donné

1.5.1.6

analyse structurale globale (pour le feu)

analyse de toute la structure en cas d'exposition au feu généralisée à la structure ou à une partie de celle-ci. Les actions indirectes du feu sont prises en compte dans l'ensemble de la structure

1.5.1.7

actions indirectes du feu

forces internes et moments causés par la dilatation thermique

1.5.1.8

étanchéité (E)

aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment, en cas d'exposition au feu d'un côté, à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds et à éviter l'apparition des flammes du côté non exposé

1.5.1.9

isolation (I)

aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment, en cas d'exposition au feu d'un côté, à limiter la montée en température de la face non exposée au-dessous des niveaux spécifiés

1.5.1.10

fonction porteuse (R)

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

1.5.1.11

élément

partie fondamentale d'une structure (telle que poutre, poteau, mais aussi assemblage de composants tels que mur à montants interne, ferme, etc.) considérée comme isolée, avec des conditions aux limites et aux appuis appropriées

1.5.1.12

analyse d'un élément (en cas d'incendie)

analyse thermique et mécanique d'un élément structural exposé au feu dans laquelle cet élément est supposé être isolé, avec des conditions aux limites et aux appuis appropriées. Les actions indirectes du feu ne sont pas prises en compte, à l'exception de celles résultant de gradients thermiques

1.5.1.13

calcul à température normale

calcul aux états limites ultimes à température ambiante selon la partie 1.1 de l'EN 1992 à l'EN 1996 et de l'EN 1999

1.5.1.14

fonction séparative

aptitude d'un élément séparatif à empêcher la propagation du feu (par exemple par le passage de flammes ou de gaz chauds — voir étanchéité) ou l'inflammation au-delà de la surface exposée (voir isolation) pendant l'exposition à un feu donné

1.5.1.15

élément séparatif

élément porteur ou non (par exemple un mur) formant une partie de l'enceinte d'un compartiment

1.5.1.16

résistance au feu normalisé

aptitude d'une structure ou d'une partie de celle-ci (en général, seulement des éléments) à remplir les fonctions exigées (fonction porteuse ou séparative) pendant l'exposition à la chaleur selon la courbe température/temps normalisée pour une combinaison de charges et une durée données

1.5.1.17

éléments structuraux

éléments porteurs d'une structure, y compris les contreventements

1.5.1.18

analyse thermique

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

1.5.1.19

actions thermiques

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

1.5.2 Termes spéciaux relatifs au calcul en général

1.5.2.1

modèle de feu avancé

feu de calcul fondé sur les aspects de conservation de la masse et de l'énergie

1.5.2.2

modèle de calcul de dynamique des fluides

modèle de feu permettant de résoudre numériquement les équations différentielles partielles qui donnent, en tout point du compartiment, les variables aéro-thermodynamiques

1.5.2.3

mur coupe-feu

mur séparant deux espaces (par exemple deux bâtiments) conçu pour assurer la résistance et la stabilité structurale au feu. Il peut posséder une résistance à un effort horizontal, de manière à empêcher la propagation du feu au-delà du mur en cas d'incendie et d'effondrement de la structure d'un côté du mur

1.5.2.4

modèle une zone

modèle de feu dans lequel les températures des gaz sont supposées homogènes dans le compartiment

1.5.2.5

modèle de feu simple

feu de calcul fondé sur un domaine d'application limité de paramètres physiques spécifiques

1.5.2.6

modèle deux zones

modèle de feu définissant différentes zones dans un compartiment : la couche supérieure, la couche inférieure, le feu et son panache, l'air extérieur et les murs. Dans la couche supérieure, la température du gaz est supposée uniforme

1.5.3 Termes relatifs aux actions thermiques

1.5.3.1

coefficient de combustion

coefficient représentant l'efficacité de la combustion, variant entre 1 pour une combustion complète et 0 pour une combustion totalement inhibée

1.5.3.2

feu de calcul

développement de feu spécifique pris comme hypothèse pour le calcul

1.5.3.3

densité de charge calorifique de calcul

densité de charge calorifique prise en compte pour déterminer les actions thermiques dans le calcul au feu ; sa valeur tient compte des incertitudes

1.5.3.4

scénario de feu de calcul

scénario de feu donné servant de base à une analyse

1.5.3.5

courbe de feu extérieur

courbe nominale température/temps s'appliquant à la face externe des murs extérieurs de séparation, susceptibles d'être exposés au feu à partir de différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment concerné ou d'un compartiment se trouvant au-dessous ou à côté de mur extérieur concerné

1.5.3.6

risque d'activation du feu

paramètre prenant en compte la probabilité d'inflammation, qui est fonction de la surface du compartiment et du type d'occupation

1.5.3.7

densité de charge calorifique

charge calorifique par unité de surface rapportée à la surface du plancher (q_f) ou à la surface totale de l'enceinte, y compris les ouvertures (q_t)

1.5.3.8

charge calorifique

somme des énergies dégagées par la combustion de tous les matériaux combustibles dans un espace (contenu des bâtiments et éléments de construction)

1.5.3.9

scénario de feu

description qualitative de l'évolution d'un feu dans le temps identifiant les éléments clés le caractérisant et le différenciant des autres feux possibles. Elle définit généralement le processus d'inflammation et de développement, l'état totalement développé, la phase de décroissance, ainsi que l'environnement du bâtiment et les systèmes ayant un impact sur l'évolution du feu

1.5.3.10

embrasement général

inflammation simultanée de toutes les charges calorifiques d'un compartiment

1.5.3.11

courbe de feu d'hydrocarbure

courbe nominale température/temps destinée à représenter les effets d'un feu de type hydrocarbure

1.5.3.12

feu localisé

feu impliquant uniquement une zone limitée de charge calorifique du compartiment

1.5.3.13

facteur d'ouverture

facteur représentant le flux d'air en fonction de la surface des ouvertures des murs du compartiment, de la hauteur de ces ouvertures et de la surface totale des parois de l'enceinte

1.5.3.14

débit calorifique

chaleur (énergie) dégagée par un produit combustible en fonction du temps

1.5.3.15

courbe température/temps normalisée

courbe nominale définie dans le prEN 13501-2 pour représenter un modèle de feu totalement développé dans un compartiment

1.5.3.16

courbes température/temps

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

- **nominales** : courbes conventionnelles adoptées pour la classification ou la vérification de la résistance au feu, par exemple la courbe température/temps normalisée, la courbe de feu extérieur, la courbe de feu d'hydrocarbure ;
- **paramétrées** : déterminées à partir de modèles de feu et de paramètres physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur du compartiment

1.5.4 Termes relatifs à l'analyse du transfert thermique

1.5.4.1

facteur de forme

pour le transfert thermique par rayonnement entre une surface A et une surface B, facteur représentant la fraction d'énergie rayonnée de manière diffuse par la surface A sur la surface B

1.5.4.2

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 globale des gaz entourant la surface concernée de l'élément et la température de cette surface

1.5.4.3

émissivité

égale à l'absorptivité d'une surface, c'est-à-dire le rapport entre la chaleur radiative absorbée par une surface donnée et celle absorbée par la surface d'un corps noir

1.5.4.4

flux thermique net

énergie, par unité de temps et de surface, définitivement absorbés par les éléments

1.6 Symboles

(1)P Pour les besoins de la présente partie 1-2, les symboles suivants s'appliquent.

Majuscules latines

A surface du compartiment

$A_{ind,d}$ valeur de calcul de l'action indirecte due au feu

A_f surface de plancher du compartiment

A_{fi} surface du feu

A_h surface des ouvertures horizontales du toit du compartiment

$A_{h,v}$ surface totale des ouvertures de l'enceinte ($A_{h,v} = A_h + A_v$)

A_j surface de la paroi j de l'enceinte, ouvertures non incluses

A_t surface totale de l'enceinte (murs, plafond et plancher, y compris les ouvertures)

A_v surface totale des ouvertures verticales sur tous les murs $\left(A_v = \sum_i A_{v,i} \right)$

$A_{v,i}$ surface de la fenêtre «i»

C_i coefficient de protection de la face i de l'élément

D profondeur du compartiment, diamètre du feu

E_d valeur de calcul des effets pertinents des actions à partir de la combinaison fondamentale selon l'EN 1990

$E_{fi,d}$ valeur de calcul constante des effets pertinents des actions dans la situation d'incendie

$E_{fi,d,t}$ valeur de calcul des effets pertinents des actions dans la situation d'incendie à l'instant t

E_g énergie interne du gaz

H distance entre le foyer d'incendie et le plafond

H_u pouvoir calorifique inférieur, y compris l'humidité

H_{u0} pouvoir calorifique inférieur du matériau sec

H_{ui} pouvoir calorifique inférieur du matériau i

L_c	longueur du noyau central
L_f	longueur de la flamme suivant l'axe
L_H	projection horizontale de la flamme (à partir de la façade)
L_h	longueur de la flamme horizontale
L_L	hauteur de la flamme (à partir de la partie supérieure de la fenêtre)
L_x	longueur de l'axe entre la fenêtre et le point où s'effectue le calcul
$M_{k,i}$	quantité de matériau combustible i
O	facteur d'ouverture du compartiment $\left(O = A_v \sqrt{h_{eq} / A_t} \right)$
O_{lim}	facteur d'ouverture réduit en cas de feu contrôlé par combustible
P_{int}	pression interne
Q	débit calorifique du feu
Q_c	composante de convection du débit calorifique Q
$Q_{fi,k}$	charge calorifique caractéristique
$Q_{fi,k,i}$	charge calorifique caractéristique du matériau i
Q_D^*	débit calorifique rapporté au diamètre D du feu local
Q_H^*	débit calorifique rapporté à la hauteur H du compartiment
$Q_{k,1}$	principale action variable caractéristique
Q_{max}	débit calorifique maximal
Q_{in}	débit calorifique entrant par les ouvertures dû à l'écoulement des gaz
Q_{out}	débit calorifique perdu par les ouvertures dû à l'écoulement des gaz
Q_{rad}	débit calorifique perdu par rayonnement par les ouvertures
Q_{wall}	débit calorifique perdu par rayonnement et convection vers les surfaces du compartiment
R	constante déduite de la constante des gaz parfaits (= 287 [J/kgK])
R_d	valeur de calcul de la résistance de l'élément à température normale
$R_{fi,d,t}$	valeur de calcul de la résistance de l'élément dans la situation d'incendie à l'instant t
RHR_f	débit calorifique maximal par mètre carré
T	température [K]
T_{amb}	température ambiante [K]
T_0	température initiale (= 293 [K])
T_f	température du compartiment [K]
T_g	température des gaz [K]
T_w	température des flammes à la fenêtre [K]
T_z	température des flammes suivant l'axe des flammes [K]
W	largeur du mur comportant la ou les fenêtres (W_1)
W_1	largeur du mur 1 supposé présenter la plus grande surface de fenêtres
W_2	largeur du mur du compartiment, perpendiculaire au mur W_1
W_a	projection horizontale d'un auvent ou d'un balcon
W_c	largeur du noyau central

Minuscules latines

- b absorptivité thermique de l'ensemble de l'enceinte $\left(b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \right)$
- b_i absorptivité thermique de la couche i d'une paroi de l'enceinte
- b_j absorptivité thermique d'une paroi j de l'enceinte
- c chaleur spécifique
- d_{eq} caractéristique géométrique d'un élément structural externe (diamètre ou côté)
- d_f épaisseur de la flamme
- d_i dimension de la section droite de la face i de l'élément
- g accélération due à la gravité
- h_{eq} moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre sur tous les murs $\left(h_{eq} = \left(\sum_i A_{v,i} h_i \right) / A_v \right)$
- h_i hauteur de la fenêtre i
- \dot{h} flux thermique par unité de surface
- \dot{h}_{net} flux thermique net par unité de surface
- $\dot{h}_{net,c}$ flux thermique net par unité de surface dû à la convection
- $\dot{h}_{net,r}$ flux thermique net par unité de surface dû au rayonnement
- \dot{h}_{tot} flux thermique total par unité de surface
- \dot{h}_i flux thermique par unité de surface dû au feu i
- k facteur de correction
- k_b facteur de conversion
- k_c facteur de correction
- m masse, facteur de combustion
- \dot{m} débit massique
- \dot{m}_{in} débit massique des gaz entrant par les ouvertures
- \dot{m}_{out} débit massique des gaz sortant par les ouvertures
- \dot{m}_{fi} débit massique des produits issus de la pyrolyse
- q_f charge calorifique par unité de surface rapportée à la surface de plancher A_f
- $q_{f,d}$ densité de charge calorifique de calcul rapportée à la surface de plancher A_f
- $q_{f,k}$ densité de charge calorifique caractéristique rapportée à la surface A_f
- q_t charge calorifique par unité de surface rapportée à la surface A_t
- $q_{t,d}$ densité de charge calorifique de calcul rapportée à la surface A_t
- $q_{t,k}$ densité de charge calorifique caractéristique rapportée à la surface A_t
- r distance horizontale entre l'axe vertical du feu et le point de calcul du flux thermique le long du plafond

s_i	épaisseur de la couche i
s_{lim}	épaisseur limite
t	temps
$t_{e,d}$	temps équivalent d'exposition au feu
$t_{fi,d}$	résistance au feu de calcul (propriété de l'élément ou de la structure)
$t_{fi,requ}$	durée de résistance au feu exigée
t_{lim}	durée de température maximale des gaz en cas de feu contrôlé par combustible
t_{max}	durée de température maximale des gaz
t_α	coefficient de vitesse de développement du feu
u	vitesse du vent, humidité
w_i	largeur de la fenêtre « i »
w_t	somme des largeurs de fenêtre de tous les murs $\left(w_t = \sum w_i \right)$; facteur de ventilation par référence à A_t
w_f	largeur de la flamme ; facteur de ventilation
y	coefficient
z	hauteur
z_0	origine virtuelle de la hauteur z
z'	position verticale de la source de chaleur virtuelle

Majuscules grecques

Φ	facteur de forme
Φ_f	facteur de forme général d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une ouverture
$\Phi_{f,i}$	facteur de forme de la face i de l'élément pour une ouverture donnée
Φ_z	facteur de forme général d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une flamme
$\Phi_{z,i}$	facteur de forme de la face i de l'élément pour une flamme donnée
Γ	temps modifié en fonction du facteur d'ouverture O et de l'absorptivité thermique b
Γ_{lim}	temps modifié en fonction du facteur d'ouverture O_{lim} et de l'absorptivité thermique b
θ	température [°C]; θ [°C] = T [K] – 273
$\theta_{cr,d}$	valeur de calcul de la température critique du matériau [°C]
θ_d	valeur de calcul de la température du matériau [°C]
θ_g	température des gaz dans le compartiment ou à proximité de l'élément [°C]
θ_m	température de la surface de l'élément [°C]
θ_{max}	température maximale [°C]
θ_r	température de rayonnement effective du feu [°C]
Ω	$(A_f \cdot q_{f,d}) / (A_v \cdot A_t)^{1/2}$
Ψ_i	facteur de charge calorifique protégée

Minuscules grecques

α_c	coefficient de transfert thermique par convection
α_h	surface des ouvertures horizontales rapportée à la surface de plancher
α_v	surface des ouvertures verticales rapportée à la surface de plancher
δ_{ni}	facteur tenant compte de l'existence d'une mesure spécifique i de lutte contre le feu
δ_{q1}	facteur tenant compte du risque d'activation du feu lié à la taille du compartiment
δ_{q2}	facteur tenant compte du risque d'activation du feu lié au type d'occupation
ε_m	émissivité de la surface de l'élément
ε_f	émissivité des flammes, du feu
η_{fi}	coefficient de réduction
$\eta_{fi,t}$	niveau de chargement pour le calcul au feu
λ	conductivité thermique
ρ	densité
ρ_g	densité des gaz internes
σ	constante de Stephan Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴])
τ_F	durée du feu en combustion libre (supposée être de 1 200 [s])
ψ_0	facteur de combinaison pour la valeur caractéristique d'une action variable
ψ_1	facteur de combinaison pour la valeur fréquente d'une action variable
ψ_2	facteur de combinaison pour la valeur quasi-permanente d'une action variable

Section 2 Procédure de calcul structural au feu

2.1 Généralités

(1) Il convient qu'une analyse de calcul structural au feu prenne en compte les étapes suivantes (lorsqu'elles sont pertinentes) :

- sélection des scénarios de feu de calcul pertinents ;
- détermination des feux de calcul correspondants ;
- calcul de l'évolution de la température à l'intérieur des éléments structuraux ;
- calcul du comportement mécanique de la structure exposée au feu.

NOTE Le comportement mécanique d'une structure dépend des actions thermiques et de leur effet thermique sur les propriétés des matériaux et sur les actions mécaniques indirectes, ainsi que de l'effet direct des actions mécaniques.

(2) Le calcul structural au feu implique la prise en compte des actions destinées à l'analyse thermique et à l'analyse mécanique selon la présente partie et d'autres parties de l'EN 1991.

(3) P Les actions sur les structures à partir de l'exposition au feu sont classées comme des actions accidentelles (voir EN 1990:2002, 6.4.3.3(4)).

2.2 Scénario de feu de calcul

(1) Pour identifier la situation de calcul accidentelle, il convient de déterminer les scénarios de feu de calcul pertinents et les feux de calcul associés sur la base d'une évaluation du risque d'incendie.

(2) Pour les structures où il existe des risques particuliers d'incendie à la suite d'autres actions accidentelles, il convient de tenir compte de ces risques lors de la détermination du concept de sécurité global.

(3) Il n'est pas nécessaire de tenir compte du comportement de la structure en fonction du temps et du chargement avant la situation accidentelle, sauf si (2) s'applique.

2.3 Feu de calcul

(1) Pour chaque scénario de feu de calcul, il convient d'estimer un feu de calcul, dans un compartiment, selon la section 3 de la présente partie.

(2) Il convient de n'appliquer le feu de calcul qu'à un compartiment du bâtiment à la fois, sauf spécification contraire du scénario de feu de calcul.

(3) Pour les structures pour lesquelles les autorités nationales spécifient des exigences de résistance au feu, on peut supposer que le feu de calcul approprié correspond au feu normalisé, sauf spécification contraire.

2.4 Analyse thermique

(1) P Lors de l'analyse thermique d'un élément, la position du feu de calcul par rapport à cet élément doit être prise en compte.

(2) Pour les éléments extérieurs, il convient de prendre en compte l'exposition au feu par les ouvertures des façades et des toits.

(3) Pour les murs séparatifs extérieurs, il convient de prendre en compte l'exposition au feu de l'intérieur (depuis le compartiment respectif) ou de l'extérieur (depuis d'autres compartiments), le cas échéant.

(4) Selon le feu de calcul choisi dans la section 3, il convient d'utiliser les procédures suivantes :

— avec une courbe nominale température/temps, l'analyse thermique des éléments structuraux est effectuée pour une durée spécifiée, sans phase de refroidissement.

NOTE 1 La durée spécifiée peut être indiquée dans les réglementations nationales ou obtenue dans l'annexe F suivant les spécifications de l'annexe nationale ;

— avec un modèle de feu, l'analyse thermique des éléments structuraux est effectuée pour toute la durée de l'incendie, y compris la phase de refroidissement.

NOTE 2 Il est possible de définir des périodes limitées de résistance au feu dans l'annexe nationale.

2.5 Analyse mécanique

(1) P La durée utilisée pour l'analyse mécanique doit être la même que pour l'analyse thermique.

(2) Il convient de faire la vérification de la résistance au feu en termes de temps :

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad \dots (2.1)$$

en termes d'effort :

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad \dots (2.2)$$

ou en termes de température :

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad \dots (2.3)$$

où :

$t_{fi,d}$ est la valeur de calcul de la résistance au feu ;

$t_{fi,requ}$ est la durée de résistance au feu exigée ;

$R_{fi,d,t}$ est la valeur de calcul de la résistance de l'élément dans la situation d'incendie à l'instant t ;

$E_{fi,d,t}$ est la valeur de calcul des effets pertinents des actions dans la situation d'incendie à l'instant t ;

θ_d est la valeur de calcul de la température du matériau ;

$\theta_{cr,d}$ est la valeur de calcul de la température critique du matériau.

Section 3 Actions pour l'analyse thermique (actions thermiques)

3.1 Règles générales

(1) P Le flux thermique net \dot{h}_{net} [W/m²] à la surface de l'élément permet de calculer les actions thermiques.

(2) Sur les surfaces exposées au feu, il convient de déterminer le flux thermique net \dot{h}_{net} en tenant compte du transfert thermique par convection et par rayonnement :

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad [\text{W/m}^2] \quad \dots (3.1)$$

où :

$\dot{h}_{\text{net,c}}$ est donné par l'équation (3.2) ;

$\dot{h}_{\text{net,r}}$ est donné par l'équation (3.3).

(3) Il convient de déterminer la composante de convection du flux thermique net par :

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = a_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad \dots (3.2)$$

où :

a_c est le coefficient de transfert thermique par convection [W/m²K] ;

θ_g est la température des gaz à proximité de l'élément exposé au feu [°C] ;

θ_m est la température de surface de l'élément [°C].

(4) Pour le coefficient de transfert thermique par convection, a_c est valable pour les courbes nominales température/temps (voir 3.2).

(5) Sur la face non exposée des éléments séparatifs, il convient de déterminer le flux thermique net \dot{h}_{net} à l'aide de l'équation (3.1), avec $a_c = 4$ [W/m²K]. Il est recommandé d'adopter le coefficient de transfert thermique par convection $a_c = 9$ [W/m²K], si l'on suppose qu'il inclut les effets de transfert thermique par rayonnement.

(6) La composante de rayonnement du flux thermique net par unité de surface est déterminée par :

$$\dot{h}_{\text{net,,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad \dots (3.3)$$

où :

Φ est le facteur de forme ;

ε_m est l'émissivité de la surface de l'élément ;

ε_f est l'émissivité du feu ;

σ est la constante de Stephan Boltzmann (= 5,67 · 10⁻⁸ W/m²K⁴) ;

θ_r est la température de rayonnement effectif de l'environnement du feu [°C] ;

θ_m est la température de surface de l'élément [°C].

NOTE 1 Sauf mention explicite dans les parties des EN 1992 à EN 1996 et de l'EN 1999 relatives au calcul au feu selon les matériaux, il est possible de prendre 0,8 comme valeur de ε_m .

NOTE 2 L'émissivité du feu peut être considérée comme $\varepsilon_f = 1,0$.

(7) Lorsque la présente partie ou les parties relatives au calcul au feu des EN 1992 à 1996 et de l'EN 1999 ne mentionnent aucune donnée spécifique, il convient d'adopter 1,0 comme facteur de forme Φ . Il est possible de choisir une valeur inférieure pour prendre en compte les effets de position et d'ombre.

NOTE Pour le calcul du facteur de forme Φ , une méthode est indiquée dans l'annexe G.

(8) Dans le cas d'éléments complètement immergés dans le feu, la température de rayonnement θ_r peut être représentée par la température des gaz θ_g les entourant.

(9) La température de surface θ_m résulte de l'analyse thermique de l'élément selon les parties 1-2 relatives au calcul au feu des EN 1992 à 1996 et de l'EN 1999, selon le cas.

(10) Les températures des gaz θ_g peuvent être adoptées sous forme de courbes nominales température/temps selon 3.2 ou selon les modèles de feu indiqués en 3.3.

NOTE Il est possible de spécifier les conditions d'utilisation des courbes nominales température/temps selon 3.2 ou d'utilisation des modèles de feu naturel selon 3.3 dans l'annexe nationale.

3.2 Courbes nominales température/temps

3.2.1 Courbe température/temps normalisée

(1) La courbe température/temps normalisée est donnée par :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots (3.4)$$

où :

θ_g est la température des gaz du compartiment $[^{\circ}\text{C}]$;

t est le temps [min].

(2) Le coefficient de transfert thermique par convection est :

$$a_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.2.2 Courbe de feu extérieur

(1) La courbe de feu extérieur est donnée par :

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots (3.5)$$

où :

θ_g est la température des gaz à proximité de l'élément $[^{\circ}\text{C}]$;

t est le temps [min].

(2) Le coefficient de transfert thermique par convection est :

$$a_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.2.3 Courbe d'hydrocarbure

(1) La courbe température/temps des hydrocarbures est donnée par :

$$\theta_g = 1\,080 (1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots (3.6)$$

où :

θ_g est la température des gaz du compartiment $[^{\circ}\text{C}]$;

t est le temps [min].

(2) Le coefficient de transfert thermique par convection est :

$$a_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \dots (3.7)$$

3.3 Modèles de feu naturel

3.3.1 Modèles de feu simplifiés

3.3.1.1 Généralités

(1) Les modèles de feu simples sont fondés sur des paramètres physiques spécifiques avec un domaine d'application limité.

NOTE Pour le calcul de la densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$, une méthode est fournie dans l'annexe E.

(2) Pour les feux de compartiment, la répartition de la température en fonction de temps est supposée uniforme. Pour les feux localisés, elle est supposée non uniforme.

(3) Lors de l'utilisation de modèles de feu simples, il convient d'adopter le coefficient de transfert thermique par convection $a_c = 35$ [W/m²K].

3.3.1.2 Feux de compartiment

(1) Il convient de déterminer les températures des gaz sur la base de paramètres physiques prenant au moins en compte la densité de charge calorifique et les conditions de ventilation.

NOTE 1 L'annexe nationale peut spécifier la procédure de calcul des conditions d'échauffement.

NOTE 2 Pour les éléments internes aux compartiments, une méthode de calcul de la température des gaz dans le compartiment est donnée dans l'annexe A.

(2) Pour les éléments extérieurs, il convient de calculer la composante de rayonnement du flux thermique comme la somme des contributions du compartiment et des flammes sortant des ouvertures.

NOTE Pour les éléments extérieurs exposés au feu sortant par les ouvertures de la façade, une méthode de calcul des conditions d'échauffement est donnée dans l'annexe B.

3.3.1.3 Feux localisés

(1) Lorsque l'occurrence de l'embrasement généralisé est improbable, il convient de prendre en compte les actions thermiques d'un feu localisé.

NOTE L'annexe nationale peut spécifier la procédure de calcul des conditions d'échauffement. Une méthode de calcul des actions thermiques à partir des feux localisés est donnée dans l'annexe C.

3.3.2 Modèles de feu avancés

(1) Il convient que les modèles de feu avancés prennent en compte les éléments suivants :

- les propriétés des gaz ;
- l'échange de masse ;
- l'échange d'énergie.

NOTE 1 Les méthodes de calcul disponibles comportent normalement des procédures itératives.

NOTE 2 Pour le calcul de la densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$, une méthode est fournie dans l'annexe E.

NOTE 3 Pour le calcul du débit calorifique Q , une méthode est fournie dans l'annexe E.

(2) Il convient d'utiliser l'un des modèles suivants :

- modèle une zone supposant une répartition uniforme de la température en fonction du temps dans le compartiment ;
- modèle deux zones supposant une couche supérieure dont l'épaisseur et la température, considérées comme uniforme, sont fonction du temps, ainsi qu'une couche inférieure de température plus basse, uniforme et fonction du temps ;
- modèle de calcul de dynamique des fluides indiquant l'évolution de la température dans le compartiment en fonction du temps et de l'espace.

NOTE L'annexe nationale peut spécifier la procédure de calcul des conditions d'échauffement.

Une méthode de calcul des actions thermiques en fonction du type de modèle (une zone, deux zones ou de calcul de dynamique des fluides) est donnée dans l'annexe D.

(3) Il convient d'adopter le coefficient de transfert thermique par convection $\alpha_c = 35 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, à moins que des informations plus détaillées ne soient disponibles.

(4) Pour calculer de manière plus précise la répartition thermique le long d'un élément en cas de feu localisé, une combinaison des résultats obtenus avec un modèle deux zones et une approche de feu localisé peut être prise en compte.

NOTE Le champ thermique de l'élément peut être obtenu en prenant en compte l'effet maximal à chaque emplacement donné par les deux modèles de feu.

Section 4 Actions pour l'analyse structurale (actions mécaniques)

4.1 Généralités

(1) P Les dilatations et déformations imposées et empêchées résultant des variations de températures dues à l'exposition au feu créent des effets d'actions, par exemple des forces et des moments, dont il faut tenir compte, sauf dans les cas où :

- on peut admettre a priori qu'ils sont négligeables ou favorables ;
- ils sont pris en compte par des conditions aux appuis et aux limites conservatoires ou pris en compte de façon implicite par des exigences de sécurité d'incendie indiquées de manière conservatoire.

(2) Pour évaluer les actions indirectes, il convient de tenir compte de ce qui suit :

- de la dilatation empêchée des éléments eux-mêmes, par exemple des poteaux dans des ossatures à plusieurs étages comportant des murs rigides ;
- d'une différence de dilatation à l'intérieur d'éléments hyperstatiques, par exemple des dalles de plancher continues ;
- des gradients thermiques dans les sections droites donnant des contraintes internes ;
- de la dilatation des éléments voisins due aux effets thermiques, par exemple le déplacement du sommet d'un poteau dû à la dilatation d'une dalle du plancher, ou la dilatation de câbles suspendus ;
- de la dilatation thermique d'éléments affectant des éléments se trouvant à l'extérieur du compartiment.

(3) Il convient de déterminer les valeurs de calcul des actions indirectes $A_{ind,d}$ en partant des valeurs de calcul des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux données dans les parties de l'EN 1992 à l'EN 1996 et du prEN 1999 relatives au calcul au feu et de l'exposition au feu considérée.

(4) Il n'est pas nécessaire de prendre en compte les actions indirectes dues à des éléments voisins lorsque les exigences de sécurité concernent les éléments soumis aux conditions de l'incendie normalisé.

4.2 Simultanéité des actions

4.2.1 Actions à partir d'un calcul à température normale

(1) P Les actions doivent être considérées comme pour un calcul à température normale si elles sont susceptibles d'intervenir en situation d'incendie.

(2) Il convient de prendre en compte, conformément à l'EN 1990, les valeurs représentatives des actions variables correspondant à la situation accidentelle d'exposition au feu.

(3) Il convient de ne pas prendre en compte la diminution des charges imposées du fait de la combustion.

(4) Il convient d'évaluer individuellement les cas où il est inutile de tenir compte des charges de neige du fait de sa fonte.

(5) Les actions résultant d'opérations industrielles ne doivent pas être prises en compte.

4.2.2 Actions additionnelles

(1) Il n'est pas nécessaire de prendre en compte la simultanéité avec d'autres actions accidentelles indépendantes.

(2) En fonction des situations à considérer dans le calcul, il peut être nécessaire de prendre en compte des actions additionnelles provoquées par l'incendie, par exemple un impact dû à l'effondrement d'éléments structuraux ou de matériels lourds.

NOTE Il est possible de spécifier des actions additionnelles dans l'annexe nationale.

(3) Il peut être nécessaire que les murs coupe-feu résistent à un impact horizontal conformément à l'EN 1363-2.

4.3 Règles de combinaisons des actions

4.3.1 Règle générale

(1) Pour obtenir les effets voulus des actions $E_{fi,d,t}$ pendant l'exposition au feu, il faut combiner les actions mécaniques conformément à l'EN 1990 «Bases de calcul des structures» pour les situations de calcul accidentelles.

(2) La valeur représentative de l'action variable Q_1 peut être considérée comme la valeur quasi-permanente $\psi_{2,1} Q_1$ ou bien comme la valeur fréquente $\psi_{1,1} Q_1$.

NOTE Il est possible de spécifier l'utilisation de la valeur quasi-permanente $\psi_{2,1} Q_1$ ou de la valeur fréquente $\psi_{1,1} Q_1$ dans l'annexe nationale. L'utilisation de $\psi_{2,1} Q_1$ est recommandée.

4.3.2 Règles simplifiées

(1) Lorsqu'il n'est pas nécessaire de prendre explicitement en compte les actions indirectes du feu, les effets des actions peuvent être déterminés en analysant la structure pour les actions combinées selon 4.3.1 pour $t = 0$ uniquement. L'application de ces effets des actions $E_{fi,d}$ peut être considérée comme constante tout au long de l'exposition au feu.

NOTE Cet alinéa s'applique, par exemple, aux effets des actions au niveau des limites et des appuis, où une analyse des parties de la structure est effectuée conformément aux parties «feu» des EN 1992 à 1996 et de l'EN 1999.

(2) Pour simplifier encore par rapport à (1), les effets des actions peuvent être déduits de ceux déterminés dans le calcul à température normale :

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad \dots (4.1)$$

où :

E_d est la valeur de calcul des effets pertinents des actions à partir de la combinaison fondamentale selon l'EN 1990 ;

$E_{fi,d}$ est la valeur de calcul constante correspondant à la situation d'incendie ;

η_{fi} est un coefficient de réduction indiqué dans les parties «feu» de l'EN 1992 à l'EN 1996 et de l'EN 1999.

4.3.3 Niveau de chargement

(1) Lorsque les données présentées sous forme de tableau sont précisées pour un niveau de chargement de référence, ce niveau de chargement correspond à :

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} \cdot R_d \quad \dots (4.2)$$

où :

R_d est la valeur de calcul de résistance de l'élément à température normale, déterminée conformément aux EN 1992 à EN 1996 et à l'EN 1999 ;

$\eta_{fi,t}$ est le niveau de chargement pour le calcul au feu.

Annexe A (informative) Courbes paramétrées température/temps

(1) Les courbes température/temps suivantes sont valables pour des compartiments ayant une surface de plancher inférieure ou égale à 500 m², ne comportant pas d'ouvertures dans le toit et ayant une hauteur maximale de 4 m. On suppose que la charge calorifique du compartiment est totalement consommée.

(2) Si les densités de charge calorifique sont spécifiées sans tenir particulièrement compte des conditions de combustion (voir annexe E), il convient de limiter cette approche aux compartiments ayant des charges calorifiques principalement de type cellulosique.

(3) Les courbes température/temps en phase d'échauffement sont données par :

$$\theta_g = 20 + 1\,325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad \dots \text{(A.1)}$$

où :

θ_g est la température des gaz dans le compartiment [°C] ;

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad [\text{h}] \quad \dots \text{(A.2a)}$$

avec :

t le temps [h] ;

$$\Gamma = [Ob]^2 / (0,04/1\,160)^2 \quad [-] ;$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} ;$$

avec les limites suivantes : $100 \leq b \leq 2\,200$ [J/m²s^{1/2}K] ;

ρ est la densité des parois de l'enceinte [kg/m³] ;

c est la chaleur spécifique des parois de l'enceinte [J/kgK] ;

λ est la conductivité thermique des parois de l'enceinte [W/mK] ;

$$O \text{ est le facteur d'ouverture : } A_v \sqrt{h_{\text{eq}}} / A_t \quad [\text{m}^{1/2}] ;$$

avec les limites suivantes : $0,02 \leq O \leq 0,20$;

A_v est la surface totale des ouvertures verticales sur tous les murs [m²] ;

h_{eq} est la moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre sur tous les murs [m] ;

A_t est la surface totale de l'enceinte (murs, plafond et plancher, y compris les ouvertures) [m²].

NOTE Lorsque $\Gamma = 1$, l'équation (A.1) donne une approximation de la courbe température/temps normalisée.

(4) Pour le calcul du coefficient b , il est possible de prendre la densité ρ , la chaleur spécifique c et la conductivité thermique λ des parois à température ambiante.

(5) Pour représenter les enceintes comportant différentes couches de matériaux, il convient d'introduire

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ sous la forme suivante :

— Si $b_1 < b_2$, $b = b_1$... (A.3)

— Si $b_1 > b_2$, une épaisseur limite s_{lim} est calculée pour le matériau exposé conformément à

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3\,600 t_{max} \lambda_1}{c_1 \rho_1}} \text{ avec } t_{max} \text{ donné par l'équation A.7} \quad [m] \quad \dots (A.4)$$

Si $s_1 > s_{lim}$ alors $b = b_1$... (A.4a)

$$\text{Si } s_1 < s_{lim} \quad \text{alors } b = \frac{s_1}{s_{lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) b_2 \quad \dots (A.4b)$$

où :

l'indice 1 représente la couche directement exposée au feu, l'indice 2 représente la couche suivante, et ainsi de suite :

s_i est l'épaisseur de la couche i ;

b_i est égal à $\sqrt{(\rho_i c_i \lambda_i)}$;

ρ_i est la densité de la couche i ;

c_i est la chaleur spécifique de la couche i ;

λ_i est la conductivité thermique de la couche i .

(6) Pour tenir compte de coefficients b différents pour les murs, le plafond et le plancher, il convient d'introduire

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ sous la forme suivante :

$$b = (\Sigma(b_j A_j)) / (A_t - A_v) \quad \dots (A.5)$$

où :

A_j est la surface de la paroi j de l'enceinte, ouvertures non incluses ;

b_j est la propriété thermique de la paroi j de l'enceinte conformément aux équations (A.3) et (A.4).

(7) La température maximale θ_{max} en phase d'échauffement est atteinte pour $t^* = t_{max}^*$.

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad \dots (A.6)$$

avec :

$$t_{max} = \max [(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) ; t_{lim}] \quad [h] \quad \dots (A.7)$$

où :

$q_{t,d}$ est la valeur de calcul de la densité de charge calorifique rapportée à la surface totale A_t de l'enceinte, telle que $q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$ [MJ/m²]. Il convient de respecter les limites suivantes : $50 \leq q_{t,d} \leq 1\,000$ [MJ/m²] ;

$q_{f,d}$ est la valeur de calcul de la densité de charge calorifique rapportée à la surface A_t du plancher [MJ/m²] indiquée dans l'annexe E ;

t_{lim} est donné par (10) en [h].

NOTE Lorsque le feu est contrôlé par le combustible, le temps t_{max} correspondant à la température maximale est donné par t_{lim} . Si t_{max} est donné par $(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O)$, le feu est contrôlé par la ventilation.

(8) Quand $t_{\max} = t_{\lim}$, t^* utilisé dans l'équation (A.1) est remplacé par :

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\lim} \quad [h] \quad \dots (A.2b)$$

avec :

$$\Gamma_{\lim} = [O_{\lim}/b]^2 / (0,04/1\ 160)^2 \quad \dots (A.8)$$

où :

$$O_{\lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{\lim} \quad \dots (A.9)$$

(9) Si ($O > 0,04$ et $q_{t,d} < 75$ et $b < 1\ 160$), Γ_{\lim} dans (A.8) doit être multiplié par k donné par :

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1\ 160 - b}{1\ 160} \right) \quad \dots (A.10)$$

(10) Dans le cas d'un feu à faible vitesse de développement, $t_{\lim} = 25$ min, dans le cas d'un feu à vitesse de développement moyenne, $t_{\lim} = 20$ min, dans le cas d'un feu à vitesse de développement élevée, $t_{\lim} = 15$ min.

NOTE Pour plus d'informations sur la vitesse de développement des feux, se reporter au Tableau E.5 de l'annexe E.

Les courbes température/temps en phase de refroidissement sont données par :

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } t_{\max}^* \leq 0,5 \quad \dots (A.11a)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 (3 - t_{\max}^*) (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } 0,5 < t_{\max}^* < 2 \quad \dots (A.11b)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } t_{\max}^* \geq 2 \quad \dots (A.11c)$$

où t^* est donné par (A.2 a)

$$t_{\max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1,0 \text{ si } t_{\max} > t_{\lim} \text{ ou } x = t_{\lim} \cdot \Gamma / t_{\max}^* \text{ si } t_{\max} = t_{\lim}$$

Annexe B
(informative)
Actions thermiques pour les éléments extérieurs —
Méthode de calcul simplifiée

B.1 Domaine d'application

(1) Cette méthode permet de déterminer :

- les températures maximales d'un compartiment en feu ;
- la taille et la température des flammes sortant des ouvertures ;
- les paramètres de rayonnement et de convection.

(2) Cette méthode considère des conditions de régime permanent pour les divers paramètres. Elle ne s'applique que pour des charges calorifiques $q_{f,d}$ supérieures à 200 MJ/m².

B.2 Conditions d'utilisation

(1) Lorsqu'il y a plusieurs fenêtres dans le compartiment considéré, la moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre h_{eq} , la surface totale des ouvertures verticales A_v et la somme des largeurs de fenêtre ($w_f = \sum w_i$) sont utilisées.

(2) Lorsqu'il n'y a des fenêtres que sur le mur 1, le rapport D/W est donné par :

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \quad \dots \text{(B.1)}$$

(3) Lorsqu'il y a des fenêtres sur plusieurs murs, le rapport D/W doit être obtenu comme suit :

$$D/W = \frac{W_2 A_{v1}}{W_1 A_v} \quad \dots \text{(B.2)}$$

où :

W_1 est la largeur du mur 1 supposé présenter la plus grande surface de fenêtres ;

A_{v1} est la somme des surfaces de fenêtre sur le mur 1 ;

W_2 est la largeur du mur perpendiculaire au mur 1 dans le compartiment.

(4) Lorsque le compartiment comporte un noyau central, le rapport D/W doit être obtenu comme suit :

— les limites données en (7) s'appliquent ;

— L_c et W_c sont la longueur et la largeur du noyau central ;

— W_1 et W_2 sont la longueur et la largeur du compartiment :

$$D/W = \frac{\left(W_2 - L_c \right) A_{v1}}{\left(W_1 - W_c \right) A_v} \quad \dots \text{(B.3)}$$

(5) Sur un mur extérieur, il convient de considérer toutes les parties du mur n'ayant pas la résistance au feu (REI) requise pour la stabilité du bâtiment comme des fenêtres.

(6) La surface totale de fenêtres d'un mur extérieur est :

- la surface totale, selon (5), si elle est inférieure à 50 % de la surface du mur extérieur concerné du compartiment ;
- d'abord la surface totale et ensuite 50 % de la surface du mur extérieur concerné du compartiment si, selon (5), la surface est supérieure à 50 %. Il convient de prendre en compte ces deux situations pour le calcul. En prenant 50 % de la surface du mur extérieur, il convient de choisir l'emplacement et la géométrie des surfaces d'ouvertures pour obtenir le cas le plus défavorable.

(7) Il convient que les dimensions du compartiment ne dépassent pas 70 m de longueur, 18 m de largeur et 5 m de hauteur.

(8) Il convient de considérer la température de la flamme comme uniforme sur toute sa largeur et son épaisseur.

B.3 Effets du vent

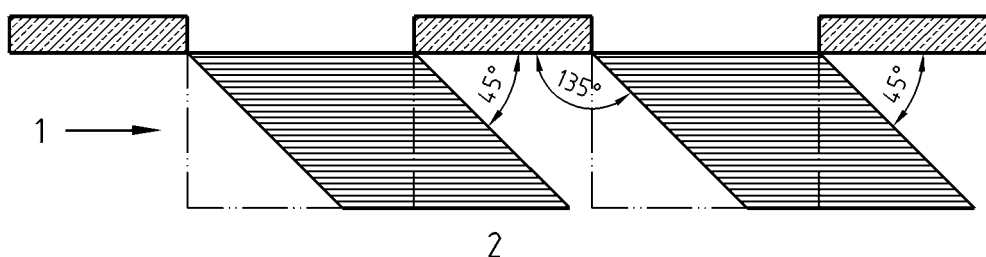
B.3.1 Mode de ventilation

(1) P S'il y a des fenêtres sur les faces opposées du compartiment ou s'il y a un apport d'air supplémentaire au feu provenant d'une source (autre que les fenêtres), le calcul doit être effectué dans des conditions de ventilation forcée. Sinon, il se fait sans ventilation forcée.

B.3.2 Déviation des flammes sous l'action du vent

(1) Il convient de supposer que les flammes venant d'une ouverture sortent du compartiment (voir Figure B.1) :

- perpendiculairement à la façade ;
- avec une déviation de 45° due à l'effet du vent.



Légende

- 1 Vent
- 2 Coupe horizontale

Figure B.1 — Déviation des flammes sous l'effet du vent

B.4 Caractéristiques du feu et des flammes

B.4.1 Absence de ventilation forcée

(1) La vitesse de combustion ou le débit calorifique sont donnés par :

$$Q = \min \left(A_f \cdot q_{f,d} / \tau_F; 3,15 \left(1 - e^{-0,036/O} \right) A_v \left(\frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{1/2} \right) \quad [\text{MW}] \quad \dots \text{(B.4)}$$

(2) La température du compartiment est donnée par :

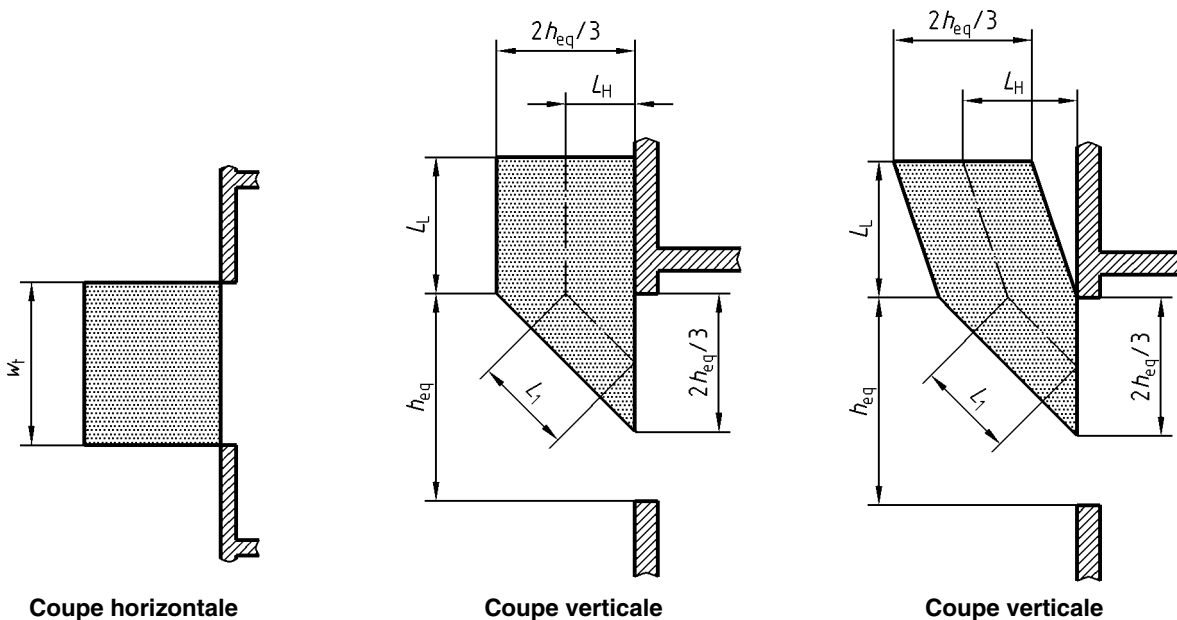
$$T_f = 6\,000 \left(1 - e^{-0,1/O} \right) O^{1/2} \left(1 - e^{-0,00286/O} \right) + T_0 \quad \dots \text{(B.5)}$$

(3) La hauteur de la flamme (voir Figure B.2) est donnée par :

$$L_L = \max \left(0; h_{eq} \left(2,37 \left(\frac{Q}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right) \right) \quad \dots \text{(B.6)}$$

NOTE Pour $\rho_g = 0,45 \text{ kg/m}^3$ et $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, cette équation peut être simplifiée pour donner :

$$L_L = 1,9 \left(\frac{Q}{w_t} \right)^{2/3} - h_{eq} \quad \dots \text{(B.7)}$$



$L_H = \frac{h_{eq}}{3} \Rightarrow$	$L_1 = \sqrt{L_H^2 + \frac{h_{eq}^2}{9}} \cong \frac{h_{eq}}{2}$	$L_1 \cong \frac{h_{eq}}{2}$
	$L_f = L_L + L_1$	$L_f = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3} \right)^2} + L_1$
$h_{eq} < 1,25 w_t$ et avec un mur au-dessus		sans mur au-dessus ou $h_{eq} > 1,25 w_t$

Figure B.2 — Dimensions des flammes sans ventilation forcée

- (4) La largeur de la flamme est égale à la largeur de la fenêtre (voir Figure B.2).
 (5) L'épaisseur de la flamme est égale aux 2/3 de la hauteur de fenêtre : $2/3 h_{eq}$ (voir Figure B.2).
 (6) Projection horizontale de la flamme :

— s'il y a un mur au-dessus de la fenêtre :

$$L_H = h_{eq}/3 \quad \text{si } h_{eq} \leq 1,25 w_t \quad \dots \text{ (B.8)}$$

$$L_H = 0,3 h_{eq} (h_{eq}/w_t)^{0,54} \quad \text{si } h_{eq} > 1,25 w_t \text{ et une distance } > 4 w_t \text{ par rapport à toute autre fenêtre } \dots \text{ (B.9)}$$

$$L_H = 0,454 h_{eq} (h_{eq}/2w_t)^{0,54} \quad \text{autres cas } \dots \text{ (B.10)}$$

— s'il n'y a pas de mur au-dessus de la fenêtre :

$$L_H = 0,6 h_{eq} (L_L/h_{eq})^{1/3} \quad \dots \text{ (B.11)}$$

- (7) La longueur de la flamme suivant l'axe est donnée par :

Si $L_L > 0$:

$$L_f = L_L + h_{eq}/2 \text{ s'il y a un mur au-dessus de la fenêtre et si } h_{eq} \leq 1,25 w_t \quad \dots \text{ (B.12)}$$

$$L_f = (L_L^2 + (L_H - h_{eq}/3)^2)^{1/2} + h_{eq}/2 \text{ s'il n'y a pas de mur au-dessus de la fenêtre ou si } h_{eq} > 1,25 w_t \quad \dots \text{ (B.13)}$$

Si $L_L = 0$, alors $L_f = 0$

- (8) La température de la flamme à la fenêtre est donnée par :

$$T_w = 520 / (1 - 0,4725 (L_f \cdot w_t / Q)) + T_0 \quad [\text{K}] \quad \dots \text{ (B.14)}$$

avec $L_f \cdot w_t / Q < 1$

- (9) L'émissivité des flammes à la fenêtre peut être considérée comme $\varepsilon_f = 1,0$.

- (10) La température de la flamme suivant l'axe est donnée par :

$$T_z = (T_w - T_0) (1 - 0,4725 (L_x \cdot w_t / Q)) + T_0 \quad [\text{K}] \quad \dots \text{ (B.15)}$$

avec :

$$L_x \cdot w_t / Q < 1$$

L_x est la longueur de l'axe entre la fenêtre et le point où s'effectue le calcul.

- (11) L'émissivité des flammes peut être considérée comme :

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f} \quad \dots \text{ (B.16)}$$

où d_f est l'épaisseur de la flamme [m].

- (12) Le coefficient de transfert thermique par convection est donné par :

$$\alpha_c = 4,67 (1/d_{eq})^{0,4} (Q/A_v)^{0,6} \quad \dots \text{ (B.17)}$$

- (13) Si un auvent ou un balcon (ayant une projection horizontale : W_a) se trouve au niveau du sommet de la fenêtre sur toute sa largeur (voir Figure B.3), il convient de modifier comme suit la hauteur et la projection horizontale de la flamme pour le mur se situant au-dessus de la fenêtre et pour $h_{eq} \leq 1,25 w_t$.

— la hauteur de la flamme L_L , donnée en (3), est diminuée de $W_a (1 + \sqrt{2})$;

— la projection horizontale de la flamme L_H , donnée en (6), est augmentée de W_a .

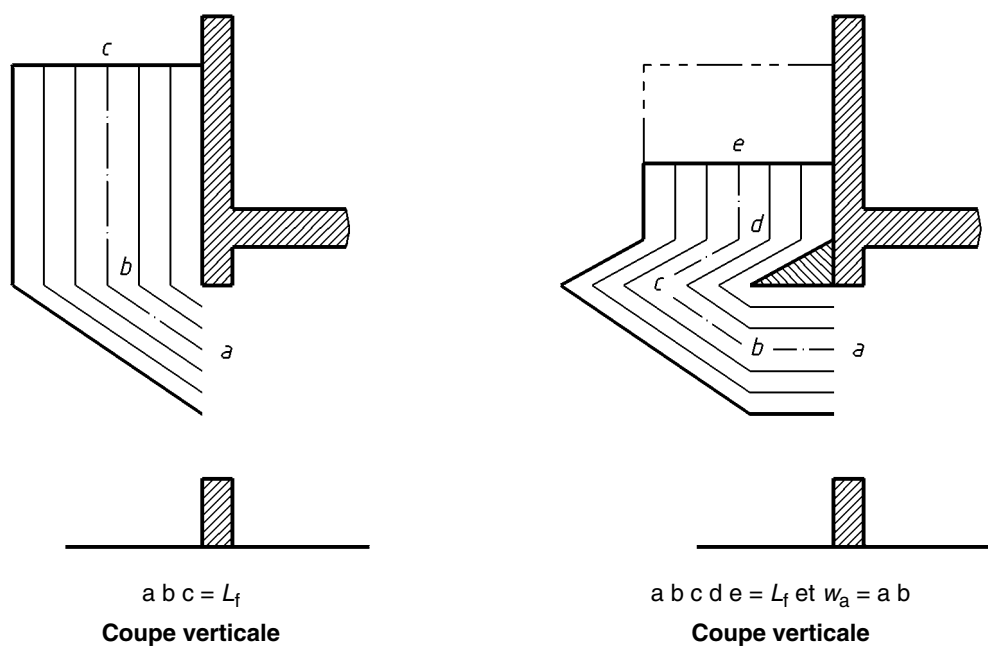


Figure B.3 — Déviation des flammes due au balcon

(14) Les conditions relatives à l'auvent ou au balcon étant identiques à celles mentionnées en (13), il convient de modifier comme suit la hauteur et la projection horizontale de la flamme en l'absence de mur au-dessus de la fenêtre ou pour $h_{eq} > 1,25 w_f$:

- la hauteur de la flamme L_L , donnée en (3), est diminuée de W_a ;
- la projection horizontale de la flamme L_H , obtenue en (6) avec la valeur ci-dessus mentionnée de L_L , est augmentée de W_a .

B.4.2 Ventilation forcée

(1) La vitesse de combustion ou le débit calorifique sont donnés par :

$$Q = (A_f \cdot q_{f,d}) / \tau_F \quad [\text{MW}] \quad \dots \text{ (B.18)}$$

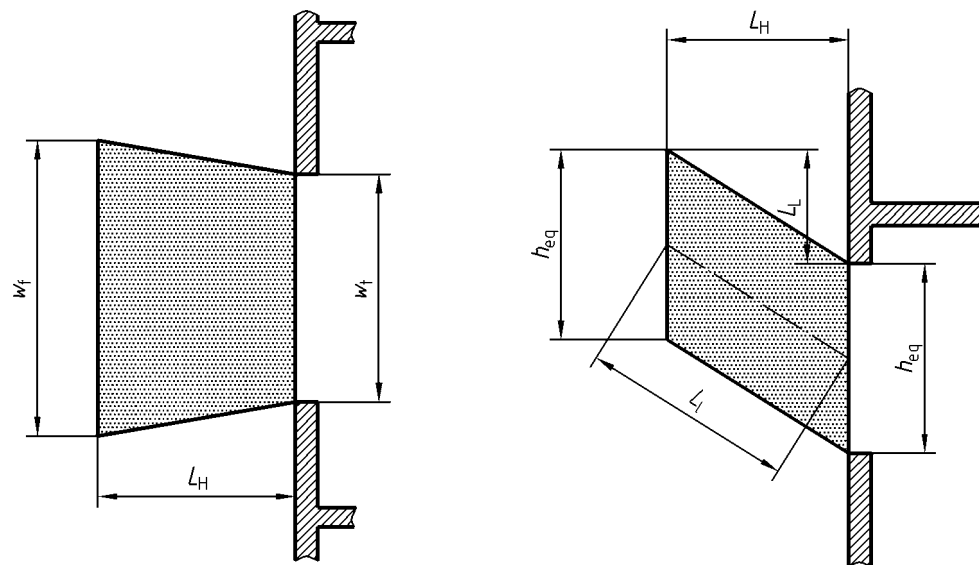
(2) La température du compartiment est donnée par :

$$T_f = 1\,200 (1 - e^{-0,00228\Omega}) + T_0 \quad \dots \text{ (B.19)}$$

(3) La hauteur de la flamme (voir Figure B.4) est donnée par :

$$L_L = \left(1,366 \left(\frac{1}{u} \right)^{0,43} \frac{Q}{A_v^{1/2}} \right) - h_{eq} \quad \dots \text{ (B.20)}$$

NOTE Pour $u = 6 \text{ m/s}$, $L_L \approx 0,628 Q / A_v^{1/2} - h_{eq}$.



Coupe horizontale

$$w_f = w_t + 0,4 L_H$$

Coupe verticale

$$L_f = (L_L^2 + L_H^2)^{1/2}$$

Figure B.4 — Dimensions des flammes sous ventilation forcée

(4) La projection horizontale de la flamme est donnée par :

$$L_H = 0,605 (u^2 / h_{eq})^{0,22} (L_L + h_{eq}) \quad \dots (B.21)$$

NOTE Pour $u = 6$ m/s, $L_H = 1,33 (L_L + h_{eq}) / h_{eq}^{0,22}$.

(5) La largeur de la flamme est donnée par :

$$w_f = w_t + 0,4 L_H \quad \dots (B.22)$$

(6) La longueur de la flamme suivant l'axe est donnée par :

$$L_f = (L_L^2 + L_H^2)^{1/2} \quad \dots (B.23)$$

(7) La température de la flamme à la fenêtre est donnée par :

$$T_w = 520 / (1 - 0,3325 L_f (A_v)^{1/2} / Q) + T_0 \quad [K] \quad \dots (B.24)$$

avec $L_f (A_v)^{1/2} / Q < 1$

(8) L'émissivité des flammes à la fenêtre peut être considérée comme $\varepsilon_f = 1,0$.

(9) La température de la flamme suivant l'axe est donnée par :

$$T_z = \left(1 - 0,3325 \frac{L_x (A_v)^{1/2}}{Q} \right) (T_w - T_0) + T_0 \quad [K] \quad \dots (B.25)$$

où :

L_x est la longueur de l'axe entre la fenêtre et le point où s'effectue le calcul.

(10) L'émissivité des flammes peut être considérée comme :

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f} \quad \dots (B.26)$$

où :

d_f est l'épaisseur de la flamme [m].

(11) Le coefficient de transfert thermique par convection est donné par :

$$\alpha_c = 9,8 (1/d_{eq})^{0,4} (Q/(17,5 A_v) + u/1,6)^{0,6} \quad \dots (B.27)$$

NOTE Pour $u = 6$ m/s, le coefficient de transfert thermique par convection est donné par :

$$\alpha_c = 9,8 (1/d_{eq})^{0,4} (Q/(17,5 A_v) + 3,75)^{0,6}$$

(12) Effet d'un balcon ou d'un auvent (voir Figure B.5) : après avoir été déviée horizontalement par un balcon ou un auvent, la trajectoire de la flamme est la même que précédemment, déplacée vers l'extérieur de la profondeur du balcon, mais la valeur de L_f reste inchangée.

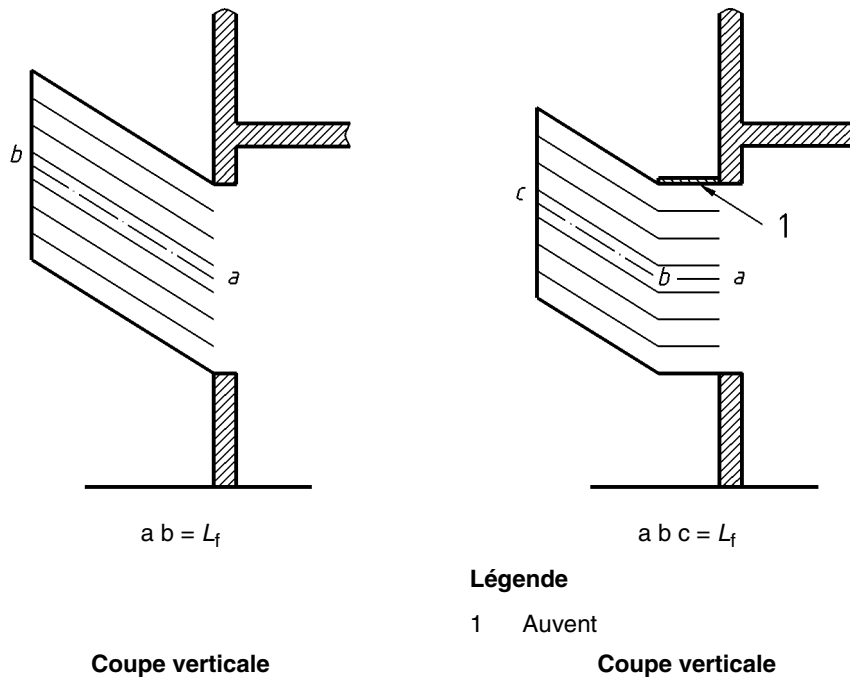


Figure B.5 — Déviation des flammes due à l'auvent

B.5 Facteurs de forme généraux

(1) Il convient de déterminer comme suit le facteur de forme général Φ_f d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement depuis une ouverture :

$$\Phi_f = \frac{\left(C_1 \Phi_{f,1} + C_2 \Phi_{f,2} \right) d_1 + \left(C_3 \Phi_{f,3} + C_4 \Phi_{f,4} \right) d_2}{\left(C_1 + C_2 \right) d_1 + \left(C_3 + C_4 \right) d_2} \quad \dots (B.28)$$

où :

$\Phi_{f,i}$ est le facteur de forme de la face i de l'élément pour cette ouverture (voir annexe G) ;

d_i est la dimension de la section droite 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 considérer comme nul le facteur de forme $\Phi_{f,i}$ d'une face d'élément depuis laquelle l'ouverture n'est pas visible.

(3) Il convient de déterminer comme suit le facteur de forme général Φ_z d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement depuis une flamme :

$$\Phi_z = \frac{\left(C_1 \Phi_{z,1} + C_2 \Phi_{z,2} \right) d_1 + \left(C_3 \Phi_{z,3} + C_4 \Phi_{z,4} \right) d_2}{\left(C_1 + C_2 \right) d_1 + \left(C_3 + C_4 \right) d_2} \quad \dots \text{(B.29)}$$

où :

$\Phi_{z,i}$ est le facteur de forme de la face i de l'élément pour cette flamme (voir annexe G).

(4) Les facteurs de forme $\Phi_{z,i}$ de faces d'éléments pour le transfert thermique par rayonnement depuis une flamme peuvent se baser sur les dimensions de flammes rectangulaires équivalentes. Dans ce cas, il convient de déterminer les dimensions et emplacements des rectangles équivalents représentant les parties frontales et latérales d'une flamme conformément à l'annexe G. Dans tous les autres cas, il est recommandé d'utiliser les dimensions de flammes indiquées en B.4 de la présente annexe.

Annexe C (informative) Feux localisés

(1) L'action thermique d'un feu localisé peut être évaluée en utilisant l'expression fournie dans cette annexe. Il convient de différencier la méthode en fonction de la hauteur relative de la flamme par rapport au plafond.

(2) Pour calculer le flux thermique entre un feu localisé et un élément structural, il convient d'utiliser l'expression (3.1) en se basant sur un facteur de forme calculé conformément à l'annexe G.

(3) La longueur de flamme L_f d'un feu localisé (voir Figure C.1) est donnée par :

$$L_f = -1,02D + 0,0148Q^{2/5} \quad [\text{m}] \quad \dots \text{ (C.1)}$$

(4) Si la flamme ne touche pas le plafond du compartiment ($L_f < H$; voir Figure C.1) ou dans le cas d'un feu extérieur, la température $\theta_{(z)}$ du panache le long de l'axe vertical symétrique de la flamme est donnée par :

$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25Q_c^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots \text{ (C.2)}$$

où :

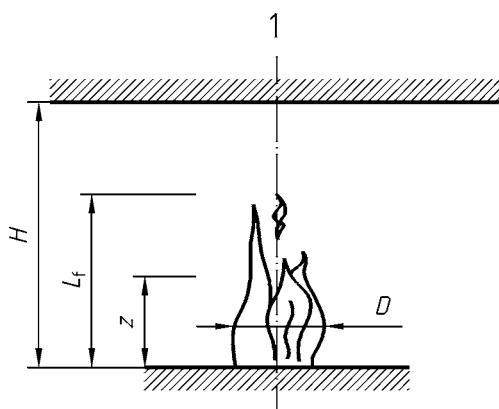
D est le diamètre du feu [m] (voir Figure C.1) ;

Q est le débit calorifique [W] selon E.4 ;

Q_c est la composante de convection du débit calorifique [W], avec $Q_c = 0,8 Q$ par défaut ;

z est la hauteur [m] suivant l'axe de la flamme (voir Figure C.1) ;

H est la distance [m] entre le foyer d'incendie et le plafond (voir Figure C.1).



Légende

1 Axe de la flamme

Figure C.1

(5) L'origine virtuelle z_0 de l'axe est donnée par :

$$Z_0 = -1,02 D + 0,00524 Q^{2/5} \quad [\text{m}] \quad \dots \text{ (C.3)}$$

(6) Si la flamme touche le plafond ($L_f \geq H$; voir Figure C.2), le flux thermique \dot{h} [W/m^2] reçu par unité de surface exposée au feu au niveau du plafond est donné par :

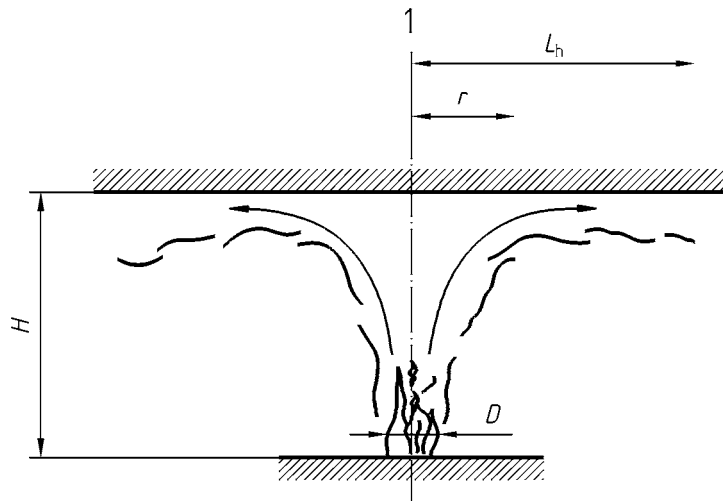
$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100\,000 && \text{si } y \leq 0,30 \\ \dot{h} &= 136\,300 - 121\,000 y && \text{si } 0,30 < y < 1,0 \\ \dot{h} &= 15\,000 y^{3,7} && \text{si } y \geq 1,0 \end{aligned} \quad \dots \text{ (C.4)}$$

où :

y est un paramètre donné par : $y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'}$

r est la distance horizontale [m] entre l'axe vertical du feu et le point du plafond où le flux thermique est calculé (voir Figure C.2) ;

H est la distance [m] entre le foyer d'incendie et le plafond (voir Figure C.2).



Légende

1 Axe de la flamme

Figure C.2

(7) L_h est la longueur de la flamme horizontale (voir Figure C.2), donnée par la relation suivante :

$$L_h = \left(2,9H \left(Q_H^* \right)^{0,33} \right) - H \quad [\text{m}] \quad \dots \text{ (C.5)}$$

(8) Q_H^* est un débit calorifique non dimensionnel donné par :

$$Q_H^* = Q / \left(1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5} \right) \quad [-] \quad \dots \text{ (C.6)}$$

(9) z' est la position verticale de la source virtuelle de chaleur [m], donnée par :

$$z' = 2,4D \left(Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3} \right) \quad \text{quand } Q_D^* < 1,0 \quad \dots \text{ (C.7)}$$

$$z' = 2,4D \left(1,0 - Q_D^{*2/5} \right) \text{ quand } Q_D^* \geq 1,0$$

où :

$$Q_D^* = Q / \left(1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5} \right) \quad [-] \quad \dots \text{ (C.8)}$$

(10) Le flux thermique net \dot{h}_{net} reçu par unité de surface exposée au feu au niveau du plafond est donné par :

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h} - a_c \cdot (\theta_m - 20) - \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_m + 273)^4 - (293)^4] \quad \dots \text{ (C.9)}$$

où les différents coefficients dépendent des expressions (3.2), (3.3) et (C.4).

(11) Les règles indiquées de (3) à (10) inclus s'appliquent si les conditions suivantes sont remplies :

- le diamètre du feu est limité par $D \leq 10$ m ;
- le débit calorifique du feu est limité par $Q \leq 50$ MW.

(12) En présence de plusieurs feux localisés distincts, il est possible d'utiliser l'expression (C.4) pour obtenir les différents flux thermiques individuels $\dot{h}_1, \dot{h}_2, \dots$ reçus par unité de surface exposée au feu au niveau du plafond. Le flux thermique total peut être considéré comme :

$$\dot{h}_{\text{tot}} = \dot{h}_1 + \dot{h}_2 \dots \leq 100\,000 \quad [\text{W/m}^2] \quad \dots \text{ (C.10)}$$

Annexe D (informative) Modèles de feu avancés

D.1 Modèles une zone

(1) Il convient d'appliquer un modèle une zone dans des conditions post-embrasement généralisé. La température, la densité, l'énergie interne et la pression du gaz sont supposées homogènes dans le compartiment.

(2) Il convient de calculer la température en prenant en compte :

- la résolution des équations de conservation de masse et de conservation d'énergie ;
- l'échange de masse entre le gaz intérieur, l'air extérieur (par les ouvertures) et le feu (vitesse de pyrolyse) ;
- l'échange d'énergie entre le feu, le gaz interne, les murs et les ouvertures.

(3) La loi des gaz parfaits à prendre en compte est la suivante :

$$P_{\text{int}} = \rho_g R T_g \quad [\text{N/m}^2] \quad \dots \text{ (D.1)}$$

(4) Le bilan massique des gaz du compartiment s'écrit comme suit :

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}} + \dot{m}_{\text{fi}} \quad [\text{kg/s}] \quad \dots \text{ (D.2)}$$

où :

$\frac{dm}{dt}$ est le débit massique des gaz dans le compartiment ;

\dot{m}_{out} est le débit massique des gaz sortant par les ouvertures ;

\dot{m}_{in} est le débit massique des gaz entrant par les ouvertures ;

\dot{m}_{fi} est le débit massique des produits issus de la pyrolyse.

(5) Le débit massique des gaz et le débit de pyrolyse peuvent être considérés comme négligeables. Par conséquent :

$$\dot{m}_{\text{in}} = \dot{m}_{\text{out}} \quad \dots \text{ (D.3)}$$

Ces débits massiques peuvent être calculés à partir de la pression statique due aux différences de densité entre l'air à température ambiante et à température élevée.

(6) Le bilan énergétique des gaz dans le compartiment peut être considéré comme :

$$\frac{dE_g}{dt} = Q - Q_{\text{out}} + Q_{\text{in}} - Q_{\text{wall}} - Q_{\text{rad}} \quad [\text{W}] \quad \dots \text{ (D.4)}$$

où :

E_g est l'énergie interne du gaz [J] ;

Q est le débit calorifique du feu [W] ;

$Q_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{out}} c T_f$;

$Q_{\text{in}} = \dot{m}_{\text{in}} c T_{\text{amb}}$;

$Q_{\text{wall}} = (A_t - A_{h,v}) \dot{h}_{\text{net}}$, est la perte d'énergie vers les parois de l'enceinte ;

$Q_{\text{rad}} = A_{h,v} \sigma T_f^4$, est la perte d'énergie par rayonnement par les ouvertures.

avec :

c est la chaleur spécifique [J/kgK] ;

\dot{h}_{net} est donnée par l'expression (3.1) ;

\dot{m} est le taux de masse gazeuse [kg/s] ;

T est la température [K].

D.2 Modèles deux zones

(1) Un modèle deux zones repose sur l'hypothèse que les produits de combustion s'accumulent en une couche sous le plafond, avec une interface horizontale. Différentes zones sont définies : la couche supérieure, la couche inférieure, le feu et son panache, l'air extérieur et les murs.

(2) Dans la couche supérieure, les caractéristiques du gaz sont supposées uniformes.

(3) Les échanges de masse, d'énergie, et de substance chimique peuvent être calculées entre ces différentes zones.

(4) Dans un compartiment donné dont la charge calorifique est répartie de façon uniforme, un modèle deux zones peut devenir un modèle une zone dans l'une des situations suivantes :

- si la température du gaz de la couche supérieure dépasse 500 °C ;
- si la couche supérieure est telle qu'elle occupe 80 % de la hauteur du compartiment.

D.3 Modèles de calcul de dynamique des fluides

(1) Un modèle de calcul de dynamique des fluides peut être utilisé pour résoudre numériquement les équations différentielles partielles qui donnent, en tout point du compartiment, les variables aéro-thermodynamiques.

NOTE Les modèles de calcul de dynamique des fluides (CFD) analysent les systèmes impliquant l'écoulement du fluide, les transferts thermiques et les phénomènes associés en résolvant les équations fondamentales de l'écoulement du fluide. Ces équations représentent les énoncés mathématiques des lois de conservation :

- la masse d'un fluide est conservée ;
- la variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces exercées sur une particule fluide (deuxième loi de Newton) ;
- la variation de l'énergie est égale à la somme du taux d'échauffement et du taux de travail exercé sur une particule fluide (première loi de thermodynamique).

Annexe E (informative) Densités de charge calorifique

E.1 Généralités

(1) Il convient que la densité de charge calorifique utilisée dans les calculs soit une valeur de calcul, fondée sur des mesures ou, dans des cas particuliers, sur les exigences de résistance au feu des réglementations nationales.

(2) La valeur de calcul peut être déterminée :

- à partir d'un classement national des charges calorifiques selon le type d'occupation ; ou
- de manière spécifique pour un projet particulier en effectuant une étude de charge calorifique.

(3) La densité de charge calorifique de calcul est définie par :

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \dots \text{(E.1)}$$

où :

m est le coefficient de combustion (voir E.3) ;

δ_{q1} est un coefficient qui prend en compte le risque d'activation du feu lié à la taille du compartiment (voir Tableau E.1) ;

δ_{q2} est un coefficient qui prend en compte le risque d'activation du feu lié au type d'occupation (voir Tableau E.1).

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$ est un coefficient qui prend en compte les différentes mesures actives de lutte contre le feu «*i*» (sprinkleur, détection, alarme automatique, sapeurs-pompiers, etc.). Ces mesures actives sont généralement imposées pour des raisons de sécurité des personnes (voir Tableau E.2 et articles (4) et (5)) ;

$q_{f,k}$ est la densité de charge calorifique caractéristique par unité de surface de plancher [MJ/m^2] (voir par exemple Tableau E.4).

Tableau E.1 — Coefficients δ_{q1} , δ_{q2}

Surface de plancher du compartiment A_f [m^2]	Risque d'activation du feu δ_{q1}	Risque d'activation du feu δ_{q2}	Exemples de types d'occupation
25	1,10	0,78	galerie d'art, musée, piscine
250	1,50	1,00	bureaux, résidence, hôtel, industrie papetière
2 500	1,90	1,22	fabrique de machines et de moteurs
5 000	2,00	1,44	laboratoire de chimie, atelier de peinture
10 000	2,13	1,66	fabrique d'artifices ou de peintures

Tableau E.2 — Coefficients δ_{ni}

δ_{ni} Fonction de mesures actives de lutte contre le feu											
Suppression automatique du feu				Détection automatique du feu		Suppression manuelle du feu					
Système d'extinction à eau automatique	Approvisionnement en eau indépendants			Détection automatique du feu et alarme		Alarme automatique transmise aux pompiers	Pompiers sur site	Pompiers hors site	Voies d'accès libres	Équipement de lutte contre le feu	Système de désenfumage
	0	1	2	par la chaleur	par la fumée						
δ_{n1}	δ_{n2}			δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ou 0,73		0,87	0,61 ou 0,78		0,9 ou 1 ou 1,5	1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5

(4) Pour les mesures normales de lutte contre le feu, qu'il convient de prévoir presque toujours, telles que des voies d'accès libres, des équipements de lutte contre le feu et des systèmes de désenfumage dans les escaliers, il est recommandé de considérer les valeurs δ_{ni} du Tableau E.2 comme étant égales à 1,0. Toutefois, si ces mesures n'ont pas été prévues, il est recommandé de considérer la valeur δ_{ni} correspondante comme étant égale à 1,5.

(5) En cas d'alerte incendie, si les escaliers font l'objet d'une suppression, le coefficient δ_{n8} du Tableau E.2 peut être considéré comme étant égal à 0,9.

(6) L'approche ci-dessus repose sur l'hypothèse que les exigences des normes européennes s'appliquant aux sprinklers, à la détection, aux alarmes et aux systèmes de désenfumage sont respectées (voir également 1.3). Toutefois, les circonstances au cas par cas peuvent modifier les valeurs indiquées dans le Tableau E.2. Il est fait référence au Document de référence CEN/TC 250/SC 1/N300A.

E.2 Détermination des densités de charge calorifique

E.2.1 Généralités

(1) Dans la charge calorifique, il convient de prendre en compte tout le contenu du bâtiment et tous les éléments de construction qui sont combustibles, y compris les revêtements et les finitions. Les éléments combustibles qui ne brûlent pas pendant l'incendie ne doivent pas être pris en compte.

(2) Les paragraphes suivants s'appliquent à la détermination des densités de charge calorifique :

- à partir d'un classement des charges calorifiques selon le type d'occupation (voir E.2.5) ; ou
- de manière spécifique pour un projet particulier (voir E.2.6).

(3) Lorsque les densités de charge calorifique sont déterminées à partir d'un classement des charges calorifiques selon le type d'occupation, on distingue :

- les charges calorifiques dues à l'occupation, données dans le classement ;
- les charges calorifiques du bâtiment (éléments de construction, revêtements et finitions) qui n'entrent généralement pas dans le classement et sont ensuite déterminées conformément aux paragraphes suivants applicables.

E.2.2 Définitions

(1) La charge calorifique caractéristique est définie par :

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \Psi_i = \sum Q_{fi,k,i} \quad [\text{MJ}] \quad \dots \text{(E.2)}$$

où :

$M_{k,i}$ est la quantité de matériau combustible [kg], selon (3) et (4) ;

H_{ui} est le pouvoir calorifique inférieur [MJ/kg] (voir E.2.4) ;

$[\Psi_i]$ est le coefficient facultatif permettant d'évaluer les charges calorifiques protégées (voir E.2.3).

(2) La densité de charge calorifique caractéristique $q_{f,k}$ par unité de surface est définie par :

$$q_{f,k} = Q_{f,k}/A \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \dots \text{(E.3)}$$

où :

A est la surface de plancher (A_f) du compartiment ou de l'espace de référence, ou l'aire de la surface intérieure (A_i) du compartiment, donnant $q_{f,k}$ ou $q_{t,k}$.

(3) Il convient de présenter sous la forme de leurs valeurs escomptées résultant de l'étude les charges calorifiques permanentes qui ne sont pas censées varier pendant la durée de vie d'une structure.

(4) Il convient de représenter les charges variables susceptibles de changer pendant la vie utile d'une structure par les valeurs censées ne pas être dépassées pendant 80 % du temps.

E.2.3 Charges calorifiques protégées

(1) Il n'est pas nécessaire de prendre en compte les charges calorifiques placées dans des enceintes conçues pour résister à l'exposition au feu.

(2) Les charges calorifiques placées dans des enceintes non combustibles, sans conception particulière vis-à-vis du feu mais qui restent intactes pendant l'exposition au feu, peuvent être prises en compte comme suit :

La charge calorifique la plus importante, mais au moins égale à 10 % des charges calorifiques protégées, est affectée d'un coefficient $\Psi_i = 1,0$.

Si cette charge calorifique plus les charges calorifiques non protégées ne suffisent pas pour porter les charges calorifiques protégées restantes au-delà de la température d'inflammation, les charges calorifiques protégées restantes peuvent être affectées d'un coefficient $\Psi_i = 0,0$.

Sinon, il est nécessaire d'évaluer séparément les valeurs de Ψ_i .

E.2.4 Pouvoirs calorifiques inférieurs

(1) Il convient de déterminer les pouvoirs calorifiques inférieurs selon l'EN ISO 1716:2002.

(2) L'humidité des matériaux peut être prise en compte de la manière suivante :

$$H_u = H_{u0} (1 - 0,01 u) - 0,025 u \quad [\text{MJ/kg}] \quad \dots \text{(E.4)}$$

où :

u est l'humidité en pourcentage de poids ;

H_{u0} est le pouvoir calorifique inférieur des matériaux secs.

(3) Le Tableau E.3 donne les pouvoirs calorifiques inférieurs de certains solides, liquides, et gaz.

**Tableau E.3 — Pouvoirs calorifiques inférieurs H_u [MJ/kg]
de matériaux combustibles pour le calcul de charges calorifiques**

Solides	
Bois	17,5
Autres matériaux cellulosiques <ul style="list-style-type: none"> • Vêtements • Liège • Coton • Papier, carton • Soie • Paille • Laine 	20
Carbone <ul style="list-style-type: none"> • Anthracite • Charbon de bois • Charbon 	30
Produits chimiques	
Série des paraffines <ul style="list-style-type: none"> • Méthane • Éthane • Propane • Butane 	50
Série des oléfines <ul style="list-style-type: none"> • Éthylène • Propylène • Butène 	45
Série des aromatiques <ul style="list-style-type: none"> • Benzène • Toluène 	40
Alcools <ul style="list-style-type: none"> • Méthanol • Éthanol • Alcool éthylique 	30
Combustibles <ul style="list-style-type: none"> • Essence, pétrole • Gasoil 	45
Plastiques hydrocarbonés purs <ul style="list-style-type: none"> • Polyéthylène • Polystyrène • Polypropylène 	40
Autres produits	
Alkylbenzènesulfonate (plastique)	35
Polyester (plastique)	30
Polyisocyanurate et polyuréthane (plastiques)	25
Polychlorure de vinyle (plastique)	20
Bitume, asphalte	40
Cuir	20
Linoléum	20
Pneumatique	30
NOTE Les valeurs indiquées dans ce tableau ne s'appliquent pas au calcul du contenu énergétique des combustibles.	

E.2.5 Classement des charges calorifiques selon le type d'occupation

(1) Il convient de classer les densités de charge calorifique en fonction du type d'occupation, de les rapporter à la surface du plancher et de les utiliser comme densités de charge calorifique caractéristiques $q_{f,k}$ [MJ/m²], selon le Tableau E.4.

Tableau E.4 — Densités de charge calorifique $q_{f,k}$ [MJ/m²] selon différents types d'occupation

Type d'occupation	Moyenne	Fractile à 80 %
Logement	780	948
Hôpital (chambre)	230	280
Hôtel (chambre)	310	377
Bibliothèque	1 500	1 824
Bureau	420	511
Classe d'école	285	347
Centre commercial	600	730
Théâtre (cinéma)	300	365
Transport (espace public)	100	122
NOTE La loi de Gumbel est supposée s'appliquer pour le fractile à 80 %.		

(2) Les valeurs de densité de charge calorifique $q_{f,k}$ indiquées dans le Tableau E.4 s'appliquent dans le cas d'un coefficient δ_{q2} égal à 1,0 (voir Tableau E.1).

(3) Les charges calorifiques indiquées dans le Tableau E.4 s'appliquent dans le cas de compartiments ordinaires en relation avec les types d'occupation donnés ici. Les pièces spéciales sont prises en compte selon E.2.2.

(4) Il convient de déterminer les charges calorifiques du bâtiment (éléments de construction, revêtements et finitions) selon E.2.2. Le cas échéant, il convient de les ajouter aux densités de charge calorifique de (1).

E.2.6 Évaluation individuelle des densités de charge calorifique

(1) Dans les cas où les classes d'occupation ne s'appliquent pas, les densités de charge calorifique peuvent être déterminées spécifiquement pour un projet particulier en effectuant une étude des charges calorifiques dues à l'occupation.

(2) Il convient d'estimer les charges calorifiques et leur localisation, en tenant compte de l'usage prévu, du mobilier et des installations, des changements dans le temps, des tendances défavorables et des modifications éventuelles de l'occupation.

(3) Si possible, il convient d'effectuer une enquête sur un projet existant comparable de manière à ce que le client n'ait à spécifier que les différences éventuelles entre le projet envisagé et celui existant.

E.3 Conditions de combustion

(1) Il convient de prendre en compte les conditions de combustion en fonction du type d'occupation et du type de charge calorifique.

(2) Dans le cas des matériaux principalement cellulodiques, il est permis de supposer un coefficient de combustion $m = 0,8$.

E.4 Débit calorifique Q

(1) La phase de développement peut être définie par l'expression :

$$Q = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad \dots \text{(E.5)}$$

où :

Q est le débit calorifique en [W] ;

t est le temps en [s] ;

t_α est le temps nécessaire pour atteindre un débit calorifique de 1 MW.

(2) Le paramètre t_α et le débit calorifique maximal RHR_f correspondant à différents types d'occupation sont indiqués dans le Tableau E.5

Tableau E.5 — Vitesse de développement du feu et RHR_f selon différents types d'occupation.

Débit calorifique maximal RHR_f			
Type d'occupation	Vitesse de développement du feu	t_α [s]	RHR_f [kW/m ²]
Logement	Moyen	300	250
Hôpital (chambre)	Moyen	300	250
Hôtel (chambre)	Moyen	300	250
Bibliothèque	Rapide	150	500
Bureau	Moyen	300	250
Classe d'école	Moyen	300	250
Centre commercial	Rapide	150	250
Théâtre (cinéma)	Rapide	150	500
Transport (espace public)	Lent	600	250

(3) Les valeurs de la vitesse de développement du feu et RHR_f indiquées dans le Tableau E.5 s'appliquent dans le cas d'un coefficient δ_{q2} égal à 1,0 (voir Tableau E.1).

(4) Dans le cas d'une propagation ultra-rapide du feu, t_α correspond à 75 s.

(5) La phase de développement est limitée par un plateau horizontal correspondant à l'état stationnaire et à une valeur Q donnée par ($RHR_f \cdot A_{fi}$).

où :

A_{fi} est la surface maximale du feu [m²], c'est-à-dire le compartiment dans le cas d'une charge calorifique répartie de manière uniforme, mais pouvant être plus petite dans le cas d'un feu localisé ;

RHR_f est le débit calorifique maximal produit par 1 m² de feu dans le cas d'un feu contrôlé par combustible [kW/m²] (voir Tableau E.5).

(6) Le plateau horizontal est limité par la phase de décroissance qui commence lorsque 70 % de la charge calorifique totale a été consommée.

(7) Il convient de supposer que la phase de décroissance est linéaire et débute lorsque 70 % de la charge calorifique a été brûlée et se termine quand la charge calorifique est intégralement consommée.

(8) Si le feu est contrôlé par la ventilation, il convient de diminuer ce niveau plateau en fonction de la quantité d'oxygène disponible, soit de façon automatique en utilisant un programme informatique se basant sur un modèle une zone, soit en utilisant l'expression simplifiée :

$$Q_{\max} = 0,10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}} \quad [\text{MW}] \quad \dots \text{ (E.6)}$$

où :

A_v est la surface des ouvertures [m^2] ;

h_{eq} est la hauteur moyenne des ouvertures [m] ;

H_u est le pouvoir calorifique inférieur du bois, égal à 17,5 MJ/kg ;

m est le coefficient de combustion, égal à 0,8.

(9) Lorsque le niveau maximal du débit calorifique est diminué dans le cas d'un feu contrôlé par la ventilation, la courbe du débit calorifique doit être prolongée pour correspondre à l'énergie disponible donnée par la charge calorifique. Si elle n'est pas prolongée, il convient de supposer qu'il y a combustion externe, ce qui implique une température des gaz plus faible dans le compartiment.

Annexe F (informative) Temps équivalent d'exposition au feu

(1) L'approche suivante peut être utilisée lorsque le calcul des éléments s'appuie sur les données présentées sous forme de tableau ou d'autres règles simplifiées correspondant à l'exposition au feu normalisé.

NOTE La méthode donnée dans cette annexe dépend des matériaux. Elle ne s'applique pas aux constructions mixtes (acier + béton) ni aux constructions en bois.

(2) Si les densités de charge calorifique sont spécifiées sans prendre spécifiquement en compte les conditions de combustion (voir annexe E), il convient alors de limiter cette approche aux compartiments contenant des charges calorifiques principalement de type cellulosique.

(3) Le temps équivalent d'exposition au feu normalisé est défini par :

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \text{ ou} \\ t_{e,d} = (q_{t,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \quad [\text{min}] \quad \dots (\text{F.1})$$

où :

$q_{f,d}$ est la densité de charge calorifique de calcul selon l'annexe E, qui veut que $q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$;

k_b est le facteur de conversion selon (4) ;

w_f est le facteur de ventilation selon (5), qui veut que $w_t = w_f \cdot A_t / A_f$;

k_c est le facteur de correction du matériau composant les sections droites structurales et défini dans le Tableau F.1.

Tableau F.1 — Facteur de correction k_c couvrant différents matériaux
(O est le facteur d'ouverture défini en annexe A)

Matériau des sections droites	Coefficient de correction k_c
Béton armé	1,0
Acier protégé	1,0
Acier non protégé	13,7 · O

(4) En l'absence d'évaluation détaillée des propriétés thermiques de l'enceinte, le facteur de conversion k_b peut être considéré comme :

$$k_b = 0,07 \quad [\text{min} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}] \text{ lorsque } q_d \text{ est exprimé en } [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad \dots (\text{F.2})$$

Sinon, k_b peut correspondre à la propriété thermique $b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ de l'enceinte selon le Tableau F.2. Pour déterminer b pour des couches multiples de matériau ou différents matériaux dans les murs, le plancher et le plafond, se reporter à l'annexe A (5) et (6).

Tableau F.2 — Facteur de conversion k_b en fonction des propriétés thermiques de l'enceinte

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ [J/m ² s ^{1/2} K]	k_b [min · m ² /MJ]
$b > 2\,500$	0,04
$720 \leq b \leq 2\,500$	0,055
$b < 720$	0,07

(5) Le facteur de ventilation w_f peut être calculé comme suit :

$$w_f = (6,0 / H)^{0,3} [0,62 + 90(0,4 - a_v)^4 / (1 + b_v a_h)] \geq 0,5 \quad [-] \quad \dots (F.3)$$

où :

a_v = A_v / A_f est la surface des ouvertures verticales (A_v) de la façade rapportée à la surface de plancher du compartiment (A_f), où il convient de respecter la limite $0,025 \leq a_v \leq 0,25$;

a_h = A_h / A_f est la surface des ouvertures horizontales (A_h) du toit rapportée à la surface de plancher du compartiment (A_f) ;

b_v = $12,5 (1 + 10 a_v - a_v^2) \geq 10,0$;

H est la hauteur du compartiment. [m]

Pour les petits compartiments [$A_f < 100 \text{ m}^2$] sans ouvertures dans le toit, le facteur w_f peut également être calculé comme suit :

$$w_f = O^{-1/2} \cdot A_f / A_t \quad \dots (F.4)$$

où :

O est le facteur d'ouverture selon l'annexe A.

(6) Il faut vérifier que :

$$t_{e,d} < t_{fi,d} \quad \dots (F.5)$$

où :

$t_{fi,d}$ est la valeur de calcul de la résistance au feu normalisée des éléments, évaluée selon les parties des prEN 1992 au prEN 1996 et du prEN 1999 relatives au feu.

Annexe G (informative) Facteur de forme

G.1 Généralités

(1) Le facteur de forme Φ est défini par 1.5.4.1, qui dans une expression mathématique est donné par :

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi S_{1-2}^2} dA_2 \quad \dots (G.1)$$

Le facteur de forme mesure la fraction de la chaleur totale émise par rayonnement qui quitte une surface rayonnante donnée pour arriver sur une surface réceptrice donnée. Sa valeur dépend de la taille de la surface rayonnante, de la distance entre la surface rayonnante et la surface réceptrice et de leur orientation respective (voir Figure G.1).

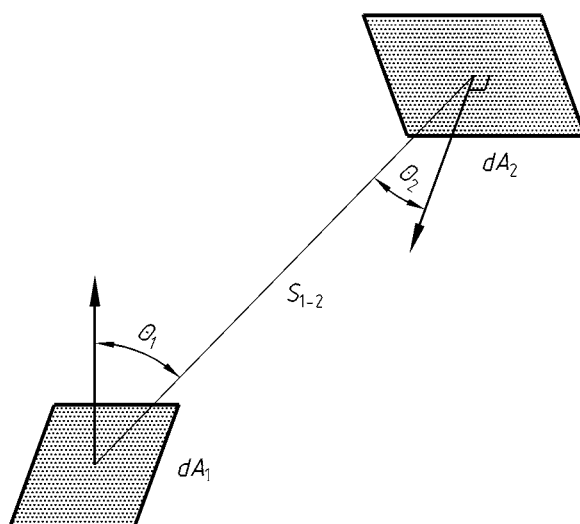


Figure G.1 — Transfert thermique par rayonnement entre aires de surface infinitésimales

(2) Dans le cas où la température et l'émissivité de l'élément rayonnant sont uniformes, la définition peut être simplifiée ainsi : «Angle solide à l'intérieur duquel le milieu rayonnant peut être vu d'une aire de surface infinitésimale particulière, divisé par 2π ».

(3) Le transfert thermique par rayonnement vers une aire infinitésimale de la surface d'un élément convexe dépend uniquement de la position et de la taille du feu (effet de position).

(4) Le transfert thermique par rayonnement vers une aire infinitésimale de la surface d'un élément concave dépend de la position et de la taille du feu (effet de position), ainsi que du rayonnement provenant d'autres parties de l'élément (effets d'ombre).

(5) Les limites supérieures du facteur de forme F sont indiquées dans le Tableau G.1.

Tableau G.1 — Limites du facteur de forme Φ

		Localisé	Totalement développé
effet de position		$\Phi \leq 1$	$\Phi = 1$
effet d'ombre	convexe	$\Phi = 1$	$\Phi = 1$
	concave	$\Phi \leq 1$	$\Phi \leq 1$

G.2 Effets d'ombre

(1) Pour quantifier l'effet d'ombre, des règles particulières sont données dans les parties des Eurocodes relatives aux matériaux.

G.3 Éléments extérieurs

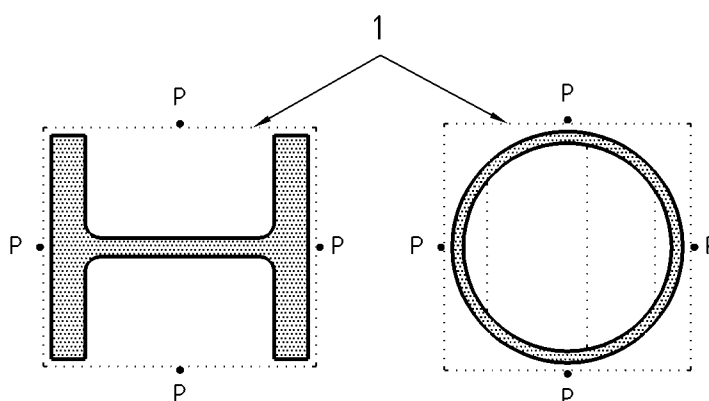
(1) Pour le calcul de la température dans les éléments extérieurs, toutes les surfaces rayonnantes peuvent être supposées de forme rectangulaire. Elles concernent les fenêtres et autres ouvertures dans les murs du compartiment et les surfaces rectangulaires équivalentes des flammes (voir annexe B).

(2) Pour calculer le facteur de forme pour une situation donnée, il convient d'abord de tracer un rectangle autour de la section droite de l'élément récepteur du transfert thermique par rayonnement, comme l'indique la Figure G.2 (cette méthode tient compte de l'effet d'ombre de façon approximative). Il convient ensuite de déterminer la valeur de F pour le point central P pour chaque face du rectangle.

(3) Pour chaque surface réceptrice d'un transfert thermique, il convient de déterminer le facteur de forme en additionnant la contribution de chacune des zones de la surface rayonnante (normalement au nombre de quatre) visibles depuis le point P de la surface réceptrice, comme l'indiquent les Figures G.3 et G.4. Il est recommandé de définir ces zones par rapport au point X où une ligne horizontale perpendiculaire à la surface réceptrice intersecte le plan contenant la surface rayonnante. Il convient de ne pas prendre en compte la contribution des zones non visibles depuis le point P , telles que les zones ombrées indiquées en Figure G.4.

(4) Si le point X se trouve à l'extérieur de la surface rayonnante, il convient de déterminer le facteur de forme effectif en additionnant la contribution des deux rectangles prolongés depuis le point X jusqu'au côté le plus éloigné de la surface rayonnante, puis en soustrayant la contribution des deux rectangles prolongés depuis le point X jusqu'au côté le plus proche de la surface rayonnante.

(5) Il convient de déterminer la contribution de chacune des zones comme suit :



Légende

1 Rectangle

Figure G.2 — Rectangle entourant les surfaces réceptrices

a) surface réceptrice parallèle à la surface rayonnante :

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

où :

$a = h / s$;

$b = w / s$;

s est la distance de P à X ;

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

w est la largeur de cette zone.

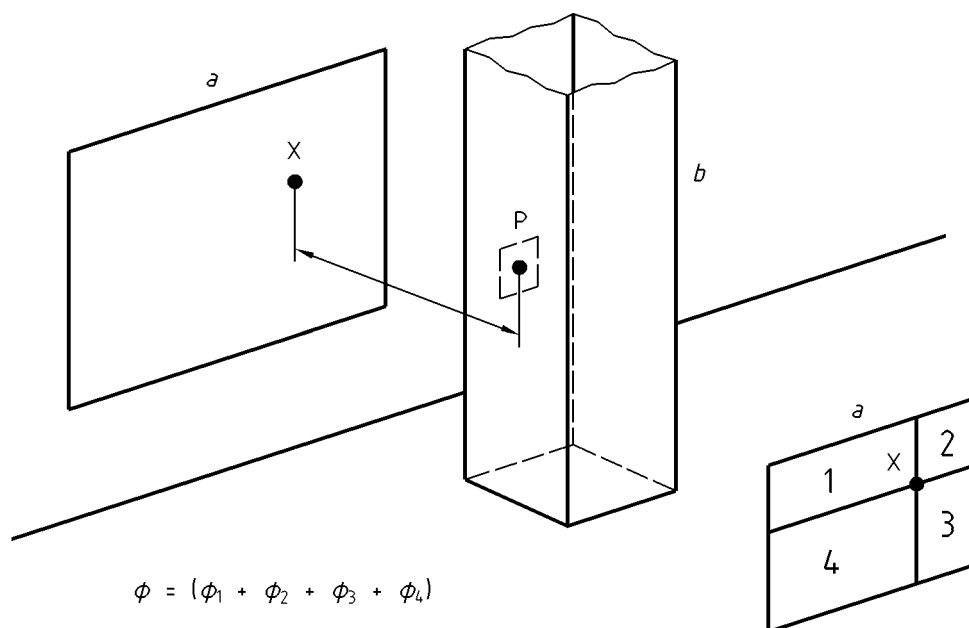
b) surface réceptrice perpendiculaire à la surface rayonnante :

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{1}{\left(1+b^2\right)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{\left(1+b^2\right)^{0,5}} \right) \right] \quad \dots \text{(G.3)}$$

c) surface réceptrice dans un plan formant un angle θ avec la surface rayonnante :

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{(1-b\cos\theta)}{\left(1+b^2-2b\cos\theta\right)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{\left(1+b^2-2b\cos\theta\right)^{0,5}} \right) + \right. \quad \dots \text{(G.4)}$$

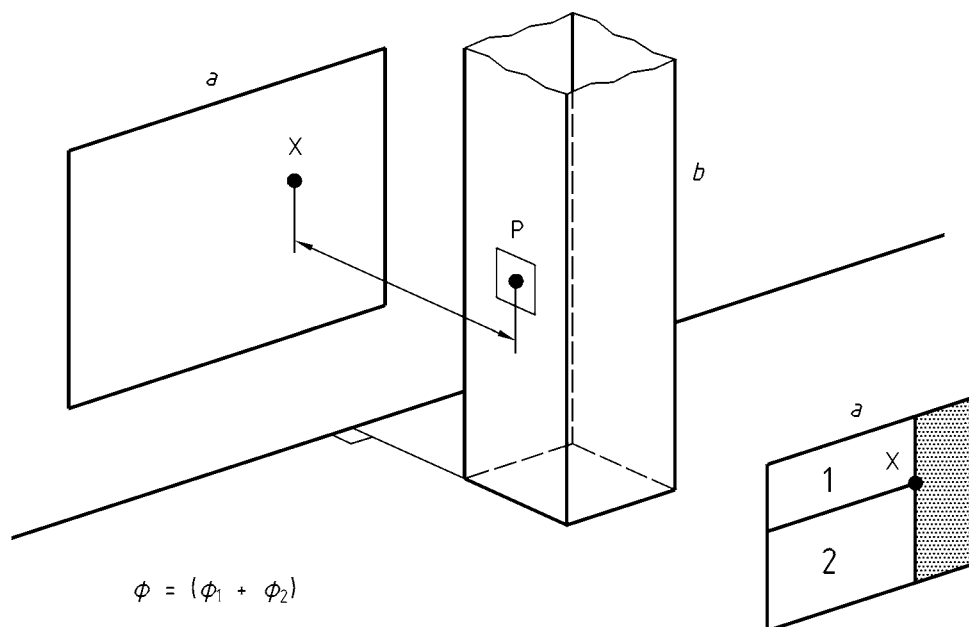
$$\left. \frac{a\cos\theta}{\left(a^2+\sin^2\theta\right)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{(b-\cos\theta)}{\left(a^2+\sin^2\theta\right)^{0,5}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\cos\theta}{\left(a^2+\sin^2\theta\right)^{0,5}} \right) \right]$$



Légende

- a Surface rayonnante
- b Surface réceptrice

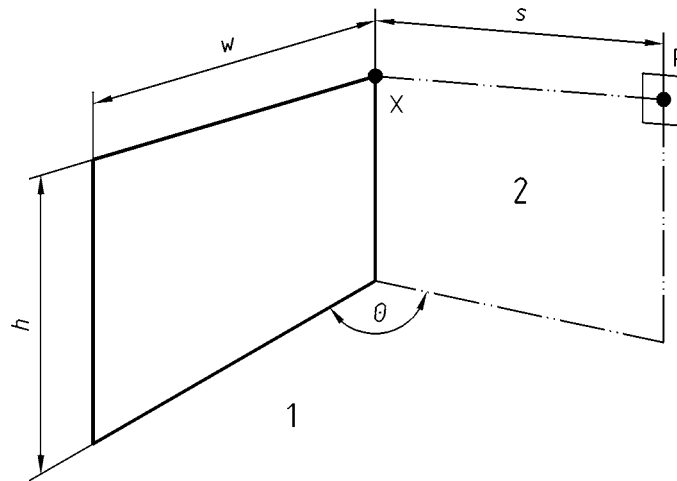
Figure G.3 — Surface réceptrice dans un plan parallèle à celui de la surface rayonnante



Légende

- a Surface rayonnante
- b Surface réceptrice

Figure G.4 — Surface réceptrice perpendiculaire au plan de la surface rayonnante



Légende

- 1 Surface rayonnante
- 2 Surface réceptrice

Figure G.5 — Surface réceptrice dans un plan formant un angle θ avec celui de la surface rayonnante

Bibliographie

EN ISO 1716:2002, *Essais de réaction au feu des produits de construction — Détermination de la chaleur de combustion* (ISO 1716:2002).

EN1363-2, *Essais de résistance au feu — Partie 2 : Modes opératoires de substitution ou additionnels*.

Annexe Nationale (normative)

AN 1 Application nationale des clauses de la norme européenne

NOTE La numérotation des clauses est celle de la norme européenne EN 1991-1-2:2002.

Clause 2.4.4 — Note 1 — Analyse thermique

Les durées de résistance au feu sont spécifiées dans les règlements nationaux.

Clause 2.4.4 — Note 2 — Analyse thermique

La limitation de la durée de résistance au feu ne peut être envisagée que dans le cadre de la réglementation en vigueur.

NOTE La réglementation en vigueur à la date de parution de cette Annexe Nationale est l'arrêté du 22 mars 2004 traitant de la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages.

Clause 3.1.10 — Règles générales

Les conditions d'utilisation des courbes nominales température-temps ainsi que la possibilité d'utiliser un modèle de feu naturel sont définies par le projet individuel, en conformité avec les règlements nationaux en vigueur.

Clause 3.3.1.1 — Généralités — Modèles feux simplifiés

Le calcul de la densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$ est effectué selon le guide associé à cette annexe nationale.

Clause 3.3.1.2 — Note 2 — Feux de compartiment

La méthode de l'annexe A est utilisable pour un projet individuel dans les conditions énoncées en AN 2.

Clause 3.3.1.2 — Feux de compartiment

La méthode de l'annexe B est utilisable pour un projet individuel dans les conditions énoncées en AN 3.

Clause 3.3.1.3.1 — Feux localisés

Les modèles de calcul de l'annexe C sont utilisables pour un projet individuel dans les conditions énoncées en AN 4.

Clause 3.3.2.1 — Notes 2 et 3 — Modèles de feu avancés

Le calcul de la densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$ et du débit calorifique Q est effectué selon le guide associé à cette annexe nationale.

Clause 3.3.2.2 — Modèles de feu avancés

Les modèles de calcul de l'annexe D sont utilisables pour un projet individuel dans les conditions énoncées en AN 5.

Clause 4.2.2.2 Actions additionnelles

Des actions additionnelles sont éventuellement à prévoir lors de l'élaboration des scénarios d'incendie pris en compte, dans les conditions de recours à l'ingénierie du comportement au feu.

Clause 4.3.1.2 Règle générale — Règle de combinaisons des actions

La valeur fréquente $\psi_{1,1} Q_1$ est à utiliser

Clause 4.3.2.2 — et 4.3.3.1

NOTE La signification de η_{fi} et de $\eta_{fi,t}$ est donnée dans les Eurocodes relatifs aux différents matériaux.

AN 2 Application nationale de l'Annexe A «Courbes paramétrées température/temps»

Cette annexe reste informative au niveau national.

NOTE Cette annexe n'est applicable que pour un pré-dimensionnement. En cas de poursuite de la démarche de dimensionnement pour différents scénarios d'incendie, il y a lieu de se référer au cadre réglementaire définissant les conditions de recours à l'ingénierie du comportement au feu, en particulier l'arrêté du 22 mars 2004.

AN 3 Application nationale de l'Annexe B «Actions thermiques pour les éléments extérieurs — Méthode de calcul simplifiée»

Cette annexe est normative au niveau national.

NOTE Cette annexe est applicable pour un dimensionnement à condition d'utiliser les compléments de calcul fournis à l'annexe B de l'EN 1993 — 1.2 (ou de l'EN 1999 — 1.2, selon le matériau utilisé) et les charges calorifiques fournies dans le tableau 3 du guide associé à cette annexe nationale. Dans les autres cas, il y a lieu de se référer au cadre réglementaire définissant les conditions de recours à l'ingénierie du comportement au feu.

AN 4 Application nationale de l'Annexe C «Feux localisés»

Cette annexe reste informative au niveau national.

NOTE Lorsque, pour un scénario retenu relatif à un projet individuel, il a été démontré que le feu reste cantonné à une partie du local, cette annexe est utilisable dans le cadre réglementaire définissant les conditions de recours à l'ingénierie du comportement au feu.

AN 5 Application nationale de l'Annexe D «Modèles de feu avancés»

Cette annexe reste informative au niveau national.

NOTE Cette annexe est utilisable dans le cadre réglementaire définissant les conditions de recours à l'ingénierie du comportement au feu.

AN 6 Application nationale de l'Annexe E «Densités de charge calorifique»

Cette annexe ne s'applique pas au niveau national.

NOTE Cette annexe est remplacée par le guide associé à cette annexe nationale qui, lors du recours à des scénarios d'incendie réel, constitue une approche possible.

AN 7 Application nationale de l'Annexe F «Temps équivalent d'exposition au feu»

Cette annexe ne s'applique pas au niveau national.

AN 8 Application nationale de l'Annexe G «Facteur de forme»

Cette annexe reste informative au niveau national.

Guide pour la détermination de la charge calorifique et de ses conditions de combustion

Ce guide remplace l'annexe E de l'EN 1991-1.2 qui n'est pas applicable au niveau national. Il donne des règles pour estimer la charge calorifique susceptible de contribuer au développement de l'incendie dans des locaux et le débit de pyrolyse qui peut lui être associé. Il constitue une approche possible lorsqu'il est fait appel à des scénarios d'incendie réel.

0 Avant-propos

(1) La charge calorifique est une donnée nécessaire pour modéliser le développement du feu. Elle doit toutefois être associée à un débit calorifique afin de représenter les conditions dans lesquelles l'énergie est libérée en fonction du temps.

(2) Dans le cadre réglementaire, lorsque l'activité du bâtiment est connue, mais son mobilier non défini, la charge calorifique caractéristique représentative de l'activité exercée peut être déduite de résultats d'études statistiques, sous réserve que ces résultats soient suffisamment documentés. Il est estimé qu'un fractile minimum de 90 % doit être considéré.

(3) Le dimensionnement de structures porteuses en situation d'incendie peut être réalisé en prenant en compte la charge calorifique de calcul déduite de distributions statistiques et d'une étude semi-probabiliste de ruine de la structure.

(4) L'étude semi-probabiliste considère une probabilité de ruine cible liée à la durée de vie du bâtiment telle qu'utilisée pour le dimensionnement à température normale.

(5) La probabilité de ruine en situation d'incendie dépend de :

- l'occurrence d'un incendie,
- de la probabilité que l'incendie se développe et sollicite thermiquement les éléments de structure,
- des conditions de chargement statique de la structure sollicitée thermiquement,
- des propriétés des matériaux composant la structure.

(6) La probabilité d'occurrence d'un feu généralisé dans un compartiment est fonction d'une part de la probabilité de naissance d'un incendie et d'autre part de paramètres tels que l'activité exercée dans le bâtiment et sa surface qui conditionneront la nature et le volume des matériaux combustibles concernés. Ces probabilités peuvent être déduites de données statistiques.

(7) La réduction de la probabilité d'occurrence d'un feu généralisé par la présence d'un (ou plusieurs) moyen(s) de protection active est déduite du taux de fiabilité ou de succès de ces moyens. Ce taux peut être obtenu de données statistiques, telles que celles issues de données collectées par les assureurs.

(8) L'effet d'une mesure de protection active peut conduire à la réduction de la probabilité d'occurrence d'un incendie sévère et donc peut, dans le cadre d'une approche semi-probabiliste, se traduire par la réduction de la charge calorifique utilisée pour le calcul.

(9) L'hypothèse de feu généralisé dans un compartiment conduit à une courbe de température dans le compartiment en fonction du temps dépendant principalement des conditions de ventilation, de la nature des parois et de la quantité et nature de la charge combustible.

(10) Les coefficients et valeurs présentés dans le chapitre 2 ont été déterminés sur la base de l'hypothèse de feux généralisés dans le compartiment sinistré. Cette hypothèse a permis de supposer une température homogène dans le compartiment.

(11) Lorsque la structure est sollicitée thermiquement par un feu localisé, uniquement une partie du potentiel calorifique participe au développement du feu. La distribution surfacique moyenne pour la charge calorifique n'est alors plus représentative. Il convient donc d'effectuer une étude déterministe pour estimer la charge calorifique ponctuelle.

(12) Si l'activité exercée dans une construction est modifiée lors sa durée de vie, et que cette modification conduit à une modification de la nature et de la quantité de la charge calorifique, une nouvelle évaluation de la probabilité de ruine de la structure de la construction doit être effectuée.

1 Détermination de la charge calorifique de calcul

(1) La valeur caractéristique de la densité de charge calorifique $q_{f,k}$ peut être déterminée :
— à partir des données statistiques du tableau 4 des charges calorifiques selon le type d'occupation ; ou
— de manière spécifique pour un projet particulier en effectuant une étude de charge calorifique.

(2) La densité de charge calorifique de calcul est définie par :

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \dots \text{(E.1)}$$

où :

m est le coefficient de combustion ;

$q_{f,k}$ est la densité de charge calorifique caractéristique par unité de surface de plancher $[\text{MJ/m}^2]$.

(3) Cette densité de charge calorifique peut éventuellement être modifiée pour tenir compte de mesures de prévention et de protection contre l'incendie, propres au projet et aux scénarios considérés. Dans un tel cas il doit être démontré que la valeur retenue ne conduise pas à une probabilité de ruine supérieure à celle utilisée en situation normale.

2 Détermination des densités de charge calorifique

2.1 Généralités

(1) Dans la charge calorifique, il convient de prendre en compte tout le contenu du local (charges mobilières) et tous les éléments de construction qui sont combustibles, y compris les revêtements et les finitions (charges immobilières). Les éléments combustibles dont il peut être prouvé qu'ils ne brûleront pas pendant l'incendie peuvent ne pas être pris en compte.

(2) Les paragraphes suivants s'appliquent à la détermination de la charge calorifique soit à partir de valeurs de charges calorifiques dépendant du type d'occupation (voir 2.5) soit de manière spécifique pour un projet particulier (voir 2.6).

(3) Lorsque la charge calorifique est déterminée à partir de charges calorifiques dépendant du type d'occupation, on distingue :

— les charges calorifiques mobilières selon le tableau 3 ;

— les charges calorifiques immobilières (éléments de construction, revêtements et finitions) qui ne sont pas compris dans les données du tableau 4 et doivent être déterminées conformément aux paragraphes suivants applicables.

2.2 Définitions

(1) La charge calorifique caractéristique est définie par :

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \Psi_i = \sum Q_{fi,k,i} \quad [\text{MJ}] \quad \dots \text{(E.2)}$$

où :

$M_{k,i}$ est la quantité de matériau combustible [kg], selon (3) et (4) ;

H_{ui} est le pouvoir calorifique inférieur $[\text{MJ/kg}]$ (voir 2.4) ;

$[\Psi_i]$ est le coefficient facultatif permettant d'évaluer les charges calorifiques protégées (voir 2.3).

(2) La densité de charge calorifique caractéristique $q_{f,k}$ est définie par :

$$q_{f,k} = Q_{fi,k} / A \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \dots (\text{E.3})$$

où :

A_f est la surface de plancher du local.

(3) Il convient de présenter sous la forme de leurs valeurs escomptées résultant de l'étude, les charges calorifiques permanentes qui ne sont pas censées varier pendant la durée de vie d'une structure.

(4) Il convient de représenter les charges calorifiques variables pendant la durée d'utilisation de calcul d'une structure par les valeurs relative au quantile à 90 %, selon une loi de Gumbel.

2.3 Charges calorifiques protégées dans le local considéré

(1) Il n'est pas nécessaire de prendre en compte les charges calorifiques placées dans des enceintes conçues pour résister à toute la durée de l'exposition au feu, soit $\Psi_1 = 0$.

2.4 Pouvoirs calorifiques inférieurs

(1) Il convient de déterminer les pouvoirs calorifiques inférieurs selon l'EN ISO 1716:1999.

(2) L'humidité des matériaux peut être prise en compte de la manière suivante :

$$H_u = H_{u0} (1 - 0,01 u) - 0,025 u \quad [\text{MJ/kg}] \quad \dots (\text{E.4})$$

où :

u est l'humidité en pourcentage de masse ;

H_{u0} est le pouvoir calorifique supérieurs des matériaux secs.

(3) Le Tableau 2 donne les pouvoirs calorifiques inférieurs de certains solides, liquides, et gaz.

Tableau 2 — Pouvoirs calorifiques inférieurs H_u [MJ/kg] de matériaux combustibles secs pour le calcul de charges calorifiques

Combustible cellulosique	PCI Net [MJ/kg]	Combustible plastique	PCI Net [MJ/kg]	Combustible carboné	PCI Net [MJ/kg]
Autre	20	ABS Acrylonitrile Butadiène Styrene	40	Alcool éthylique	29
Bois	18	Alkylbenzène-sulfonate	35	Anthracite	34
Coton	20	Lino (linoléum)	20	Asphalte	42
Cuir	19	Phénol -Formaldéhyde	28	Benzène	40
Laine	23	Plastique acrylique	28	Bitume	41
Liège	30	Polychlorure de vinyle (PVC)	20	Butane	46
Paille	16	Polyester	30	Butène	45.5
Papier-carton	17	Polyester renforcé par fibre de verre	21	Charbon de bois	34
Soie	19	Polyéthylène	43.5	Charbon (houille)	31
		Polyiso-cyanurate	25	Cire - Farte Paraffine	47
		Polyméthyl Méthacrylate (PMMA)	28	Coke	30
		Polypropylène	43	Essence Pétrole	44
		Polystyrène	40	Éthane	47.5
		Polyuréthane	28	Éthanol	27
		Résine époxy	34	Éthylène	47
		Résine Mélanine pure	19	Gasoil Diesel	41
		Urée Formaldéhyde	15	Graisses	40
				Huiles	40
				Hydrogène	120
				Méthane	50
				Méthanol	20
				Propane	46
				Propylène	47

Combustible «caoutchouc»	PCI Net [MJ/kg]
Caoutchouc type pneu	33
Gomme Isoprène	45
Mousse caoutchouc - latex	41

(3) Il convient d'évaluer la charge calorifique immobilière selon les valeurs du tableau 2 et de l'ajouter aux charges calorifiques mobilières calculées ci-dessous.

NOTE Des informations supplémentaires peuvent être obtenues dans diverses publications telles que le SFPE handbook [3].

2.5 Classement des charges calorifiques selon le type d'occupation

(1) Il convient de classer les densités de charge calorifique en fonction du type d'occupation, de les rapporter à la surface du plancher et de les utiliser comme densités de charge calorifiques caractéristiques $q_{f,k}$ [MJ/m²], selon le Tableau 3.

Tableau 3 — Densités de charge calorifique $q_{f,k}$ [MJ/m²] selon différents types d'occupation, pour une valeur moyenne et une valeur raisonnablement pessimiste

Type d'occupation	Moyenne [MJ/m ²]	Dispersion	$q_{f,k}$ [MJ/m ²] (quantile à 90 %)
Logement	780	0,15	930
Hôpital	450	0,3	630
Hôtel (chambre)	350	0,25	460
Bureau	450	0,5	740
Bibliothèque de bureau - Archives de bureau (*)	1 200	0,7	2 300
Salle de réunion / conférence	250	0,5	410
Classe d'école	350	0,4	530
Centre commercial	600	0,3	840
Théâtre (cinéma)	300	0,3	420
Transport (espace public)	100	0,3	140
(*) Pour une hauteur de stockage de 3 m.			

2.6 Évaluation individuelle des densités de charge calorifique

(1) Les locaux dont les activités n'entrent pas dans les critères du tableau 3 doivent faire l'objet d'une étude spécifique afin de déterminer la charge surfacique moyenne à prendre en compte.

(2) Il convient d'estimer les charges calorifiques et leur localisation, en tenant compte de l'usage prévu, du mobilier et des installations et des tendances défavorables quant à leurs évolutions dans le temps.

(3) Si possible, il convient d'effectuer une enquête sur un projet existant comparable de manière à ce qu'il n'y ait à évaluer que les différences éventuelles entre le projet envisagé et celui existant.

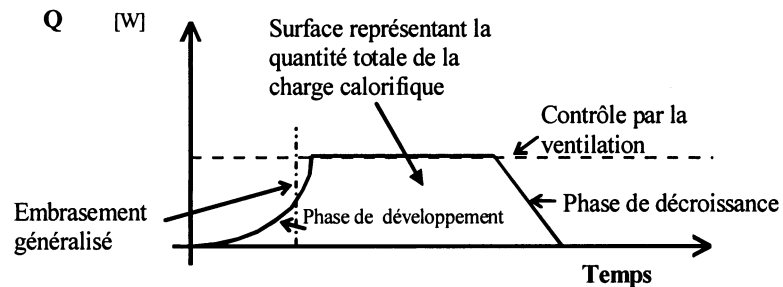
3 Conditions de combustion

(1) Il convient de prendre en compte les conditions de combustion en fonction du type d'occupation et du type de charge calorifique.

(2) Dans le cas des matériaux principalement cellulosiques, un coefficient de combustion $m = 0,8$ est suggéré. Dans le cas d'autre combustible, à défaut de résultats argumentés, m sera pris égal à 1.

4 Débit calorifique Q

(1) Le débit calorifique (Q) d'une charge combustible, en fonction du temps peut être représenté par les différentes phases illustrées sur la figure 4.



NOTE L'aire sous la courbe représente la charge calorifique globale de l'incendie.

Figure 4 — Différentes phases pour représenter le débit calorifique (Q) en fonction du temps.

(2) La phase de développement (avant que les gaz chauds dans le local n'atteignent environ 500 °C) peut être définie par l'expression :

$$Q = Q_0 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad \dots (E.5)$$

où :

Q est le débit calorifique en [W] ;

Q₀ est égale à 1 MW (c'est la valeur de Q atteinte au bout de t_α secondes) ;

t est le temps en [s] ;

t_α est le temps, en [s], nécessaire pour atteindre un débit calorifique de 1 MW.

(3) La valeur du paramètre t_α pour différentes vitesses de développement du feu et le débit calorifique maximal RHR_f correspondant à différents types d'occupation sont indiqués dans les Tableaux 4 et 5.

Tableau 4 — Valeurs de t_α pour différentes vitesses de développement du feu

Vitesse de développement du feu	t _α [s]
Lent	600
Moyen	300
Rapide	150
Ultra-rapide	75

Tableau 5 — Vitesse de développement du feu en fonction de l'occupation

Type d'occupation	Vitesse de développement du feu	Type d'occupation	Vitesse de développement du feu
Logement	Moyen ???	Salle de réunion / conférence	Moyen
Hôpital	Moyen	Classe d'école	Moyen
Hôtel (chambre)	Moyen	Centre commercial	Rapide
Bureau	Moyen	Théâtre (cinéma)	Rapide
Bibliothèque de bureau - Archives de bureau	Rapide	Transport (espace public)	Lent

(4) La croissance du feu et le débit calorifique maximal Q_{\max} sont limités soit par l'apport d'oxygène (limitation par la ventilation), soit par la nature du combustible. Q_{\max} , est donné, en utilisant les valeurs de Q_1 selon 5) et de Q_2 selon 6), par :

$$Q_{\max} = \text{Min}(Q_1, Q_2)$$

(5) Q_1 est le débit calorifique limité par le combustible :

$$Q_1 = RHR_f A_{fi} \quad \text{en [kW]}$$

où :

A_{fi} est la surface maximale du feu en [m²], inférieure ou égale à la surface du local ;

RHR_f est le débit calorifique surfacique maximal en [kW/m²] lorsque la limitation n'est pas due aux amenées d'air (voir Tableau 6).

Tableau 6 — RHR_f selon différents types d'occupation.

Type d'occupation	RHR_f [kW/m ²]	Type d'occupation	RHR_f [kW/m ²]
Logement	250	Salle de réunion / conférence	250
Hôpital	250	Classe d'école	250
Hôtel (chambre)	250	Centre commercial	500
Bureau	250	Théâtre / cinéma / salle de spectacle	500
Bibliothèque et archives de bureau	500	Transport public	250

NOTE En dehors de ces types d'occupation, RHR_f peut être évalué à partir de ou d'une combinaison de données issues de la littérature, d'essais spécifiques ou d'estimation de répartition du combustible.

(6) Le débit calorifique $Q_2 = K \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}}$ en [kW],

où :

A_v est la surface totale des ouvertures $A_v = \sum_N A_i$ [m²];

A_i est la surface de l'ouverture numéro i [m²];

h_{eq} est la moyenne $h_{\text{eq}} = \frac{\sum_N A_i \cdot h_i}{\sum_N A_i}$ [m];

h_i est la hauteur de l'ouverture i [m];

N est le nombre total d'ouverture ;

H_u est le pouvoir calorifique inférieur du bois égale à 17,5 [MJ/kg] ;

K est une constante valant 100 [kg/s/m^{2.5}].

Remarque : Dans le cadre de l'utilisation d'un modèle de zone, dans le cas d'une limitation par la ventilation, les bilans d'énergie et de masse conduisent à déterminer les débits d'air entrant. La valeur déterminée par l'équation ci-dessus peut être remplacée par le débit calorifique Q_2 issu des débits d'air entrant calculés.

(7) Il convient de supposer que la phase de décroissance est linéaire et débute lorsque 70 % de la charge calorifique a été brûlée et se termine quand la charge calorifique est intégralement consommée.

Remarque : Dans le cadre de l'utilisation d'un modèle de zone, dans le cas d'une limitation par ventilation et s'il peut être démontré qu'il y a combustion externe, alors la charge incendie doit être diminuée de la quantité qui brûle à l'extérieur.