

norme européenne

norme française

NF EN 1991-1-2
Juillet 2003

P 06-112-1

Eurocode 1 : actions sur les structures

Partie 1-2 : actions générales - actions sur les structures exposées au feu

E : Eurocode 1 : actions on structures - part 1-2 : general actions - actions on structures exposed to fire

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

Statut

Norme française homologuée par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 juin 2003 pour prendre effet le 5 juillet 2003.

Est destinée à remplacer la norme expérimentale XP ENV 1991-2-2, de décembre 1997 (indice de classement : P 06-102-2).

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la norme européenne EN 1991-1-2 :2002.

Analyse

Le présent document traite des actions thermiques et mécaniques sur les structures exposées au feu. Il est destiné à être utilisé en association avec les parties relatives au calcul au feu des EN 1992 à EN 1996 et de l'EN 1999, qui fixent les règles de calcul de résistance au feu des structures.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : bâtiment, structure, conception, calcul, résistance au feu, règle de construction.

AFNOR 2003

Sommaire

- Liste des auteurs
- Avant-propos national à la norme NF EN 1991-1-2
- Avant-propos

- Section 1 généralités
 - 1.1 Domaine d'application
 - 1.2 Références normatives
 - 1.3 Hypothèses
 - 1.4 Distinction entre principes et règles d'application
 - 1.5 Termes et définitions
 - 1.5.1 Termes courants utilisés dans les parties des eurocodes relatives au feu
 - 1.5.2 Termes spéciaux relatifs au calcul en général
 - 1.5.3 Termes relatifs aux actions thermiques
 - 1.5.4 Termes relatifs à l'analyse du transfert thermique
 - 1.6 Symboles
- Section 2 procédure de calcul structural au feu
 - 2.1 Généralités
 - 2.2 Scénario de feu de calcul
 - 2.3 Feu de calcul
 - 2.4 Analyse thermique
 - 2.5 Analyse mécanique
- Section 3 actions pour l'analyse thermique (actions thermiques)
 - 3.1 Règles générales
 - 3.2 Courbes nominales température/temps
 - 3.2.1 Courbe température/temps normalisée
 - 3.2.2 Courbe de feu extérieur
 - 3.2.3 Courbe d'hydrocarbure
 - 3.3 Modèles de feu naturel
 - 3.3.1 Modèles de feu simplifiés
 - 3.3.2 Modèles de feu avancés
- Section 4 actions pour l'analyse structurale (actions mécaniques)
 - 4.1 Généralités
 - 4.2 Simultanéité des actions
 - 4.2.1 Actions à partir d'un calcul à température normale
 - 4.2.2 Actions additionnelles
 - 4.3 Règles de combinaisons des actions
 - 4.3.1 Règle générale
 - 4.3.2 Règles simplifiées
 - 4.3.3 Niveau de chargement
- Annexe A (informative) courbes paramétrées température/temps
- Annexe B (informative) actions thermiques pour les éléments extérieurs - méthode de calcul simplifiée
 - B.1 domaine d'application
 - B.2 conditions d'utilisation
 - B.3 effets du vent
 - B.3.1 mode de ventilation
 - B.3.2 déviation des flammes sous l'action du vent
 - B.4 caractéristiques du feu et des flammes
 - B.4.1 absence de ventilation forcée
 - B.4.2 ventilation forcée
 - B.5 facteurs de forme généraux
- Annexe C (informative) feux localisés
- Annexe D (informative) modèles de feu avancés
 - D.1 modèles une zone
 - D.2 modèles deux zones
 - D.3 modèles de calcul de dynamique des fluides
- Annexe E (informative) densités de charge calorifique

- E.1 généralités
- E.2 détermination des densités de charge calorifique
 - E.2.1 généralités
 - E.2.2 définitions
 - E.2.3 charges calorifiques protégées
 - E.2.4 pouvoirs calorifiques inférieurs
 - E.2.5 classement des charges calorifiques selon le type d'occupation
 - E.2.6 évaluation individuelle des densités de charge calorifique
- E.3 conditions de combustion
- E.4 débit calorifique Q
- Annexe F (informative) temps équivalent d'exposition au feu
- Annexe G (informative) facteur de forme
 - G.1 généralités
 - G.2 effets d'ombre
 - G.3 éléments extérieurs
- Bibliographie

Membres de la commission de normalisation

Président : M LARAVOIRE

Secrétariat : M PINCON - BNTEC

- M BALOCHE CSTB
- BAUDY BUREAU VERITAS
- BIETRY
- CALGARO SETRA
- CHABROLIN CTICM
- DEVILLEBICHOT EGF•BTP
- DURAND UMGO
- GANDIL
- HORVATH CIM-BETON
- IZABEL SNPPA
- JACOB LCPC
- KOVARIK PORT AUTONOME DE ROUEN
- LARAVOIRE CGPC
- LE CHAFFOTEC CTICM
- LELOUP BSI
- LEMOINE UMGO
- LERAY
- LIGOT IRABOIS
- LUMBROSO
- MAILLARD MINISTERE EQUIPEMENT, TRANSPORTS ET LOGEMENT
- MAITRE SOCOTEC
- MARTIN SNCF
- MARVILLET SNCF
- MATHEZ
- MATHIEU
- MEBARKI UNIVERSITE DE MARNE LA VALLEE
- MILLEREUX FIBC
- MUZEAU CUST
- PAMIES APAVE
- MME PATROUILLEAU AFNOR
- M PINCON BNTEC
- PRAT SETRA
- RAGNEAU LABORATOIRE DE STRUCTURE ET MECANIQUE APPLIQUEE
- RAMONDENC SNCF
- RAOUL SETRA
- SENECA DGHUC
- TEPHANY MINISTERE DE L'INTERIEUR- DDSC
- THONIER SPETPFOM
- TRINH CETEN-APAVE

Avant-propos national à la norme NF EN 1991-1-2

A.P.1 : introduction

(0) Le règlement du Comité européen de Normalisation (CEN) impose que les normes européennes adoptées par ses membres soient transformées en normes nationales au plus tard dans les 6 mois après leur ratification et que les normes nationales en contradiction soient annulées.

(1) La présente publication reproduit la norme européenne EN 1991-1-2 :2002 - Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu, ratifiée par le Comité Européen de normalisation le 1^{er} septembre 2002 et mise à disposition en novembre 2002. Elle fait partie d'un ensemble de normes constituant la collection des Eurocodes qui, dépendent dans une certaine mesure les unes des autres pour leur application. Certaines d'entre elles sont encore en cours d'élaboration. C'est pourquoi le CEN a fixé une période de transition nécessaire à l'achèvement de cet ensemble de normes européennes, période durant laquelle les membres du CEN ont l'autorisation de maintenir leurs propres normes nationales adoptées antérieurement.

(2) Cette publication, faite en application des règles du Comité européen de normalisation, peut permettre aux différents utilisateurs de se familiariser avec le contenu (concepts et méthodes) de l'Eurocode.

(3) L'application en France de cette norme appelle un ensemble de précisions et de compléments pour lesquels une Annexe Nationale est en préparation dans le cadre de la Commission de normalisation BNTEC P06A. En attendant la publication de cette Annexe nationale, si la norme européenne est employée, c'est avec les compléments précisés par l'utilisateur et sous sa responsabilité.

(4) Avec son annexe nationale, la NF EN 1991-1-2 aura vocation à remplacer la norme expérimentale XP ENV 1991-2-2. Cependant, en raison d'autres parties d'Eurocodes, normes provisoires ENV, qui font référence à cette dernière et qui ne sont pas encore remplacées par des normes EN, la norme XP ENV 1991-2-2 est maintenue en vigueur pendant la période de coexistence nécessaire.

A.P.2 : références aux normes françaises

La correspondance entre les normes mentionnées à l'article " Références normatives " et les normes françaises identiques est la suivante :

- prEN 13501-2 : NF EN 13501-2 (indice de classement : P92-800-2) ¹
1
En préparation.

- EN 1990 : NF EN 1990 (indice de classement : P 06-100-1)
- EN 1991-1-1 : NF EN 1991-1-1 (indice de classement : P 06-111-1)
- prEN 1991-1-3 : NF EN 1991-1-3 (indice de classement : P 06-113-1) ¹
- prEN 1991-1-4 : NF EN 1991-1-4 (indice de classement : P 06-114-1) ¹
- prEN 1992 : NF EN 1992 (indice de classement : P 18-711 à 730) ¹
- prEN 1993 : NF EN 1993 (indice de classement : P 22-311 à 372) ¹
- prEN 1994 : NF EN 1994 (indice de classement : P 22-391 à 395) ¹
- prEN 1995 : NF EN 1995 (indice de classement : P 21-711 à 720) ¹
- prEN 1996 : NF EN 1996 (indice de classement : P 10-611 à 630) ¹
- prEN 1999 : NF EN 1999 (indice de classement : P 22-151 à 155) ¹

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 Etats Membres et, finalement, les remplaceraient. Pendant quinze ans, la Commission, avec l'aide d'un Comité Directeur comportant des représentants des Etats 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 Etats Membres de l'Union Européenne et de l'AELE décidèrent, sur la base d'un accord ² 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).

2

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).

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.

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des autorités réglementaires dans chaque Etat Membre et ont safeguardé 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 Etat à l'autre.

Statut et domaine d'application des Eurocodes

Les Etats 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 ³ visés à l'article 12 de la DPC, quoiqu'ils soient d'une nature différente de celle des normes harmonisées de produits ⁴. 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.

3

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.

4

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.

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 ;

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 ouvrages ⁵. 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.

5

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.

Informations additionnelles spécifiques à 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'incendie ⁶ ", l'exigence essentielle peut être respectée en appliquant les diverses stratégies suivantes de sécurité incendie en vigueur dans les Etats membres, telles que les scénarios de feux conventionnels (feux nominaux) ou " naturels " (feux paramétrés), y compris des mesures actives ou passives de sécurité incendie.

6

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

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.

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

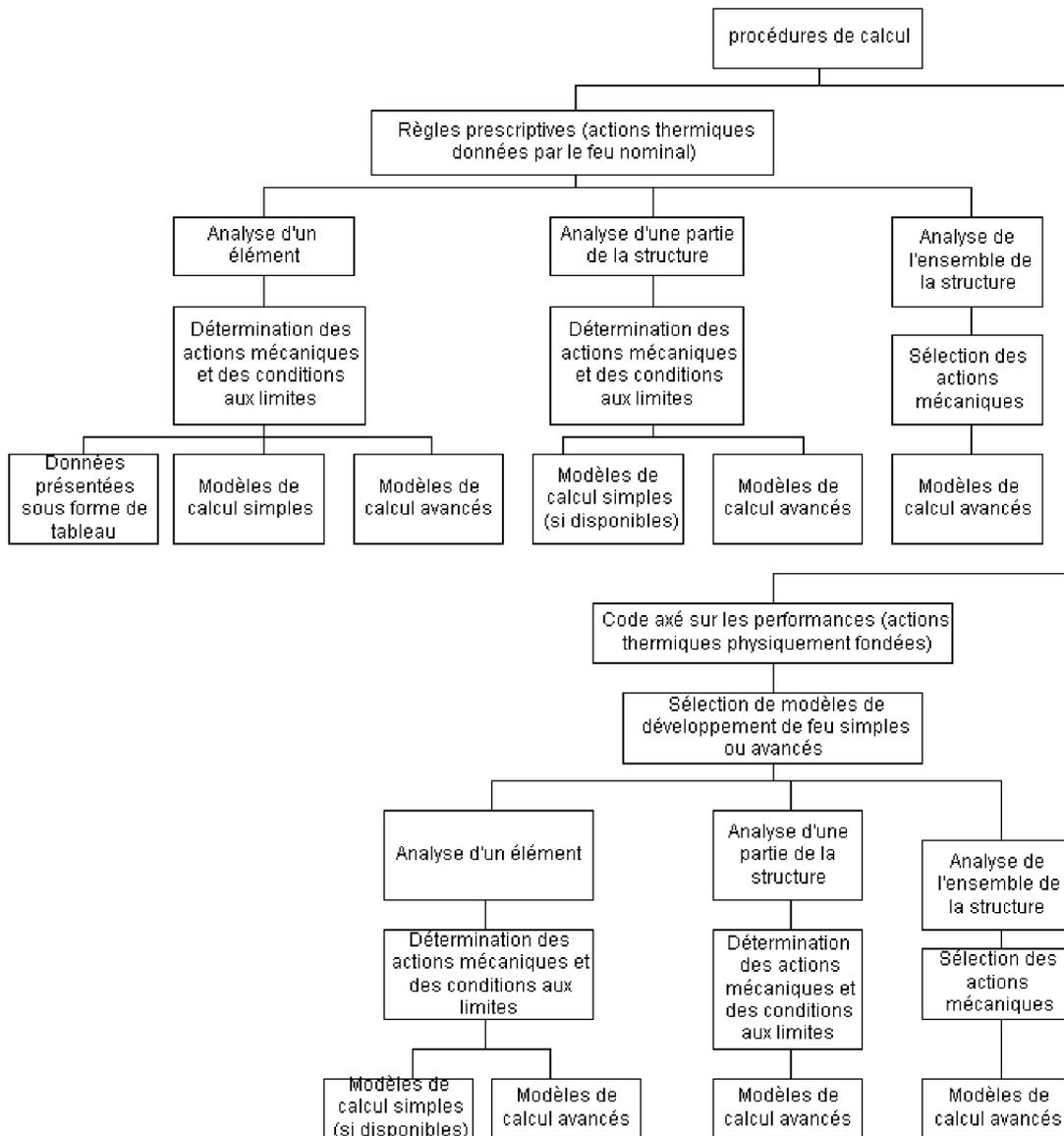
Une procédure analytique complète de calcul structural au feu devrait prendre en compte le comportement du système structural à des températures élevées, l'exposition potentielle à la chaleur et les effets bénéfiques des systèmes de protection incendie actifs et passifs, ainsi que les incertitudes associées 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)
- 3.3.1.1(1)
- 3.3.1.2(1)
- 3.3.1.2(2)
- 3.3.1.3(1)
- 3.3.2(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_i}) ou à la surface totale de l'enceinte, y compris les ouvertures (q_{t_i})

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 et W_2)
- 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
- $t_{f,i,d}$ résistance au feu de calcul (propriété de l'élément ou de la structure)
- $t_{f,requ}$ 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 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

- facteur de forme
- f facteur de forme général d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une ouverture
- f_i facteur de forme de la face i de l'élément pour une ouverture donnée
- z facteur de forme général d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement à partir d'une flamme
- z_i facteur de forme de la face i de l'élément pour une flamme donnée
- temps modifié en fonction du facteur d'ouverture O et de l'absorptivité thermique b
- t_{lim} temps modifié en fonction du facteur d'ouverture O_{lim} et de l'absorptivité thermique b
- température [°C] ; [°C] = T [K] - 273
- $t_{cr,d}$ valeur de calcul de la température critique du matériau [°C]
- t_d valeur de calcul de la température du matériau [°C]
- t_g température des gaz dans le compartiment ou à proximité de l'élément [°C]
- t_m température de la surface de l'élément [°C]
- t_{max} température maximale [°C]
- t_r température de rayonnement effective du feu [°C]
- $(A_f q_{f,d}) (A_v A_t)^{1/2}$
- i facteur de charge calorifique protégée

Minuscules grecques

- c coefficient de transfert thermique par convection
- h surface des ouvertures horizontales rapportée à la surface de plancher
- v surface des ouvertures verticales rapportée à la surface de plancher
- n_i facteur tenant compte de l'existence d'une mesure spécifique i de lutte contre le feu
- q_1 facteur tenant compte du risque d'activation du feu lié à la taille du compartiment
- q_2 facteur tenant compte du risque d'activation du feu lié au type d'occupation
- B_{5m} émissivité de la surface de l'élément
- B_{5f} émissivité des flammes, du feu
- f_i coefficient de réduction
- $f_{i,t}$ niveau de chargement pour le calcul au feu
- conductivité thermique
- densité
- ρ_g densité des gaz internes
- constante de Stephan Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/mK⁴])
- F durée du feu en combustion libre (supposée être de 1 200 [s])
- o facteur de combinaison pour la valeur caractéristique d'une action variable

- ₁ facteur de combinaison pour la valeur fréquente d'une action variable
- 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 :

$t_{fi,d}$ s ; $t_{fi,requ}$ (expression 2.1)

en termes d'effort :

$R_{fi,d,t}$ s ; $E_{fi,d,t}$ (expression 2.2)

ou en termes de température :

$d_{cr,d}$ (expression 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 ;
- d est la valeur de calcul de la température du matériau ;
- 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) \dot{h}_{net} Le flux thermique net [\dot{h}_{net}] [W/m] 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 :

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

..... (expression 3.1)

où :

- $\dot{h}_{net,c}$ est donné par l'équation (3.2) ;
- $\dot{h}_{net,r}$ est donné par l'équation (3.3) .

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

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

..... (expression 3.2)

où :

- a_c est le coefficient de transfert thermique par convection [W/mK] ;
- 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/mK]. Il est recommandé d'adopter le coefficient de transfert thermique par convection $a_c = 9$ [W/mK], 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 :

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

..... (expression 3.3)

où :

- est le facteur de forme ;
- B_{5m} est l'émissivité de la surface de l'élément ;
- B_{5f} est l'émissivité du feu ;
- est la constante de Stephan Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/mK}^4$) ;
- t_r est la température de rayonnement effectif de l'environnement du feu [°C] ;
- t_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 B_{5m} .

NOTE 2 L'émissivité du feu peut être considérée comme $B_{5f} = 1,0$.

(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. 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, une méthode est indiquée dans l'annexe G.

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

(9) La température de surface t_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 t_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 :

$$t_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \text{ [°C]..... (expression 3.4)}$$

où :

- t_g est la température des gaz du compartiment [°C] ;
- t est le temps [min].

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

$$c = 25 \text{ W/mK}$$

3.2.2 Courbe de feu extérieur

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

$$t_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) + 20 \text{[°C] (expression 3.5)}$$

où :

- t_g est la température des gaz à proximité de l'élément [°C] ;
- t est le temps [min].

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

$$c = 25 \text{ W/mK}$$

3.2.3 Courbe d'hydrocarbure

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

$$t_g = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 \text{ [°C] (expression 3.6)}$$

où :

- t_g est la température des gaz du compartiment [°C] ;
- t est le temps [min].

(2) Le coefficient de transfert thermique par convection est :
 $c_c = 50 \text{ W/mK}$ (expression 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 $c_c = 35 \text{ [W/mK]}$.

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'embrase 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 $c_c = 35$ [W/mK], 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) P 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 $2,1 Q_1$ ou bien comme la valeur fréquente $1,1 Q_1$.

NOTE

Il est possible de spécifier l'utilisation de la valeur quasi-permanente $2,1 Q_1$ ou de la valeur fréquente $1,1 Q_1$ dans l'annexe nationale. L'utilisation de $2,1 Q_1$ 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 :

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = f_i E_d \dots\dots\dots \text{(expression 4.1)}$$

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 ;
- f_i 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 :

$$E_{fi,d,t} = f_{i,t} R_d \dots\dots\dots \text{(expression 4.2)}$$

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 ;
- $f_{i,t}$ 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 consumée.

(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 :

$$t_g^* = 20 + 1,325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-1,9t^*}) \dots\dots\dots \text{(expression A.1)}$$

où :

- t_g^* est la température des gaz dans le compartiment [°C] ;
- $t^* = t$ [h]. (expression A.2a)

avec :

- t le temps [h] ;
- $O = [O/b]$ / (0,04/1 160) [-] ;

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

avec les limites suivantes : $100 < b < 200$ [J/ms^{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 est le facteur d'ouverture :

$$A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [m^{1/2}] ;$$

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

- A_v est la surface totale des ouvertures verticales sur tous les murs [m] ;
- 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) [m].

NOTE

Lorsque $\alpha = 1$, 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, la chaleur spécifique c et la conductivité thermique 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 $b_1 \leq b_2$, $b = b_1$ (expression A.3)
- Si $b_1 > b_2$, une épaisseur limite s_{lim} est calculée pour le matériau exposé conformément à

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 t_{max} \lambda_1}{c_1 \rho_1}}$$

avec t_{max} donné par l'équation A.7 [m] (expression A.4)

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

Si $s_1 > s_{lim}$
 alors

$$b = \frac{s_1}{s_{lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}} \right) b_2$$

..... (expression 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 :

$$b = ((b_j A_j) / (A_t - A_v)) \dots\dots\dots \text{(expression A.5)}$$

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 t_{max} en phase d'échauffement est atteinte pour $t^* = t^*_{max}$.

$$t^*_{max} = t_{max} \dots\dots\dots \text{(expression A.6)}$$

avec :

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

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 $q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t$ [MJ/m]. Il convient de respecter les limites suivantes : $50 q_{t,d} \leq 1\,000$ [MJ/m] ;
- $q_{f,d}$ est la valeur de calcul de la densité de charge calorifique rapportée à la surface A_t du plancher [MJ/m] 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_{lim} est donné par $(0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O)$, le feu est contrôlé par la ventilation.

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

$$t^* = t_{lim} \text{ [h]} \dots\dots\dots \text{(expression A.2b)}$$

avec :

$$lim = [O_{lim} / b] / (0,04 / 1\,160) \dots\dots\dots \text{(expression A.8)}$$

où :

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

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

$$k = 1 + \left(\frac{0 - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1\ 160 - b}{1\ 160} \right)$$

..... (expression 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 :

- $g = g_{max} - 625 (t^* - t_{max}^*)$ pour $t_{max}^* \leq 0,5$ (expression A.11a)
 - $g = g_{max} - 250 (3 - t_{max}^*) (t^* - t_{max}^*)$ pour $0,5 < t_{max}^* \leq 2$ (expression A.11b)
 - $g = g_{max} - 250 (t^* - t_{max}^*)$ pour $t_{max}^* > 2$ (expression A.11c)
- où t^* est donné par (A.2 a)
- $t_{max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O)$
 - $x = 1,0$ si $t_{max} < t_{lim}$ ou $x = t_{lim} / t_{max}^*$ 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/m

B.2 conditions d'utilisation

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 ($w_t = w_i$) sont utilisées.

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

$$D/W = \frac{W_2}{w_t}$$

..... (expression B.1)

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

$$D/W = \frac{W_2 A_{v1}}{W_1 A_v}$$

..... (expression B.2)

où :

- W_1 est la largeur du mur 1 supposé présenter la plus grande surface de fenêtres ;
- A_v est la largeur du mur perpendiculaire au mur 1 du 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 :

$$D/W = \frac{\left(W_2 - L_c \right) A_{v1}}{\left(W_1 - W_c \right) A_v}$$

..... (expression 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

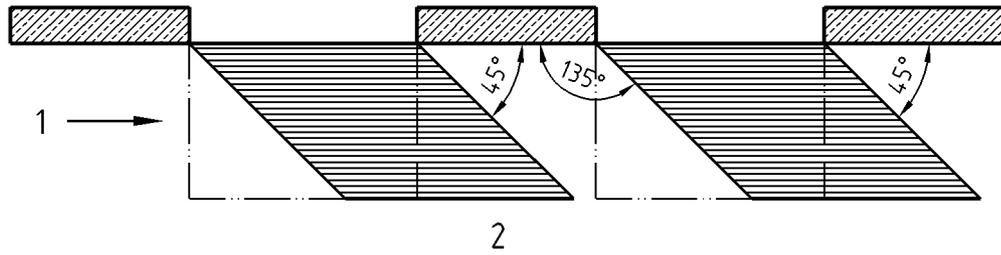
(1) P S'il y a des fenêtres sur les faces opposées du compartiment ou s'il y a un apport d'air supplémentaire au feu provenant d'une source (autre que les fenêtres), le calcul doit être effectué dans des conditions de ventilation forcée. Sinon, il se fait sans ventilation forcée.

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.

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



Légende

- 1 Vent
- 2 Coupe horizontale

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 :

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

..... (expression B.4)

(2) La température du compartiment est donnée par :

$$T_f = 6\,000 \left(1 - e^{-0,1/O} \right) O^{1/2} \left(1 - e^{-0,00286\Omega} \right) + T_0$$

..... (expression B.5)

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

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

..... (expression B.6)

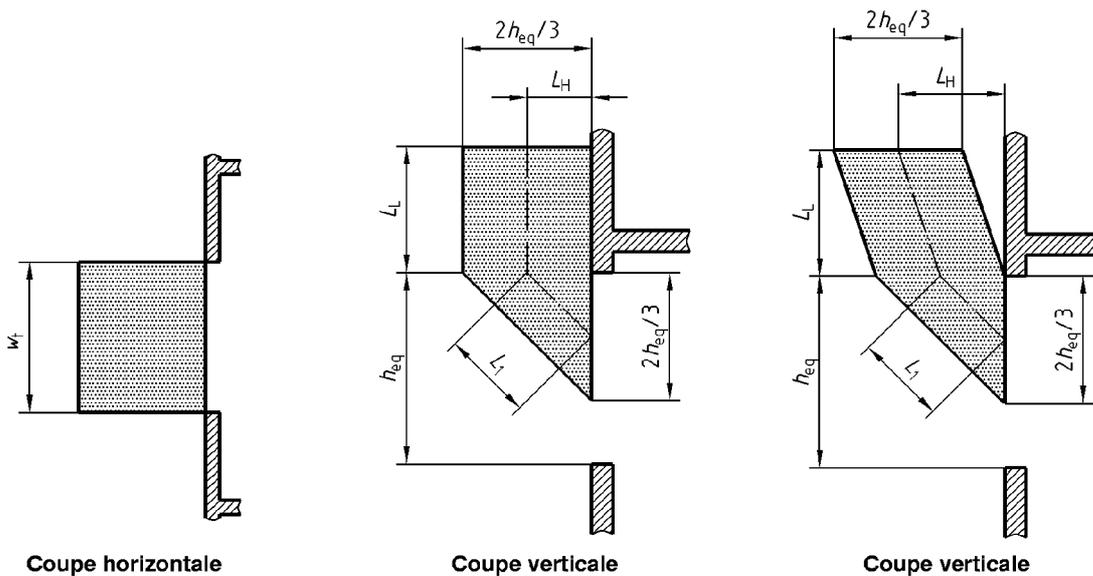
NOTE

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

$$L_L = 1,9 \left(\frac{Q}{w_t} \right)^{2/3} - h_{eq}$$

..... (expression B.7)

Figure B.2 Dimensions des flammes sans ventilation forcée



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

(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 : $\frac{2}{3} h_{eq}$ (voir Figure B.2).

(6) Projection horizontale de la flamme :

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

• $L_H = h_{eq}/3$ si $h_{eq} < 1,25 w_t$ (expression B.8)

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

• $L_H = 0,454 h_{eq} (h_{eq} / 2w_t)^{0,54}$ autres cas (expression B.10)

- s'il n'y a pas de mur au-dessus de la fenêtre :
 $L_H = 0,6 h_{eq} (L_L / h_{eq})^{1/3}$ (expression B.11)

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

- Si $L_L > 0$:
 - $L_f = L_L + h_{eq}/2$ s'il y a un mur au-dessus de la fenêtre ou si $h_{eq} > 1,25 w_t$ (expression B.12)
 - $L_f = (L_L + (L_H - h_{eq}/3))^{1/2} + h_{eq}/2$ s'il n'y a pas de mur au-dessus de la fenêtre ou si $h_{eq} > 1,25 w_t$ (expression B.13)
- Si $L_L = 0$, alors $L_f = 0$

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

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

avec $L_f w_t / Q > 1$

(9) L'émissivité des flammes à la fenêtre peut être considérée comme $B_{5f} = 1,0$.

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

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

avec :

- $L_x w_t / Q > 1$
- 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 :

$$B_{5f} = 1 - e^{-0,3d_f} \text{ (expression B.16)}$$

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

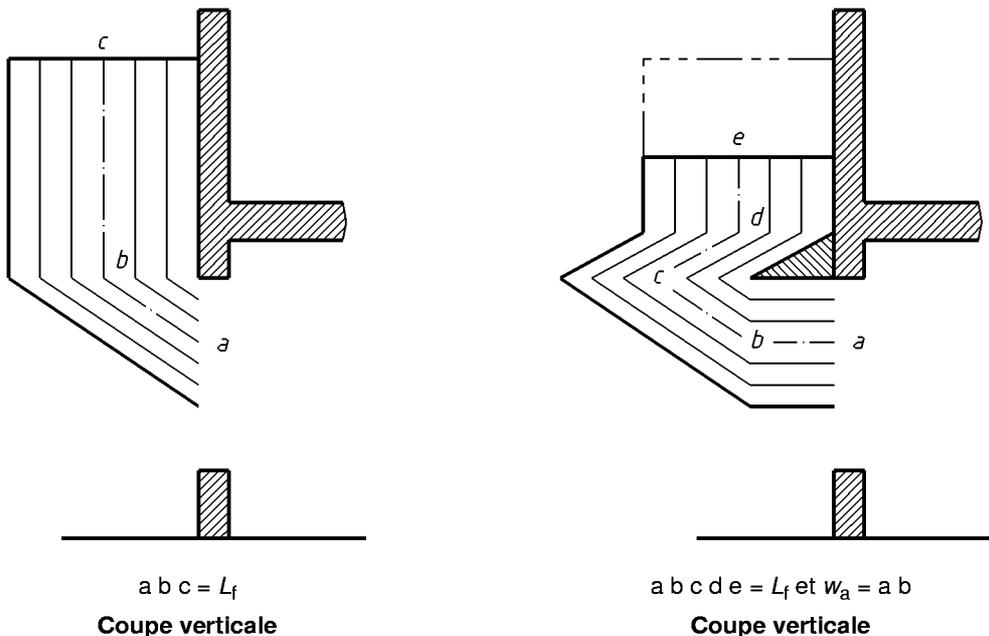
(12) Le coefficient de transfert thermique par convection est donné par :

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

(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 $h_{eq} > 1,25 w_t$.

- la hauteur de la flamme L_L , donnée en (3), est diminuée de $W_a (1+2)$;
- 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 $h_{eq} > 1,25 w_t$:

- 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 :

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

(2) La température du compartiment est donnée par :

$$T_f = 1\,200 \left((A_f \cdot q_{f,d}) / 17,5 - e^{-0,00228} \right) + T_0 \dots\dots\dots \text{(expression B.19)}$$

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

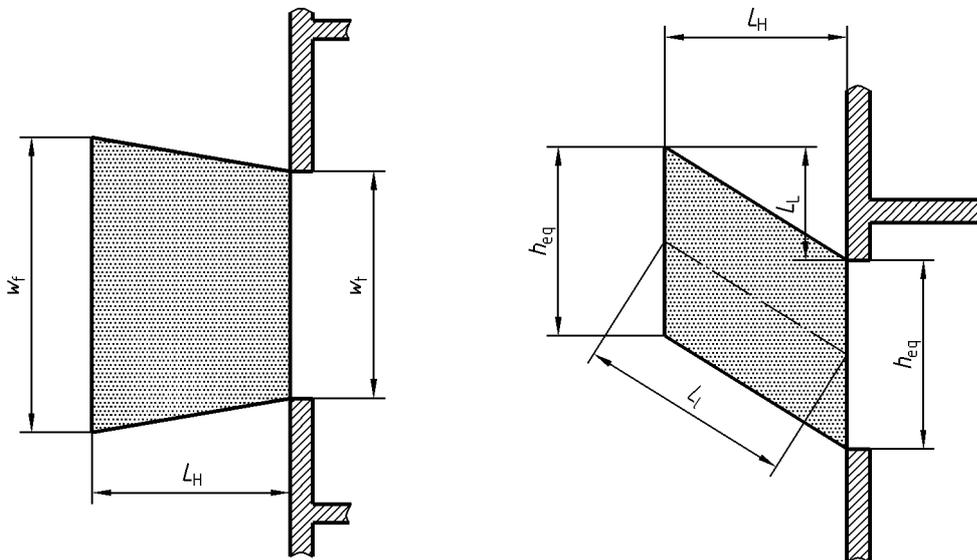
$$L_L = \left(1,366 \left(\frac{1}{u} \right)^{0,43} \frac{Q}{A_v^{1/2}} \right) - h_{eq}$$

..... (expression B.20)

NOTE

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

Figure B.4 Dimensions des flammes sous ventilation forcée



Coupe horizontale

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

Coupe verticale

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

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

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

NOTE

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

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

$$w_t = w_f + 0,4 L_H \dots\dots\dots \text{(expression B.22)}$$

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

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

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

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

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

(8) L'émissivité des flammes à la fenêtre peut être considérée comme $B_{5f} = 1,0$.

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

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

..... (expression 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 :

$B_{5f} = 1 - e^{-0,3d_f}$ (expression B.26)

où :

d_f est l'épaisseur de la flamme [m].

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

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

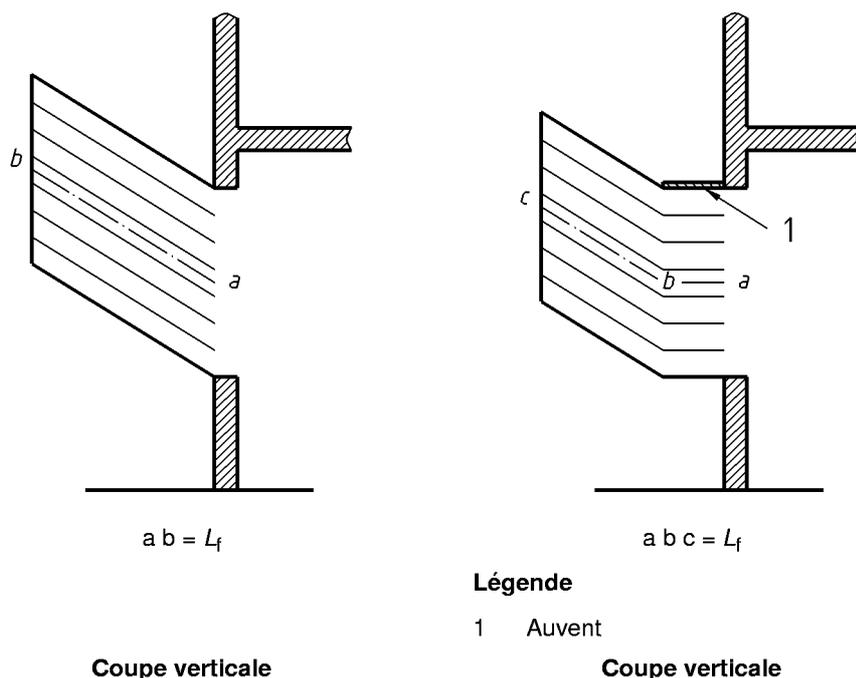
NOTE

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

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

(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 f d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement depuis une ouverture :

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

..... (expression B.28)

où :

- $f_{i,i}$ 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 $f_{i,i}$ 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 f_z d'un élément pour le transfert thermique par rayonnement depuis une flamme :

$$\phi_z = \frac{\left(C_1 \phi_{z,1} + C_2 \phi_{z,2} \right) d_1 + \left(C_3 \phi_{z,3} + C_4 \phi_{z,4} \right) d_2}{\left(C_1 + C_2 \right) d_1 + \left(C_3 + C_4 \right) d_2}$$

..... (expression 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 :

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

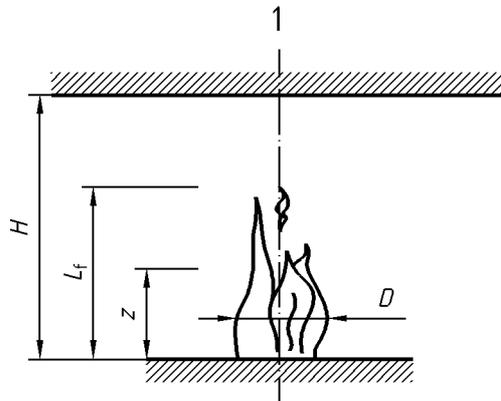
(4) Si la flamme ne touche pas le plafond du compartiment ($L_f < H$; voir Figure C.1) ou dans le cas d'un feu extérieur, la température $\theta(z)$ du panache le long de l'axe vertical symétrique de la flamme est donnée par :

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

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).

Figure C.1



Légende

1 Axe de la flamme

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

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

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

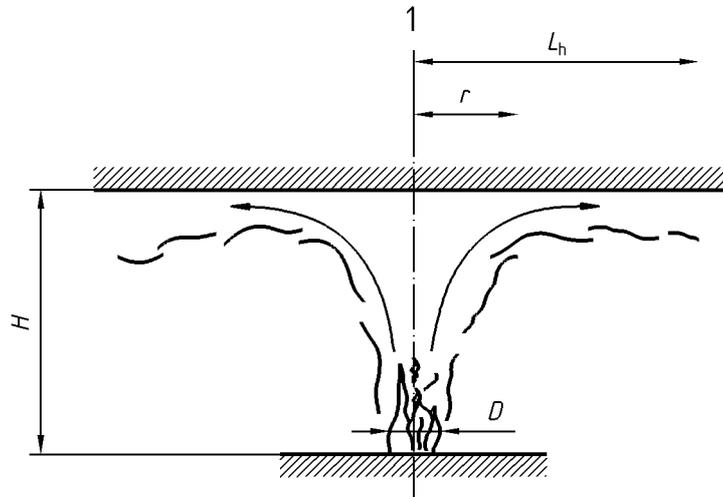
- $\dot{q} = 100\,000$ si $y \leq 0,30$
- $\dot{q} = 136\,300 - 121\,000 y$ si $0,30 < y < 1,0$ (expression C.4)
- $\dot{q} = 15\,000 y^{-3,7}$ si $y \geq 1,0$

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).
- Figure C.2



Légende

- 1 Axe de la flamme

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

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

..... (expression C.5)

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

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

..... (expression C.6)

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

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

..... (expression C.7)

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

où :

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

..... (expression C.8)

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

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

..... (expression 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 $D \leq 10 \text{ m}$;
- le débit calorifique du feu est limité par $Q \leq 50 \text{ MW}$.

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

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

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 :

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

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

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}} + \dot{m}_{\text{fi}} \quad \text{[kg/s]}$$

..... (expression D.2)

où :

- dm/dt est le débit massique des gaz dans le compartiment ;
- $[\dot{m}]_{\text{out}}$ est le débit massique des gaz sortant par les ouvertures ;
- $[\dot{m}]_{\text{in}}$ est le débit massique des gaz entrant par les ouvertures ;
- $[\dot{m}]_{\text{fi}}$ 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 :

$$\dot{m}_{\text{in}} = \dot{m}_{\text{out}}$$

..... (expression 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 :

$$\frac{dE_g}{dt} = Q - Q_{out} + Q_{in} - Q_{wall} - Q_{rad} \quad [W]$$

..... (expression D.4)

où :

- E_g est l'énergie interne du gaz [J] ;
- Q est le débit calorifique du feu [W] ;
- $Q_{out} = [\dot{M}]_{out} c T_f$;
- $Q_{in} = [\dot{M}]_{in} c T_{amb}$;
- $Q_{wall} = (A_t - A_{h,v}) [\dot{h}]_{net}$, est la perte d'énergie vers les parois de l'enceinte ;
- $Q_{rad} = A_{h,v} T_f^4$, 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 calculés 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 :

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

où :

- m est le coefficient de combustion (voir E.3) ;
- m_{q1} est un coefficient qui prend en compte le risque d'activation du feu lié à la taille du compartiment (voir Tableau E.1) ;
- m_{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/m²] (voir par exemple Tableau E.4).

Tableau E.1 Coefficients m_{q1} , m_{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	Approvisionnements en eau indépendants		Détection automatique du feu et alarme		Alarme automatique transmise aux pompiers	Pompiers sur site δ_{n6}	Pompiers hors site δ_{n7}	Voies d'accès libres δ_{n8}	Équipement de lutte contre le feu δ_{n9}	Système de désenfumage δ_{n10}
	0	1	2	par la chaleur δ_{n3}						
δ_{n1}	δ_{n2}		δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	0,61 ou 0,78	δ_{n7}	0,9 ou 1 ou 1,5	1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ou 0,73	0,87					

(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 surpression, le coefficient n_8 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 sprinkleurs, 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 :

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

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) ;
- $[i]$ 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 :

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

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_t) 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 $i = 1,0$.

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 $i = 0,0$.

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

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

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/m], selon le Tableau E.4.

Tableau E.4 Densités de charge calorifique $q_{f,k}$ [MJ/m] 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 q_2 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 celluloseux, 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 :

$$Q = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2$$

..... (expression 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 q_2 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 ($RHR_f A_{fi}$).

où :

- A_{fi} est la surface maximale du feu [m], 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 m de feu dans le cas d'un feu contrôlé par combustible [kW/m] (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 :

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

où :

- A_v est la surface des ouvertures [m] ;
- 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 :

$$t_{e,d} = (q_{f,d} k_b w_f) k_c \text{ ou}$$

$$t_{e,d} = (q_{t,d} k_b w_t) k_c \text{ [min]} \dots\dots\dots \text{ (expression F.1)}$$

où :

- $q_{f,d}$ est la densité de charge calorifique de calcul selon l'annexe E, qui veut que $q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t$;
- k_b est le facteur de conversion selon (4) ;

- w_f est le facteur de ventilation selon (5), qui veut que $w_t = w_f A_t / A_f$;
- 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	$13,7 \cdot O$

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

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

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 :

$$w_f = (6,0 / H)^{0,3} [0,62 + 90(0,4 - v)^4 / (1 + b_v h)] \text{ s}; 0,5 [-] \dots\dots\dots (\text{expression F.3})$$

où :

- $v = A_v / A_f$ 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 $0,025 \leq v \leq 0,25$;
- $h = A_h / A_f$ est la surface des ouvertures horizontales (A_h) du toit rapportée à la surface de plancher du compartiment (A_f) ;
- $b_v = 12,5(1 + 10 v - v)$ s; 10,0 ;
- H est la hauteur du compartiment. [m]

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

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

où :

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

(6) Il faut vérifier que :

$$t_{e,d} \geq t_{fi,d} \dots\dots\dots (\text{expression F.5})$$

où :

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

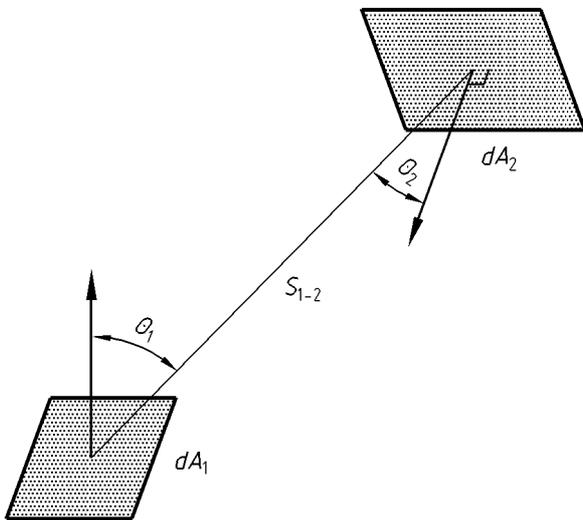
(1) Le facteur de forme est défini par 1.5.4.1, qui dans une expression mathématique est donné par :

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi S_{1-2}^2} dA_2$$

..... (expression 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 2 ".
- (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

		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).

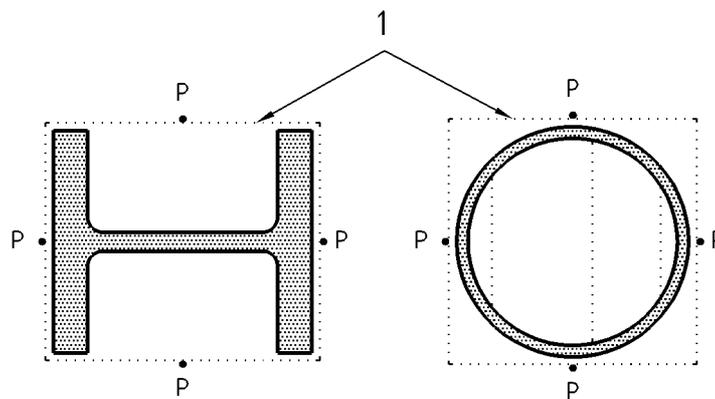
(2) Pour calculer le facteur de forme pour une situation donnée, il convient d'abord de tracer un rectangle autour de la section droite de l'élément récepteur du transfert thermique par rayonnement, comme l'indique la Figure G.2 (cette méthode tient compte de l'effet d'ombre de façon approximative).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

Figure G.2 Rectangle entourant les surfaces réceptrices



Légende

1 Rectangle

a) surface réceptrice parallèle à la surface rayonnante :

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

..... (expression 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 :

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

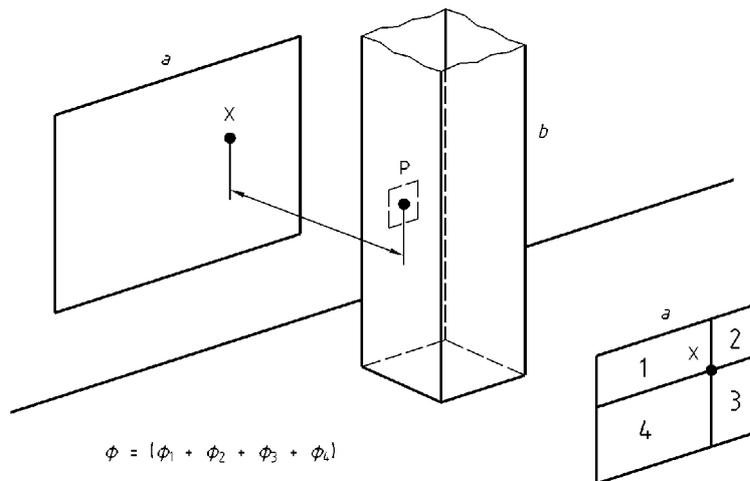
..... (expression G.3)

c) surface réceptrice dans un plan formant un angle $B\theta$ avec la surface rayonnante :

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

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

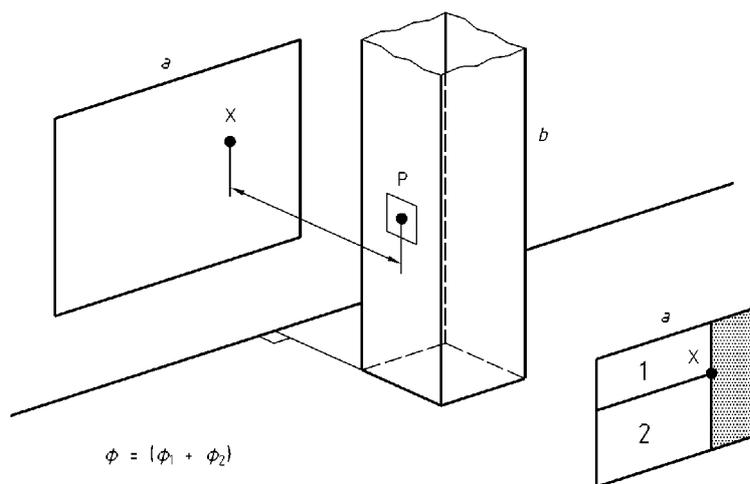
..... (expression G.4)



Légende

- a Surface rayonnante
- b Surface réceptrice

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

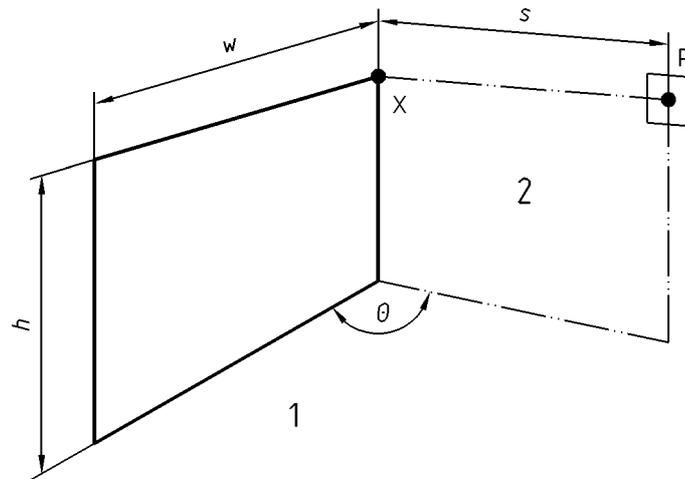


Légende

- a Surface rayonnante
- b Surface réceptrice

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

Figure G.5 Surface réceptrice dans un plan formant un angle B8 avec celui de la surface rayonnante



Légende

- 1 Surface rayonnante
- 2 Surface réceptrice

Bibliographie

EN ISO 1716 :2002

Essais de réaction au feu des produits de construction - Détermination de la chaleur de combustion (ISO 1716 :2002).

EN 1363-2

Essais de résistance au feu - Partie 2 : Modes opératoires de substitution ou additionnels. **Liste des documents référencés**

- #1 - NF EN 1990 (mars 2003) : Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures (Indice de classement : P06-100-1)
- #2 - NF EN 1991-1-1 (mars 2003) : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-1 : Actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments (Indice de classement : P06-111-1)
- #3 - NF EN 1991-1-3 (avril 2004) : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-3 : Actions générales - Charges de neige (Indice de classement : P06-113-1)
- #4 - NF EN 1991-1-4 (novembre 2005) : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent (Indice de classement : P06-114-1)
- #5 - NF EN 1992-1-1 (octobre 2005) : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (Indice de classement : NF P18-711-1)

Liste des figures

- Figure 1 Autres procédures de calcul
- Figure B.1 Déviation des flammes sous l'effet du vent
- Figure B.2 Dimensions des flammes sans ventilation forcée
- Figure B.3 Déviation des flammes due au balcon
- Figure B.4 Dimensions des flammes sous ventilation forcée
- Figure B.5 Déviation des flammes due à l'auvent
- Figure C.1
- Figure C.2
- Figure G.1 Transfert thermique par rayonnement entre aires de surface infinitésimales
- Figure G.2 Rectangle entourant les surfaces réceptrices
- Figure de l'article : G.3 éléments extérieurs
- Figure G.5 Surface réceptrice dans un plan formant un angle B8 avec celui de la surface rayonnante

Liste des tableaux

- Tableau E.1 Coefficients q_1 , q_2
- Tableau E.2 Coefficients n_i
- Tableau E.3 Pouvoirs calorifiques inférieurs H_u [MJ/kg] de matériaux combustibles pour le calcul de charges calorifiques
- Tableau E.4 Densités de charge calorifique $q_{f,k}$ [MJ/m] selon différents types d'occupation
- Tableau E.5 Vitesse de développement du feu et RHR_f selon différents types d'occupation.
- Tableau F.1 Facteur de correction k_c couvrant différents matériaux (O est le facteur d'ouverture défini en annexe A)

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

Tableau G.1 Limites du facteur de forme