

Recommandation ECA-Vaud

Méthodes d'ingénierie pour les calculs de résistance au feu de systèmes porteurs

Rôles et exigences

R02-v02 – Mars 2017

Etablissement d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels du canton de Vaud
Av. du Grey 111, Case postale, 1002 Lausanne
T. 058 721 21 21 - F. 058 721 21 22
Division prévention
www.eca-vaud.ch
✉ prevention@eca-vaud.ch

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
1.1. CONTEXTE	3
1.2. CADRE LÉGAL	3
1.3. ETATS DE LA TECHNIQUE ET DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	4
2. CHAMP D'APPLICATION	5
3. INGÉNIERIE DE LA RÉSISTANCE AU FEU DES STRUCTURES	5
3.1. MÉTHODOLOGIE	5
3.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX	7
3.2. RÔLES ET RESPONSABILITÉS	7
4. OBJECTIFS DE PROTECTION	9
4.1. OBJECTIFS DE PROTECTION GÉNÉRAUX	9
4.2. OBJECTIFS DE PROTECTION SPÉCIFIQUES	9
5. SCÉNARIOS D'INCENDIE	12
5.1. GÉNÉRALITÉS	12
5.2. SCÉNARIOS DE FEU NORMALISÉS	12
5.3. SCÉNARIOS DE FEU SELON L'INCENDIE NATUREL	13
6. ANALYSES THERMIQUE ET MÉCANIQUE	22
6.1. ANALYSE DES EFFETS THERMIQUES	22
6.2. PROPAGATION DE LA CHALEUR DANS LES ÉLÉMENTS	24
6.3. CALCUL STRUCTURAL	24
6.4. MODÈLES DE CALCUL	27
6.5. CRITÈRES DE ROBUSTESSE	29
7. MISE EN ŒUVRE ET SUIVI DU PROJET, RÉSERVES PARTICULIÈRES	29
ANNEXE A : BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXE B : DÉFINITIONS	32
ANNEXE C DOCUMENTS À FOURNIR	33

1. Introduction

1.1. Contexte

Dans le cadre de la mission de contrôle par l'ECA-Vaud de la plausibilité des méthodes de preuves en protection incendie, basées sur une approche orientée « performance » pour les structures porteuses, le présent document a été établi.

Les objectifs principaux de cette recommandation relative aux calculs de systèmes porteurs peuvent être résumés comme suit :

- En complément des prescriptions applicables, préciser le champ d'application des calculs de résistance au feu des systèmes porteurs et le déroulement global d'une étude d'ingénierie ;
- Etablir de manière claire les fonctions et responsabilités des différents acteurs, lors de chaque phase d'une étude d'ingénierie. Cette dernière doit notamment viser à satisfaire les objectifs des différentes parties concernées par le projet ;
- Garantir la conformité des méthodes mises en œuvre avec le contexte réglementaire actuel ;
- Donner à l'autorité de protection incendie les moyens de valider les valeurs proposées pour les hypothèses de départ et la justification finale fournie.

1.2. Cadre légal

En vertu de l'Accord intercantonal sur l'élimination des entraves techniques au commerce (AIETC) du 23 octobre 1998, la norme et les directives de l'AEAI (version 2015) ont en effet force de loi et sont légalisées dans l'ensemble de la Suisse au travers des législations cantonales. Les mesures de protection incendie prescrites par l'AEAI doivent donc être appliquées.

L'article 11 al 1 de la norme de protection incendie 1-15 précise que dans le cadre d'un concept standard, il est possible de cas en cas de mettre en œuvre d'autres mesures de protection incendie au lieu des mesures prescrites, pour autant que celles-ci offrent une sécurité équivalente pour l'objet concerné. C'est l'autorité de protection incendie qui statue sur cette équivalence (objectifs).

L'article 12 al. 1 de la norme décrit les conditions dans lesquelles une méthode de preuves peut être utilisée:

En protection incendie, il est admis de recourir aux méthodes de preuves en vue d'évaluer le danger et le risque d'incendie, ou les conceptions sur lesquelles repose la sécurité incendie dans un cas particulier, pourvu que les objectifs définis par la norme de protection incendie soient atteints et que le problème soit considéré dans son ensemble.

Le recours à un calcul selon l'incendie naturel est toutefois réservé à des cas particuliers et sous réserve d'approbation de l'autorité de protection incendie comme le précise l'article 12 al. 2 de la norme de protection incendie AEAI 1-15:

L'autorité de protection incendie examine les concepts et les preuves de protection incendie pour vérifier qu'ils soient complets, compréhensibles et plausibles.

De plus à l'article 7.3 de la directive AEAI 27-15 "méthode de preuves en protection incendie" il est précisé que:

Les modèles de calcul simplifiés et les modèles de calcul généraux fondés sur les Eurocodes (preuve par calcul/modèles de feu naturel) doivent être validés par un ingénieur diplômé et qualifié.

Les preuves établies sur la base d'un scénario de feu naturel doivent aboutir à la même sécurité que celles qui font appel aux feux normalisés. Il faut donc prévoir, en ce qui concerne les mesures relatives à la construction, un concept de sécurité adéquat et reconnu.

Il est à relever que dans le calcul selon l'incendie naturel, les exigences relatives aux durées de résistance au feu (R30, R60,...) sont remplacées par des exigences de résistance à la ruine selon le type de structure.

Par ailleurs, le calcul basé sur une courbe d'incendie naturel ne permet pas de se substituer à d'autres mesures de sécurité incendie (p.ex. voies de fuite, compartimentage coupe-feu) exigées conformément aux prescriptions de l'AEAI. L'assurance qualité en protection incendie telle que définie dans la directive AEAI 11-15 doit être respectée en prenant en compte les résultats de l'étude dans la planification et la réalisation des travaux.

1.3. Etats de la technique et documents de référence

La recommandation ECA sert de base à l'application des méthodes d'ingénierie feu relatives aux systèmes porteurs. Lorsqu'il est fait référence à des normes ou états de la technique spécifiques, ceux-ci sont explicitement mentionnés. Néanmoins, pour des points qui ne seraient pas couverts par la présente recommandation, les documents fixant l'état de la technique, notamment les documents du Centre suisse de la construction métallique (SZS) et les normes SIA des structures porteuses (SIA 260 à 267 et 269), servent de référence.

En complément, les normes européennes de conception et de calcul des ouvrages (Eurocodes) SN EN 1990 à 1999 ayant le statut de norme nationale ainsi que leurs annexes nationales constituent des sources d'informations complémentaires et reconnues selon le répertoire 40-15 « Autres dispositions » de l'AEAI.

2. Champ d'application

La réalisation de calculs selon l'incendie naturel est à envisager prioritairement pour des cas particuliers (p.ex. charge calorifique réduite, locaux élevés ou avec évacuation de chaleur importante), lorsque qu'on peut s'attendre à ce que les températures atteintes dans le local où se situe l'incendie soient inférieures aux valeurs critiques, même en cas d'incendie généralisé [1]. Dans ces cas, les exigences requises par le dimensionnement selon une courbe de feu normalisé peuvent s'avérer disproportionnées, en particulier pour la construction métallique.

La vérification de la résistance au feu par des calculs selon l'incendie naturel peut, sous réserve d'approbation par l'autorité compétente, être étendue à d'autres types de bâtiments, ouvrages ou installations.

Le but visé du calcul selon l'incendie naturel doit être une rationalisation des mesures de protection incendie en lien avec les systèmes porteurs, sans diminution inacceptable du niveau de sécurité, conformément aux objectifs de protection définis.

Dans tous les cas, une étude d'ingénierie selon l'incendie naturel doit nécessairement être accompagnée ou avoir été précédée d'un concept de protection incendie lié à l'ouvrage, ce concept devant notamment préciser, dans les conditions d'exploitation prévues, les mesures constructives, techniques et organisationnelles relatives à la protection incendie.

3. Ingénierie de la résistance au feu des structures

3.1 Méthodologie

Le processus d'ingénierie de la sécurité incendie identifie les différentes étapes relatives à la réalisation d'une étude d'ingénierie :

- a. Après avoir défini le périmètre du projet, il s'agit tout d'abord d'identifier les objectifs de protection incendie et les critères quantitatifs (de performance) associés, en tenant compte des exigences fonctionnelles.
- b. Le concept de protection incendie doit ensuite être élaboré. Ce concept doit définir, sur la base d'une identification préliminaire des dangers et du cadre réglementaire, les éléments de la solution de conception susceptibles de potentiellement satisfaire aux critères de performance.

- c. Les scénarios d'incendies de dimensionnement, qui seront utilisés pour vérifier la performance des paramètres de conception, doivent également être convenus.
- d. La satisfaction du projet de conception par rapport aux critères de performance doit être évaluée par une étude d'ingénierie, en se basant sur des méthodes d'ingénierie adaptées. Si la solution de conception ne satisfait pas les critères de performance, des modifications sont nécessaires jusqu'à l'obtention d'un projet final de conception conforme aux exigences.
- e. Un rapport final du projet, y compris la documentation nécessaire, est ensuite produit et validé. La mise en œuvre de ce projet final de conception donne lieu à la construction de l'ouvrage.

Même après la mise en œuvre, le processus d'ingénierie de la sécurité incendie se poursuit par des contrôles périodiques et des procédures de gestion continue de la sécurité incendie (directive AEAI 14-15).

Le schéma présenté ci-après résume le processus d'ingénierie de la sécurité incendie d'un bâtiment, d'une installation ou d'un ouvrage, incluant les phases de conception, de mise en œuvre et de maintenance.

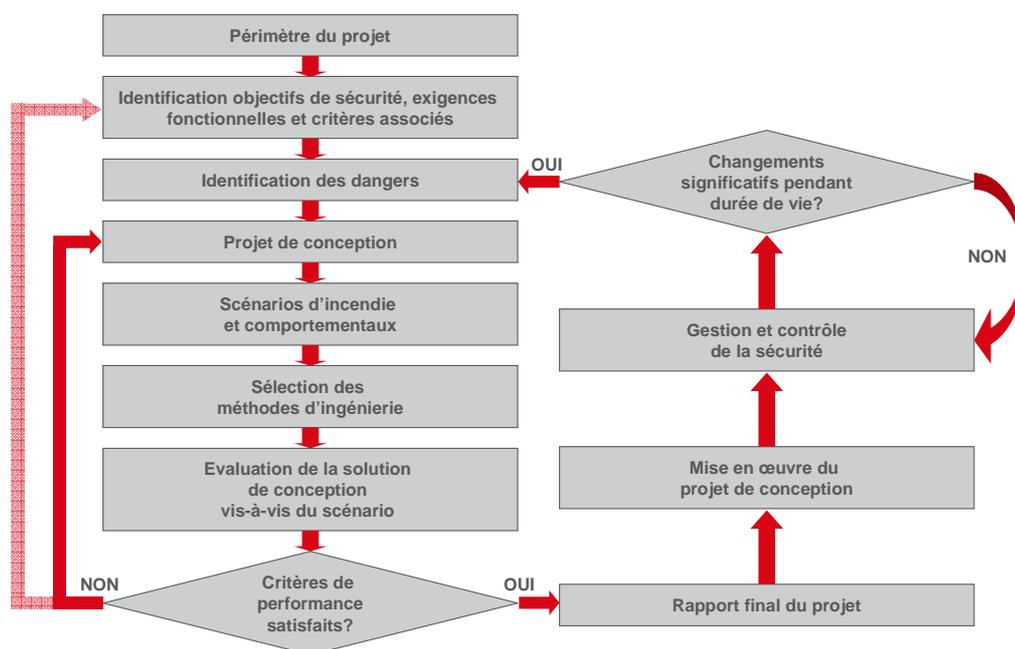


Figure 1 : Processus d'ingénierie de la sécurité incendie, adapté de [2]

3.1. Principes généraux

La réalisation d'une étude d'ingénierie de sécurité incendie, relative aux conséquences de l'action du feu sur des systèmes porteurs, doit contenir les éléments suivants :

- Définition des objectifs de protection incendie et des critères de performance associés ;
- Sélection des scénarios de feu de dimensionnement pertinents ;
- Etablissement des courbes de températures correspondantes ;
- Calcul de l'évolution des températures à l'intérieur des éléments structuraux ;
- Calcul du comportement mécanique de la structure exposée au feu et conséquence sur la stabilité.



Figure 2 : Eléments-clé d'une étude d'ingénierie relative à la résistance au feu de structures porteuses et chapitres correspondants dans le document

Habituellement, deux approches peuvent être mises en œuvre dans le cas de calculs relatifs au comportement de structures porteuses sous l'effet du feu :

1. Approche « **durée au feu ISO** » : Calculs basés sur une durée de résistance au feu prescrite, selon une courbe d'incendie normalisée,
2. Approche « **feu naturel** » : Calculs basés sur le risque de ruine selon SN EN 1991-1-2, en lien avec l'intégralité de l'action thermique, pouvant inclure une approche statistique.

3.2. Rôles et responsabilités

3.2.1 Objectifs de protection

Une proposition relative aux objectifs de protection incendie et critères de performance associés, doit être établie par le bureau responsable des calculs et soumise pour approbation à l'autorité concernée, avant l'élaboration de la justification.

La proposition doit être conforme au cadre réglementaire et basée sur les principes exposés dans la présente recommandation. La validation finale des critères d'évaluation des objectifs de protection reste du ressort de l'autorité.

3.2.2 Scénarios de feu

Les scénarios de feu retenus et courbes de températures associées sont précisés par l'ingénieur et soumis pour avis à l'autorité de protection incendie, avant l'élaboration de la justification.

Si des caractéristiques de feu autres que celles mentionnées dans le présent document sont proposées par l'ingénieur, celui-ci doit justifier par écrit, de manière claire et pertinente son choix.

3.2.3 Modèles de calcul

Concernant le choix des modèles de calcul, leur utilisation et l'interprétation des résultats, ces éléments sont placés sous la responsabilité du bureau spécialisé. Les hypothèses faites et les paramètres retenus doivent être décrits de manière claire et être conformes à la présente recommandation.

3.2.4 Analyses thermiques et mécaniques

Les analyses thermiques et mécaniques, incluant le calcul de l'évolution de la température à l'intérieur des éléments structuraux et du comportement mécanique de la structure exposée, sont de la totale responsabilité du bureau spécialisé.

L'autorité compétente ne valide pas les résultats obtenus, mais est informée de la satisfaction aux objectifs de protection définis et des éventuels écarts. Si les écarts sont inadmissibles, la mise en place de mesures de sécurité supplémentaires est réservée.

3.2.5 Maître d'ouvrage, propriétaire et exploitant (voir également le chapitre 7)

Dans le cas d'un calcul au feu selon l'incendie naturel, la responsabilité du maître d'ouvrage, du propriétaire et/ou de l'utilisateur peut être engagée, compte tenu que des hypothèses relatives à l'affectation et à l'utilisation des locaux sont formulées : charge thermique et conditions de ventilation notamment.

Une attention particulière est à porter sur le cycle de vie du bâtiment: la fixation de certains paramètres dans le cadre d'une étude d'ingénierie feu peut fortement restreindre toute possibilité de transformation ou de réaffectation des locaux concernés par l'étude. Le niveau du degré d'assurance qualité en protection incendie, ainsi que les exigences découlant de ce degré sont détaillées dans la directive AEAI 11-15 "Assurance qualité en protection incendie" [10].

4. Objectifs de protection

4.1. Objectifs de protection généraux

D'une manière générale, la résistance au feu d'un système porteur doit permettre de garantir la sécurité des personnes et des animaux ainsi que la lutte contre le feu (norme AEA1 1-15). Un système porteur doit en effet être dimensionné et construit de manière à conserver suffisamment sa stabilité en cas d'incendie.

Par ailleurs, le dimensionnement et la construction des systèmes porteurs doivent garantir que ni la défaillance prématurée d'une partie de construction isolée, ni les effets de la dilatation thermique n'entraînent leur effondrement, au même niveau ou à un autre niveau, et que les compartiments coupe-feu attenants ne subissent pas de dommages disproportionnés (p.ex. perte significative du compartimentage coupe-feu provoquant la propagation de l'incendie). Un justificatif peut être exigé.

4.2. Objectifs de protection spécifiques

4.2.1. Remarques préliminaires

Les deux approches « durée au feu ISO » et « incendie naturel », pouvant être mises en œuvre dans le cadre de calculs relatifs aux conséquences du feu sur des systèmes porteurs, considèrent des critères de performance distincts. Ces deux approches peuvent être mise en œuvre afin de prouver la satisfaction aux objectifs de protection généraux.

Il s'agit, dans les deux approches, de s'assurer que la sécurité structurale en cas d'incendie est suffisante : on prendra en considération tant les effets des actions liés aux déformations (dilatation sous l'action thermique) que l'influence de la température sur les propriétés des matériaux de construction.

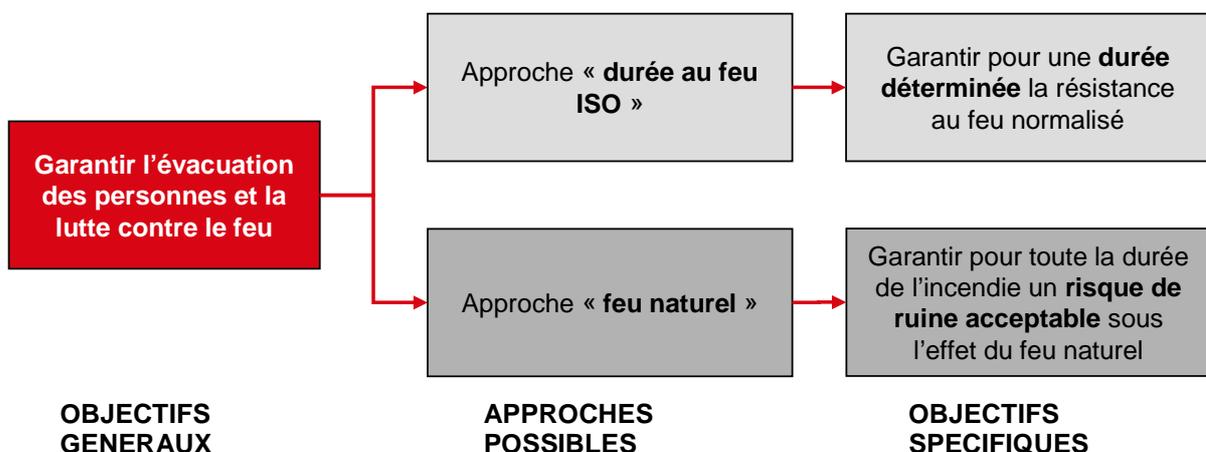


Figure 3 : Approches possibles pour évaluer les objectifs de protection incendie des systèmes porteurs

4.2.2. Calcul selon l'incendie normalisé (feu ISO)

Conventionnellement, les objectifs de protection généraux sont considérés comme satisfaits si les éléments porteurs résistent au feu normalisé, pendant une durée prescrite. Le critère de performance « traditionnel » est ainsi une durée de résistance au feu normalisé, tenant compte du nombre de niveaux, des charges thermiques, du type de construction, de la surface et de l'affectation du bâtiment et de la présence d'une installation sprinkler.

Pour tout calcul réalisé selon cette méthode, les niveaux de performance à atteindre (R 30, R 60, etc.) sont fixés au chapitre 3.7 de la directive de protection incendie « Distances de sécurité incendie, systèmes porteurs et compartiment coupe-feu » (AEAI 15-15). En cas de doute, les exigences fixées par l'autorité compétente lors de mises à l'enquête sont déterminantes.

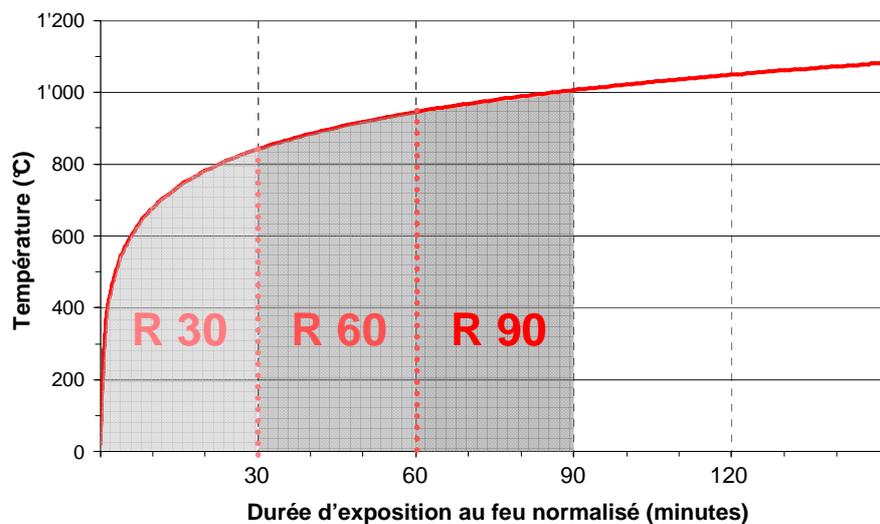


Figure 4 : Illustration du « niveau de performance » requis selon l'incendie normalisé

4.2.3. Calcul selon l'incendie naturel

Dans le cas de l'incendie naturel, le critère de performance retenu est le risque de ruine de l'ouvrage. La notion d'une durée de résistance au feu n'est plus applicable: le calcul considère l'intégralité de l'action thermique de l'incendie (ignition, croissance, feu développé, décroissance, extinction).

Il s'agit de vérifier, sur la base des scénarios de feu définis, que la sécurité structurale est garantie durant toute la durée de l'incendie ainsi que, pendant la phase de refroidissement de la structure. Cette vérification tient ainsi compte des caractéristiques des compartiments: vitesse de développement du feu et conditions de ventilation notamment.

La méthode au feu naturel prévoit de plus une pondération statistique de la charge thermique (pondération basée sur une analogie avec les niveaux de performance requis pour les autres vérifications d'un système porteur), pour les scénarios de feu définis.

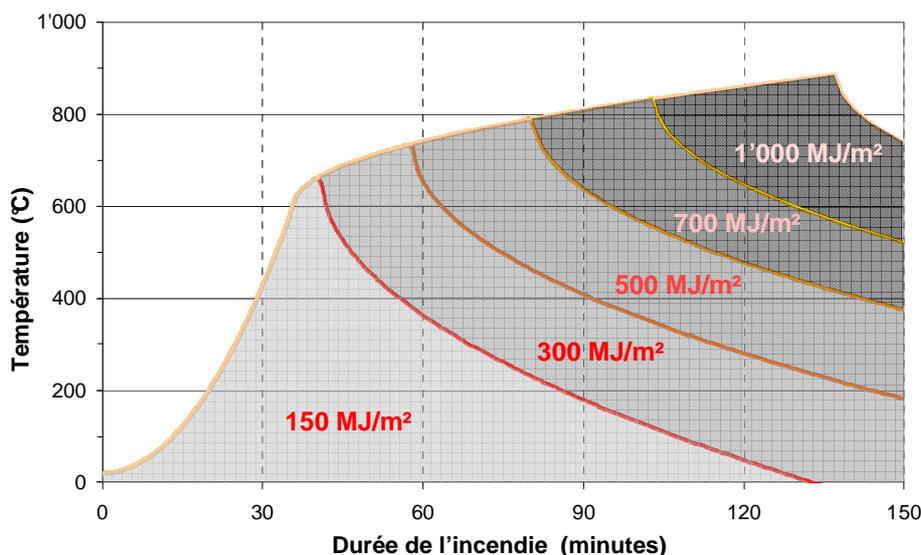


Figure 5 : Incendie naturel : illustration de l'action thermique, pour différents niveaux de charge thermique (les températures sont illustratives)

Par ailleurs, il convient de distinguer les critères de performance en fonction du type d'élément structurel (voir également le chapitre 6.5):

- la structure dite *primaire* (colonnes, murs, tirants,...) doit être dimensionnée de manière à ne pas subir de ruine fragile (ruine soudaine, dangereuse) ou entraîner la ruine en cascade d'éléments de structure principaux.
- la structure dite *secondaire* peut être dimensionnée tout en acceptant des déformations plus importantes selon la type de structure (planchers mixtes par exemple).

5. Scénarios d'incendie

5.1. Généralités

En cas d'incendie, le risque d'effondrement d'éléments porteurs n'est habituellement considéré comme tangible que si le feu se développe jusqu'à atteindre des proportions pouvant être décrites comme sévères.

Les scénarios de feu visant au dimensionnement d'installations de désenfumage, basés sur la phase de croissance du feu (pré-flashover), ne sont pas à priori de nature à constituer un risque de ruine significatif pour les systèmes porteurs, hormis pour des éléments particuliers soumis à un incendie localisé.

En conséquence, les scénarios de feu de dimensionnement servant à évaluer le comportement de systèmes porteurs sous l'effet du feu, doivent inclure des conditions d'embrassement généralisé (post-flashover). On peut soit utiliser les courbes d'incendie normalisées, soit avoir recours aux courbes de feu naturel.

5.2. Scénarios de feu normalisé

Dans le cas d'un calcul de résistance au feu normalisé, le scénario de feu à considérer est donné par la courbe température-temps standard, décrite dans l'ISO 834-1 / SN EN 1363-1 [3,5], pour la durée prescrite. Il n'y a pas de courbe de puissance de feu associée.

Les évolutions des 3 principales courbes de température normalisées sont données par des fonctions logarithmiques ou exponentielles de la durée de l'incendie et sont résumées sur la figure suivante.

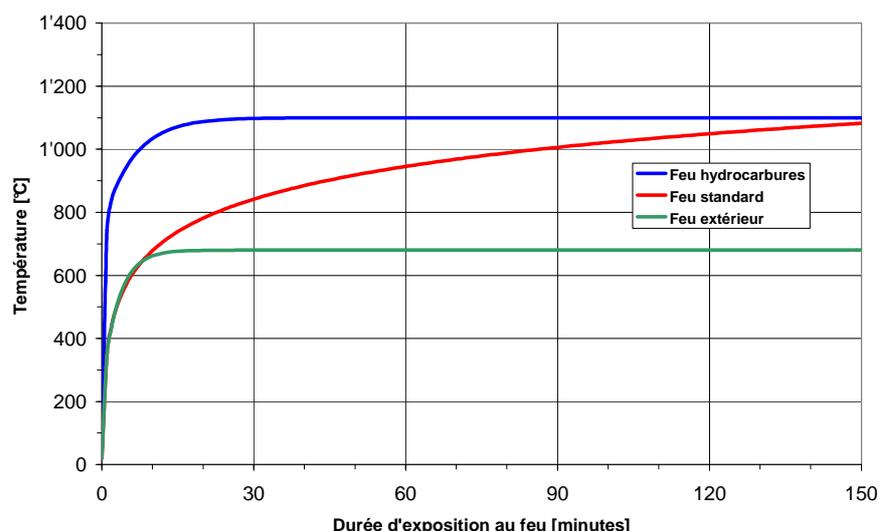


Figure 6 : Courbes température-temps normalisées

La courbe de feu ISO extérieur ne doit pas être utilisée pour le calcul de structures extérieures au bâtiment. Pour ce type de structure, il faut par exemple se référer à l'annexe B de la norme SN EN 1991-1-2:2002 [4].

5.3. Scénarios de feu selon l'incendie naturel

5.3.1. Principes

Dans une étude au feu naturel, des scénarios de feu spécifiques sont déterminés en fonction de l'affectation du compartiment étudié et d'une identification des dangers d'incendie. Les principaux facteurs d'influence sur le développement du feu doivent être considérés. Pour chaque calcul, un scénario de feu doit être appliqué à un seul compartiment du bâtiment à la fois.

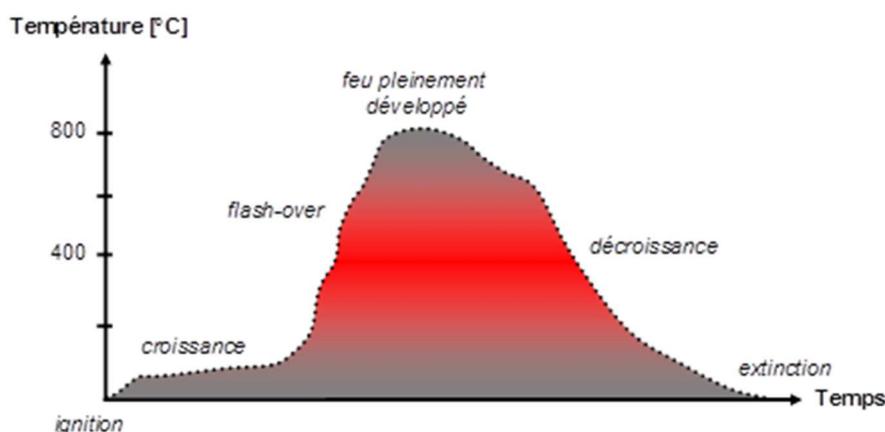


Figure 7 : Illustration des différentes phases d'un incendie

La figure 7 montre les cinq phases d'un feu réel:

- Une **phase de commencement** avec un feu couvant à basse température durant une période souvent difficile à estimer. Elle est caractérisée par une variété de phénomènes de combustion. Soit un feu qui brûle lentement (sans la présence de flamme), ou qui présente de très petites flammes peu visibles ou encore qui présente un caractère incandescent.
- Une **phase de croissance** et de développement appelée "pré-flashover". C'est dans cette phase que le feu est encore localisé. Cette phase dure jusqu'à un éventuel "flashover" ou embrasement de tout le compartiment. La durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment, de ses conditions de ventilation et des matières combustibles présentes.
- Le "**flashover**" est la transition entre le feu localisé et l'embrasement généralisé dû à une inflammation spontanée des gaz de combustibles, dès que par exemple la température des gaz de la couche de fumée atteint une valeur suffisamment élevée.
- Une **phase de plein développement**, ou phase "post-flashover": cette phase correspond à un feu généralisé dont la durée dépend de la charge calorifique et de la ventilation. Elle est caractérisée par un taux de combustion relativement stable.

- Une **phase de décroissance**: le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles soient complètement consommés et que plus aucune énergie ne soit libérée par le foyer. L'activité de l'incendie s'éteint tout simplement.

Les scénarios de feu définis sont associés à des courbes de puissance, lesquelles servent de base à l'établissement des courbes de températures utilisées pour l'analyse thermomécanique.

Les courbes de puissance et courbes de températures associées sont habituellement établies à l'aide de modèles de zone(s) et/ou de modèles de champ (modèles CFD). De plus, certains modèles de feu simplifiés (p.ex. feux localisés) peuvent fournir des informations pertinentes dans le cadre d'une étude d'ingénierie de la résistance au feu des structures.

Lorsque des modèles de calcul (modèles de zones, modèles de champ, modèles simplifiés) sont utilisés, il appartient au bureau spécialisé de préciser les références et/ou le logiciel utilisé (nom, version, date, éditeur) et de pouvoir justifier que le modèle de calcul est approprié à l'objet étudié.

Dans tous les cas, les hypothèses de départ, servant de base à la paramétrisation du modèle utilisé, doivent être clairement exposées, avec les références éventuelles.

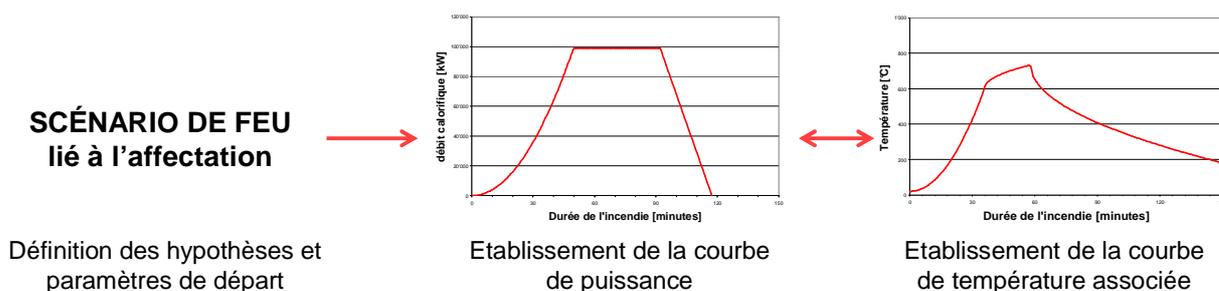


Figure 8 : Principes lors de la définition de scénarios de feu « naturels »

5.3.2. Courbes de puissance de feu (débit calorifique)

Conformément à l'approche traditionnelle en la matière (p.ex. norme ISO/TR 13387-2 [9]), le développement du feu dans sa phase initiale est assimilé à une fonction quadratique: la puissance de feu est proportionnelle au carré du temps écoulé après l'ignition du feu (feu « αt^2 »).

Le développement du feu doit notamment tenir compte de la charge thermique disponible, de la puissance spécifique (puissance du feu par m² de surface), des conditions de ventilation et d'embrassement généralisé. La valeur maximale atteinte par le débit calorifique correspond à un état stationnaire déterminé par des conditions de contrôle par le combustible ou par la ventilation.

Sans autre justificatif, les vitesses de développement du feu et les densités de débits calorifiques (puissances spécifiques) sont à baser sur les valeurs présentées dans l'annexe E.5 de la norme SN EN 1991-1-2:2002 [4] :

Affectation	Vitesse de développement du feu	Coefficient α [kW/s ²]	Durée jusqu'à 1.00 MW	Puissance spécifique [kW/m ²]
Logement	Moyenne	0.01111	5.0 min	250
Hôpital (chambre)	Moyenne	0.01111	5.0 min	250
Hôtel (chambre)	Moyenne	0.01111	5.0 min	250
Bibliothèque	Rapide	0.04444	2.5 min	500
Bureau	Moyenne	0.01111	5.0 min	250
Ecole, enseignement	Moyenne	0.01111	5.0 min	250
Centre commercial	Rapide	0.04444	2.5 min	250
Théâtre, cinéma	Rapide	0.04444	2.5 min	500
Transport (espace public)	Lent	0.00278	10 min	250

Tableau 1 : Vitesses de développement du feu et densités de débits calorifiques pour différentes affectations (source : SN EN 1991-1-2 [4])

Pour les affectations non considérées dans le précédent tableau (p.ex. industrie, artisanat), des valeurs adaptées sont à proposer par le bureau responsable des calculs, en citant les références éventuelles.

5.3.3 Ouvertures et conditions de ventilation

Les géométries et positions des ouvertures dans les parois, planchers et éléments de toiture sont à préciser (p.ex. schémas, extraits de plans).

Il convient de tenir compte tant des éléments constructifs tels que vitrages, portes, ouvrants, exutoires, etc. que de l'influence des installations techniques présentes (p.ex. portes coupe-feu asservies, installations de désenfumage). L'éventuelle ruine de certains éléments constructifs (p.ex. vitrages) et les hypothèses y relatives doivent être clairement décrites.

En effet, les conditions de ventilation sont un facteur essentiel du développement du feu. Si le feu est contrôlé par la ventilation, une augmentation des ouvertures provoque une augmentation de la température maximale des gaz chauds, sinon elle provoque une réduction. Les températures auxquelles les vitrages non-résistants au feu se brisent sont généralement comprises entre 100 et 500°C. Cette rupture dépend du type de châssis, de la qualité des vitrages, du mode de pose, de l'épaisseur, des dimensions, du nombre de couches de vitrage, etc.

En l'absence de données précises au sujet des vitrages utilisés, il convient d'envisager deux scénarios extrêmes en fonction de la température des gaz chauds près des vitrages à l'intérieur du compartiment ou du local [13]:

- Scénario 1: 90% de la surface du vitrage est considéré comme ouverture dès le début de l'incendie. Ce scénario permet de tester un développement du feu contrôlé par le combustible.
- Scénario 2:
 - *Simple vitrage*: A 100°C, 50% de la surface des vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 250°C, 90 % de la surface des vitrages exposés sont considérés comme une ouverture.
 - *Double vitrage*: A 200°C, 50% de la surface des vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 400°C, 90 % de la surface des vitrages exposés sont considérés comme une ouverture.
 - Triple vitrage dans un châssis en acier: A 300°C, 50% de la surface des vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 500°C, 90 % de la surface des vitrages exposés sont considérés comme une ouverture.
 -

Si les vitrages ont d'autres caractéristiques comme des cadres PVC ou une fonction de résistance au choc ou de résistance au feu, les températures de référence prévues dans le scénario 2 pour leur éclatement doivent être remplacées par les caractéristiques données par le fournisseur.

Si une ventilation de désenfumage est présente dans le local, il faut en tenir compte dans la détermination de la courbe d'échauffement avec les caractéristiques propres à celle-ci et en particulier la température maximale de fonctionnement.

5.3.4 Embrassement généralisé

Lorsque les conditions nécessaires à la transition brusque vers un embrassement généralisé (conditions de flash-over) sont réunies, le scénario de feu doit être adapté en conséquence : toutes les surfaces combustibles du compartiment peuvent alors participer à l'incendie, en fonction des conditions de ventilation.

5.3.5 Installations techniques

Les scénarios de feu doivent tenir compte de l'influence potentielle d'éléments asservis à une alarme-feu (exutoires, portes, etc.), notamment par rapport aux conditions de ventilation.

Les installations sprinklers ne peuvent être prises en considération pour la détermination des scénarios de feux naturels que dans les cas où, selon la directive de protection incendie AEAI 15-15 « distances de sécurité incendie, systèmes porteurs et compartiments coupe-feu » (2015), une diminution de la durée de résistance au feu est possible (cf. chapitre 3.7 de la directive susmentionnée) en présence de sprinkler.

Cette (éventuelle) prise en considération ne doit pas être représentée par la stabilisation ou la décroissance de la puissance de l'incendie, mais par une pondération statistique de la charge thermique tenant compte de la fiabilité des installations sprinklers.

5.3.6 Charges thermiques

Par définition, la charge thermique totale (q_{total}) correspond à la puissance calorifique de tous les matériaux combustibles d'un compartiment coupe-feu, rapportée à la surface au sol de ce dernier. Elle est la somme des charges thermiques mobilière et immobilière et s'exprime en MJ/m².

Les valeurs pour la charge thermique *mobilière* sont à baser sur des valeurs standard comme celles définies ci-dessous tirée de l'annexe E de la norme SN EN 1991-1-2:2002

Type d'occupation	Moyenne	Fractile à 80%
Logement	780	948
Hôpital (chambre)	230	280
Hôtel (chambre)	310	377
Bibliothèque	1500	1824
Bureaux combinés	420	511
Classe d'école	285	347
Centre commercial	600	730
Théâtre (cinéma)	300	365
Transport (espace public)	100	122

Tableau 2 : Densité de charge calorifique
pour différentes affectations (source : SN EN 1991-1-2 [4])

Si un requérant (maître d'ouvrage, planificateur, etc.) souhaite s'écarter de ces valeurs, une justification plausible et validée par l'exploitant doit être fournie (la charge de la preuve incombe au requérant).

Pour les affectations non considérées dans la littérature, il appartient au requérant de proposer une valeur adaptée pour la charge thermique et de justifier son choix, par exemple celles issue de l'étude de l'EPFZ faite en 2005 sur les charges thermiques dans l'industrie" [8].

La charge thermique *immobilière* est à évaluer en fonction de la présence de matériaux et/ou parties de constructions combustibles telles que poutres, parois, plafonds, planchers, revêtements, finitions, etc.

5.3.7 Facteurs de pondération – Charge thermique de calcul

Conformément à l'approche « incendie naturel », pour les scénarios de feu établis, une pondération statistique de la charge thermique est possible. Cette pondération se retranscrit par des facteurs δ venant multiplier la charge thermique totale, résultant en une charge thermique de calcul $q_{d,fi}$ (servant au dimensionnement) :

$$q_{d,fi} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \prod \delta_{ni} \cdot m \cdot q_{k,fi}$$

m : facteur de combustion. Sans autre justificatif, m sera égal à 0.8 (cf. SN EN 1991-1-2 [4]).

Les facteurs de pondération sont déduits d'une approche statistique en lien avec la probabilité de ruine acceptable (risque admis) et la probabilité d'avoir un feu sévère, pouvant potentiellement mettre en danger la structure. Plus le facteur de pondération est élevé, plus la probabilité d'effondrement diminue.

Il est à noter que compte tenu du cadre légal et de la gestion actuelle du risque incendie en Suisse, une application stricte de l'annexe E de la norme SN EN 1991-1-2 [4] est exclue.

Les facteurs de pondération δ_{q1} et δ_{q2} du tableau E.1 qui tiennent compte, par analogie aux prescriptions AEAI, de l'affectation des compartiments et de la grandeur de celui-ci sont admis pour les catégories définies par la norme.

Tableau E.2 — Coefficients δ_{ni}

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

Tableau 3 : Facteur de réduction (source : SN EN 1991-1-2 [4])

Les coefficients δ_{ni} du tableau E.2, peuvent être pris en compte selon le tableau suivant avec les limitations suivantes :

- δ_{n2} : le facteur 0.87 peut être pris en compte si l'alimentation en eau est conforme à la directive SES sur le sprinkler
- δ_{n3} et δ_{n4} : ne peuvent être pris en compte que si une installation sprinkler est présente. De plus les facteurs ne se cumulent pas en cas d'installation de détection de fumée et de chaleur.
- δ_{n5} : peut-être pris en compte si la transmission de l'alarme avec la CTA est active et conforme aux directives de l'ECA en matière de transmission de l'alarme.
- δ_{n6} et δ_{n7} : sont toujours égal à 1.0
- δ_{n8} , δ_{n9} , δ_{n10} : sont égal à 1.0 si les mesures sont conformes aux directives AEAI et 1.5 si elles ne le sont pas où leur maintenance est défectueuse

L'utilisation de tout autre système de pondération est soumise à l'approbation de l'autorité compétente, et devra être justifiée par écrit de manière plausible par le requérant. La conformité avec la gestion actuelle du risque incendie en Suisse, ainsi qu'avec les hiérarchies et les facteurs d'influence (niveaux, affectation, surface, sprinkler) définis dans les prescriptions de protection incendie (AEAI 2015) doit être garantie.

Ci-après et à titre informatif, l'influence de différents paramètres sur les courbes de puissance est détaillée et illustrée graphiquement. Toutes les valeurs mentionnées sur les graphiques sont purement indicatives.

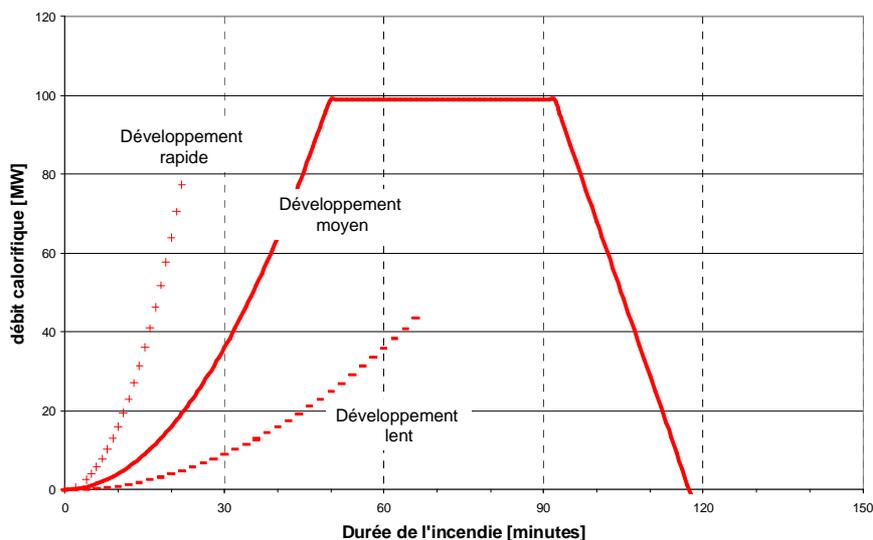


Figure 9 : Courbe de puissance : illustration de l'influence du coefficient α

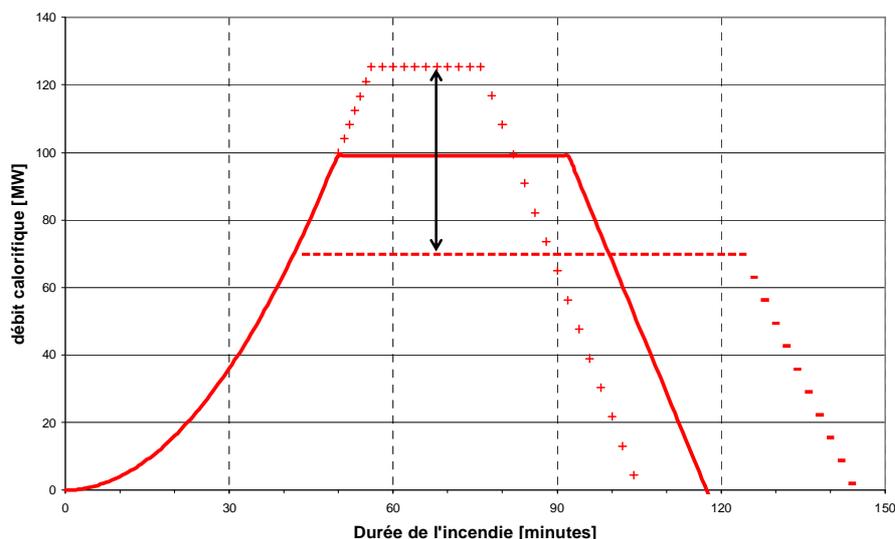


Figure 10 : Courbe de puissance : illustration de l'influence de la limitation par la ventilation / le combustible. La surface (énergie totale dégagée) sous les trois courbes est identique.

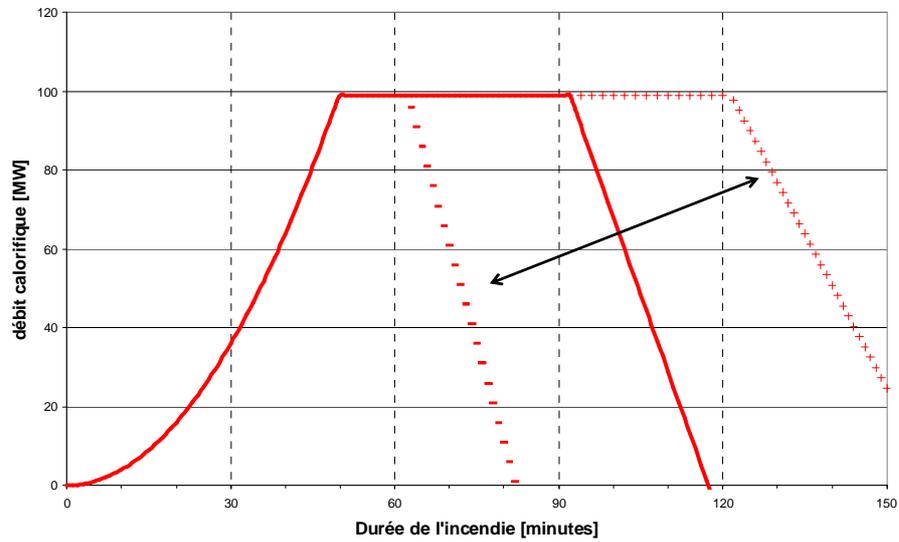


Figure 11: Courbe de puissance : illustration de l'influence de la charge thermique

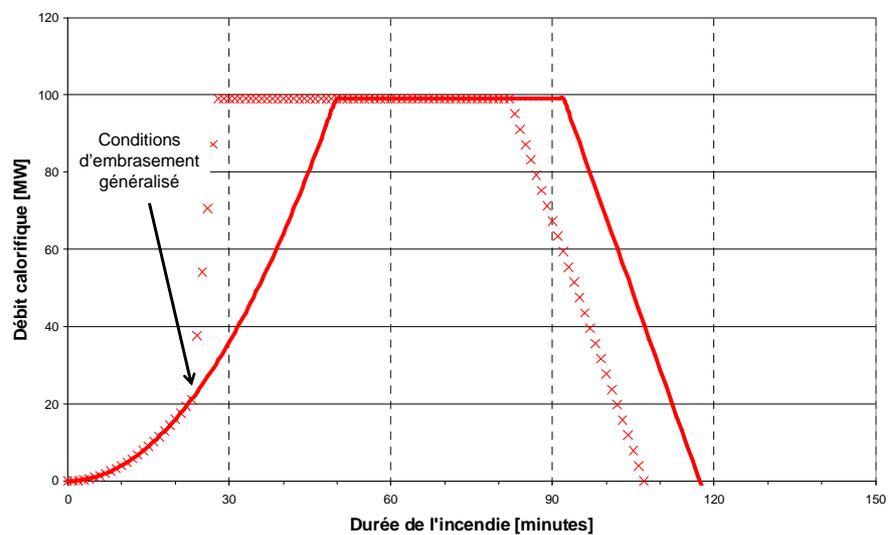


Figure 12 : Courbe de puissance : illustration de la transition brusque vers un incendie généralisé. La surface (énergie totale dégagée) sous les deux courbes est identique.

5.3.8 Feux localisés et généralisés

Le comportement global d'une structure porteuse sous l'effet d'un incendie doit être basé sur le champ de températures à proximité de la structure porteuse étudiée. Cette action thermique exercée sur l'ensemble (la globalité) du système porteur peut être évaluée à l'aide de valeurs moyennes, correspondant à la température de la couche de gaz chauds.

Cependant, les températures atteintes à proximité directe des flammes peuvent être sensiblement plus élevées que dans le reste du compartiment. En conséquence, la stabilité des éléments structurels critiques (structures primaires, piliers, voiles, etc...) doit être vérifiée ponctuellement, sur la base d'un calcul localisé de la température. Différents modèles numériques simplifiés existent, par exemple ceux donnés dans l'annexe C de la norme SN EN 1991-1-2 [4]).

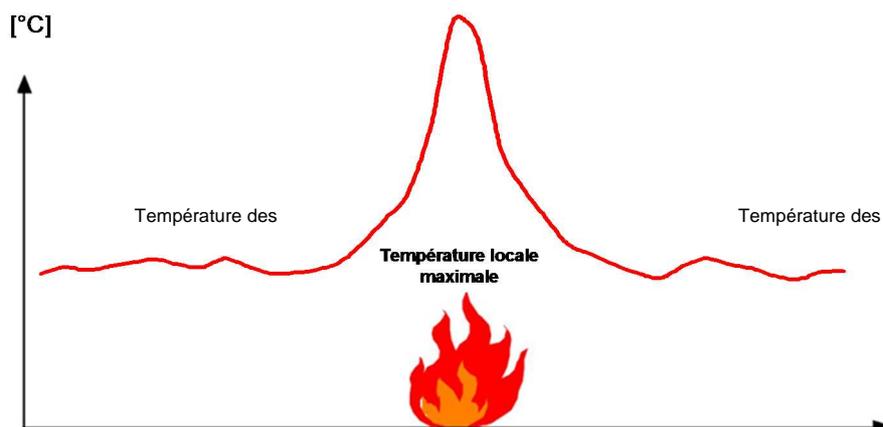


Figure 13 : Evaluation localisée des éléments structurels primaires

Pour les parkings aériens, on peut par exemple se baser sur le « Guide pour la vérification du comportement au feu des parcs de stationnement largement ventilés en superstructure métallique » [14].

6. Analyses thermique et mécanique

6.1. Analyse des effets thermiques

Le transfert thermique aux éléments de structure doit être calculé à partir de l'action thermique. A partir du champ de température dans la structure et de la combinaison des charges agissant sur la structure en cas d'incendie, le comportement au feu de cette dernière est analysé. Dans les deux cas, des modèles de complexité croissante peuvent être utilisés.

Il s'agit d'évaluer, selon les modèles décrits ci-après, si l'action thermique considérée peut provoquer l'effondrement (ruine) du système porteur, compte tenu des hypothèses formulées :

- Des modèles simplifiés pour une analyse par élément peuvent être appliqués. Généralement, ces modèles sont basés sur la notion de température critique. Si la température d'échauffement est inférieure à la température critique, la stabilité est garantie ; si la température d'échauffement est plus élevée que la température critique, la ruine est possible. Il s'agit d'un critère simple de « vrai ou faux » pour la stabilité au feu. L'objectif est atteint si le temps pour atteindre la ruine est supérieur à la durée d'exposition au feu naturel requise.
- Des modèles plus sophistiqués, basés par exemple sur des calculs aux éléments finis, peuvent être utilisés. Les résultats du modèle sont généralement exprimés en termes de résistance pendant la durée entière du feu. Dans certains cas, le critère de performance (destiné à mesurer à quel niveau les objectifs sont atteints) peut être donné en termes de déformation.

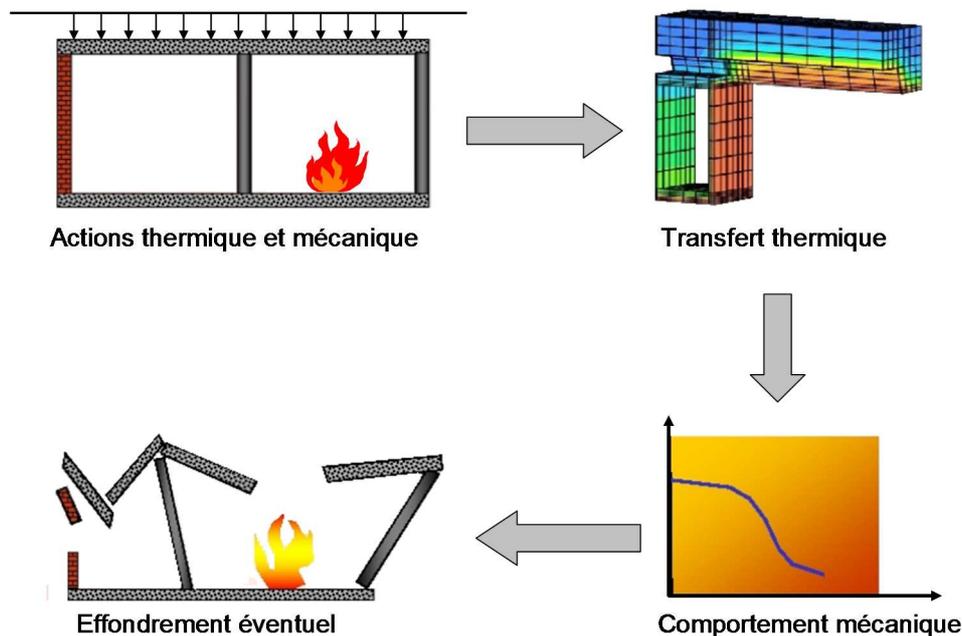


Figure 14 : Illustration de la démarche générale pour les analyses thermomécaniques [6]

6.2. Propagation de la chaleur dans les éléments

6.2.1. Principes généraux

Les calculs d'échauffement des éléments de structure doivent être basés sur les principes thermodynamiques classiques. Il convient notamment de citer les transferts de chaleur par convection (loi de Newton) et radiation (loi de Stefan-Boltzmann).

Les valeurs des constantes ou variables utilisées dans les formules sont à baser sur les valeurs des normes SIA, au besoin dans les Eurocodes. En cas de recours à une autre valeur, une justification est demandée.

6.2.2. Echauffement de sections droites

Le calcul de l'échauffement de sections droites simples (sections rectangulaires ou profilés métalliques par exemple) ou d'éléments linéaires en barres (poutres, colonnes) est à baser sur les formules disponibles (voir p.ex. [1], ou les normes SN EN 199x-1-2).

Pour toute autre forme de section, le recours au calcul par éléments finis est nécessaire. Les hypothèses de calcul doivent être clairement formulées dans le rapport.

6.2.3. Echauffement de plaques et de membranes

Pour le calcul de plaques et de dalles, le recours au calcul par éléments finis est nécessaire. Les hypothèses de calcul doivent être clairement formulées dans le rapport.

6.2.4. Echauffement d'éléments protégés

Dans le cas d'éléments protégés, les paramètres physiques utilisés pour les matériaux d'isolation doivent être consignés.

6.3. Calcul structural

6.3.1. Principes

L'évaluation du comportement mécanique en situation d'incendie des structures en acier et mixtes est à baser sur les règles de calcul des normes SIA et des Eurocodes. Il s'agit notamment de tenir compte de :

- Les charges mécaniques que peut subir une structure en situation d'incendie ;
- Les propriétés des matériaux aux températures élevées : relations contrainte-déformation, module de rigidité, résistance et dilatation thermique ;

- Les différentes possibilités d'analyse et leurs domaines d'application en relation avec non seulement les règles de calcul simplifiées, mais aussi avec les outils de calcul avancés (voir figure 1 de la norme SN EN 1991-1-2) ;
- Les points spécifiques, en particulier les dispositions constructives spéciales, la connexion des différents éléments de structure, etc. qui ne sont pas pris en compte directement par les règles de calcul au feu, mais qui doivent être traités afin d'assurer un niveau suffisant de sécurité incendie.

6.3.2. Cas de charges

Les structures considérées sont à contrôler selon une situation de chargement accidentelle conformément à la SIA 260, art. 4.4.3.5 [7].

La réduction des charges par les coefficients ψ_2 doit être déterminée de façon à ne pas considérer la future utilisation dans une situation figée non flexible (tout comme le choix de la charge thermique). Dans tous les cas, ces valeurs doivent être fixées dans la convention d'utilisation du bâtiment.

Selon le chiffre 4.2.2 de la norme SN EN 1991-1-2:2002 [4], en fonction des situations accidentelles qu'il faut faire intervenir dans le calcul, des actions additionnelles peuvent être nécessaires au cours de l'exposition au feu, par exemple un impact dû à l'effondrement d'éléments structuraux ou de matériel lourd.

6.3.3. Caractéristiques des matériaux

Pour le calcul structural, on considérera l'évolution des caractéristiques physiques des matériaux (p.ex. acier, béton) en fonction de leur échauffement ceci conformément aux normes SIA et aux Eurocodes:

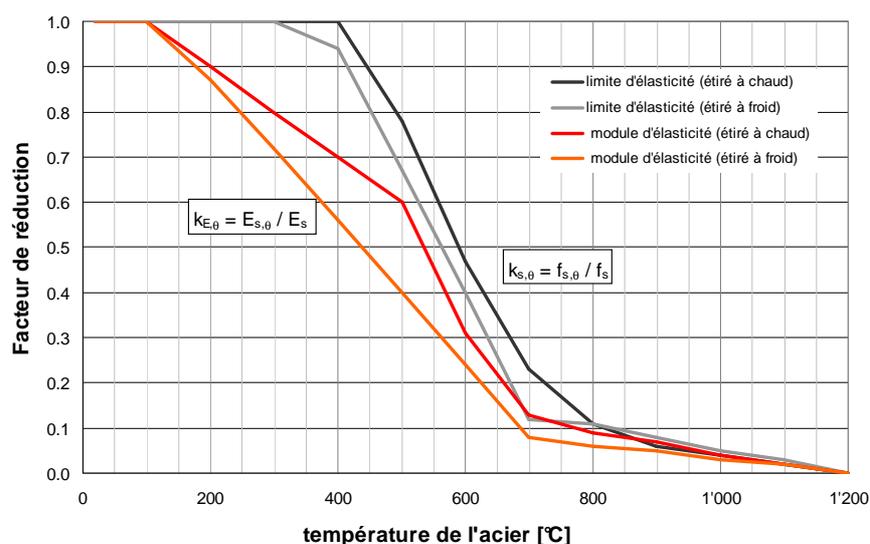


Figure 15 : Résistance de l'acier d'armature en fonction de la température [11]

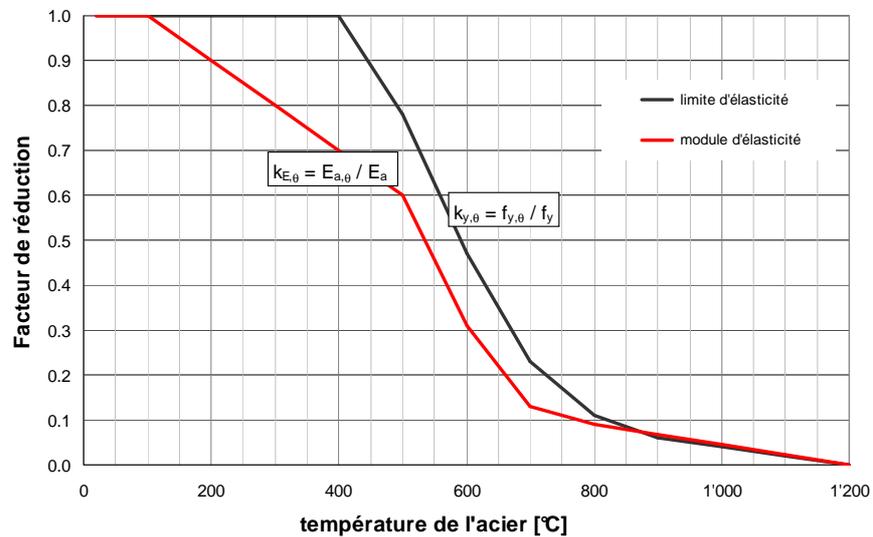


Figure 16 : Résistance de l'acier de construction en fonction de la température [12]

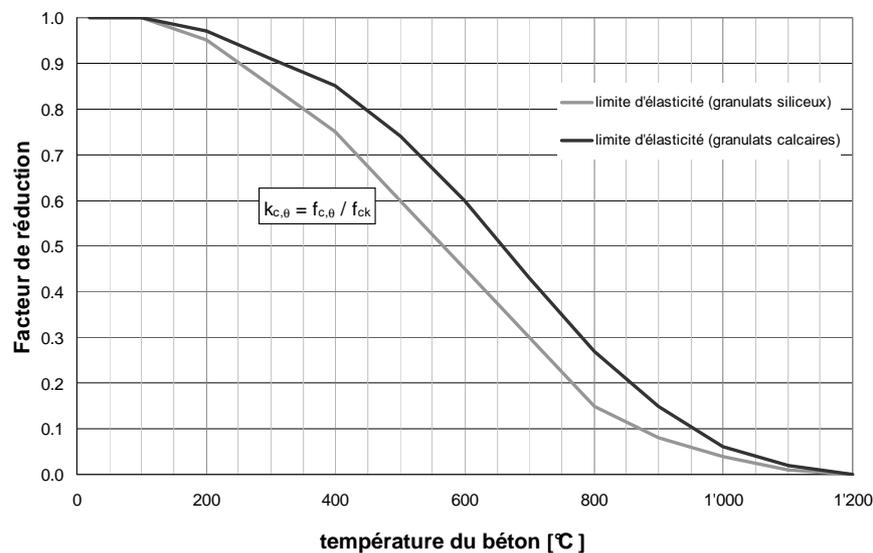


Figure 17 : Résistance du béton en fonction de la température [11]

6.4. Modèles de calcul

Le calcul du comportement mécanique de structures exposées au feu peut être réalisé selon l'une des trois approches suivantes:

- **Analyse par élément** : Chacun des éléments de la structure est vérifié en le considérant totalement séparé des autres éléments. La liaison avec d'autres éléments est remplacée par les conditions aux limites appropriées.
- **Analyse de parties de la structure** : Une partie de la structure est directement prise en compte en utilisant des conditions aux limites appropriées pour représenter sa liaison avec le reste de la structure.
- **Analyse globale de structures**: La structure totale est utilisée dans le calcul.

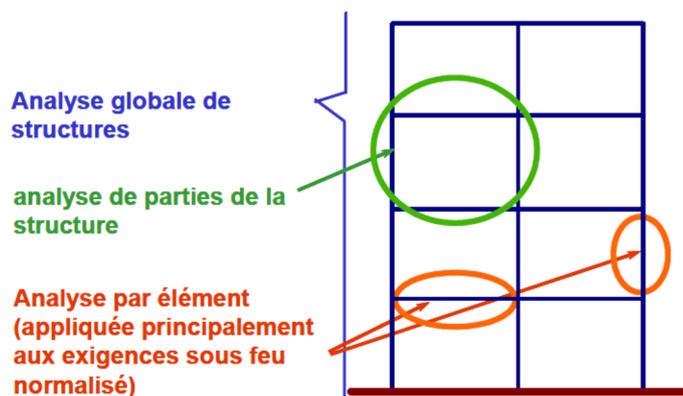


Figure 18 : Différentes approches pour le comportement mécanique des structures sous l'effet du feu [6]

En relation avec les 3 approches présentées ci-avant, trois méthodes de calcul distinctes peuvent être utilisées pour évaluer le comportement mécanique des structures en situation d'incendie :

1. **Diagrammes et valeurs tabulées**: ces méthodes sont établies sur la base de résultats d'essais au feu normalisé. Elles sont applicables aux structures béton ou mixtes acier-béton.
2. **Modèles de calcul simplifiés** : ce type de modèle de calcul peut être scindé en deux différentes familles :
 - a. Méthode de la température critique, largement appliquée aux éléments de structure en acier,
 - b. Méthodes de calcul simplifiées établies pour l'analyse par élément à la fois des structures en acier et des structures mixtes acier-béton.

3. **Modèles de calcul avancés** : ce type de modèle peut être appliqué en principe sur tout type de structure. Il est basé sur les lois physiques fondamentales, et doit permettre de calculer le développement / la distribution de température à l'intérieur d'éléments structuraux, ainsi que le comportement mécanique de la structure ou d'une partie de celle-ci.

Dans le cas de l'utilisation de scénarios de feu naturel, seules les deux dernières méthodes sont utilisables, étant donné que les valeurs tabulées sont le résultat d'essais en laboratoire sous feu normalisé.

Le choix de la méthode de calcul doit être adapté au type d'analyse effectué : par exemple, une analyse globale de la structure sous l'effet d'un feu normalisé ou naturel, ne peut être réalisée qu'à l'aide d'un modèle de calcul avancé.

Les tableaux 3 et 4, basés sur la norme SN EN 1991-1-2 [4], illustrent clairement les différentes possibilités d'application des trois méthodes de calcul, sous l'effet du feu normalisé ou d'un feu naturel :

Méthode de calcul / Type d'analyse	Valeurs tabulées	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Applicable	Applicable	Applicable
Analyse de parties de la structure	Non applicable	Applicable (si disponible)	Applicable
Analyse globale de la structure	Non applicable	Non applicable	Applicable

Tableau 3 : Domaine d'application des différentes méthodes de calcul en situation de feu normalisé

Méthode de calcul / Type d'analyse	Valeurs tabulées	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Non applicable	Applicable (si disponible)	Applicable
Analyse de parties de la structure	Non applicable	Non applicable	Applicable
Analyse globale de la structure	Non applicable	Non applicable	Applicable

Tableau 4 : Domaine d'application des différentes méthodes de calcul en situation de feu naturel

Il est notamment à relever que :

- Les valeurs tabulées ne peuvent servir qu'à l'analyse par élément, sous l'effet du feu normalisé ;
- Sous l'effet du feu normalisé, les modèles de calcul simplifiés peuvent servir à l'analyse par élément, et dans des cas limités, à une partie de la structure (p.ex. portiques métalliques simples) ;
- Sous condition de feu naturel, l'application des méthodes de calcul simplifiées est très limitée par le fait que la condition d'échauffement des éléments est totalement différente de celles sous condition de feu normalisé ;
- Les méthodes de calcul avancées s'appliquent à tout type d'analyse, en situation de feu normalisé ou naturel.

6.5. Critères de robustesse

La robustesse d'une structure peut être définie comme sa capacité à supporter des altérations de la résistance d'un ou plusieurs éléments, sans détérioration importante de la stabilité globale du bâtiment.

Dans une approche globale, il faut considérer l'ensemble des interactions entre éléments et sous-systèmes de structure. Dans ce contexte, il apparaît que certains éléments sont nécessaires et indispensables à la stabilité globale de l'ensemble du bâtiment, tandis que d'autres sont secondaires.

On peut distinguer ainsi deux catégories d'éléments porteurs :

- Eléments *principaux* : colonnes, murs et voiles porteurs, poutres principales de planchers, qui ne peuvent en aucun cas défaillir. La perte de résistance et les déformations induites ou imposées par un incendie **ne doivent en aucun cas provoquer leur défaillance**. Cela signifie p.ex. que le comportement mécanique de colonnes doit tenir compte des températures atteintes localement (« feu localisé »).
- Eléments *secondaires* : poutres secondaires de plancher, dalles sur sommiers, qui même s'ils subissent des déformations importantes, ne compromettent pas la stabilité globale de l'ouvrage. Dans le cas des planchers mixtes acier-béton, cela permet l'utilisation de l'effet membranaire.

7. Mise en œuvre et suivi du projet, réserves particulières

L'établissement d'une « convention sur l'affectation du bâtiment » (cf. directive AEA1 11-15 [10]) sur la base d'un dialogue entre le maître de l'ouvrage et les projeteurs est obligatoire (SIA 260, art. 2.2).

Ce document permet notamment de consigner par écrit les buts généraux de l'utilisation de la construction, le contexte et les exigences de tiers, les besoins de l'exploitation et de la maintenance, les objectifs particuliers du maître de l'ouvrage, les objectifs de protection et les risques spéciaux et des dispositions tirées des normes. Il est à rédiger au niveau de l'avant-projet et à confirmer lors du projet d'exécution.

L'application des méthodes de calcul avancées est réservée à des ingénieurs diplômés et qualifiés (DPI 27-15, art. 7.4). L'autorité se réserve le droit de demander les documents justificatifs nécessaires, ainsi que de demander un avis externe sur une étude réalisée.

Dans le cas où des modifications sont apportées à la construction de l'ouvrage, ou lorsque des changements surviennent dans l'activité, l'occupation ou la quantité de combustible, ou lorsque des travaux de rénovation ou de remaniement sont jugés significatifs, il convient que la satisfaction aux objectifs de protection soit réévaluée et que la documentation soit mise à jour en conséquence. Des assainissements peuvent s'avérer nécessaires.

Même après la mise en œuvre du projet, le processus d'ingénierie de la sécurité incendie se poursuit par des contrôles périodiques et des procédures de gestion continue de la sécurité incendie (DPI 11-15).

Annexe A : Bibliographie

- [1] Steeldoc tec 02/2015 *Protection incendie des structures*, Centre suisse de la construction métallique (SZS), 2015
- [2] ISO 23932, *Ingénierie de la sécurité incendie – Principes généraux*, 2009
- [3] ISO 834-1, *Essai de résistance au feu – Éléments de construction – Partie 1: Exigences générales*, 1999
- [4] SN EN 1991-1-2, *Eurocode 1 : Action sur les structures, Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu*, 2002
- [5] SN EN 1363-1, *Essais de résistance au feu – Partie 1: Exigences générales*, 2013
- [6] Projet DiFiSek, *Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge*, Commission Européenne, 2008
- [7] SIA 260, *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*, 2013
- [8] Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie und Gewerbebauten – Köhler, Klein et Fontana, 2006
- [9] ISO/TR 13387-2, *Ingénierie de la sécurité contre l'incendie – Partie 2: Conception des scénarios-incendie et des feux*, 1999
- [10] Directive 11-15 Assurance qualité en protection incendie – AEAI 2015, révision 2017
- [11] SN EN 1992-1-2, *Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-2: Règles générales - Calcul du comportement au feu*, 2004
- [12] SN EN 1993-1-2, *Eurocode 3 – Calcul des structures en acier, Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu*, 2005
- [13] ITM-SST 1551.1 – *Instruction technique – Etude de stabilité au feu à l'aide d'une approche performancielle – Service incendie et ambulance de la Ville de Luxembourg*
- [14] *Guide pour la vérification du comportement au feu des parcs de stationnement largement ventilés en superstructure métallique* » (CTICM, 2014)

Annexe B : Définitions

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.

Analyse partielle ou globale d'une structure (en cas d'incendie) : Analyse thermique et mécanique d'un bâtiment dont les éléments structuraux, ou une partie de ceux-ci, sont exposés au feu. Les actions indirectes (effets de la dilatation ou ruine partielle de certains éléments) du feu sont prises en compte, afin de vérifier la stabilité partielle ou globale du bâtiment considéré.

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.

Analyse mécanique : Comportement mécanique de la structure exposée à l'incendie, sous l'effet des actions et combinaisons d'actions à prendre en compte.

Courbe de feu normalisée : Courbe normalisée [3, 5], couramment appelée « feu ISO », décrivant un développement de la température en fonction du temps, utilisée pour évaluer la performance de parties de construction exposées à un incendie développé. Cette courbe permet de représenter l'action thermique d'une manière simplifiée.

Courbe de puissance : Courbe décrivant l'évolution du débit calorifique en fonction du temps, selon un scénario d'incendie défini. La désignation courbe « HRR », de l'anglais « Heat Release Rate », est fréquemment utilisée.

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.

Incendie naturel : Les désignations « calcul selon l'incendie naturel », « calcul au feu réel », « calcul avec des modèles de feu naturel » et « calcul dans des conditions d'incendie naturel » ont un sens équivalent. Elles se réfèrent à des calculs d'effets thermiques d'un incendie dans un ouvrage, en tenant notamment compte de la charge thermique, des conditions de ventilation, de la forme et taille de l'enceinte ainsi que des propriétés thermiques de celle-ci.

Résistance au feu : Aptitude d'une structure, d'une partie de structure ou d'un élément de structure (parties de construction) à remplir les fonctions exigées (fonction porteuse ou séparative) pour un niveau de chargement, une exposition au feu et une durée donnés.

Système porteur : Ensemble des parties de construction et assemblages nécessaires pour supporter et répartir les charges ainsi que pour assurer la stabilité.

Température critique : température à laquelle un élément soumis à un incendie et sollicité par un effort externe perd totalement sa capacité portante. C'est aussi le moment où la réserve de résistance disponible en cas accidentel, avec des charges réduites (par rapport à la situation « normale »), est épuisée.

Annexe C Documents à fournir

La note de calcul d'une étude relative au comportement de systèmes porteurs sous l'effet de l'incendie doit être documentée dans un rapport contenant les renseignements suivants:

Données à fournir

- *Descriptifs de la structure considérée*
 - Principe général de stabilité
 - Vues en plan et en élévation des éléments de structure
 - Indication des charges : poids propre de la structure, des charges permanentes et utiles, vent, neige, ...
 - Indication des systèmes statiques utilisés pour la vérification de la structure à froid
 - Définition de caractéristiques mécaniques de matériaux utilisés pour les éléments de la structure (nuance de l'acier par ex. S355JR, classe du béton par ex. C30/37...)

- *Définition des compartiments au feu et des cellules étudiés (plans, surface, caractéristiques de parois et des portes)*
 - Plans de protection incendie définissant le compartimentage coupe-feu
 - Indication des surfaces des compartiments
 - Indication des REI des murs et cloisons ainsi que des portes sur les vues en plan de chaque étage
 - Indication des REI des planchers
 - Indication des parties de façades permettant d'éviter la propagation du feu d'un compartiment à l'autre

- *Définition des ouvertures*
 - Systèmes d'évacuation de fumée et de chaleur par ventilation mécanique ou naturelle (surface utile des ouvertures pour ventilation naturelle, débit m³/heure par ventilation mécanique, température de déclenchement, surface utile des amenées d'air frais, attestation de conformité pour le fonctionnement à haute température)
 - Caractéristiques des portes et cloisons (spécifications du degré de résistance au feu; si pas de résistance au feu, nature des cloisons)
 - Définition des surfaces vitrées (spécifications du degré de résistance au feu et au choc; en absence de spécifications, nature des vitrages et des châssis ; voir catégories §5.3.3)

- *Données relatives au feu*
 - Densité de charge calorifique (q_f) pour chaque compartiment
 - Débit calorifique maximal (RHR_f) pour chaque compartiment
 - Vitesse de propagation (t_α) pour chaque compartiment

- *Descriptif des modèles de feu utilisés*
 - Description du feu considéré (feu généralisé et/ou feu localisé) et mention des modèles utilisés pour calculer les courbes d'échauffement (ex. modèle à deux zones, méthodes analytiques de l'Eurocode pour le feu localisé, computational fluid dynamic,...)
 - Conditions limites considérés pour le calcul du feu généralisé (conditions de ventilation, conditions aux limites du compartiment)
 - Tailles et positions des foyers pour les feux localisés, avec justification des positions choisies
 - Critères définissant le passage d'un feu localisé à feu généralisé

- *Descriptifs des mesures actives de lutte contre le feu*
 - Sprinklers

Résultats à fournir

Résumé des compartiments étudiés ainsi que des scénarios pour chaque compartiment et pour chaque scénario considéré:

- *Evolution du feu*
 - Pour chaque compartiment et pour chaque scénario considéré, courbe du débit calorifique total du feu en fonction du temps pendant toute la durée de l'incendie jusqu'à extinction ; explications physiques des changements brusques de cette courbe (Flashover, bris de vitrages, ouverture automatique, compartiment complètement en feu, ...)
- *Champ de températures*
 - Pour chaque compartiment et pour chaque scénario considéré, évolution de la température de l'air pendant toute la durée de l'incendie jusqu'à extinction. Plusieurs points d'intérêts sont à considérer (ex. température de la couche chaude et de la couche froide pour feu généralisé avec modèle a deux zones, pour feu localisé température a différents distance du foyer)
 - Evolution de la température dans la structure pour le(s) scénario(s) le(s) plus défavorable(s). Plusieurs points d'intérêts sont à considérer (ex. pour une poutre en béton armé, température superficielle, des barres acier, dans différents point dans la section)
- *Descriptif des méthodes de calcul utilisées*
 - Descriptif du modèle statique utilisé pour la vérification de la structure. Si le modèle est différent du modèle utilisé pour la vérification à température ambiante, justification des hypothèses prises pour le calcul au feu
 - Justification de la stabilité globale de la structure lors de l'incendie d'après la stratégie de vérification au feu choisi
- *Comportement de la structure*
 - Vérification de la structure porteuse, en considérant des éléments simples, des parties de la structure ou la structure entière. La résistance au feu doit être garantie en conformité avec l'article 6 de ce document.
 - Si on ne considère pas la structure dans son ensemble, l'éventuelle interaction entre les éléments ou des parties de structure considérée dans le calcul au feu et le reste de la structure doit être impérativement prise en compte. Les conditions d'appuis, l'influence de la dilatation thermique, de la modification de rigidité, de la déformation des éléments adjacents doit être analysée. Cette interaction peut être négligée dans le cas où elle aura un effet favorable.
 - Justification des détails constructifs de la structure si déterminants (ex. assemblages) pour la résistance au feu requise et en conformité avec le comportement prévu. Prise en compte de l'écaillage (ou non) du béton dans une structure en béton armé (SIA 262, SN EN 1992-1-2 et publication SIA).
- *Conclusions*
 - Atteinte ou non des objectifs
 - Mesures à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs