



Strassen, septembre 2012

Le présent texte a été établi par l'Inspection du travail et des mines et le Service Incendie et Ambulance de la Ville de Luxembourg.

ITM-SST 1551.1

Prescriptions de sécurité incendie

INSTRUCTION TECHNIQUE

Etude de stabilité au feu à l'aide d'une approche performancielle

Le présent document comporte 48 pages

SOMMAIRE

Article		Page
1)	Introduction sur les approches par le calcul	2
2)	Prescriptions réglementaires	3
3)	Analyse quantitative des risques, scénarios d'incendie	4
4)	Détermination des courbes d'échauffement (EN1991-1-2 avec AN-LU)	11
5)	Dimensionnement de la structure portante pour les différents matériaux de construction usuels, (Eurocodes - annexes nationales)	16
6)	Procédure de validation et de contrôle	27
7)	Organisme agréé pour le contrôle des calculs au feu	29
8)	Transposition des hypothèses de dimensionnement et des résultats de calcul dans les documents d'exécution et d'exploitation	30
9)	Analyse des risques restants lors de l'intervention	30
Annexe I	Paramètres de calculs à considérer	33
Annexe II	Modèle de calcul au feu naturel	44
Annexe III	Méthode de détermination des charges au feu caractéristiques.	47

Art. 1 Introduction sur les approches par le calcul

Deux approches existent pour estimer l'action thermique à considérer pour vérifier la stabilité au feu d'une construction :

1. Feu nominal (approche prescriptive) : l'action thermique est définie par la courbe standard température/temps selon la norme internationale ISO 834
2. Feu naturel (approche performancielle) : l'action thermique est donnée par des scénarios d'incendie réel qui dépendent du type de bâtiment et de son exploitation.

En plus de l'action thermique, la façon d'appréhender la structure se divise en 2 catégories :

1. Soit un seul élément est vérifié, extrait de son contexte structurel et de l'interaction avec les éléments voisins, comme c'est le cas pour un essai au feu conventionnel.
2. Soit plusieurs éléments de structure ou même la structure dans son entièreté sont étudiés

Ces 2 approches concernant l'analyse structurelle sont résumées sur la Figure 1 ci-dessous.

Le présent document avec les méthodes de calcul suggérées traite exclusivement de l'approche performancielle, appelée également « Actions thermiques physiquement fondées » dans le schéma ci-dessous de la Figure 2 extraite des Eurocodes.

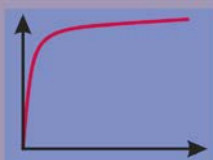
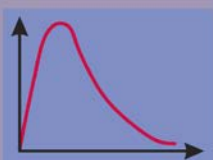

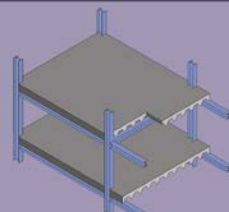
Stabilité au feu d'une structure		
Approche	Prescriptive	Performancielle
Structure	<p>Courbe ISO 834</p> 	<p>Feu Naturel</p> 
	Classification	Ingénierie
	Ingénierie	Ingénierie

Figure 1 : Approche prescriptive et performancielle (EN 1991-1-2 avec AN-LU)

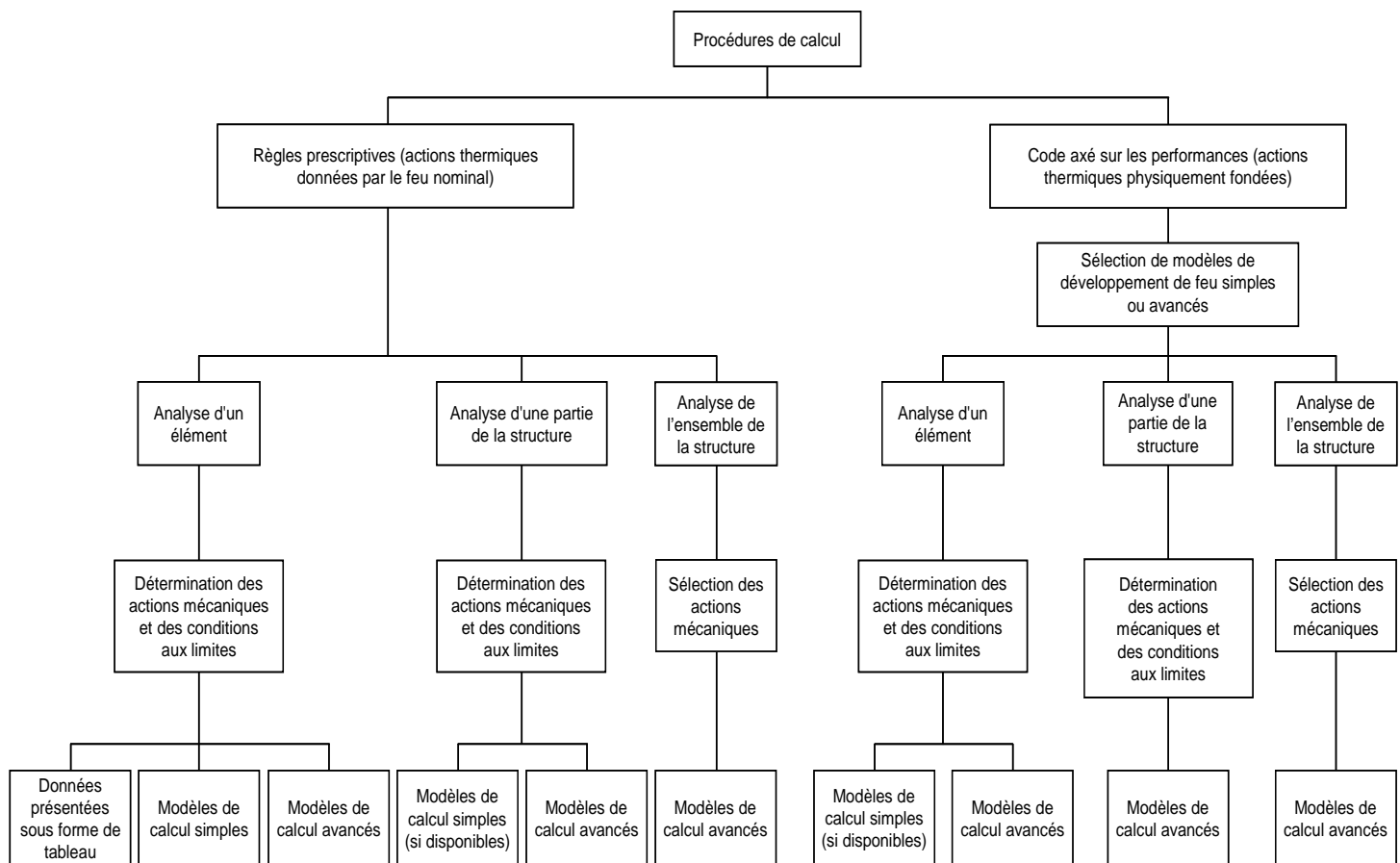


Figure 2 : Procédures de calcul

Art. 2 Prescriptions réglementaires

2.1. Hypothèses de base

Même si le contexte général et les notions de sécurité au feu sont semblables en Europe et même si la caractérisation au feu des produits de construction est régie par une directive européenne, les exigences relatives aux ouvrages ne sont pas homogènes car relevant dans chaque cas de l'autorité nationale. Néanmoins les réglementations des pays européens et du Luxembourg en particulier définissent des exigences dont le niveau varie principalement selon le type de bâtiment (hauteur, nombre de niveaux, taille des compartiments, bâtiment isolé au non,...) et son utilisation (nombre d'occupants, type d'activité, occupé la nuit ou pas, locaux à risque, ...). Le niveau d'exigence est en fait fonction d'un temps d'évacuation estimé et des conséquences en cas de ruine.

En matière de résistance, les exigences R30, R60, R90, R120, R180 et R240 ont été définies dans le passé à une époque où l'approche prescriptive était la seule voie.

2.2. Adaptation en cas d'approche performancielle

En cas d'utilisation d'une approche performancielle, les exigences doivent être fixées sur base d'une étude de risque définissant le temps d'évacuation des occupants et le temps nécessaire pour l'intervention des services de secours dans des conditions acceptables.

Dans ce cas, une étude du comportement du bâtiment jusqu'au refroidissement complet de la structure est à réaliser (exigence standard). La résistance au feu de la structure y compris ses assemblages est à démontrer jusqu'au refroidissement complet en tenant compte des mesures de protection actives (par exemple désenfumage, sprinkler, détection incendie). Néanmoins pour certains types de bâtiments et d'exploitation, cette exigence standard peut être allégée ou renforcée (voir article 9).

Dans tous les cas, l'approbation sera donnée suivant la procédure de validation de l'article 6, au vu des résultats de cette étude et des risques restants comme par exemple :

- les modes de ruine probables y compris les effets du second ordre,
- les effets de ruines d'éléments secondaires,
- les possibilités de défaillance des mesures de protection passives (portes et volets coupe-feu,...)
- les possibilités de défaillance des mesures de protection actives,
- des changements d'exploitation ou d'affectation, etc.

Cette analyse des risques restants sera réalisée suivant les profils de risque définis dans l'article 9 du document ITM-SST 1551.

De plus, quelle que soit l'approche considérée, l'influence du comportement de la structure dans le compartiment soumis au feu sur le compartimentage (compartiments voisins, parois du compartiment) et sur les issues (cages d'escalier, portes, ...) devra être analysée.

Art. 3 Analyse quantitative des risques, Scénarios d'incendie

Le bâtiment est divisé en compartiments délimités par des parois satisfaisant aux exigences EI 30, 60, 90 ou 120. La taille maximale des compartiments et le niveau de performance EI est donnée dans les conditions types ITM y relatives. L'incendie est supposé affecter un seul compartiment à la fois.

Lors de la détermination de la résistance au feu des parois de compartiment, il est tenu compte de la stabilité générale du bâtiment et de l'influence des éléments structurels sur la paroi. De plus il est tenu compte des dilatations et des déformations des éléments structurels dues à l'incendie. Dans le cas particulier où une paroi de compartiment fait partie de la structure portante, le critère R de résistance au feu peut être vérifié par l'approche performancielle.

Connaissant la disposition de ces compartiments et les éléments de structures qui s'y trouvent, différents scénarios seront analysés afin de couvrir les situations les plus critiques (éléments chauffés, taux de chargement, effet des dilatations thermiques,...). Ainsi dans le cas d'une colonne d'un bâtiment multi-étagé soumise seulement aux actions verticales, le compartiment du rez-de-chaussée doit évidemment être analysé mais également les compartiments situés aux étages supérieurs lorsque la section de la colonne est modifiée. En fait chaque élément structurel d'une section transversale donnée doit être étudié dans sa zone de sollicitation mécanique maximale, mais aussi dans sa zone de sollicitation thermique maximale.

3.1. Développement du feu : courbe ISO (Approche prescriptive)

Dans le compartiment incendié, l'embrasement est supposé généralisé ; l'échauffement des gaz chauds est uniforme et suit la courbe ISO. Aucune donnée n'est nécessaire pour déterminer le développement du feu.

3.2. Développement du feu : feu naturel (Approche performancielle)

Contrairement au calcul conventionnel, l'approche performancielle de la sécurité incendie se base sur les scénarios possibles de feu. Chaque scénario décrit l'évolution d'un feu en fonction des paramètres physiques qui le caractérisent comme la charge calorifique, la taille du foyer, sa position, la vitesse de propagation, le débit calorifique maximal, les conditions de ventilation, les caractéristiques thermiques des parois du compartiment, les mesures actives de lutte contre le feu et la probabilité d'occurrence du feu (voir EN 1991-1-2 avec AN-LU). Ces paramètres physiques doivent être choisis pour être représentatifs des scénarios les plus défavorables.

La Figure 3 montre la comparaison entre les échauffements mesurés lors d'essais d'incendie concernant différentes configurations (taille du compartiment, charge calorifique, isolation des murs, caractéristiques du combustible, ...) et la courbe conventionnelle ISO 838. Elle démontre que la courbe normalisée ne correspond pas au développement d'un incendie réel.

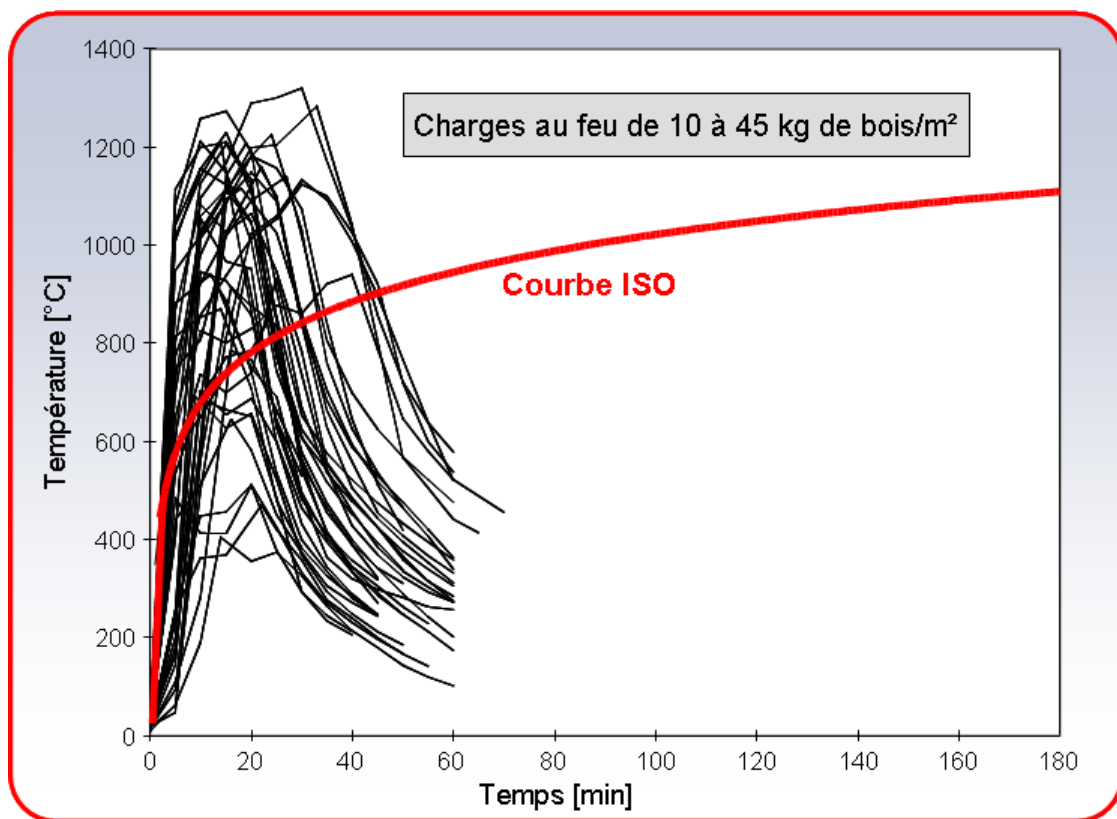


Figure 3 : Courbe conventionnelle température-temps comparée à des résultats de feux réels en laboratoire.

La figure 4 montre les cinq phases d'un feu réel :

1. Une phase de commencement ou phase couvante : feu couvant à très basse température avec une durée souvent difficile à estimer. Elle est caractérisée par une variété de phénomènes de combustion qui peuvent donner un feu qui brûle lentement (c'est-à-dire sans la présence de flammes ou de feu bien apparent => feu couvant), ou qui présente de très petites flammes peu visibles ou qui présente un caractère d'incandescence. Cette phase n'est pas montrée sur la Figure 4.

2. Une phase de croissance et de développement appelée « pré-flashover » (feu localisé) : elle couvre la période de la propagation du feu jusqu'à éventuellement le « flashover » ou l'embrassement de tout le compartiment; la durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment et des matières combustibles.
3. Le «flashover » est la transition entre le feu localisé et l'embrassement généralisé dû à une inflammation spontanée des gaz combustibles, dès que par exemple la température des gaz de la couche de fumée atteint une valeur suffisamment élevée.
4. 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.
5. Une phase décroissante : le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé et plus aucune énergie ne soit libérée par le foyer ; l'activité de l'incendie s'estompe tout simplement (extinction).

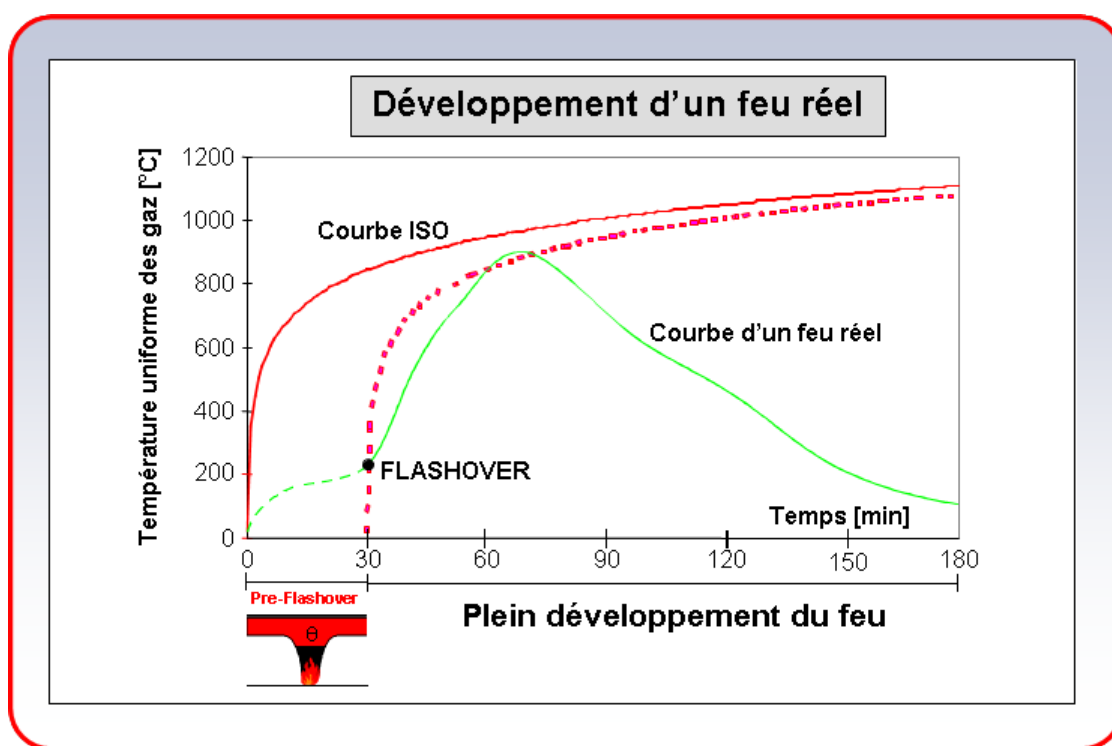


Figure 4 : Les différentes phases de développement d'un incendie réel.

3.1.1. Charge calorifique Q_{fi} (Fire load)

La charge calorifique de matériaux combustibles dans une zone est la charge au feu ou encore la quantité totale de chaleur que peut dégager l'ensemble des combustibles présents dans un espace déterminé dans des conditions d'incendie réelles.

La charge calorifique donne l'énergie totale disponible dans le compartiment [MJ]. La densité de charge calorifique q_f [MJ / m²] est la charge calorifique par m² de plancher.

Pour les bâtiments tels que appartement, hôpital, hôtel, bibliothèque, bureau, école, centre commercial, théâtre, cinéma, espace public dans les gare ou aéroport, la densité de charge au feu caractéristique est donnée dans le tableau E.4 de l'EN1991-1-2.

En cas de bâtiment non couvert par ce tableau ou moyennant justification particulière, la charge calorifique peut être estimée pour l'industrie en utilisant le tableau 1 de l'annexe 1.

Une alternative consiste à inventorier l'ensemble des matériaux combustibles dans le compartiment et à en déduire la charge calorifique en appliquant l'équation (E. 2) et le tableau E.3 de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU. Le tableau 3 de l'annexe 1 peut également être utilisé lorsque le tableau E.3 ne contient pas les informations nécessaires.

3.1.2. Densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$ (Design fire load)

La densité de charge calorifique de calcul $[q_{f,d}]$ [MJ/m²] est la densité caractéristique de charge calorifique multipliée par les coefficients majorateurs et/ou minorateurs afin d'obtenir la valeur à utiliser dans les calculs pour obtenir la sécurité voulue (Voir équation (E. 1) de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU).

3.1.3. Débit calorifique maximal par unite de surface RHRf (Rate of Heat Release)

La vitesse à laquelle la charge au feu va se consumer est fonction du débit calorifique maximal $[RHR_f]$ en [kW/m²] (voir EN 1991-1-2 avec AN-LU (tableau E.5)) et de la vitesse de développement du feu (Voir 3.2.4).

Pour les bâtiments tels que appartement, hôpital, hôtel, bureau, école, centre commercial, espace public dans les gares ou aéroport, le débit calorifique par m² est de 250 kW/m² et de 500 kW/m² pour les théâtres, cinémas, bibliothèques et halls d'exposition. Le débit calorifique total est la taille du foyer multiplié par cette valeur. Pour d'autres types de bâtiment, voir les valeurs du débit calorifique donné dans le tableau 2 de l'annexe 1.

Ces valeurs sécuritaires de débit calorifique peuvent être différentes des valeurs adoptées pour le calcul de dimensionnement des installations d'évacuation des fumées.

3.1.4. Taille du foyer et vitesse de propagation.

Le feu démarre en général comme un feu localisé. En phase de pre-flashover, la surface du feu augmente selon une équation parabolique (équation (E.5) de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU) dépendant d'un paramètre t_α (150, 300 ou 600 secondes) qui donne le temps après lequel le débit calorifique atteint 1 MW (tableau E.5 de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU) (Voir figure 5).

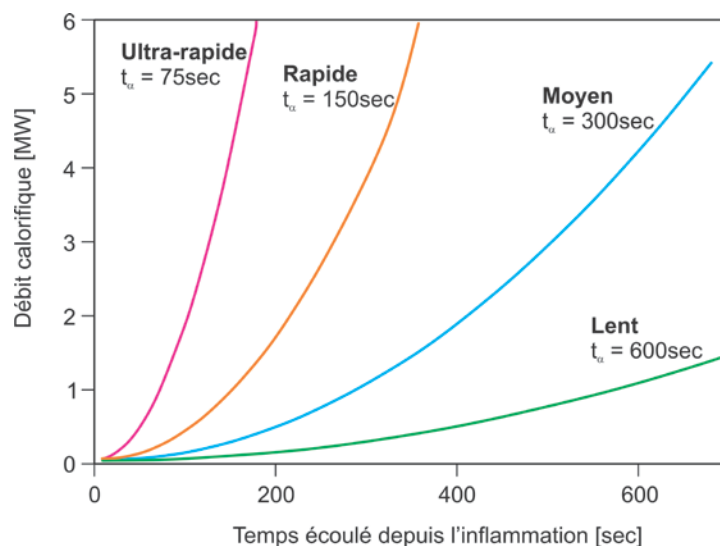


Figure 5: Débit calorifique des incendies $Q [W] = 10^6 (t / t_\alpha)^2$

Tant qu'il y a suffisamment d'oxygène dans le compartiment, l'augmentation de la taille du foyer est représentée par cette équation jusqu'à atteindre la surface totale du compartiment en cas de charge au feu répartie. Toutefois, dans certains cas où la charge au feu est suffisamment isolée, la taille maximale du foyer peut être limitée à la surface couverte par cette charge au feu isolée.

Si l'oxygène dans le compartiment est totalement consommé, le feu est dit contrôlé par la ventilation; la taille du foyer et par conséquent le débit calorifique sont limités en conséquence. Cette prise en compte de l'oxygène peut se faire par l'équation simplifiée (E.6) ou le chapitre 3.3.2 de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU, correspondant aux modèles avancés tels que Ozone ou similaire.

En cas de flash-over, la taille du foyer atteint instantanément la totalité du compartiment en cas de charge au feu assez bien répartie.

Pour certaines configurations, le flash-over n'est pas possible et on se base alors sur des feux localisés (voir EN 1991-1-2 avec AN-LU : Annexe C). Il y a absence de risque d'embrassement général notamment dans les cas décrits dans le complément non contradictoire de la règle 3.3.1.3(1) NOTE de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU.

Des scénarios de feu localisé doivent toujours être évalués.

3.1.5. Position du foyer

Les positions du foyer à considérer dans les calculs sont celles qui conduisent aux effets les plus défavorables. Elles dépendent de 3 types de paramètres :

- Les facteurs influençant le développement du feu (charge au feu, ventilation, taille du compartiment ou du local,...)
- La structure influencée par le foyer (type de structure, taux de chargement, ...)
- La position du foyer par rapport aux éléments de structure (feu localisé à mi-portée d'une poutre, feu localisé au pied d'un poteau, etc.).

3.1.6. Conditions de ventilation

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 de gaz chauds; sinon, elle provoque une réduction. La température menant au bris des vitrages non-résistants au feu est généralement comprise entre 100 et 500°C dépendant 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 à ce sujet, 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:

- Scénario 1 : 90% de la surface des vitrages est considéré comme ouverture dès le début de l'incendie. Ce scénario couvre notamment le bris de vitrages volontaire causé par l'intervention des services d'incendie et de sauvetage.
- Scénario 2 :
 - Simple vitrage : A 100°C, 50% de la surface des simples vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 250°C, 90% de la surface des vitrages exposés à cette température est considéré comme ouverture.
 - Double vitrage : A 200°C, 50% de la surface des doubles vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 400 °C, 90% de la surface des vitrages exposés à cette température est considéré comme 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 à cette température est considéré comme ouverture.

Si les vitrages ont une fonction de résistance au choc ou de résistance au feu, les températures de référence de 100 à 500 C° prévues dans le scénario 2 pour leur éclatement doivent être remplacées par les caractéristiques de ces vitrages et de leur châssis à déclarer par le fournisseur.

L'ensemble des vitrages présents dans le compartiment ou dans le local en feu sont à considérer.

Lorsque la ventilation est mise en route pour des fonctions d'aide au désenfumage, il faut en tenir compte lors de la détermination de la courbe d'échauffement dans le compartiment en feu. Sinon, la ventilation mécanique est à arrêter dans le compartiment en feu et de préférence dans tout le bâtiment.

3.1.7. Caractéristiques thermiques des parois du compartiment

La résistance au feu d'une paroi justifiée par un classement EI est évaluée sur base de la courbe ISO suivant la réglementation européenne (Directive 89/106/CEE : produits de construction). Une paroi réalisée sur chantier par la combinaison d'éléments résistants et d'éléments isolants peut par contre être vérifiée par calcul suivant l'approche du feu naturel. Les performances de résistance des parois verticales et des portes du compartiment doivent tenir compte des effets du second ordre provoqués par les gradients thermiques.

Dans un compartiment il peut y avoir des locaux dont les parois doivent également justifier un classement (locaux techniques, archives, cuisine, etc) qui forment des compartiments secondaires ainsi que des locaux sans exigences EI particulières mais qui peuvent néanmoins présenter une certaine résistance au feu. L'étude vérifiera si le feu dans un de ces locaux n'est pas plus défavorable que le feu dans le compartiment principal pour les éléments de structure traversant ces locaux.

3.1.8. Mesures actives de lutte contre le feu et probabilité d'occurrence du feu.

Le concept de sécurité des Eurocodes est basé sur un concept semi-probabiliste qui a conduit aux coefficients de sécurité sur les matériaux et aux coefficients majorateurs des charges. Sur base de ce principe, des coefficients majorateurs et minorateurs de la charge au feu ont été mis au point pour quantifier le risque d'incendie en fonction du type d'activité, de la taille du compartiment et de l'effet bénéfique des mesures actives de lutte contre le feu (Voir équation (E.1) de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU).

Probabilité d'occurrence du feu.

Des coefficients traduisent respectivement le risque en fonction de la taille du compartiment et du type d'activité (voir tableau E.1)

Mesures actives de lutte contre le feu

Des coefficients traduisent la réduction ou l'accroissement du risque de développement d'un incendie en fonction respectivement de la présence ou de l'absence de certaines mesures actives telles que sprinklers, approvisionnements en eau indépendants, détection automatique par la chaleur et/ou par la fumée, transmission automatique de l'alarme aux pompiers, pompiers d'entreprises, voies d'accès sécurisées (e.g. cages d'escalier pressurisées), équipements de lutte contre le feu et systèmes de désenfumage dans les escaliers (voir tableau E.2).

Toutes les valeurs numériques du tableau E.2 sont à utiliser à l'exception de celle du coefficient δ_{n7} , correspondant à l'intervention des pompiers hors site c'est-à-dire des services d'incendie volontaires ou professionnels, dont la valeur est à prendre comme $\delta_{n7} = 1,0$.

3.1.9. Scénarios d'incendie.

Etant donné que le nombre de scénarios incendie dans un bâtiment peut devenir très élevé (ou même infiniment élevé), ni les données, ni les ressources sont disponibles pour atteindre la quantification de tous ces scénarios. Ainsi, l'analyse détaillée et la quantification des scénarios d'incendie pour un bâtiment spécifique, devront toutefois se limiter aux scénarios, les plus révélateurs.

La caractérisation d'un scénario incendie aux fins d'une analyse, devrait contenir une description des éléments suivants:

- type, taille et lieu / endroit des sources d'allumage ;
- répartition et type de combustible ;
- densité de la charge calorifique ;
- type de feu ;
- conditions de ventilation internes ;
- conditions de ventilation externes ;
- état des portes ;
- rupture / cassure des fenêtres ;
- système de ventilation au niveau du bâtiment.
- performance de chacune des mesures de sécurité ;
- suppression du feu ;

Seuls les scénarios d'incendie réalistes les plus défavorables seront étudiés. Le choix de ces scénarios dépend de cas en cas. Néanmoins l'approche générale suivante peut servir de base pour les cas les plus courants. Elle devra être adaptée pour des configurations plus spécifiques.

La première étape consiste à déterminer les différents compartiments au feu du bâtiment. Par compartiment au feu, on considère les compartiments limités par des parois certifiées par un classement EI. Chaque compartiment devra être analysé. L'incendie est supposé affecter un seul compartiment à la fois. En plus, à l'intérieur de ces compartiments, des scénarios considérant des espaces confinés par des murs sans exigences EI particulières mais présentant néanmoins une certaine résistance au feu seront éventuellement aussi pris en compte (voir 3.2.7).

Pour chaque compartiments, les données décrivant les caractéristiques du foyer, sa position et sa vitesse de propagation (3.2.1 à 3.2.5) ainsi que les conditions (ventilation, parois, mesures actives) influençant son développement (3.2.6 à 3.2.8) sont à inventorier.

Généralement, le feu conduira à un flash-over. La courbe de température uniforme après flash-over est obtenue par des modèles (Voir 4.3) qui utilisent comme donnée la charge au feu de calcul et qui détermine la courbe de calcul de dégagement de chaleur en fonction des conditions de ventilation. La position du foyer initial n'influence généralement pas la courbe de température lors d'un feu généralisé, ce qui limite le nombre de scénarios.

Avant le flash-over, le feu est localisé. Des modèles spécifiques pour cette phase (Voir 4.2) sont à utiliser. La position du foyer et sa distance par rapport aux éléments structuraux, et plus précisément aux sections les plus critiques de ces éléments, permet de définir les scénarios critiques.

La détermination des sections critiques des éléments structuraux se fait d'abord par une étude de la structure non soumise au feu mais soumise aux charges statiques accidentelles à considérer en cas d'incendie (voir 4.5). Ensuite, il faut tenir compte de sections critiques induites par les dilatations éventuellement bridées et les déplacements provoqués par les échauffements de la structure.

Pour certains types de compartiment, il n'y a pas de flash-over et les scénarios se limitent à des feux localisés (voir 3.2.4).

Pour évaluer la sévérité d'un scénario, il faut déterminer son influence sur la stabilité de la structure. Cela implique le calcul des actions thermiques (voir article 4), la détermination des échauffements de la structure et des sollicitations qu'ils y induisent, et enfin la vérification de la stabilité de la structure (Voir article 5). Les conséquences possibles de chaque scénario d'incendie doivent également être décrites.

En général, l'exigence d'une résistance durant la durée complète de l'incendie jusqu'au refroidissement complet de la structure est la demande standard (résistance au feu naturel illimitée). Cependant, pour certains bâtiments, des allègements sont permis et il suffit de vérifier la stabilité durant 30, 60, 90 ou 120 minutes (voir article 9). Dans ce cas, il faudra veiller à ce que les scénarios prennent bien en compte les conditions les plus sévères durant ce laps de temps. Ainsi, par exemple, si le pic des courbes d'échauffement apparaît après le temps de résistance requis, il faudra particulièrement bien justifier pourquoi ce pic ne peut apparaître plus tôt.

Lorsque l'ensemble des scénarios qui seront analysés en détails a été fixé, il faut démontrer que cet ensemble est bien représentatif pour la totalité du bâtiment et couvre donc bien les scénarios les plus critiques.

Pour ce faire, les scénarios retenus seront comparés à l'aide de tableaux et figures récapitulatifs donnant les caractéristiques suivantes :

- Densité de charge calorifique de calcul $q_{f,d}$ (Design fire load) et mesures actives de lutte contre le feu considérées dans cette charge calorifique de calcul ;
- Débit calorifique maximal par unité de surface RHR_f (Rate of Heat Release);
- Taille initiale du foyer et vitesse de propagation ;
- Position du foyer ;
- Conditions de ventilation ;
- Caractéristiques thermiques des parois du compartiment ;
- Identification des éléments structurels critiques pour le scénario et taux de chargement de ces éléments à température ambiante sous charges statiques accidentelles ;
- Temps jusqu'au moment de l'apparition de phénomènes remarquables, tels que p.ex. le flashover, bris des fenêtres, activation de mesures actives ;
- Courbe d'évolution en fonction du temps du débit calorifique (Rate of Heat Release) ;
- Courbe d'évolution en fonction du temps de l'envergure/taille du foyer;
- Courbes d'évolution en fonction du temps des températures aux endroits critiques dans le compartiment ;
- Conséquences du scénario sur la structure.

Art. 4 Détermination des courbes d'échauffement (EN1991-1-2 avec AN-LU)

4.1. Introduction

En matière de développement de l'incendie, différentes simplifications de la dynamique du feu naturel peuvent être réalisées. L'Eurocode 1 distingue les modèles à appliquer en situation de pré-flashover (modèles de feu localisé et modèles à 2 zones) et en situation de post-flashover (feu généralisé). En général, les 2 types de modèles devront être utilisés puisque les scénarios doivent couvrir les 2 types de situations : feu localisé avant flash-over et feu généralisé après flash-over.

4.2. Feu localisé et modèle à 2 zones

Dans un feu localisé, il y a accumulation de produits combustibles dans une couche en dessous du plafond (couche supérieure), avec une interface horizontale entre cette couche chaude et la couche inférieure où la température des gaz demeure beaucoup plus basse.

Cette situation est bien représentée par un modèle à deux zones, utilisé dans toutes les situations de pré-flashover. En plus du calcul de l'évolution de la température des gaz, ces modèles sont utilisés pour connaître la propagation des fumées dans les bâtiments et pour estimer la sécurité des personnes en fonction de la hauteur de la couche de fumée.

Dans les modèles à deux zones, la température des gaz est calculée avec l'hypothèse qu'elle est uniforme dans chaque couche. Cette température moyenne dans la zone chaude est généralement suffisamment précise tant que des phénomènes globaux sont considérés : quantité de fumée à extraire du bâtiment, probabilité de flashover, écroulement total du toit ou du plafond, etc.

Pour l'évaluation du comportement local d'un élément de structure situé au-dessus du feu, l'hypothèse d'une température uniforme peut être insuffisante et le modèle à deux zones doit être combiné avec des modèles spécifiques qui donnent l'évaluation de l'effet local sur ces éléments en fonction de leur distance par rapport au foyer (Méthode d'Heskestad ou d'Hasemi selon les équations (C1) à (C3) respectivement (C4) à (C8) de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU), (voir Figure 6).

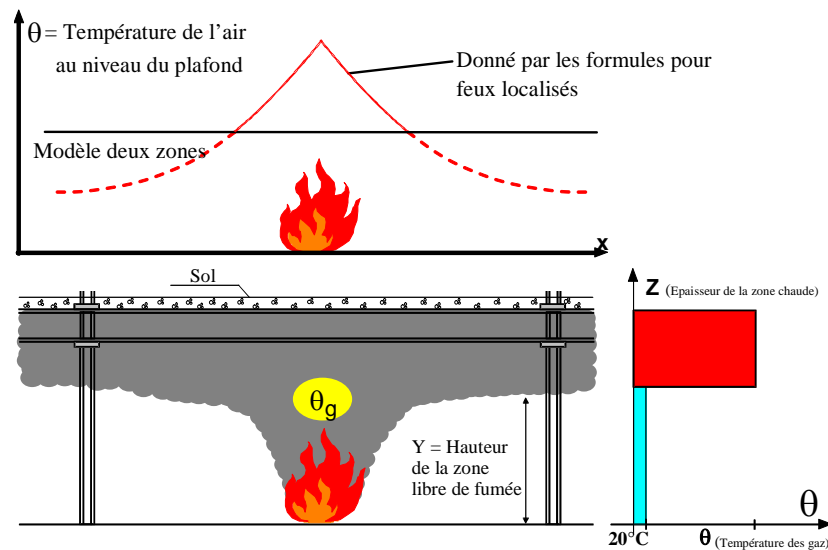


Figure 6 : Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu localisé

4.3. Feu généralisé et modèle à 1 zone

Pour modéliser un feu généralisé dans un compartiment, outre les feux nominaux déjà mentionnés (ISO, courbes hydrocarbure, ...), il existe plusieurs types de modèles.

4.3.1 Modèle à une zone

Le modèle à une zone est basé sur l'hypothèse fondamentale que, pendant le feu, la température des gaz chauds est uniforme dans le compartiment. Les modèles à une zone sont adaptés pour des conditions de post-flashover.

Les données nécessaires doivent être plus précises que pour les courbes paramétriques et sont les mêmes que celles requises pour un modèle à deux zones.

La Figure 7 montre comment un feu de compartiment est modélisé, et représente différents termes d'échanges d'énergie et de masse.

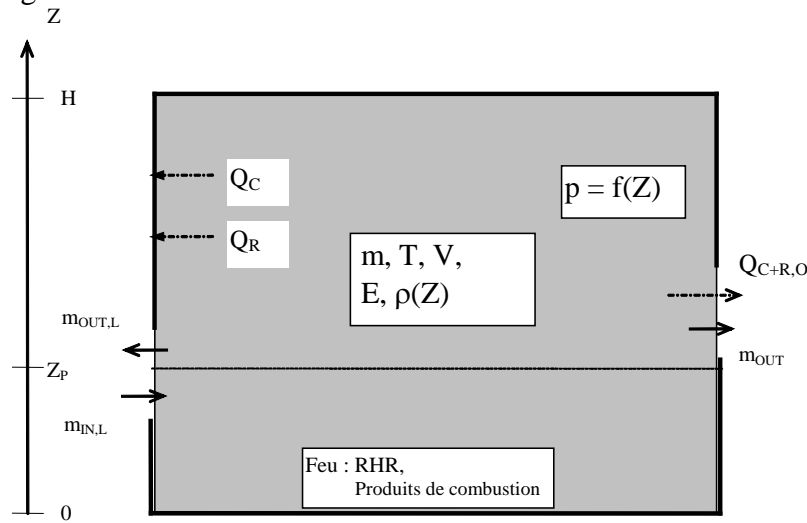


Figure 7 : Un compartiment dans un modèle à une zone

4.3.2. Feux paramétriques

Les feux paramétriques constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un compartiment particulier. Comme les feux nominaux, ils consistent en la détermination d'une courbe température-temps, mais ces courbes contiennent des paramètres destinés à représenter certains aspects de la réalité.

Pour presque tous les feux paramétriques mentionnés dans la littérature, les paramètres pris en compte sont, d'une manière ou d'une autre :

- la géométrie du compartiment,
- la charge calorifique présente dans le compartiment,
- les ouvertures dans les murs et/ou dans le toit et
- le type et la nature des différents éléments de construction constituant les limites du compartiment.

Les feux paramétriques sont basés sur l'hypothèse que la température est uniforme dans le compartiment, ce qui limite leur champ d'application aux conditions de feu généralisé dans des compartiments de dimensions modérées. Ils constituent néanmoins un pas significatif vers la considération de la nature réelle d'un feu particulier par rapport aux feux nominaux, tout en étant basés sur quelques expressions analytiques simples, c'est à dire qu'aucun outil informatique sophistiqué n'est nécessaire pour les appliquer (Voir équations (A.1) à (A.12) de l'annexe A de l'EN 1991-1-2 avec AN-LU). Il est intéressant de remarquer que l'annexe A de l'Eurocode donne une courbe d'échauffement très semblable à la courbe ISO pour $O= 0.04 [m^{1/2}]$ et $b=1160 [J/m^2s^{1/2}K]$.

4.4. Combinaison entre les modèles à 1 zone et les modèles à 2 zones. Choix du modèle

Après avoir défini les caractéristiques du feu, c'est-à-dire la courbe du débit calorifique total, la géométrie du compartiment et les caractéristiques des parois, il est nécessaire de choisir le modèle de feu naturel à appliquer selon le scénario considéré. Ce choix peut être fait en fonction du domaine d'application des modèles.

Dans cette optique, on suppose que la première application doit être celle du « modèle à deux zones ». La question est comment et quand la transition de l'application du « modèle à deux zones » à celle du « modèle à une zone » se produit.

Les résultats d'un « modèle à deux zones » sont donnés sous la forme de deux variables principales:

- température de la zone supérieure T_u ;
- hauteur de l'interface des deux zones H_i .

Ces deux variables vont conditionner la simulation avec le modèle de zones (voir Figure 8). Les quatre conditions suivantes peuvent limiter l'application d'un « modèle à deux zones » :

Condition 1 (C1) : $T_u > 500^\circ\text{C}$

La température élevée des produits de combustion (plus élevée que 500°C) conduit à un flashover par une pyrolyse de l'ensemble de la charge calorifique du compartiment ;

Condition 2 (C2) : $H_i < H_q$ et $T_u > T_{\text{ignition}}$

Si la diminution de la hauteur d'interface (H_i) est telle que le matériau combustible se trouve dans la couche de fumée (hauteur maximale du combustible = H_q) et si la couche de fumée présente une température plus élevée que la température d'inflammation T_{ignition} (supposée égale à 300°C en l'absence de données plus précises), le feu se propage très rapidement dans tout le compartiment par l'inflammation du combustible ;

Condition 3 (C3) : $H_i < 0,1 H$

La hauteur d'interface (H_i) diminue et devient trop faible par rapport à la hauteur du compartiment (H), ce qui n'est plus représentatif d'un phénomène à deux zones ;

Condition 4 (C4) : $A_{fi} > 0,5 A_f$

La surface du feu (A_{fi}) est trop importante par rapport à la surface du sol du compartiment (A_f) pour être considérée comme un feu localisé.

Si une de ces 4 conditions est remplie, le modèle 2 zones doit se transformer en modèle 1 zone. En plus, les conditions 1 ou 2 conduisent à une modification du taux initial de dégagement de chaleur. Cette modification est réalisée comme indiqué dans la Figure 8.

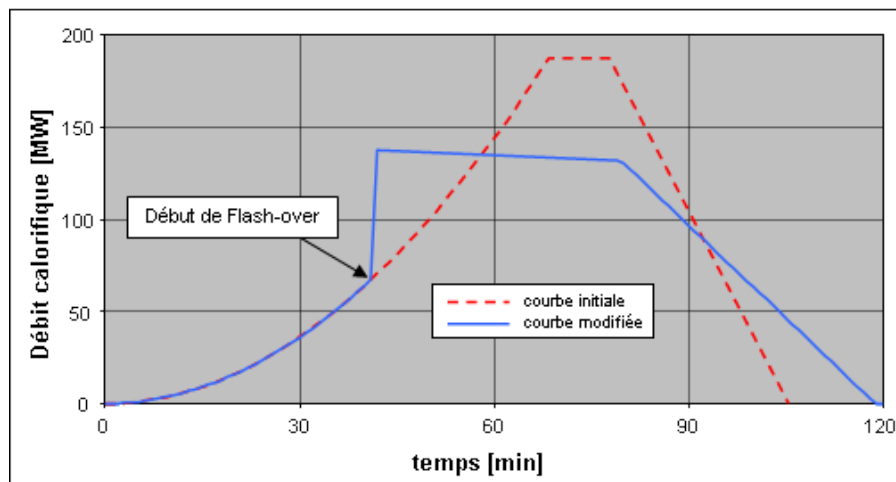


Figure 8 : Courbes de débit calorifique total: La courbe bleue modifiée par le flash-over (embrasement généralisé) et par l'oxygène disponible couvre évidemment la même surface que la courbe initiale rouge.

L'approche décrite ci-dessus est présentée dans le schéma de la Figure 9. Ce schéma montre dans quelles conditions (modélisation à deux zones ou à une zone) les courbes de température de calcul doivent être déterminées.

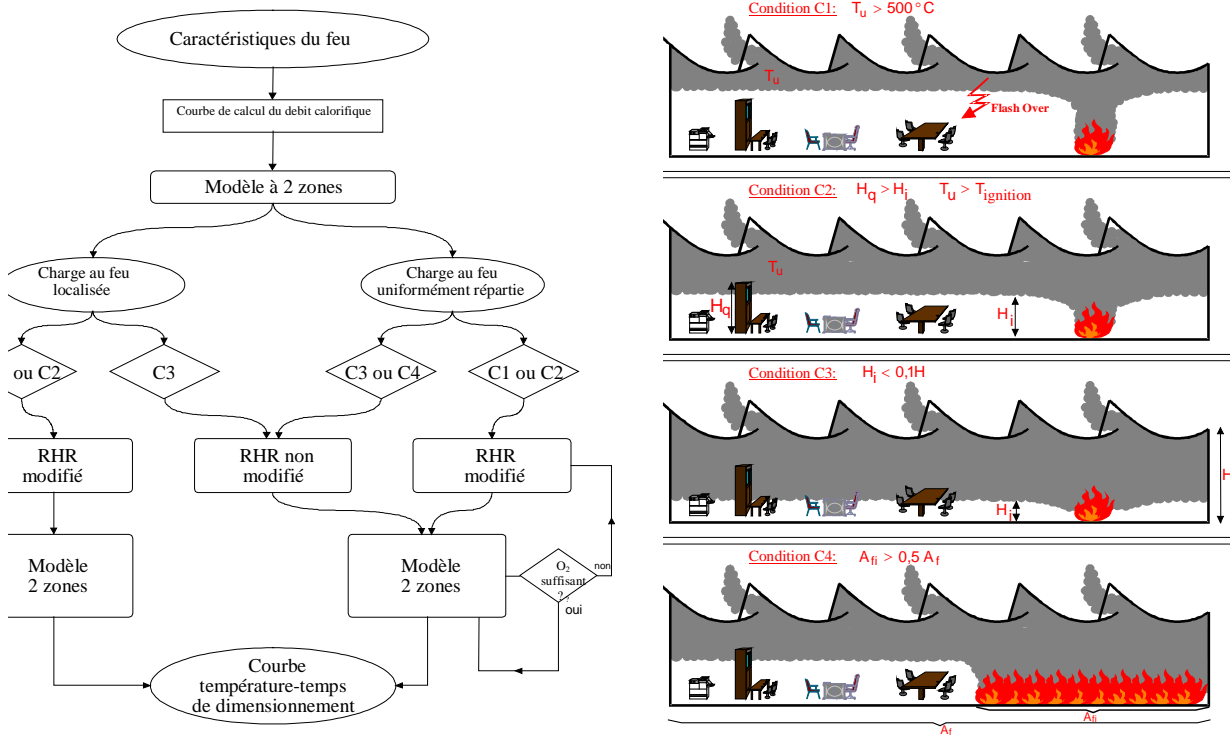


Figure 9 : Combinaison de modèles à une zone et à deux zones

La combinaison des modèles 2 zones et 1 zone avec transition des 2 zones vers 1 zone suivant les critères exposés à la Figure 9 doit être implémentée dans tout logiciel et les résultats validés par comparaison avec de nombreux essais.

4.5. Détermination des actions mécaniques en cas d'incendie

En situation d'incendie, les charges mécaniques appliquées aux structures peuvent être obtenues en utilisant les formules suivantes (voir relation (6.11b) de l'EN 1990) :

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,i} \text{ ou } \Psi_{2,i}) Q_{k,i} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

où :

$G_{k,j}$ est la valeur caractéristique des actions permanentes

$Q_{k,1}$ est l'action variable principale caractéristique

$Q_{k,i}$: sont les valeurs caractéristiques des actions variables d'accompagnement

$\Psi_{1,1}$ est le coefficient d'accompagnement pour la valeur fréquente d'une action variable

Ψ_2 est le coefficient d'accompagnement pour les valeurs quasi-permanentes des actions variables

Les valeurs recommandées de ψ_1 et ψ_2 sont données dans le tableau ci-dessous. Dans l'annexe nationale Luxembourgeoise, ψ_2 est imposé pour l'action variable dominante $Q_{k,1}$ sauf pour l'action de vent où ψ_1 est à considérer.

Tableau 1 : Valeurs recommandées des facteurs ψ notées en gras pour les bâtiments

Action	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Charges imposées dans les bâtiments, catégorie (voir EN 1991-1-1)			
Catégorie A : domestique, zones résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : zones de bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C : zones de congrégation	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : zones de commerces	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : zones de stockage	1,0	0,9	0,8
Catégorie F : zones de trafic routier poids du véhicule $\leq 30 \text{ kN}$	0,7	0,7	0,6
Catégorie G : zones de trafic routier $30 \text{ kN} < \text{poids du véhicule} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Catégorie H : toits	0	0	0
Charges de neige sur les bâtiments (voir EN 1991-1-3/ AN-LU)	0,50	0,20	0
Charges de vent sur les bâtiments (voir EN 1991-1-4 / AN-LU)	0,6	0,2	0

Art. 5 Dimensionnement de la structure portante pour les différents matériaux de construction usuels, (Eurocodes - annexes nationales)

Pour les Eurocodes 2, 3, 4, 5, 6 et 9 les généralités et les bases de calcul définissent les grands principes valables quelle que soit l'approche considérée pour représenter l'action thermique. Le type d'approche pour l'action thermique peut influencer les procédures et modèles de calcul. Les clauses spécifiques à l'approche performancielle sont repérées ci-dessous pour les différents Eurocodes. En cas d'approche performancielle, les méthodes sont limitées à des vitesses d'échauffement situées entre 2 et 50 K/min.

Dans les tableaux 2 à 7, le signe « ✓ » signifie que la clause en question est applicable, le signe « - » signifie qu'elle ne l'est pas.

5.1. Béton armé

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1992-1-2 avec AN-LU. Seules les méthodes de calcul avancées permettent d'analyser une structure sous feu naturel. En effet, les méthodes simplifiées ainsi que les valeurs tabulées ne sont applicables que dans le cas du feu ISO.

Tableau 2

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités	✓	✓
2. Base de calcul	✓	✓
2.1 Exigences	✓	✓
2.1.1 Généralités	✓	✓
2.1.2 Exposition au feu normalisé	✓	-
2.1.3 Exposition au feu paramétré	-	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour la fonction séparative, pendant la phase de déclin de l'incendie, l'augmentation de température moyenne sur la totalité de la surface non exposée est limitée à 200 K, et l'augmentation de température maximale en un point quelconque de cette surface ne doit pas dépasser 240 K.</i>		
2.2 Actions	✓	✓
2.3 Valeurs de calcul des propriétés des matériaux	✓	✓
2.4 Méthodes de vérification	✓	✓
3. Propriétés des matériaux	✓	✓
3.1 Généralités	✓	✓
3.2 Propriétés de résistance et de déformation aux températures élevées	✓	✓
3.2.1 Généralités	✓	✓
3.2.2 Béton	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour les actions thermiques conformes à l'EN 1991-1-2, section 3 (Simulation d'un incendie naturel), notamment lorsque l'on considère la partie descendante de la courbe de température, il convient de modifier le modèle mathématique de la relation contrainte/déformation. L'annexe C de l'EN 1994-1-2 est à considérer.</i>		
3.2.3 Acier de béton armé	✓	✓
3.2.4 Acier de précontrainte	✓	✓
3.3 Propriétés thermiques et physiques du béton de granulats siliceux et calcaires	✓	✓
3.3.1 Dilatation thermique	✓	✓

3.3.2 Chaleur spécifique	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Le pic que présente la chaleur spécifique aux alentours de 100 °C ne peut pas être considéré dans la phase de refroidissement. De même, l'influence de la température sur la masse volumique n'est pas valable en phase de refroidissement.</i>		
3.3.3 Conductivité thermique	✓	✓
3.4 Dilatation thermique des aciers de béton armé et de précontrainte	✓	✓
4. Procédures de calcul	✓	✓
4.1 Généralités	✓	✓
4.2 Méthode de calcul simplifiée	✓	✓
4.2.1 Généralités	✓	✓
4.2.2 Distributions de température	✓	✓
4.2.3 Section droite réduite	✓	✓
4.2.4 Réduction de la résistance	✓	-
4.3 Méthodes de calcul avancées	✓	✓
4.3.1 Généralités	✓	✓
4.3.2 Réponse thermique	✓	✓
4.3.3 Réponse mécanique	✓	✓
4.3.4 Validation des méthodes de calcul avancées	✓	✓
4.4 Cisaillement, torsion et ancrage	✓	✓
4.5 Eclatement	✓	✓
4.5.1 Eclatement explosif	✓	✓
4.5.2 Chute du béton	✓	✓
4.6 Jonctions	✓	✓
4.7 Revêtements de protection	✓	✓
5. Valeurs tabulées	✓	-
6. Béton à haute résistance	✓	-
Annexes Informatives		
A Distributions de température	✓	-
B Méthodes de calcul simplifiées	✓	✓
C Flambement des poteaux en conditions d'incendie	✓	-
D Méthodes de calcul pour le cisaillement, la torsion et l'ancrage	✓	✓
E Méthode de calcul simplifiée pour les poutres et les dalles	✓	-

5.2. Béton précontraint

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1992-1-2 avec AN-LU – Voir 5-1 ci-dessus.

A ce sujet, il s'agit de tenir compte du fait que les déformations et les contraintes thermiques créées pendant l'échauffement modifient fortement la zone de béton fissuré. Cela entraîne la nécessité de prendre en compte l'effet de l'état fissuré du béton sur la résistance à l'effort tranchant du béton même.

Cette vérification est notamment obligatoire pour les dalles alvéolées précontraintes et les poutres précontraintes soumises à un incendie. Dans ce cas on se réfère entre autres aux documents suivants:

- Arnold VAN ACKER : Shear resistance of prestressed hollow core floors exposed to fire – Journal of the fib, volume 4, Number 2, June 2003.
- EN 1168 : Hollow core slabs, Annex G - Resistance to fire – CEN/TC229 N1606, 2010-06-10, background document février 2010.
- BFBN betonproducten, lettre circulaire de A.P. PIELKENROOD “Nader onderzoek brand Lloydsraat te Rotterdam”, 16.11.2009

Au cas où cette vérification au cisaillement n'a pas pu être effectuée, une protection thermique additionnelle adéquate est à prévoir.

5.3. Acier

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1993-1-2 avec AN-LU. La majorité de cet Eurocode peut être utilisé pour les deux types d'approche. Les seules restrictions sont décrites ci-dessous et concernent la température des structures protégées lors de la phase de refroidissement. Les méthodes peuvent être utilisées pour autant que les propriétés des matériaux de protection soient connues dans le domaine des températures. Pour plusieurs matériaux isolants, l'effet retardateur de l'échauffement est produit par l'évaporation de l'eau libre et par des changements d'état des matériaux. Ces effets ne se produisent pas lors de la phase de refroidissement.

Tableau 3

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités	✓	✓
2. Bases de calcul	✓	✓
3. Propriétés des matériaux	✓	✓
4. Calcul du comportement au feu		
4.1 Généralités	✓	✓
4.2 Modèles de calcul simplifiés	✓	✓
4.2.1 Généralités	✓	✓
4.2.2 Classification des Sections	✓	✓
4.2.3 Résistance	✓	✓
4.2.4 Température critique	✓	✓
4.2.5 Evolution de la température de l'acier	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>La formule de calcul de la température dans l'acier protégé et non protégé est valable pour la phase croissante et décroissante du feu. Par contre, la formule du calcul de la température dans l'acier protégé comprend des paramètres caractérisant l'effet de l'isolant. Ces paramètres doivent selon les cas être adaptés pour la phase de refroidissement.</i>		
4.3 Modèles de calcul avancés	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Des méthodes de calcul avancées peuvent être utilisées en association avec une courbe d'échauffement quelconque, à condition que les propriétés des matériaux soient connues dans le domaine de températures concerné</i>		
Annexe A Ecroutissage de l'acier au carbone aux températures élevées	✓	✓
Annexe B Transfert thermique aux structures extérieures	-	✓
Annexe C (informative) Acier inoxydable	✓	✓
Annexe D (informative) Assemblages	✓	✓
Annexe E (informative) Sections de Classe 4	✓	✓

5.4. Structures mixtes acier/béton

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1994-1-2 avec AN-LU.

Tableau 4

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités	✓	✓
2. Bases de calcul		
2.1 Exigences	✓	✓
2.1.1 Exigences fondamentales	✓	✓
2.1.2 Exposition à un feu nominal	✓	✓
2.1.3 Exposition au feu paramétrique	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour la fonction séparative, pendant la phase de déclin de l'incendie, l'augmentation de température moyenne sur la totalité de la surface non exposée est limitée à 200 K, et l'augmentation de température maximale en un point quelconque de cette surface ne doit pas dépasser 240 K.</i>		
2.2 Actions	✓	✓
2.3 Valeurs de calcul des propriétés des matériaux	✓	✓
2.4 Méthodes de vérification	✓	✓
3. Propriétés des matériaux		
3.1 Généralités	✓	✓
3.2 Propriétés mécaniques	✓	✓
3.2.1 Résistance et propriétés de déformation de l'acier de construction	✓	✓
3.2.2 Résistance et propriétés de déformation du béton	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour les actions thermiques conformes à l'EN 1991-1-2, section 3 (Simulation d'un incendie naturel), notamment lorsque l'on considère la partie descendante de la courbe de température, il convient de modifier le modèle mathématique de la relation contrainte/déformation. L'annexe C de l'EN 1994-1-2 est à considérer.</i>		
3.2.3 Aciers d'armature	✓	✓
3.3 Propriétés thermiques	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Le pic que présente la chaleur spécifique aux alentours de 100 °C ne peut pas être considéré dans la phase de refroidissement.</i>		
3.3.4 Matériaux de protection contre le feu	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Les paramètres définissant les matériaux de protection doivent selon les cas être adaptés pour la phase de refroidissement.</i>		

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
3.4 Masse volumique	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>De même, l'influence de la température sur la masse volumique n'est pas valable en phase de refroidissement.</i>		
4. Procédures de vérification		
4.1 Introduction	✓	✓
4.2 Valeurs tabulées	✓	-
4.3 Modèles de calcul simplifiés	✓	-
4.4 Modèles de calcul avancés	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Des méthodes de calcul avancées peuvent être utilisées en association avec une courbe d'échauffement quelconque, à condition que les propriétés des matériaux soient connues dans le domaine de températures concerné</i>		
5. Dispositions constructives	✓	✓
Annexe A « Relations contrainte-déformation aux températures élevées pour les aciers de construction »	✓	✓
Annexe B « Relations contrainte-déformation aux températures élevées pour le béton de granulats siliceux » Cette annexe a été remplacée dans l'AN-LU	✓	✓
Annexe C « Relations contrainte-déformation du béton adaptées à l'incendie naturel avec branche de température décroissante pour utilisation dans les modèles de calcul avancés »	-	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Cette annexe régit le comportement mécanique du béton en cas d'approche performancielle</i>		
Annexe D « Modèle de calcul de la résistance au feu des dalles mixtes non protégées soumises à un incendie en face inférieure de la dalle selon la courbe température-temps normalisée »	✓	-
Annexe E « Modèle de calcul des moments résistants positif et négatif d'une poutre en acier connectée à une dalle en béton et soumise à un incendie en face inférieure de la dalle en béton » <i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Le tableau D.5 de l'annexe D doit être adapté.</i>	✓	✓
Annexe F « Modèle de calcul des moments résistants positifs et négatifs pour une poutre en acier partiellement enrobée de béton, connectée à une dalle de béton et soumise aux conditions de l'incendie normalisé en face inférieure de la dalle »	✓	-
Annexe G « Modèle de calcul par sommation pondérée de la résistance à l'incendie normalisé de poteaux mixtes avec profilé en acier partiellement enrobé, dans le cas de flambement suivant l'axe faible »	✓	-

Annexe H [informative] « Modèle de calcul simplifié pour les profils creux remplis de béton exposés aux conditions d'incendie normalisé »	✓	-
Annexe I [informative] « Conception et évaluation de modèles expérimentaux »	✓	✓

5.5. Bois

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1995-1-2 avec AN-LU. Concernant les sections en bois lamellé collé, une attention particulière doit être prêtée à la qualité des colles sous feu selon le chapitre 3.5 de cette norme.

Le dimensionnement suivant l'EN 1995-1-2 suppose que les poutres et les poteaux en bois sont de sections pleines.

Lorsque des règles d'application données dans l'EN 1995-1-2 sont valables seulement pour la courbe standard temps-température, ceci est identifié dans les articles appropriés. Le tableau suivant commente et rappelle ces cas.

Tableau 5

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités	✓	✓
2. Bases du calcul		
2.1 Exigences	✓	✓
2.1.1 Exigences de base	✓	✓
2.1.2 Exposition à un feu nominal	✓	✓
2.1.3 Exposition à un feu paramétrique	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour la fonction séparative, pendant la phase de déclin de l'incendie, l'augmentation de température moyenne sur la totalité de la surface non exposée est limitée à 200 K, et l'augmentation de température maximale en un point quelconque de cette surface ne doit pas dépasser 240 K.</i>		
2.2 Actions	✓	✓
2.3 Valeurs de calcul des propriétés des matériaux et des résistances	✓	✓
2.4 Méthodes de vérification	✓	✓
3. Propriétés des matériaux		
3.1 Généralités	✓	✓
3.2 Propriétés mécaniques	✓	✓
3.3 Propriétés thermiques	✓	✓

3.4 Profondeur de carbonisation	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Le paragraphe 3.4 est spécifique au feu standard. En cas de feu paramétrique selon l'annexe A de l'EN 1991-1-2, l'annexe A de l'EN 1995-1-2 s'applique. Il n'y a pas de méthode pour un feu non standard et non paramétrique. Néanmoins, par analogie avec un feu paramétrique, des valeurs sécuritaires des vitesses de combustion et des profondeurs de carbonisation pourraient être déduites pour des feux naturels quelconques.</i>		
3.5 Colles	✓	✓
4. Méthodes de calcul pour la résistance mécanique		
4.1 Généralités	✓	✓
4.2 Règles simplifiées pour déterminer les propriétés de section	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Ces règles se basent sur le paragraphe 3.4. Voir remarque ci-dessus.</i>		
4.3 Règles simplifiées pour l'analyse des éléments de structure et des composants	✓	✓
4.4 Méthodes de calcul avancées	✓	✓
5. Procédures de calcul pour les sous-systèmes de plancher et de mur	✓	✓
5.1 Généralités	✓	✓
5.2 Analyse de la fonction porteuse	✓	✓
5.3 Analyse de la fonction séparative	✓	-
6. Assemblages	✓	-
7. Détails structuraux	✓	✓
Annexe A (Informatif) « Exposition à un feu paramétrique »	-	✓
Annexe B (informatif) « Méthodes de calcul avancées »	✓	✓
Annexe C (Informatif) « Solives de plancher et montants de mur porteur dans des systèmes dont les cavités sont totalement remplis d'isolation »	✓	-
Annexe D (informatif) « Carbonisation des éléments dans les systèmes de murs et planchers avec cavités de vide »	✓	-
Annexe E (informatif) « Analyse de la fonction séparative des systèmes de mur et de plancher »	✓	-
<i>Spécificité dans le cas de l'approche au feu normalisé</i> <i>Ces règles ne peuvent être appliquées que pour des exigences de résistance inférieures à 60 minutes.</i>		
Annexe F (informatif) « Guide pour les utilisateurs de cette partie d'Eurocode »	✓	✓

5.6. Construction en maçonnerie

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1996-1-2 avec AN-LU.

Comme les résultats d'essais au feu normalisé constituent la base de données pour les méthodes de calcul du comportement au feu des maçonneries, la présente norme traite par conséquent principalement du calcul en vue de la résistance au feu normalisé. Il n'y a pas de méthode compatible avec l'approche performancielle.

Tableau 6

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités		
2. Principes et règles de base	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Pour la fonction séparative, pendant la phase de déclin de l'incendie, l'augmentation de température moyenne sur la totalité de la surface non exposée est limitée à 200 K, et l'augmentation de température maximale en un point quelconque de cette surface ne doit pas dépasser 240 K.</i>		
3. Matériaux	✓	✓
4. Procédures de calcul de la résistance au feu des murs en maçonnerie	✓	✓
5. Dispositions de détail	✓	✓
Annexe A (informative) « Recommandations pour la sélection des périodes de résistance au feu »	✓	-
Annexe B (normative) « Tableaux de valeurs de la résistance au feu des murs en maçonnerie »	✓	-
Annexe C (informative) « Modèle de calcul simplifié »	✓	-
Annexe D (informative) « Méthode de calcul complexe »	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>Le pic que présente la chaleur spécifique aux alentours de 100 C ne peut pas être considéré dans la phase de refroidissement.</i>		
Annexe E (informative) « Exemples de liaisons satisfaisant aux prescriptions de la Section 5 »	✓	✓

5.7. Aluminium

Le dimensionnement est à réaliser suivant l'EN 1999-1-2 avec AN-LU. Lorsque les règles données dans l'EN 1999-1-2 sont valables uniquement pour l'exposition au feu normalisé, ceci est identifié dans les articles et paragraphes pertinents de cet Eurocode. Le tableau suivant commente et rappelle ces cas.

Tableau 7

Table des matières	FEU ISO	FEU Naturel
1. Généralités		
2. Base de calcul	✓	✓
3. Propriétés des matériaux	✓	✓
4. Calcul du comportement au feu	✓	✓
4.1 Généralités	✓	✓
4.2 Modèles de calcul simplifiés	✓	✓
4.2.1 Généralités	✓	✓
4.2.2 Résistance	✓	✓
4.2.3 Echauffement de l'aluminium	✓	✓
<i>Spécificité dans le cas de l'approche performancielle</i> <i>La formule de calcul de la température dans l'aluminium protégé comprend des paramètres caractérisant l'effet de l'isolant. Ces paramètres doivent selon les cas être adaptés pour la phase de refroidissement.</i>		
4.3 Modèles de calcul complexe	✓	✓
4.3.1 Généralités	✓	✓
4.3.2 Réponse thermique	✓	✓
4.3.3 Réponse mécanique	✓	✓
4.3.4 Validation des modèles de calcul complexe	✓	✓
Annexe A (informative) « Propriétés des alliages d'aluminium ne figurant pas dans l'EN 1999-1-1 »	✓	✓
Annexe B (informative) « Transfert thermique aux éléments de structure extérieurs en aluminium »	-	✓

Art. 6 Procédure de validation et de contrôle

La procédure de validation valide et vérifie la méthode de calcul et teste l'exactitude des résultats. Le choix des scénarios et les programmes de calcul qui seront utilisés sont à soumettre préalablement aux autorités compétentes, selon le schéma de la Figure 10.

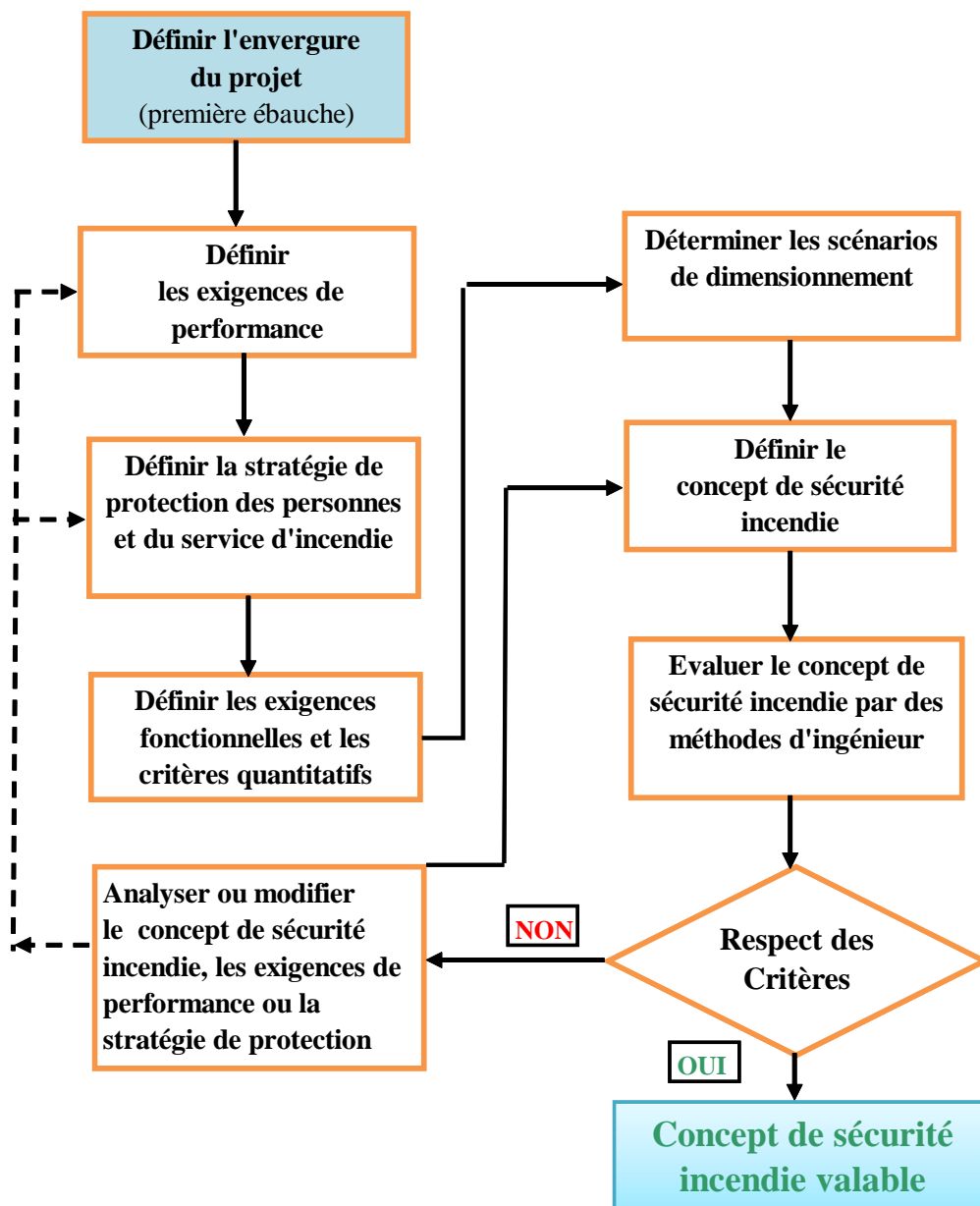


Figure 10 : Méthodologie comprenant les phases successives de développement du concept de sécurité incendie selon ISO TC92 SC4

La procédure de validation et de contrôle comprend les opérations successives suivantes (1 à 4 pour la validation, 5 pour le contrôle initial et 6 pour le contrôle lors d'un changement dans l'exploitation ou d'affectation) :

1. Les **scénarios d'incendie** à considérer pour l'établissement des actions thermiques et pour l'évaluation des performances de résistance au feu seront proposés par le maître d'ouvrage. Ces scénarios précisent clairement toutes les mesures de protection actives ou passives mises en œuvre et considérées dans les calculs. Ces scénarios d'incendie doivent être validés par les autorités compétentes qui peuvent exiger l'avis d'un organisme agréé.
2. Les **courbes d'action thermiques** générées par les scénarios retenus seront établies par le bureau d'étude, avec l'aide d'une méthode ou d'un logiciel reconnu de son choix et en phase avec l'Eurocode 1 partie feu et son Annexe Luxembourgeoise. Une méthode ou un logiciel est considéré comme reconnu s'il est suffisamment validé par une campagne expérimentale basée sur des rapports d'essais d'organismes reconnus.
3. La **résistance au feu** exigée sera justifiée par le bureau d'études sur base des courbes d'actions thermiques obtenues lors de l'étape précédente. Cette justification sera établie sur base des principes et des méthodes proposées dans les parties concernées des normes européennes et des Annexes Nationales luxembourgeoises. Un modèle de calcul avancé suffisamment reconnu et calibré sur des essais pourra être utilisé par le bureau d'études.
4. La **validation** des études effectuées dans le cadre des points 1 à 3 ci-dessus devra être fournie par un organisme agréé par l'autorité compétente suivant l'article 7. Cet organisme vérifiera les calculs, en particulier leur cohérence par rapport aux scénarios retenus et aux normes, et remettra en cas d'accord au bureau d'études et à l'autorité compétente un rapport favorable à l'obtention duquel sera conditionnée **l'autorisation d'exploitation**.
Dépendant du résultat de la validation, l'autorité compétente peut exiger du bureau d'études un recouplement à l'aide d'un autre modèle de calcul. Dans le même sens, il sera exigé notamment dans le cas d'analyse complexe de procéder à des calculs supplémentaires en faisant varier certains paramètres physiques déterminants.
5. Il appartiendra à un organisme de contrôle agréé par l'autorité compétente de **contrôler** la conformité de la construction avec les hypothèses retenues dans l'étude d'ingénierie incendie relative à la justification de la résistance au feu des structures et de vérifier la bonne exécution et la mise en place des mesures additionnelles éventuelles requises par cette étude. Ce contrôle se basera sur les notes justificatives du bureau d'études et sur les plans de construction ([voir l'article 8](#)). Il conditionnera la délivrance par l'autorité publique compétente de **l'autorisation d'exploitation**.
6. Lors d'un changement d'affectation ou d'un changement dans l'exploitation susceptible d'aggraver la charge au feu ou les conditions de ventilation, un contrôle supplémentaire est obligatoire. Il consiste à valider la cohérence des scénarios et se basera sur les notes justificatives du bureau d'études et sur les plans de construction fixant les conditions d'exploitation (voir article 8).

Remarque:

1) La qualification des concepteurs:

Les concepteurs appelés à intervenir sur les points 1 à 3 doivent être ingénieurs et présenter à l'autorité compétente un certificat de réussite des épreuves d'un cours de "fire safety engineering" ou un dossier démontrant leur expérience personnelle dans le domaine.

2) L'organisme de contrôle agréé qui est retenu pour intervenir sur les points 1, 4 et 5 dans le cadre de la validation et du contrôle, tel que décrit dans le présent article, doit être le même bureau. Sauf dans des cas particuliers (par exemple lors d'un projet avec une architecture compliquée, un établissement d'une grande envergure, etc.), sur accord de l'autorité compétente, le bureau de contrôle qui intervient au point 4 peut être différent de celui des points 1 et 5.

Note :

L'ingénierie du comportement structurel en situation d'incendie requérant le recours à un modèle de calcul avancé peut aussi s'avérer nécessaire dans le cadre d'une analyse au feu normalisé, soit pour effectuer une analyse du comportement global de la structure, soit pour justifier des éléments qui ne sont pas couverts par les valeurs tabulées ni par les méthodes simplifiées proposées dans les Eurocodes, soit encore pour analyser le comportement de certains assemblages ou des déformations. Dans ce cas, comme au point 4 ci-dessus, les autorités compétentes pourront demander un contrôle par un organisme agréé par les autorités compétentes suivant l'article 7. Ceci s'applique également lorsqu'on est en dehors des domaines de validité des méthodes tabulées ou simplifiées.

Art. 7 Organisme agréé pour le contrôle des calculs au feu

Les organismes spécialisés qui souhaitent intervenir dans la procédure de contrôle des calculs et de la réalisation au niveau des points 1 et 4 à 6 de l'article 6, doivent être préalablement agréés à cet effet comme "organisme de contrôle" par le Ministre ayant le Travail dans ses attributions.

Les conditions d'agrément et les règles d'intervention des organismes de contrôle sont déterminées par l'article 614 du Code du travail et les règlements grand-ducaux et ministériels qui en découlent dans le cadre des compétences et attributions de l'Inspection du travail et des mines.

Ceci implique notamment pour l'organisme de contrôle :

- de présenter lors de la demande d'agrément un dossier établissant la compétence du personnel dans l'ingénierie concernée et démontrant que l'organisme dispose de moyens de calcul [et de matériels] appropriés.
- d'être organisé et de réaliser ses interventions de manière à garantir une totale indépendance par rapport à la démarche de conception, ce qui n'exclut pas la possibilité d'échange d'informations techniques entre l'organisme de contrôle et les auteurs de projet [et les firmes réalisant la structure].
- d'être accrédité pour ses activités au titre des normes applicables des séries EN ISO/CEI 17000 respectivement EN 45000 par l'Office Luxembourgeois d'Accréditation et de Surveillance (OLAS) de l'Institut Luxembourgeois de la Normalisation, de l'Accréditation de la Sécurité et la qualité des produits et services (ILNAS) ou par tout autre organisme d'accréditation équivalent signataire de l'accord multilatéral pris dans le cadre de la coordination européenne des organismes d'accréditation.

Art. 8 Transposition des hypothèses de dimensionnement et des résultats de calcul dans les documents d'exécution et d'exploitation

Les aménagements prévus par le concepteur lors de l'analyse au feu de la structure (mise en place de mesures actives spécifiques, renforcement de structure, connections supplémentaires, armatures supplémentaires...) doivent clairement figurer dans les **notes justificatives** ainsi que sur les **plans de construction**, afin de vérifier sans équivoque leur existence lors de la mise en exploitation de l'ouvrage.

Les **notes justificatives** fixent les **conditions d'exploitation** et décrivent les hypothèses utilisées pour l'étude d'ingénierie incendie ainsi que les recommandations déduites des résultats de cette étude. Elles donnent les différents scénarios qui impliquent la définition :

- des compartiments au feu et des cellules étudiés avec les caractéristiques de parois et des ouvertures
- des données relatives au feu (densité de charge calorifique, débit calorifique maximal, les tailles des foyers considérés (tailles et position des foyers, vitesses de propagation)
- des mesures actives de lutte contre le feu

Les documents en question seront tenus à la disposition des autorités compétentes. Il est de la responsabilité du propriétaire et de l'exploitant de garantir le respect des conditions d'exploitation.

Art. 9 Analyse des risques restants lors de l'intervention

L'analyse des risques restants (RR) consiste à analyser différentes situations telles que :

Exigence allégée :

1. Etude de la **stabilité au feu** de la structure **limitée** à une durée de 30, 60, 90 ou 120 minutes (RR1).
2. Mise en évidence des **points sensibles de la structure**. Les éléments particulièrement vitaux pour la stabilité d'ensemble de la structure et les éléments dont la ruine entrainerait une ruine en chaîne de l'ensemble de la structure du bâtiment doivent être mis en évidence. De la même façon seront également mis en évidence les éléments dont la ruine ne conduit qu'à un effondrement partiel de la structure (RR2).
3. Etude des **modes de ruine**. Les conséquences ainsi que les circonstances (ruine brutale ou ductile, effondrement en chaîne, extension de la perte de stabilité de la structure à d'autres compartiments que celui incendié) seront documentées et mise à disposition des autorités compétentes. Dans certaines conditions, certaines ruines seront autorisées (RR3).

Exigence standard :

4. Risque en **phase de refroidissement**. Les études comprendront une partie spécifiquement dédiée à la phase de refroidissement et aux dégâts et dangers que celle-ci peut engendrer. Ceci revient à analyser une résistance au feu naturel illimitée. Par exemple, les risques de défaillances des assemblages dans la phase de refroidissement doivent être analysés (RR4).

Exigence renforcée :

5. Possibilités de **défaillance** de certaines mesures de protection passives (portes, volets coupe-feu,...) ou actives (désenfumage, sprinkler, détection...). Les types de défaillance à considérer sont à fixer par les autorités compétentes (RR5).
6. Prise en compte de **changements futurs d'exploitation ou d'affectation** (RR6). Cette exigence n'est à considérer que sur demande du maître d'ouvrage.

Afin de qualifier les risques affectant un bâtiment, un profil de risque a été défini dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8: Définition du profil de risque

Catégories d'occupation	Bâtiments Bas (< 7 m)		Bâtiments Moyens (> 7 m; < 22 m)	Bâtiments Elevés (> 22 m)
	1 niveau	2 à 3 niveaux (R+1 à R+2)	4 à 7 niveaux (R+3 à R+6)	plus de 7 niveaux
Catégorie a : Occupants qui sont éveillés /conscients et familiarisés avec le bâtiment	A	A	C	C
Catégorie b : Occupants qui sont éveillés /conscients mais qui ne sont pas familiarisés avec le bâtiment	A	B		
Catégorie c : Majorité des Occupants qui sont susceptibles de dormir / de ne pas être conscients	B	C	C	D
Catégorie d : Occupants recevant des soins médicaux	C	D	D	

Le tableau 9 ci-dessous montre les analyses requises suivant le profil de risque

RR1 signifie résistance au feu naturel pendant un temps déterminé

RR2 signifie mise en évidence des points sensibles de la structure.

RR3 signifie étude des modes de ruine.

RR4 signifie situation standard.

RR5 signifie possibilités de défaillance de mesures passives ou actives

RR6 signifie une prise en compte de changements futurs d'exploitation ou d'affectation.

Tableau 9: Analyse des risques restants en fonction du profil de risque

Profil de risque	Analyse des risques restants
A	RR1
B	RR1,RR2
C	RR1,RR2,RR3, RR4
D	RR1, RR2, RR3, RR4, RR5

Visa du Directeur adjoint
De l'Inspection du travail
et des mines

s.

Robert HUBERTY

Mise en vigueur, le 26.10.2012

s.

Paul WEBER
Directeur
de l'Inspection du travail
et des mines

ANNEXE I : Paramètres de calculs à considérer

La source ci-dessus donne un intervalle de variation des charges au feu. Les valeurs caractéristiques correspondant aux fractiles 80% ont été déduites des valeurs limites des intervalles en supposant que celles-ci correspondent aux fractiles 5% et 95% et que les charges au feu se distribuent suivant une loi statistique de Gumbel (voir annexe 3). Le tableau ci-dessous donne les valeurs caractéristiques à utiliser. Pour certains types d'occupation, vu le nombre trop réduit de données statistiques, la valeur 80% fractile est notée en rouge et doit être considérée avec précaution. Cette valeur peut être utilisée à titre indicatif mais devra être justifiée et validée par les autorités compétentes de cas en cas.

Le tableau 1 donne des valeurs pour la production MJ/m² et en MJ/m³ pour l'entreposage. Dans le cas de l'entreposage il y a lieu de tenir compte de la hauteur de stockage en m.

Tableau 1 : Densité de charges calorifiques selon l'exploitation en industrie.

Source : source VKF-AEAI : Note explicative de protection incendie (19.12.2007)

<http://bsvonline.vkf.ch/web/BSVonlineStart.asp?Sprache=f>

Occupation		Production		Entreposage		Entreposage net	
		Densité de charges calorifiques de – à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile	Densité de charges calorifiques de – à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile	Densité de charges calorifiques de – à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile
		q _m MJ/m ²	q _{r,k} MJ/m ²	q _m MJ/m ³	q _{r,k} MJ/m ³	q _m MJ/m ³	q _{r,k} MJ/m ³
Carton & Papier							
Fabrique de carton / carton ondulé							
Fabrique de carton / carton ondulé	Entreposage de matières premières			1600 - 1700	1664	2000 - 2300	2192
Fabrique de carton / carton ondulé	Entreposage de papier en bobines				3700		14700
Fabrique de carton / carton ondulé	Production, traitement	700 - 2400	1785				
Fabrique de papier							
Fabrique de papier	Entreposage de matières premières (cellulose)				20000		22000
Fabrique de papier	Entreposage de matières premières (vieux papier, pressé)				6900		8600
Fabrique de papier	Entreposage de matières premières (vieux papier, en vrac)			1700 - 3700	2977	2200 - 5400	4243
Fabrique de papier	Production, transformation	200 - 1200	839				
Fabrique de papier	Entreposage de produits finis			1500 - 4100	3160	2100 - 8100	5931

Imprimerie							
Imprimerie	Entreposage de papier en bobines			2000 - 5300	4107	3900 - 6700	5688
Imprimerie	Production	400 - 500	464				
Imprimerie	Production avec local pour déroulement du papier	2000 - 2200	2128				
Imprimerie	Expédition, emballage			200 - 2400	1605	300 - 3000	2024
Imprimerie	Reliure		2400				
Industrie alimentaire							
Boissons (sans alcool)							
Boissons (sans alcool)	Remplissage	300 - 350	332				
Boissons (sans alcool)	Entreposage				600		900
Chocolat							
Chocolat	Entreposage de matières premières (y compris matériau d'emballage)			4900 - 5400	5219	8100 - 8200	8164
Chocolat	Production, local de conchage	500 - 2000	1458				
Chocolat	Entreposage de produits finis, expédition			1000 - 2000	1639	2600 - 3300	3047
Commerce alimentaire							
Commerce alimentaire	Entreposage de produits frais, expédition			400 - 1000	783	1100 - 1900	1611
Commerce alimentaire	Entreposage de récipients				1800		2400
Commerce alimentaire	Emballage / portionnement de viande		1900				
Fabrication de produits laitiers							
Fabrication de produits laitiers	Production de fromage		300				
Fabrication de produits laitiers	Entreposage de fromage			400 - 1500	1102	800 - 1800	1439
Grains							
Minoterie	Entreposage de farine			3600 - 3800	3728	5100 - 5400	5292
Minoterie	Production	500 - 1700	1266				
Graisses, huiles, beurre							
Graisses, huiles	Production		8500				
Graisses, huiles, beurre	Entreposage			3400 - 7200	5826	4800 - 11100	8823
Pâtes alimentaires							
Pâtes alimentaires	Production	500 - 800	692				
Pâtes alimentaires	Entreposage			1500 - 2000	1819	2400 - 2900	2719

Produits de boulangerie-pâtisserie							
Produits de boulangerie-pâtisserie	Entreposage de matières premières				1500		2800
Produits de boulangerie-pâtisserie	Production	300 - 700	555				
Produits de boulangerie-pâtisserie	Entreposage de produits finis, expédition			500 - 2100	1522	600 - 2300	1685
Sucre							
Fabrique de sucre	Production, emballage	100 - 200	164				
Fabrique de sucre	Entreposage			4200 - 5000	4711	5200 - 7400	6605
Industrie chimique							
Industrie chimique générale							
Industrie chimique générale	Production	500 - 7800	5161				
Industrie chimique générale	Entreposage, solvants			1800 - 6800	4993		
Industrie chimique générale	Entreposage, résine époxy				3800		5000
Produits pharmaceutiques							
Produits pharmaceutiques	Production	300 - 1100	811				
Produits pharmaceutiques	Entreposage			1100 - 2500	1994	1300 - 3700	2832
Logistique							
Centre de distribution							
Centre de distribution	Entreposage			300 - 8100	5280	400 - 16200	10489
Centre de distribution	Entreposage de produits de jardin				1500		3100
Centre de distribution	Entreposage de produits ménagers				8100		16200
Centre de distribution	Entreposage d'appareils électriques			200 - 1300	902	300 - 2300	1577
Centre de distribution	Entreposage de meubles			1000 - 3000	2277	1300 - 5000	3663
Matières et marchandises diverses							
Accessoires auto							
Accessoires auto	Entrepôt de pièces de rechange			400 - 800	655	700 - 1300	1083
Accessoires auto	Entrepôt de liquides (huiles, nettoyeurs, solvants)				1200		3000
Accessoires auto	Entrepôt de pneus			700 - 1200	1019	800 - 1800	1439
Aliments fourragers							
Aliments fourragers	Production d'aliments composés	500 - 1400	1075				
Aliments fourragers	Entreposage d'aliments composés			900 - 1500	1283	1300 - 2200	1875

Appareils électriques							
Appareils électriques	Production et emballage	100 - 150	132				
Appareils électriques	Entreposage			500 - 1300	1011	700 - 2300	1722
Déchets, recyclage							
Déchets	Déchets spéciaux (peintures, solvants)				2500		6100
Déchets	Déchets spéciaux (acides)				1300		2800
Déchets	Recyclage de plastiques, entrepôt				3800		6000
Déchets	Recyclage de plastiques, production		1200				
Déchets	Plaquettes de bois			400 - 1800	1294	1300 - 2500	2066
Matériaux de construction							
Matériaux de construction	Briques silico-calcaires	300 - 550	460				
Matériaux de construction	Béton (puits, etc.)		300				
Matériaux de construction	Bois			1200 - 1600	1455	2000 - 3200	2766
Matériaux de construction	Matériaux d'isolation (polystyrol)			300 - 600	492	400 - 700	592
Matériaux de construction	Marché d'articles de construction			500 - 1200	947	800 - 2000	1566
Production de verre							
Production de verre	Emballage		350				
Production de verre	Entreposage			100 - 150	132	150 - 200	182
Produits à base de tabac							
Produits à base de tabac	Production	250 - 600	473				
Tabac, fabrique de cigarettes	Entreposage			900 - 1800	1475	1400 - 2400	2039
Textiles							
Etoffes, vêtements							
Etoffes, vêtements	Entreposage			100 - 600	419	300 - 1100	811
Fabrique de tapis							
Fabrique de tapis	Production		2500				
Fabrique de tapis	Production, teinturerie		300				
Fabrique de tapis	Entreposage			500 - 1200	947	800 - 2000	1566
Filature							
Filature	Production	500 - 700	628				
Filature	Entreposage			3100 - 3300	3228	3800 - 4700	4375
Tissage							
Tissage	Production	200 - 300	264				
Tissage	Entreposage			700 - 1400	1147	900 - 1800	1475

Transformation des métaux							
Construction de véhicules automobiles							
Construction de véhicules automobiles	Production (véhicules de nettoyage, véhicules blindés, etc.)	300 - 400	364				
Construction de véhicules automobiles	Entreposage			200 - 600	455	300 - 900	683
Construction métallique							
Construction métallique	Entreposage de peintures, revêtements en poudre			1000 - 2500	1958	1600 - 4900	3707
Construction métallique	Peinture au pistolet		100				
Construction métallique	Production, galvanisation	100 - 300	228				
Construction métallique	Entreposage			100 - 200	164	150 - 250	214
Fabrication de machines							
Fabrication de machines	Travail du métal		250				
Fabrication de machines	Entreposage, expédition			50 - 100	82	50 - 150	114
Transformation du plastique							
Fabrique de câbles							
Fabrique de câbles	Production	400 - 1700	1230				
Fabrique de câbles	Entreposage de produits finis			1600 - 4000	3132	5300 - 7900	6960
Feuilles et bâches							
Feuilles et bâches	Production	700 - 2400	1785				
Feuilles et bâches	Entreposage de produits finis			900 - 2200	1730	1300 - 3000	2385
Matières synthétiques							
Matières synthétiques	Entreposage de matières premières (granulés)			4100 - 5100	4739	5100 - 10100	8293
Bouteilles PET	Moulage par injection		800				
Bouteilles PET	Entreposage			400 - 1000	783	500 - 2100	1522
Polystyrol	Découpage	100 - 300	228				
Polystyrol	Entreposage			200 - 400	328	400 - 500	464
Mousses	Entreposage (rembourrage, matelas)			300 - 400	364	500 - 700	628
Moulage par injection							
Moulage par injection	Production	100 - 1600	1058				
Moulage par injection	Entreposage de produits finis			1400 - 2100	1847	1600 - 2600	2239
Panneaux de mousse dure							
Panneaux de mousse dure	Production		1600				
Panneaux de mousse dure	Entreposage de produits finis				1700		3100

Tuyaux, conduites							
Tuyaux, conduites	Production	700 - 2000	1530				
Tuyaux, conduites	Entreposage de produits finis			1300 - 3200	2513	1600 - 5300	3963
Travail du bois							
Charpenterie							
Charpenterie	Production pure		900				
Charpenterie	Halle de production avec dépôt intermédiaire	1400 - 3600	2805				
Charpenterie	Entreposage			1700 - 2800	2402	1800 - 4600	3588
Commerce d'articles en bois							
Commerce d'articles en bois	Débitage		5000				
Commerce d'articles en bois	Entreposage			1300 - 2500	2066	2400 - 7500	5656
Entrepôt de briquettes							
Entrepôt de briquettes	Entreposage				11600		16600
Fabrique de panneaux de particules							
Fabrique de panneaux de particules	Production de panneaux de particules	900 - 1300	1155				
Fabrique de panneaux de particules	Entreposage			4100 - 6600	5696	6200 - 10200	8754
Menuiserie du bâtiment et d'intérieur							
Menuiserie	Production pure		900				
Menuiserie	Production avec dépôt intermédiaire	900 - 2000	1602				
Menuiserie	Entreposage			1000 - 3000	2277	1300 - 5000	3663
Menuiserie	Fabrication de meubles rembourrés	500 - 550	532				
Menuiserie	Laquage de meubles	250 - 600	473				
Scierie							
Scierie	Scierie	1000 - 1700	1447				
Scierie	Entrepôt de bois de sciage				2400		4900

Tableau 2 : Débit calorifique maximal par unité de surface RHR_f (Rate of Heat Release) (source NBN S 21-208 annexe B).

Produits stockés	RHR [kW/m ²]	h_t [m]
Foyer-type de bois	290	0,1
	544	0,2
	990	0,4
	1582	0,8
Palettes de bois	1250	0,5
	3500	1,5
	6000	3,0
	9000	4,9
Meubles en caisse	100	3,3
Planches sciées empilées	82	1,5
Panneaux de particules empilés	134	2,4
Matériaux cellulositiques	160	-
Sacs postaux	350	1,5
Feuilles de carton empilées	524	1,8
Rouleaux de carton	840	7,0
Boîtes de carton	1030	7,0
Boîtes de carton compartimentées	1500	4,6
Matériel électrique en cartons	284	2,0
Produits emballés en général	1130	3,6
Atelier de réparation de voiture, essence, peintures	260	0,8
Garage de camions	1860	-
Produits industriels méthyliques	740	-
Essence	1590	-
Fuel léger	1470	-
Composants en fibre de verre, en boîte	870	4,6
Cellules de douches en PE renforcé de fibres de verre emballées en cartons empilés	1250	4,6
Bouteilles en plastique en boîtes	4320	4,6
Bouteilles PVC emballées en cartons compartimentés empilés	3000	4,6
Bouteilles PE emballées en cartons compartimentés empilés	5500	4,6
Bouteilles PE emballées en cartons empilés	1750	4,6

Produits stockés	RHR [kW/m ²]	h _t [m]
Casiers à lettres en PE remplis et empilés	7500	1,5
Poubelles de PE en carton, empilés	1750	4,6
Films de matière plastique en rouleaux	4200	4,3
Film de PP et PE en rouleaux, empilés	5500	4,3
Bains en PP emballés dans des cartons fermés, empilés	3900	4,6
Isolant en PU empilé	1210	4,6
Panneaux d'isolant en mousse rigide de PU en cartons fermés, empilés	1700	4,6
Panneaux d'isolant en mousse rigide de PS, empilés	2900	4,3
Réservoirs en PS emballés dans des cartons	12440	4,6
Récipients en PS, en boîtes	3450	4,3
Bains en PS emboîtés dans des cartons, empilés	4750	4,3
Jouets en PS, en boîtes	1400	4,6
Jouets en PS en pièces détachées emballées dans des cartons empilés	1800	4,6

PE = polyéthylène
PVC = chlorure de polyvinyl
h_t = Hauteur du stockage

PP = polypropylène
PS = polystyrène

PU = polyuréthane

Tableau 3 : Pouvoir calorifique « Hu » de divers matériaux et produits.

Sources : AEAI (Association des établissements cantonaux d'assurance incendie Suisse)

Le tableau donne le pouvoir calorifique à considérer pour des matériaux et produits typiques utilisés dans la construction et pour les aménagements intérieurs.

Matériau	Valeur	Unité
ABS	35.20	MJ/kg
Acétate d'éthyle	20.80	MJ/kg
Acétone (0.8 kg/litre)	28.80	MJ/kg
Acide cyanoacétique	16.92	MJ/kg
Acide sulfhydrique	15.12	MJ/kg
Alcool (0.7 kg/litre)	27.00	MJ/kg
Aliments ⁴⁾	15.60	MJ/kg
Amidon	17.60	MJ/kg
Appareils électriques ¹⁾	10.00	MJ/kg
Appareils téléphoniques	41.76	MJ/kg
Armoires roulantes / archives	114.60	MJ/m ³
Beurre	38.20	MJ/kg
Biscuits	17.60	MJ/kg
Biscuits au beurre	17.20	MJ/kg
Bitume	35.28	MJ/kg
Bois: - hêtre	18.70	MJ/kg
- bouleau	18.70	MJ/kg
- pin douglas	19.60	MJ/kg
- érable	17.80	MJ/kg
- chêne	18.70	MJ/kg
- épicéa	20.40	MJ/kg
- pin	17.80	MJ/kg
Bois de sciage	12.60	MJ/kg
Bonbons, simples	16.10	MJ/kg
Calcium	15.50	MJ/kg
Caoutchouc ²⁾	39.06	MJ/kg
Carton	16.50	MJ/kg
Carton-pâte	16.80	MJ/kg
Cellulose	16.30	MJ/kg
Cellulose, dérivés de	29.30	MJ/kg
Charbon de bois	33.70	MJ/kg
Chocolat au lait	23.50	MJ/kg
Chocolat noir	23.50	MJ/kg
Colle, à eau	5.00	MJ/kg
Contreplaqué 5 mm	53.00	MJ/m ²
Coton (balles)	15.48	MJ/kg
Coton (fibre textile)	17.40	MJ/kg
Cuir	19.80	MJ/kg
Ecran, terminal avec écran	137.88	MJ/pièce
EPS (polystyrène) - styropor	38.00	MJ/kg

Matériau	Valeur	Unité
Essence de nettoyage = white-spirit	43.50	MJ/kg
Farine	15.90	MJ/kg
Farine de maïs	15.70	MJ/kg
Farine de riz	15.50	MJ/kg
Farine de seigle	16.56	MJ/kg
Fibres textiles en coton	17.40	MJ/kg
Fibres textiles en laine	23.20	MJ/kg
Fromage ³⁾	13.10	MJ/kg
Graisse	40.00	MJ/kg
Huile à moteur	41.60	MJ/kg
Huile hydraulique (0.91 kg/litre)	35.70	MJ/kg
Huile lubrifiante	42.00	MJ/kg
Huile pour machines	42.30	MJ/kg
Huile solaire	25.10	MJ/kg
Kérosène (J P1)	43.00	MJ/kg
Laine	23.20	MJ/kg
Lampadaires	20.00	MJ/pièce
Lampes	15.00	MJ/pièce
Légumes (frais)	10.00	MJ/kg
Margarine	32.40	MJ/kg
Mousse	39.80	MJ/kg
Nitrate de potassium	4.68	MJ/kg
Noisettes	16.80	MJ/kg
Nylon	29.88	MJ/kg
Ordinateur avec imprimante	100.00	MJ/pièce
Palettes (en bois)	369.60	MJ/ pièce
Panneaux de particules	17.28	MJ/kg
Panneaux de particules de bois	19.20	MJ/kg
Panneaux de particules de bois 19 mm	295.20	MJ/m ²
Papier	16.50	MJ/kg
Papier, empilé de manière non compacte	17.60	MJ/kg
Papier, papier de toilette	17.60	MJ/kg
Papier, vieux papier	13.40	MJ/kg
Papier, vieux papier en balles	15.12	MJ/kg
Parfumerie, articles de	25.20	MJ/kg
Pâtes alimentaires, pâtes aux œufs	15.10	MJ/kg
PE (polyéthylène), récipients ou pièces moulées	43.92	MJ/kg
PE, feuilles	44.50	MJ/kg
Peinture, en général, combustible	42.00	MJ/kg
Perceuse	110.50	MJ/pièce
Pétrole brut	43.50	MJ/kg
PMMA	24.84	MJ/kg
Pneus	27.70	MJ/kg
Polyamide	28.44	MJ/kg
Polycarbonate	29.88	MJ/kg
Polyester	27.36	MJ/kg

Matériau	Valeur	Unité
Polyéthylène	43.92	MJ/kg
Polyoxyméthylène	15.48	MJ/kg
Polypropylène	43.92	MJ/kg
Polystirol	39.60	MJ/kg
Polyuréthane	22.70	MJ/kg
Poudre de lait, entier	21.00	MJ/kg
Poudre de lait, maigre	15.50	MJ/kg
PP	45.36	MJ/kg
Propène	45.60	MJ/kg
PS	39.60	MJ/kg
PU dur	24.12	MJ/kg
PU souple	23.04	MJ/kg
PVC	18.00	MJ/kg
Résine époxy, EP	29.16	MJ/kg
Résine polyester (GFK)	19.08	MJ/kg
Savon	46.90	MJ/kg
Sucre	17.10	MJ/kg
Sucre de canne	16.80	MJ/kg
Tabac	16.50	MJ/kg
Tapis	46.20	MJ/m ²
Téléviseurs en couleurs	313.56	MJ/pièce
Textiles	22.32	MJ/kg
Verre	28.80	MJ/kg
Vêtements	21.00	MJ/kg
Vieux papier	13.50	MJ/kg
Viscose, articles en	17.60	MJ/kg
Viscose, fibres de	15.60	MJ/kg
White-spirit, essence de nettoyage	43.50	MJ/kg
Xylène	40.00	MJ/kg

ANNEXE II : Modèle de calcul au feu naturel

La note de justification de la résistance au feu naturel doit contenir 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 d'exploitation, 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 e.g. S355JR, classe du béton e.g. C30/37...)
- Définition des compartiments au feu et des cellules étudiés (plans, surface, caractéristiques de parois et des portes)
 - Plans d'architectes définissant les compartiments au 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 E 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 de porte et cloisons (spécifications du degré de résistance au feu ; si pas de résistance au feu, nature des cloisons)
 - Définition des surfaces vitrés (spécifications du degré de résistance au feu et au choc; en absence de spécifications, nature des vitrages et des châssis ; voir catégories §3.2.6)
- 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_a) 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. courbe paramétrique, 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 (éventuellement nombres d'approvisionnements en eau indépendants)
 - détection automatique par la chaleur et/ou par la fumée ;
 - transmission automatique de l'alarme aux pompiers
 - pompiers d'entreprises
 - voies d'accès sécurisées
 - équipements de lutte contre le feu
 - systèmes de désenfumage dans les escaliers
- Détermination du profil de risque en fonction de la catégorie d'occupation et du nombre de niveaux.
- Détermination du type d'analyse de structure à réaliser (analyse des risques restants) en fonction du profil de risque

Résultats à fournir :

Résumé des compartiments et cellules 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).

- évolution de la température dans la structure pour le scenario considéré le plus défavorable. 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 portante, en considérant singles éléments, des parties de la structure ou la structure entière (ex. poutre + poteau, portiques, hall industriel). La résistance au feu doit être garantie en conformité avec l'article 9 de ce document.
 - Si on ne considère pas la structure dans son ensemble, l'éventuelle interaction entre les éléments singulièrement considéré ou des parties de structure analysée doit être tout de même impérativement prise en compte (influence de la dilatation thermique, de la modification de rigidité, de la déformation des éléments adjacents). Cette interaction peut être négligée dans le cas ou elle aura un effet favorable.
 - La vérification doit être faite avec des méthodes reconnues ainsi que:
 - Méthodes simplifiés contenues dans l'Eurocode
 - Méthodes analytiques conformes aux principes des Eurocodes
 - Méthodes de vérification avancées (ex. logiciels aux éléments finis).
 Dans ce dernier cas, il est nécessaire de montre la validité de la méthode utilisée pour l'application prévue (par document de validation annexé ou référence aux documents scientifiques de validité reconnue).
 - Justification des détails constructifs de la structure (ex. assemblages) pour la résistance au feu requise et en conformité au comportement prévu.

ANNEXE III : Méthode de détermination des charges au feu caractéristiques.

Source : source VKF-AEAI : Note explicative de protection incendie (19.12.2007)

<http://bsvonline.vkf.ch/web/BSVonlineStart.asp?Sprache=f>

Cette source a été utilisée de la façon suivante pour obtenir les charges au feu caractéristiques.

Cette source donne un intervalle de variation des charges au feu.

La valeur limite inférieure de l'intervalle est supposée être la valeur correspondant au fractile 5% et est notée $q_m^{5\%}$

La valeur limite supérieure de l'intervalle est supposée être la valeur correspondant au fractile 95% et est notée $q_m^{95\%}$

Les charges au feu sont supposées se distribuer suivant une loi statistique de Gumbel.

Dès lors, la moyenne μ et le coefficient de variation V se calcule par les formules suivantes :

$$V = \frac{1 - \frac{q_m^{5\%}}{q_m^{95\%}}}{\left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,05))] \right] - \left(\frac{q_m^{5\%}}{q_m^{95\%}} \right) \cdot \left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,95))] \right]}$$

$$\mu = \frac{q_m^{5\%}}{1 - \left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,05))] \right] \cdot V}$$

La moyenne et le coefficient de variation étant connus, la valeur caractéristique correspondant au fractile 80% se déduit par la formule suivante :

$$q_{f,k}^{80\%} = \mu \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V \cdot [0,577 + \ln(-\ln(0,08))] \right]$$

A titre d'exemple,

Occupation		Production		Entreposage		Entreposage net	
		Densité de charges calorifiques de - à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile	Densité de charges calorifiques de - à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile	Densité de charges calorifiques de - à (mesures suisses)	Densité de charges calorifiques caractérist. 80% fractile
		q_m MJ/m ²	$q_{f,k}$ MJ/m ²	q_m MJ/m ³	$q_{f,k}$ MJ/m ³	q_m MJ/m ³	$q_{f,k}$ MJ/m ³
Carton & Papier							
Fabrique de papier	Entreposage de matières premières (vieux papier, en vrac)			1700 - 3700	2977	2200 - 5400	4243

La valeur limite inférieure de l'intervalle notée $q_m^{5\%}$ vaut 1700 MJ/m³.

La valeur limite supérieure de l'intervalle notée $q_m^{95\%}$ vaut 3700 MJ/m³.

Le coefficient de variation V et la moyenne μ valent :

- $$V = \frac{1 - \frac{q_m^{5\%}}{q_m^{95\%}}}{\left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,05))] \right] - \left(\frac{q_m^{5\%}}{q_m^{95\%}} \right) \cdot \left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,95))] \right]} = 0,25$$
- $$\mu = \frac{q_m^{5\%}}{1 - \left[\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln(-\ln(0,05))] \right] \cdot V} = 2523 \text{ MJ/m}^3$$

La valeur caractéristique correspondant au fractile 80% vaut :

$$q_{f,k}^{80\%} = \mu \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V \cdot [0,577 + \ln(-\ln(0,08))] \right] = 2977 \text{ MJ/m}^3$$