



Programme d'éducation
et de formation
tout au long de la vie

PROJET SKILLS

BÂTIMENTS EN ACIER EN EUROPE

Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée

Partie 7 : Ingénierie incendie



Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée
Partie 7 : Ingénierie incendie

AVANT-PROPOS

Cette publication est la septième partie du guide de conception et calcul : *Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée*.

Les 11 parties de ce guide sont :

- Partie 1 : Guide pour les architectes
- Partie 2 : Conception
- Partie 3 : Actions
- Partie 4 : Conception et calcul des portiques
- Partie 5 : Conception et calcul des structures à treillis
- Partie 6 : Conception et calcul des poteaux composés
- Partie 7 : Ingénierie incendie
- Partie 8 : Enveloppe des bâtiments
- Partie 9 : Introduction aux logiciels de calcul
- Partie 10 : Guide pour la spécification d'un projet de construction
- Partie 11 : Attaches transmettant des moments

Le guide *Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée* est le premier d'un ensemble en deux volumes, le second s'intitulant *Bâtiments en acier à plusieurs niveaux*.

Ces deux guides ont été réalisés dans le cadre du projet européen "Facilitating the market development for sections in industrial halls and low rise buildings (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030" que l'on peut traduire en français par « Faciliter le développement du marché des profilés laminés pour les halles industrielles et les bâtiments de faible hauteur ».

Ces guides de conception et de calcul ont été rédigés sous la direction d'ArcelorMittal, Peiner Träger et Corus. Le contenu technique a été préparé par le CTICM et le SCI, collaborant dans le cadre de « Steel Alliance », réalisée grâce à une subvention financière du Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier (RFCS) de la Communauté européenne.

La traduction française de la présente publication a été réalisée dans le cadre du projet SKILLS, sous l'égide du CTICM et dans le cadre d'une collaboration avec ConstruirAcier et l'APK. Le projet SKILLS a été financé avec le soutien de la Commission européenne. Cette publication n'engage que son auteur et la Commission n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y sont contenues.

Contenu

	Page n°
AVANT-PROPOS	iii
RÉSUMÉ	vi
1 INTRODUCTION	7
2 RISQUES INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS À SIMPLE REZ-DE-CHAUSSÉE	9
2.1 Objectifs de sécurité incendie	9
2.2 Analyse du risque incendie	9
2.3 Exigences principales des réglementations de sécurité incendie actuelles	10
3 OPTIONS D'INGÉNIERIE INCENDIE DES EUROCODES	13
3.1 Approches de calcul courantes	13
3.2 Analyse en situation d'incendie	14
3.3 Analyse du transfert thermique	15
3.4 Analyse structurale	15
4 GUIDE DE SOLUTIONS APPROPRIÉES D'INGÉNIERIE INCENDIE	18
4.1 Champ d'application des différentes méthodes de calcul	18
4.2 Choix d'une approche de calcul optimale	19
5 UTILISATION DIRECTE D'UNE APPROCHE D'INGÉNIERIE SIMPLIFIÉE POUR DES NON SPÉCIALISTES	21
5.1 Modèles de feux	21
5.2 Modèles thermiques	25
5.3 Modèles structuraux	30
5.4 Règles de calcul spécifiques aux bâtiments à simple rez-de-chaussée	41
5.5 Méthodes de calcul simplifiées	43
5.6 Recommandations de conception	48
6 GUIDE POUR L'UTILISATION DE SOLUTIONS PLUS AVANCÉES	58
6.1 Modèles de feu	58
6.2 Modèles thermiques	61
6.3 Modèles structuraux	63
RÉFÉRENCES	68

RÉSUMÉ

Ce document fournit des recommandations pour la conception à l'incendie des bâtiments à simple rez-de-chaussée. Il contient des informations détaillées pour permettre aux ingénieurs et aux projeteurs de se familiariser avec les différentes procédures et les modèles de calcul qui peuvent être appliqués actuellement, non seulement pour satisfaire les exigences prescriptives, mais aussi pour mener une approche performentielle (fondée sur des objectifs) utilisant l'ingénierie de la sécurité incendie. Les méthodes de calcul introduites dans ce guide, allant des règles de calcul simplifiées aux modèles les plus sophistiqués, sont issues de l'EN 1993-1-2 et de l'EN 1994-1-2. Elles couvrent à la fois les structures en acier et les structures mixtes acier-béton (protégées et non protégées). Par ailleurs, des règles de calcul spécifiques sont données également pour vérifier simplement si le comportement de la structure métallique des bâtiments industriels à simple rez-de-chaussée satisfait les exigences de performance introduites récemment dans les réglementations incendie de plusieurs pays européens.

1 INTRODUCTION

Du fait des spécificités des bâtiments à simple rez-de-chaussée, l'objectif de sécurité des vies humaines en cas d'incendie peut facilement être atteint sans exiger de degré de résistance au feu élevé pour la structure. Toutefois, d'autres objectifs de sécurité doivent être pris en compte si la ruine de tout ou partie de ces bâtiments peut être acceptée. C'est pourquoi plusieurs réglementations européennes traitant de la sécurité incendie des bâtiments évoluent vers l'acceptation de conception alternative basée sur l'ingénierie de la sécurité incendie. Les règles prescriptives peuvent alors être remplacées par des exigences de performances, comme un comportement adéquat de la structure en situation d'incendie, dans le but de satisfaire les objectifs de sécurité qui incluent la sécurité des personnes (occupants et pompiers), la protection de l'environnement, la protection des biens et la poursuite des activités. Les avantages apportés par l'application de l'approche performantielle dans la conception des constructions vis-à-vis de la sécurité incendie ont déjà été démontrés pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée, en particulier lorsqu'une résistance au feu était exigée, autorisant dans certains cas l'adoption de solutions plus novatrices, moins coûteuses et plus sûres.

Pour aider au calcul du comportement au feu des bâtiments, un nouvel ensemble de normes européennes, les Eurocodes, a été développé. Les parties des Eurocodes applicables au calcul à l'incendie des bâtiments à simple rez-de-chaussée sont l'EN 1991-1-2^[1] (qui contient les concepts principaux et les règles nécessaires pour décrire les actions thermiques et mécaniques agissant sur les structures exposées au feu) et les Parties qui traitent du calcul au feu des structures spécifiques à un matériau particulier, comme l'EN 1993-1-2^[2], relatif aux structures en acier et l'EN 1994-1-2^[3] relatif aux structures mixtes acier-béton.

Les Parties « Comportement à l'incendie » des Eurocodes fournissent à présent un large éventail de méthodes de calcul. Elles permettent aux ingénieurs de suivre, soit une approche prescriptive pour satisfaire les exigences prescrites dans les réglementations de sécurité incendie nationales, soit une approche performantielle utilisant l'ingénierie de la sécurité incendie qui demande, en général, des analyses numériques plus complexes mais qui fournit des réponses plus précises aux objectifs de sécurité incendie.

Le présent guide donne une vue d'ensemble des méthodes de calcul actuellement disponibles pour évaluer les performances à l'incendie des bâtiments à simple rez-de-chaussée constitués soit d'une structure en acier, soit d'une structure mixte acier-béton, ainsi que leur champ d'application. Des méthodes de calcul simplifiées, faciles d'utilisation, et des modèles de calcul plus avancés, sont traitées séparément. Par ailleurs, des règles de calcul simplifiées sont également fournies pour estimer rapidement si le comportement de la structure métallique des bâtiments de stockage ou des bâtiments industriels, remplit les objectifs de sécurité incendie prescrits par les réglementations relatives aux bâtiments de ce type.

Ce guide vise également à aider les ingénieurs à mieux comprendre les différentes approches et méthodes de calcul disponibles pour le calcul structural au feu d'un bâtiment à simple rez-de-chaussée selon les Eurocodes, à partir d'une analyse relativement simple d'éléments isolés soumis à des conditions d'incendie normalisé jusqu'à une analyse plus complexe sous conditions de feu réel.

2 RISQUES INCENDIE DANS LES BÂTIMENTS À SIMPLE REZ-DE-CHAUSSÉE

2.1 Objectifs de sécurité incendie

L'objectif principal de la plupart des réglementations de sécurité incendie est d'assurer la protection des vies humaines (occupants des bâtiments et services de secours), de l'environnement et des biens (contenu du bâtiment et bâtiment lui-même). A travers de nombreuses mesures incluant les systèmes de protection active et passive, les objectifs sont :

- De réduire et de prévenir les conséquences d'un feu en contrôlant le risque d'incendie dans le bâtiment ;
- De fournir des voies d'évacuation sûres pour les occupants du bâtiment ;
- De prévenir la propagation du feu du compartiment incendié aux autres parties du bâtiment et aux constructions contigües ;
- De s'assurer que le bâtiment présente une durée de stabilité au feu suffisante pour assurer l'évacuation des occupants et l'intervention des services de secours pour sauver, si nécessaire, les personnes restantes.

2.2 Analyse du risque incendie

Les bâtiments à simple rez-de-chaussée utilisés comme usines, entrepôts ou centre commerciaux, représentent aujourd'hui un type de construction en acier très courant. Dans le cas spécifique des entrepôts, selon la disposition du stockage (incluant le stockage libre, les racks à palettes, les stockages sur étagères pleines ou à lames...) et la combustibilité des matériaux stockés, le feu peut se développer très rapidement et, par conséquent, mettre les occupants en danger bien avant que ne survienne la ruine de la structure du bâtiment. En effet, le développement du feu peut être extrêmement important du fait de la propagation ascendante généralement très rapide des flammes. Les espaces (verticaux et horizontaux) séparant habituellement les palettes contigües et les supports se comportent alors comme des cheminées qui facilitent la propagation des flammes jusqu'au toit. La fumée dégagée lors de l'incendie forme rapidement une couche chaude sous la toiture, qui descend progressivement au fur et à mesure que le feu se développe. La vitesse à laquelle ce phénomène se produit dépend bien sûr des produits combustibles stockés et de leur disposition dans le bâtiment. En situation non ventilée, les bâtiments à simple rez-de-chaussée peuvent être enfumés entièrement en quelques minutes. Bien que la fumée soit principalement constituée d'air « entraîné », elle contient suffisamment de substances toxiques et asphyxiantes pour invalider ou tuer en quelques minutes les personnes qui y sont exposées. Par ailleurs, les fumées chaudes émettent des flux radiatifs très importants. Il est à noter qu'une couche de gaz chauds à 500°C émet un flux radiatif de l'ordre de 20 kW/m² (correspondant au flux radiatif émis par un corps noir à la température de 500°C), et que, sous de telles conditions, les brûlures cutanées surviennent après quelques secondes⁴. Il est généralement admis que le seuil de « tenabilité » est de 2,5 kW/m², ce qui est nettement plus faible que le niveau

de flux reçu lorsque les éléments de structure peuvent présenter un risque de ruine. Par conséquent, les bâtiments résistent à l'action du feu plus longtemps que les occupants et la ruine de l'ossature métallique d'un bâtiment à simple rez-de-chaussée ne constitue pas un risque supplémentaire pour la sécurité des personnes s'échappant de la zone incendiée.

En ce qui concerne les opérations de secours, il est communément admis que les pompiers ne doivent pas entrer dans un bâtiment à simple rez-de-chaussée en raison de la croissance rapide de l'incendie. En général, les opérations de lutte contre l'incendie sont menées de l'extérieur, les murs avoisinant la zone incendiée étant arrosée avec de l'eau. Dans ce cas, pour les pompiers, le risque dû à un effondrement de la structure est nul puisqu'il correspond à un niveau de température qui n'est plus supportable par les services de secours (sous réserve que la ruine en chaîne dans le cas de bâtiments compartimentés, ou que l'effondrement de la structure vers l'extérieur, ne se produise pas^[5,6]). Si, au début de l'incendie, les pompiers doivent entrer dans le bâtiment pour secourir des personnes, ils ne peuvent plus y rester lorsque le flux de chaleur ait atteint environ 7 kW/m², ce qui est également très éloigné du niveau de flux correspondant au risque de ruine de la structure.

Pour toutes ces raisons, une augmentation de la résistance au feu demandée pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée n'est pas nécessaire. En revanche, le comportement global de la structure et la stabilité au feu des murs coupe-feu requièrent une attention particulière pour écarter tout risque de ruine en chaîne. Pour rappel, un bâtiment à simple rez-de-chaussée risque une ruine en chaîne lorsqu'une ruine locale de la partie échauffée de la structure conduit à la ruine des parties restées froides situées dans une zone à l'abri des gaz chauds et des fumées. Par ailleurs, afin de garantir la sécurité des pompiers positionnés autour du bâtiment, la structure des bâtiments à simple rez-de-chaussée (éléments de façade compris) doit s'effondrer vers l'intérieur.

De nombreuses réglementations nationales ont déjà pris en compte les remarques précédentes pour les bâtiments industriels et les bâtiments publics à simple rez-de-chaussée en n'exigeant plus de durée de stabilité au feu particulière pour ces ouvrages mais en introduisant des exigences de sécurité spécifiques en matière de comportement structural global et en concentrant les exigences sur les moyens d'évacuation, sur la détection et la suppression de l'incendie.

En ce qui concerne les autres types de bâtiments à simple rez-de-chaussée avec des charges incendie relativement faibles, le risque de pertes en vies humaines lors d'un incendie est réduit du fait de l'évacuation facile des occupants et de la facilité et de la fiabilité des opérations de secours.

2.3 Exigences principales des réglementations de sécurité incendie actuelles

2.3.1 Résistance au feu des éléments structuraux

En dépit des commentaires précédents, un degré de résistance au feu est quelquefois exigé pour la structure des bâtiments à simple rez-de-chaussée^[7].

La résistance au feu est définie comme la durée pendant laquelle un élément de construction peut résister une exposition au feu sans perdre ses capacités (fonction porteuse ou séparative). Habituellement, les éléments de construction sont classifiés en utilisant trois critères de performance :

- La fonction porteuse, notée *R*, qui est l'aptitude d'un élément porteur à résister au feu sans perdre ses capacités de résistance structurale ;
- L'étanchéité, notée *E*, qui est l'aptitude d'un élément séparatif, en cas d'exposition au feu sur un côté, à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds du côté non exposé
- L'isolation, notée *I*, est l'aptitude d'un élément séparatif, en cas d'exposition au feu sur un côté, à limiter la montée en température de la face non exposée au-dessous des niveaux fixés (en général à une valeur moyenne de 140°C).

Dans les réglementations prescriptives, la résistance au feu exigée pour un élément de construction est exprimée en termes de durée minimale pendant laquelle cet élément doit « fonctionner » de manière satisfaisante lorsqu'il est exposé à l'incendie normalisé.

Lorsque des exigences de stabilité au feu sont données pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée, elles varient habituellement entre 15 (R15) et 60 minutes (R60), selon le type d'occupation du bâtiment, l'existence d'un système de sprinklers, la hauteur du bâtiment et la taille du compartiment.

2.3.2 Compartimentage et séparation entre bâtiments

Un bâtiment à simple rez-de-chaussée doit être subdivisé en compartiments séparés par des murs coupe-feu lorsque la surface au sol du bâtiment dépasse la dimension maximale autorisée pour un compartiment. Les limites sur la taille maximale des compartiments peuvent être étendues en équipant le bâtiment d'un système de sprinklers.

Le compartimentage permet de réduire les pertes matérielles en limitant les dommages directs au contenu du compartiment dans lequel l'incendie prend naissance, et en évitant que le feu ne s'étende plus largement. Au regard de la sécurité des vies personnes, les occupants présents dans les autres parties du bâtiment peuvent emprunter les voies d'évacuation et sortir en sécurité sans être exposés aux fumées ou aux gaz générés par l'incendie.

Le degré de résistance au feu demandé pour les murs coupe-feu séparant les compartiments varie habituellement de REI 60 à REI 120.

La propagation de l'incendie aux bâtiments voisins doit aussi être évitée. Cette exigence est habituellement satisfaite par des distances de séparation suffisantes entre bâtiments ou par l'implantation d'éléments de façade présentant une performance au feu adéquate. Dans le cadre du projet de recherche français Flumilog, une méthode de calcul a récemment été développée pour estimer les effets thermiques des feux dans les bâtiments de stockage à un seul niveau. Cette méthode permet de déterminer des distances de séparation sécuritaires en prenant en compte les caractéristiques principales du bâtiment, telles que son contenu, le type d'éléments de façade et de toiture, etc.

2.3.3 Suppression du feu

L'installation de systèmes de sprinklers peut être exigée par les réglementations de sécurité incendie. En plus de leur effet évident dans la limitation du développement de l'incendie, leur utilisation conduit généralement à une réduction du degré de résistance au feu exigé pour la structure. Ils permettent également d'augmenter la taille maximale autorisée des compartiments.

2.3.4 Systèmes de contrôle des fumées

Les réglementations de sécurité incendie peuvent exiger que des systèmes de contrôle de fumées soient installés dans les bâtiments publics, les bâtiments de stockage et les bâtiments industriels afin de faciliter l'évacuation des occupants, en minimisant les risques d'inhalation de fumées et de blessures. Dans une certaine mesure, ils permettent également aux pompiers de mieux voir le feu et par conséquent de pouvoir l'éteindre plus rapidement et plus efficacement.

Les systèmes de contrôle de fumées contribuent à évacuer la fumée de la zone incendiée et à limiter la propagation des gaz chauds sous la toiture. Ils augmentent le temps avant que le compartiment ne soit complètement enfumé, et donnent ainsi aux personnes plus de temps pour évacuer le bâtiment. Ceci peut être réalisé par une combinaison de systèmes de désenfumage (mécaniques ou naturels) et d'écrans de cantonnement (qui confinent les fumées dans des zones spécifiques).

2.3.5 Détection et alarmes incendie

Des mesures adéquates sont nécessaires pour détecter la naissance d'un incendie et pour alerter les occupants du bâtiment et les brigades de pompiers de l'occurrence d'un feu. Dans les petits bâtiments à simple rez-de-chaussée où toutes les issues sont visibles, il est probable qu'un incendie sera détecté rapidement par les occupants et que le cri « Au feu ! » est suffisant. Dans les bâtiments à simple rez-de-chaussée de taille plus importante, un simple signal sonore tel qu'une alarme alimentée sur batterie ou le tintement d'une cloche peut être suffisant. Dans un bâtiment industriel, le bruit ambiant doit être pris en compte, pour s'assurer que l'alarme sera entendue par les occupants.

2.3.6 Moyens d'évacuation

Pour évacuer en sécurité un bâtiment, il convient de prévoir des moyens d'évacuation appropriés, tels qu'un nombre suffisant de sorties de secours de largeur adaptée, des passages et des voies d'accès de dimensions appropriées. Généralement, les voies d'évacuation dans les petits bâtiments à simple rez-de-chaussée mènent directement à une zone sûre située à l'extérieur du bâtiment. Par conséquent, elles n'exigent en général aucune attention particulière. Dans les bâtiments plus grands, où les distances de parcours sont plus importantes et où le feu est susceptible de rendre très rapidement inutilisable une voie d'évacuation unique, des moyens d'évacuation alternatifs peuvent être nécessaires. Il convient également de prendre en compte les personnes handicapées.

3 OPTIONS D'INGÉNIERIE INCENDIE DES EUROCODES

3.1 Approches de calcul courantes

En utilisant les parties feu des Eurocodes^[8,9], les bâtiments à simple rez-de-chaussée peuvent être conçus en utilisant, soit l'approche prescriptive, soit l'approche performentielle (fondée sur les objectifs) utilisant l'ingénierie de la sécurité incendie^[10].

L'approche prescriptive est appliquée principalement pour répondre aux exigences définies en termes de résistance au feu normalisé prescrites habituellement dans les réglementations traitant de sécurité incendie. Elle donne un niveau de sécurité qui est relativement facile à atteindre et à mettre en œuvre. Elle peut cependant être très conservatrice, en conduisant à l'application d'une importante protection contre l'incendie afin d'obtenir le degré de résistance au feu exigé. Cette approche est habituellement utilisée pour le calcul de bâtiments et de structures relativement simples.

En alternative, ou lorsque cela est autorisé par les réglementations nationales, l'approche performentielle peut permettre, en fonction du risque réellement encouru dans l'ouvrage, d'évaluer de manière optimale les mesures nécessaires pour atteindre l'ensemble des objectifs de sécurité incendie retenus, telles que celles expliquées au paragraphe 2.1, et les critères de performance associés. En ayant recours à l'ingénierie du comportement au feu, les ingénieurs peuvent évaluer la résistance au feu nécessaire à la structure pour éviter propagation du feu et/ou pour éviter un effondrement prématuré de la structure. Concernant les bâtiments à simple rez-de-chaussée, la structure principale peut être conçue pour être stable au feu suffisamment longtemps pour permettre aux occupants d'évacuer le bâtiment. Une telle approche prend en compte la sévérité de l'incendie par des estimations appropriées des charges calorifiques réelles et des différents paramètres liés au développement de l'incendie qui peuvent être déterminés selon l'activité du bâtiment.

L'approche performentielle offre une plus grande souplesse dans le choix des solutions techniques permettant de remplir les objectifs de sécurité incendie. Toutefois, elle exige généralement l'utilisation d'outils de calcul sophistiqués. Les ingénieurs et les projeteurs utilisant des modèles de calcul avancés doivent avoir été formés convenablement pour pouvoir les maîtriser et connaître leurs limitations. Comme l'ingénierie de la sécurité incendie permet d'optimiser la conception et le dimensionnements des bâtiments, avec de faibles réserves de résistance, il est nécessaire que son utilisateur soit expérimenté pour s'assurer que les modèles utilisés sont appropriés.

Lorsque les réglementations traitant de la sécurité incendie autorisent le recours à l'approche performentielle, les organismes de contrôle peuvent exiger que le calcul au feu soit vérifié par une tierce partie.

La performance au feu de tout ou partie d'une structure, est évaluée, pour un scénario de feu donné, en appliquant successivement les trois étapes du calcul structural au feu^[1] suivantes.

- Analyse de l'incendie pour calculer les actions thermiques en utilisant un modèle de développement du feu.
- Analyse thermique pour déterminer la vitesse d'échauffement et les températures dans les éléments structuraux en appliquant un modèle thermique.
- Analyse structurale pour calculer la réponse mécanique des éléments structuraux en appliquant un modèle mécanique.

Les différentes méthodes de calcul disponibles pour évaluer la performance au feu d'une structure sont décrites brièvement ci-après. Ces méthodes vont de simples calculs manuels à l'utilisation de modèles numériques sophistiqués. La complexité des calculs au feu dépendra principalement des hypothèses et des méthodes adoptées pour mener les trois étapes du calcul structural au feu.

3.2 Analyse du feu

L'objectif principal de la modélisation d'un incendie est la simulation du développement du feu et la détermination des actions thermiques (température des gaz, flux de chaleur) impactant les éléments structuraux (afin de déterminer, dans une étape ultérieure, la température au sein de ces éléments).

Bien qu'une pratique courante consiste à représenter un incendie par une courbe de feu normalisé, un calcul structural au feu peut être basé sur un incendie de calcul qui fournit des conditions plus réalistes dans un compartiment. De cette manière, des paramètres comme la densité de charge calorifique, le débit calorifique ou les conditions de ventilation, qui jouent un rôle significatif dans la sévérité de l'incendie, sont pris en compte. Par ailleurs, l'identification de scénarios de feu de calcul pertinents est un aspect essentiel du calcul au feu. Les scénarios de feu de calcul utilisés pour l'analyse d'un feu de bâtiment doivent être déduits de tous les scénarios de feu possibles. Dans la plupart des bâtiments, le nombre de scénarios d'incendies possibles est infini et doit donc être réduit. Seuls les scénarios de feu les plus pertinents et les plus pénalisants devront être étudiés. Une fois les scénarios de feu de calcul sélectionnés, différents modèles de feu peuvent être utilisés pour estimer la sévérité de l'incendie et calculer les actions thermiques correspondantes.

Plusieurs niveaux de modèles de feux sont applicables aux différentes phases du développement d'un incendie. Lorsqu'un feu prend naissance dans un compartiment, il est tout d'abord localisé à l'intérieur du compartiment et, selon les caractéristiques de ce dernier et de la charge calorifique, il peut rester localisé ou se généraliser à l'ensemble du compartiment. Dans le cas de petits compartiments ou de compartiments avec des ouvertures de petites dimensions par rapport à celles du compartiment, le feu se développe complètement et devient généralisé.

Trois niveaux de modélisation sont disponibles pour décrire les incendies, qu'ils soient localisés ou généralisés, comme indiqué dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Niveaux des modèles d'incendie

Niveaux du modèle	Feu localisé	Feu généralisé
Modèle simplifié	Modèle d'Hasemi Modèle d'Heskestad	Feux paramétrés
Modèles de zones	Modèle 2 zones	Modèle 1 zone
Modèles de champs	CFD	CFD

Les modèles simplifiés sont généralement des modèles empiriques fondés sur des hypothèses conventionnelles. Les modèles de zones prennent en compte les principaux paramètres contrôlant l'incendie. Toutefois, ils sont basés sur des hypothèses simplificatrices qui en limitent le domaine d'application. Ils devraient être utilisés dans les compartiments pour lesquels les géométries sont simples et faciles à définir. Les modèles de champs sont plus précis mais ils sont trop complexes pour être utilisés quotidiennement comme outil de calcul ; ils devraient être utilisés dans les compartiments avec des géométries complexes ou avec des plafonds hauts et irréguliers.

Les conditions d'utilisation de ces modèles sont brièvement détaillées au Chapitre 6.

3.3 Analyse du transfert thermique

Une fois les actions thermiques calculées, l'échauffement des éléments structuraux peut être calculé. Les modèles de transfert thermique qui seront utilisés doivent être basés sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie du transfert de chaleur.

Différentes modélisations peuvent être utilisées selon les hypothèses et les besoins. Parmi les modèles thermiques, on peut distinguer les règles analytiques qui permettent d'obtenir l'estimation d'une température uniforme en section, principalement pour les éléments en acier. Il existe aussi des méthodes de calcul avancées fondées principalement sur la méthode aux éléments finis ou aux différences finies, permettant de déterminer la distribution de température en 2D ou en 3D dans les éléments structuraux (sur la section transversale et selon la longueur des éléments). Les modèles de calcul avancés peuvent être appliqués à tout type de structure exposée au feu.

Les modèles thermiques sont détaillés brièvement dans les chapitres suivants.

3.4 Analyse structurale

A partir des champs de températures obtenus précédemment dans les éléments structuraux et sur la base des combinaisons des actions mécaniques en situation d'incendie, le comportement mécanique peut être déterminé en suivant l'une des trois approches suivantes :

- Analyse par élément, dans laquelle chaque élément de structure (poutre, poteau, dalle, etc.) est étudié en supposant qu'il est complètement isolé des autres éléments. Les conditions de liaison avec les autres éléments seront remplacées par des conditions aux limites appropriées ;

- Analyse de parties de la structure, dans laquelle un sous-ensemble d'éléments structuraux est pris en compte directement dans le calcul avec des conditions aux limites appropriées pour représenter ses liaisons avec les autres parties de la structure ;
- Analyse globale de la structure, dans laquelle la structure complète est considérée dans le calcul.

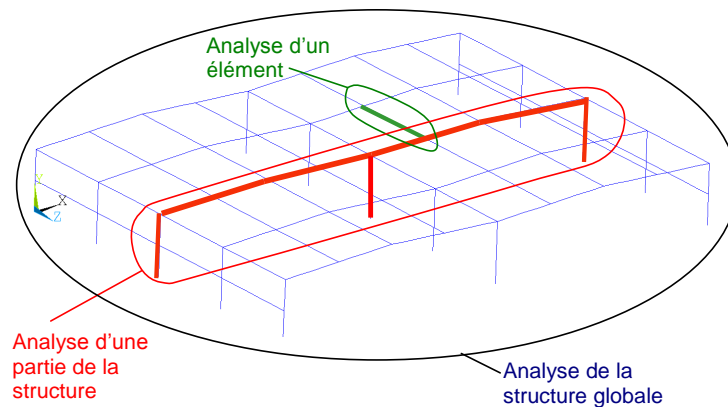


Figure 3.1 Différentes approches de calcul pour l'évaluation de la réponse mécanique des structures en cas d'incendie

L'analyse par éléments est facile à appliquer, en particulier avec les méthodes de calcul simplifiées. Par conséquent, elle est très largement appliquée pour justifier les structures sous condition de l'incendie normalisé. L'analyse globale de la structure ou l'analyse de parties de cette structure considère au moins plusieurs éléments de la structure, si bien que l'effet de leur interaction ainsi que la redistribution de charge des parties échauffées (parties affaiblies à l'intérieur du compartiment en feu) aux parties froides (parties plus résistantes en dehors du compartiment en feu) peuvent être pris en compte directement et de manière précise. Par conséquent, l'analyse globale permet d'obtenir une estimation plus réaliste du comportement au feu de la structure.

Selon les Eurocodes, trois types de méthodes de calcul peuvent être utilisées pour estimer le comportement mécanique des structures en situation d'incendie avec les différentes approches de calcul exposées précédemment. Un calcul au feu peut être réalisé au moyen de :

- Une méthode de calcul simplifiée, basée sur des données tabulées prédéfinies, comme c'est le cas dans l'EN 1994-1-2[3]. Cette méthode est seulement applicable aux éléments de structure mixtes acier-béton. Les tableaux ont été établis à partir de résultats à la fois numériques et expérimentaux pour différents types d'éléments de structure, tels que des dalles, des poutres et des poteaux, pour une durée de résistance au feu donnée, pour un échauffement correspondant aux conditions de l'incendie normalisé et pour un niveau de chargement fixé. Les tableaux sont faciles à utiliser et placent en sécurité mais ils ne couvrent qu'une gamme limitée de types de sections.
- Les modèles de calcul simplifiés. Ce type de méthode de calcul peut être divisé en deux familles distinctes. La première est la méthode de la température critique largement appliquée à l'analyse d'éléments structuraux

en acier. La seconde est l'utilisation de modèles mécaniques simplifiés (vérification dans le domaine des résistances) établis pour l'analyse par élément et applicables aux structures soit en acier, soit mixtes acier-béton. Ces modèles ont été développés pour les éléments structuraux les plus courants, à savoir les dalles, les poutres et les poteaux par exemple.

- Les modèles de calcul avancés. Ce type de méthode de calcul peut être appliqué à tous les types de structures et les modèles sont, en général, basés sur la méthode aux éléments finis. Ils fournissent une analyse réaliste des structures. Les résultats de calcul sont généralement définis en termes de déformation de la structure pendant toute la durée de l'incendie.

Les modèles structuraux sont détaillés brièvement dans les chapitres suivants.

4 GUIDE DE SOLUTIONS APPROPRIÉES D'INGÉNIERIE INCENDIE

4.1 Champ d'application des différentes méthodes de calcul

Le tableau suivant montre le champ d'application des différentes méthodes de calcul disponibles pour le calcul structural au feu en distinguant soit un calcul suivant les exigences prescriptives fondées sur l'incendie normalisé, soit un calcul basé sur l'approche performentielle^[11].

Tableau 4.1 Champ d'application des différentes méthodes de calcul

Approche	Outils	Actions thermiques	Modélisation thermique	Modélisation structurale
Approche prescriptive (calcul à l'incendie normalisé)	Données pré-calculées à partir d'essais au feu normalisé (données des fabricants)	Courbe ISO normalisée EN 1991-1-2		
	Données tabulées à partir de l'EN 1994-1-2		EN 1994-1-2, §4.2	
	Modèles de calcul simplifiés donnés dans les Eurocodes		Acier EN 1993-1-2 §4.2.5	Acier EN 1993-1-2 §4.2.3 §4.2.4
			Mixte EN 1994-1-2 §4.3	
	Modèles de calcul avancés		Acier et mixte	
			FEA* ou FDA**	FEA*
Approche performentielle (calcul au feu naturel)	Modèles de calcul simplifiés	Feu généralisé (feu paramétré, courbe ISO normalisée***) Feu localisé	Acier EN 1993-1-2 §4.2.5	Acier EN 1993-1-2 §4.2.3 §4.2.4 Règles spécifiques basées sur un feu généralisé §5.4
	Modèles de calcul avancés	Modèles de zones	Acier et mixte	
		Modèles de champs	FEA* ou FDA**	FEA*

*FEA : Analyse aux éléments finis **FDA : Analyse par les différences finies

*** La ruine des bâtiments à simple rez-de-chaussée survient habituellement quand la structure du bâtiment (une partie ou la totalité de la structure) est totalement exposée au feu (incendie généralisé dans le compartiment). Dans de telles conditions d'incendie, du fait que la vitesse de montée en température des gaz n'a aucun effet significatif sur le mode de ruine de la structure du bâtiment, une approche performentielle se référant aux actions thermiques déduites de la courbe d'incendie normalisé convient pour estimer le comportement au feu des bâtiments à simple rez-de-chaussée. Cette approche peut être utilisée pour démontrer

l'absence de ruine en chaîne et démontrer que la ruine n'est pas progressive et que l'effondrement se produit vers l'intérieur du bâtiment.

4.2 Choix d'une approche de calcul optimale

Le choix de l'approche de calcul dépend du type de bâtiment (bâtiment de stockage, bâtiment industriel, bâtiment commercial, etc.), des exigences spécifiées dans la réglementation correspondante traitant de la sécurité incendie et de l'acceptation ou non par les autorités d'appliquer une approche performentielle comme alternative aux règles prescriptives.

Quelques suggestions sur le choix de l'approche du calcul au feu sont données ci-dessous.

Avec la diversité des exigences, la première étape la plus importante est de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le degré de résistance au feu exigé, s'il existe ?
- Est-il possible de mener une approche performentielle ?

Quand une approche prescriptive doit être utilisée (calcul sous feu normalisé) :

- Il peut être approprié d'utiliser des modèles de calcul simplifiés lorsque de faibles degrés de résistance au feu (R15 or R30) sont exigés pour les éléments structuraux ;
- Les modèles de calcul avancés doivent être utilisés lorsque les éléments structuraux ne sont pas couverts par les modèles de calcul simplifiés. Ils peuvent aussi être utilisés avec un intérêt économique pour les structures en acier où des degrés de résistance au feu élevés (supérieurs à R60) sont exigés car ils peuvent permettre de réduire l'épaisseur de protection contre l'incendie à appliquer sur les éléments en acier.

Si l'approche performentielle est acceptée par les autorités réglementaires nationales et qu'une stabilité structurale est demandée :

- Une approche performentielle est probablement la plus intéressante si la structure est inhabituelle et ne peut être traitée avec les méthodes prescriptives traditionnelles.
- Une protection contre l'incendie localisé peut être nécessaire, compte tenu du comportement global de l'ensemble de la structure sous feu réel, pour atteindre l'objectif recherché en matière de sécurité des personnes, (occupants du bâtiment et services de secours).

Les réglementations nationales traitant de la sécurité incendie peuvent exiger l'utilisation d'une approche performentielle pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée présentant des risques d'incendie significatifs (avec charges calorifiques importantes).

Les réglementations nationales traitant de la sécurité incendie peuvent permettre le recours à une approche performentielle s'appuyant sur des règles simplifiées et des recommandations constructives pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée. De telles approches sont données au §5.4. D'autres

recommandations et règles de conception peuvent être trouvées dans la référence^[12].

Des mesures de protection actives contre l'incendie (installation de sprinklers, de détecteurs d'incendie, d'alarmes incendie, de système de désenfumage) et des mesures de protection passives contre le feu (compartimentage, moyens d'évacuation, etc.) sont habituellement installées dans les bâtiments en accord avec les exigences spécifiées dans les réglementations nationales traitant de la sécurité incendie.

5 UTILISATION DIRECTE D'UNE APPROCHE D'INGÉNIERIE SIMPLIFIÉE POUR DES NON SPÉCIALISTES

Ce chapitre donne une vue d'ensemble de règles de calcul « simplifiées », courantes et faciles à utiliser pour l'évaluation de la résistance au feu d'éléments structuraux en acier ou mixtes acier-béton.

Sont également données, des règles de calcul simplifiées et des recommandations constructives pour satisfaire les exigences spécifiques exprimées en termes de comportement structural qui ont été récemment introduites dans les réglementations traitant de la sécurité incendie de plusieurs pays européens pour les bâtiments industriels et de stockage à un seul niveau. Il est à noter que ces méthodes sont également applicables à d'autres types de bâtiments à simple rez-de-chaussée.

5.1 Modèles de feux

5.1.1 Courbes nominales température/temps

L'EN 1991-1-2^[1] donne trois courbes de feu normalisées, définissant arbitrairement les équations de la température des gaz chaud en fonction du temps. Dans ces équations, aucun paramètre physique n'est pris en compte. La courbe la plus couramment utilisée dans le calcul au feu des structures et pour les prescriptions réglementaires est la courbe température/temps normalisée (*feu ISO normalisé*) qui représente un feu pleinement développé (feu généralisé) dans un compartiment. La seconde courbe, la courbe de feu extérieur, est destinée aux éléments de façade et la troisième courbe, la courbe d'hydrocarbure, représente un feu avec un combustible de type liquide ou hydrocarboné.

Les courbes nominales température/temps sont définies comme suit :

- Pour la courbe température/temps normalisée (*feu ISO normalisé*) :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

- Pour la courbe de feu extérieur :

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

- Pour la courbe d'hydrocarbure :

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

où :

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

t est le temps [min].

Il est important de noter que les courbes précédentes sont des courbes de référence. Elles ne reflètent pas l'effet thermique réel d'un incendie. En effet,

les températures données par ces courbes sont continuellement croissantes avec le temps, sans considérer que la charge calorifique est limitée. Par conséquent, le degré de résistance au feu normalisé exigé réglementairement pour les éléments structuraux (exprimé en temps) n'indique pas le temps réel pendant lequel ils résisteront dans le cas d'un incendie réel se déclarant dans un bâtiment. Les exigences imposées en matière de résistance aux éléments de structure doivent donc être considérées comme des indices jugés nécessaires par les pouvoirs publics en fonction de l'importance du risque et de la sévérité estimée du feu pour garantir la sécurité des biens et des personnes.

5.1.2 Feux paramétrés

Les modèles de feux paramétrés fournissent une méthode de calcul. Les modèles de feux paramétrés fournissent une méthode de calcul relativement simple pour estimer la température des gaz chauds dans un compartiment, en prenant en compte de manière simplifiée les principaux paramètres qui influencent le développement du feu, comme la taille du compartiment, la charge calorifique (correspondant à la masse de matériaux combustibles dans le compartiment), les conditions de ventilation (ouvertures) et les propriétés thermiques (comme la conductivité thermique et la chaleur spécifique) des murs et des plafonds du compartiment.

Comme les courbes température/temps nominales, les courbes température/temps paramétrées fournissent des relations exprimant la température des gaz chauds en fonction du temps. Elles sont basées sur l'hypothèse d'une température des gaz uniforme dans le compartiment, ce qui limite leur champ d'application aux conditions de post-embrasement généralisé (post-flash-over) dans les compartiments de dimensions raisonnables. La courbe de feu ainsi obtenue comprend une phase d'échauffement représentée par une loi exponentielle jusqu'à une température maximale, suivie par une phase de refroidissement à décroissance linéaire jusqu'à une température résiduelle (généralement prise égale à la température ambiante). La température maximale et la durée d'incendie correspondante sont les deux paramètres principaux qui affectent le comportement au feu des éléments structuraux. En conséquence, ils ont été adoptés comme les paramètres gouvernant l'équation définissant les feux paramétrés.

Un tel modèle est donné dans l'Annexe A de l'EN 1991-1-2. Il est applicable aux compartiments ayant une surface de plancher inférieure ou égale à 500 m², sans ouvertures en toiture et ayant une hauteur maximale de 4 m, pour des revêtements de compartiments avec une inertie thermique comprise entre 100 et 2200 J/m²s^{1/2}K, pour un facteur d'ouverture compris entre 0,02 à 0,20 et pour des compartiments avec des charges calorifiques principalement de type cellulosique. En raison de ces limitations, pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée, le modèle est essentiellement utilisé pour les zones de bureaux.

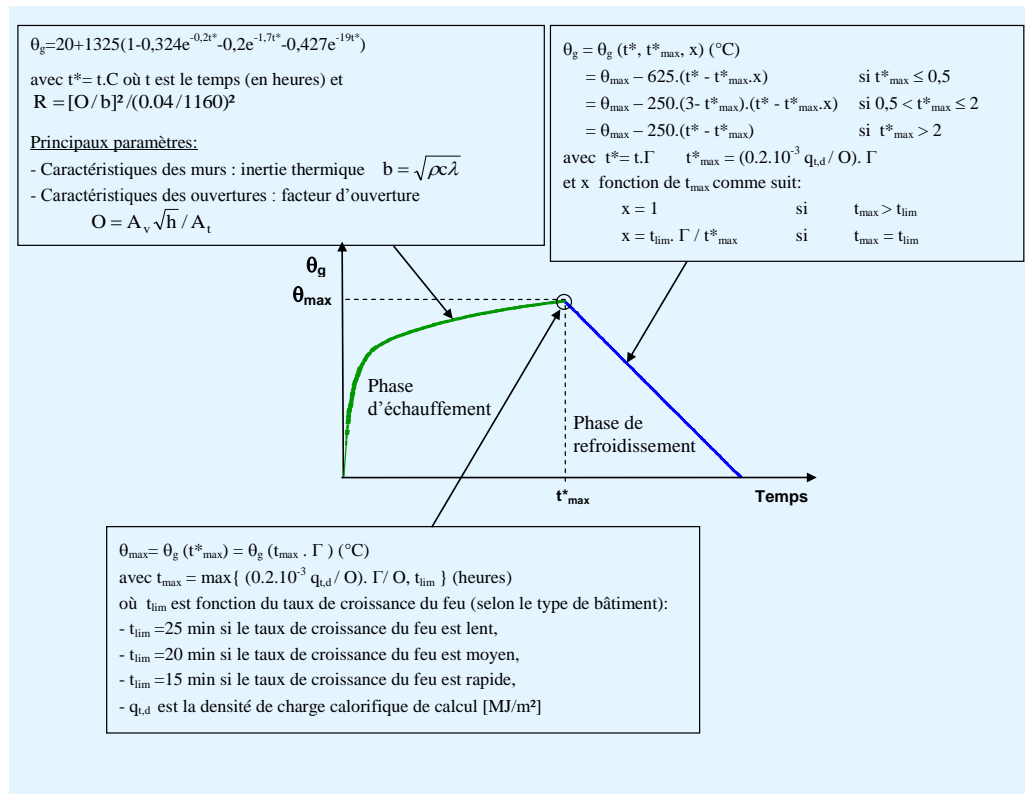


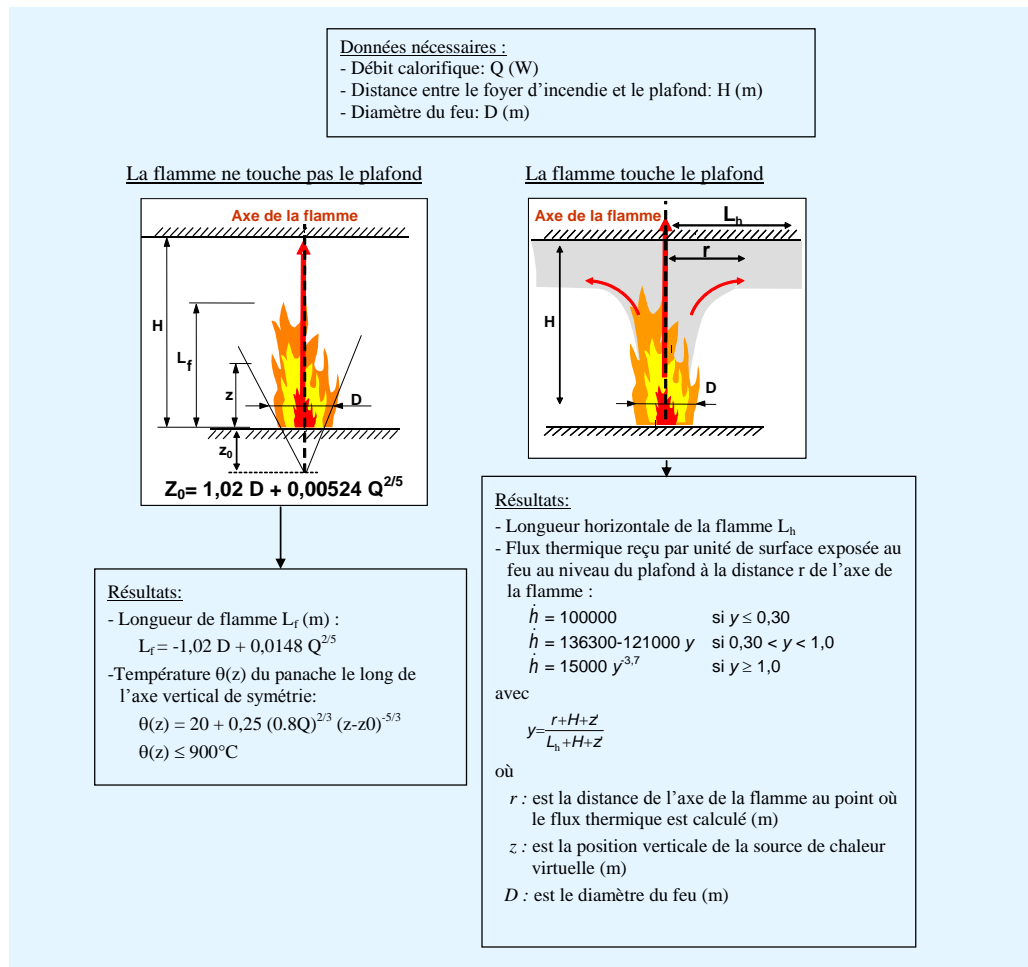
Figure 5.1 Feux paramétrés (Annexe A de l'EN 1991-1-2)

Les données pour les courbes de feux paramétrés sont la valeur de calcul de la densité de charge calorifique, la vitesse de développement du feu, les conditions de ventilation (représentées par la taille et la position des ouvertures) et les propriétés thermiques (la capacité thermique, la densité et la conductivité) des murs pour évaluer les pertes de chaleur qui se produisent par convection et rayonnement aux limites du compartiment. Pour la densité de charge calorifique, il est de pratique courante dans le calcul de se référer aux valeurs caractéristiques données dans l'EN 1991-1-2.

Même si les courbes de feux paramétrés offrent une amélioration importante par rapport à la courbe température/temps normalisée (« feu ISO »), elles ne permettent pas encore d'obtenir une évaluation très précise de la sévérité de l'incendie. Par conséquent, quelques pays européens recommandent leur usage seulement pour des calculs de prédimensionnement.

5.1.3 Feux localisés

L'Annexe C de l'EN 1991-1-2 fournit des approches simplifiées pour déterminer les actions thermiques des feux localisés. Deux situations sont distinguées selon la hauteur de la flamme par rapport au plafond du compartiment : quand la flamme ne touche pas le plafond (basée sur la méthode d'Heskestad) et quand la flamme touche le plafond (basée sur la méthode d'Hasemi).



5.2 Modèles thermiques

En considérant la grande conductivité thermique de l'acier et la faible épaisseur des profilés utilisés couramment en construction métallique, il n'est pas nécessaire de prendre en compte de gradients thermiques sur la section transversale des éléments de structure métallique. On peut donc faire l'hypothèse d'une température homogène lorsqu'ils sont uniformément échauffés.

En conséquence, des règles de calcul simplifiées peuvent être utilisées pour estimer les températures des éléments de structure métallique entièrement exposés au feu ou qui supportent une dalle en béton, et qui sont alors exposés sur trois côtés. Des règles similaires existent pour les sections en acier protégées contre l'incendie, bien qu'il soit nécessaire de connaître les propriétés thermiques des matériaux de protection, ce qui n'est pas toujours facile à obtenir.

Pour les éléments de construction mixte acier-béton, il n'existe pas à proprement parler de modèles de calcul simplifiés pour estimer l'évolution, en fonction du temps et de la distribution de température dans les éléments. Pour simplifier le calcul, des informations concernant la distribution des températures pour des durées courantes d'exposition au feu normalisé (par exemple 30, 60, 90 et 120 minutes) sont données dans l'EN 1994-1-2.

5.2.1 Éléments en acier non protégés

L'échauffement d'éléments en acier non protégés peut être déterminé au moyen de l'approche analytique simplifiée donnée dans l'EN 1993-1-2. Dans cette méthode, l'élévation de température dépend des actions thermiques (exprimées en termes de flux thermiques nets), des propriétés thermiques de l'acier et du facteur de massivité de l'élément A_m/V . Le facteur de massivité est défini comme le ratio entre l'aire de la surface exposée aux flux thermiques A_m [m²/m] et le volume de l'élément V [m³/m] par unité de longueur. Les facteurs de massivité pour quelques éléments en acier non protégés sont représentés à la Figure 5.3.

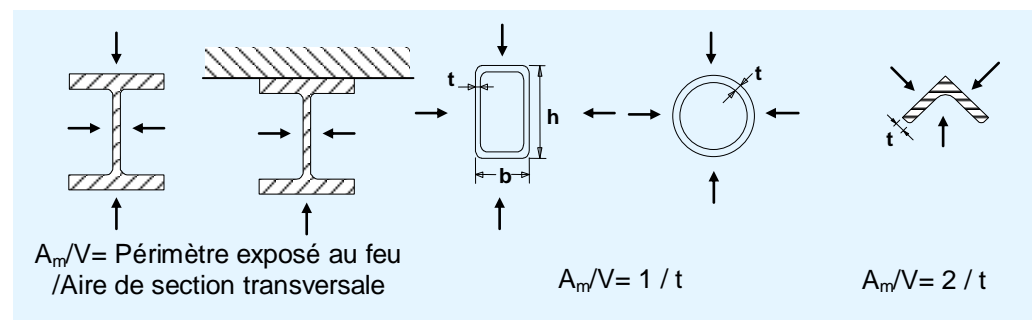


Figure 5.3 Exemple de facteurs de massivité pour des éléments en acier non protégés

En supposant une distribution de température uniforme sur la section transversale, l'augmentation de température $\Delta\theta_{a,t}$ d'un élément en acier non protégé pendant un intervalle de temps Δt peut être déterminée à partir de :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \text{avec } \Delta t \leq 5 \text{ s} \quad (4)$$

où :

k_{sh} est le facteur de correction pour l'effet d'ombre créé par une protection locale contre le rayonnement due à la forme du profilé en acier,

C_a est la chaleur spécifique de l'acier [J/kgK],

ρ_a est la masse volumique de l'acier [kg/m³],

$\dot{h}_{net,d}$ est la valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface [W/m²].

La résolution pas-à-pas de cette équation donne l'évolution de la température de l'élément en acier pendant l'incendie. Afin d'assurer la convergence numérique de la solution, une limite supérieure de l'incrément de temps Δt doit être retenue. Dans l'EN 1993-1-2, il est suggéré que la valeur de Δt ne soit pas supérieure à 5 secondes.

Les actions thermiques sont déterminées par le flux thermique net $\dot{h}_{net,r}$ reçu par l'élément en acier pendant l'exposition au feu. Il est défini comme la somme de deux flux distincts : une composante de convection $\dot{h}_{net,c}$ et une composante de rayonnement $\dot{h}_{net,r}$.

La composante de convection du flux thermique est exprimée par la relation :

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (5)$$

où :

α_c est le coefficient de transfert thermique par convection [W/m²K],

θ_g est la température des gaz [°C],

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

La composante de rayonnement du flux thermique est exprimée par :

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \sigma_0 \varepsilon_m ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) \quad (6)$$

où :

ϕ est le facteur de forme, incluant la position et l'effet de forme (<1),

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

θ_r est la température de rayonnement effectif du feu [°C] ($\theta_r \approx \theta_g$),

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

σ_0 est la constante de Stephan Boltzmann [= 5,67 10⁻⁸ W/m² K⁴].

Selon l'EN 1991-1-2, pour de nombreux cas pratiques, le facteur de forme peut être pris égal à 1. Le coefficient de convection (α_c) varie de 25 W/m²K (conditions de feu normalisé) à 50 W/m²K (conditions de feu d'hydrocarbures). L'émissivité des éléments de structure en acier au carbone ou de construction mixte acier-béton peut être prise égale à $\varepsilon_m = 0,7$.

Pour les sections de forme convexe (par exemple les profils creux en acier) totalement entourées de gaz chauds, l'effet d'ombre ne joue aucun rôle et, par conséquent, le facteur k_{sh} est pris égal à 1. Sinon, le facteur de correction pour l'effet d'ombre k_{sh} est donné par :

$$k_{sh} = \begin{cases} \frac{0,9 [A_m/V] J_b}{A_m/V} & \text{pour les sections en I, en situation d'incendie normalisé} \\ \frac{[A_m/V] J_b}{A_m/V} & \text{pour les autres cas} \end{cases} \quad (7)$$

où :

$[A_m/V]_b$ est la valeur du facteur de massivité enveloppe [m⁻¹].

L'application de la méthode de calcul de l'EN 1993-1-2, avec des expositions au feu ISO normalisé de 15 et 30 minutes, conduit aux courbes de température illustrées à la Figure 5.4 et données dans le Tableau 5.1 en fonction du facteur de massivité incluant l'effet d'ombre $(A_m/V)_{sh} = k_{sh} A_m/V$.

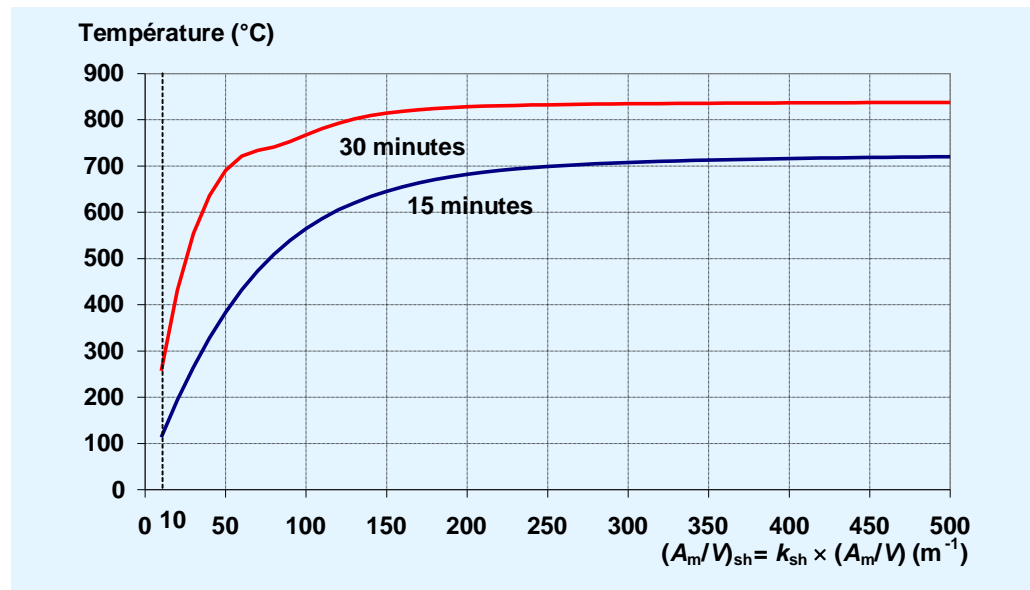


Figure 5.4 Température d'éléments en acier non protégés après 15 et 30 minutes d'exposition au feu ISO normalisé

Tableau 5.1 Température d'éléments en acier non protégés après 15 et 30 minutes d'exposition au feu ISO normalisé

Facteur de massiveté (A_m/V) _{sh}	Température de l'acier (°C)		Facteur de massiveté (A_m/V) _{sh}	Température de l'acier (°C)	
	15 min	30 min		15 min	30 min
10	113	257	130	621	802
20	194	431	140	634	809
30	265	554	150	646	815
40	328	636	160	655	819
50	383	690	170	664	822
60	432	721	180	671	825
70	473	734	190	677	827
80	509	741	200	682	828
90	539	753	250	699	833
100	565	767	300	708	835
110	586	781	400	716	837
120	605	792	500	720	838

5.2.2 Éléments en acier protégés

L'EN 1993-1-2 fournit également une approche de calcul simplifiée pour les éléments protégés avec des matériaux de protection contre l'incendie. Dans de tels cas, l'augmentation de température dépend du facteur de massiveté A_p/V de l'élément en acier isolé par le matériau de protection contre le feu (A_p est la surface concernée du matériau de protection par unité de longueur d'élément et V est le volume de l'élément par unité de longueur) et les caractéristiques du système de protection. Les matériaux de protection peuvent prendre la forme d'un enrobage ou de systèmes en caisson, mais cette approche simplifiée ne couvre pas les peintures intumescentes. En supposant une distribution uniforme de température, l'augmentation de température $\Delta\theta_{a,t}$ dans un élément en acier protégé pendant un intervalle de temps Δt peut être déterminé au moyen de l'expression suivante :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (8)$$

avec

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (9)$$

où :

d_p est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu [m],

C_p est la chaleur spécifique du matériau de protection [J/kgK],

λ_p est la conductivité thermique du système de protection contre le feu [W/mK],

ρ_p est la masse volumique du matériau de protection contre l'incendie [kg/m³],

θ_g est la température des gaz [°C].

La Figure 5.5 donne les expressions pour calculer le facteur de massiveté d'éléments en acier protégés.

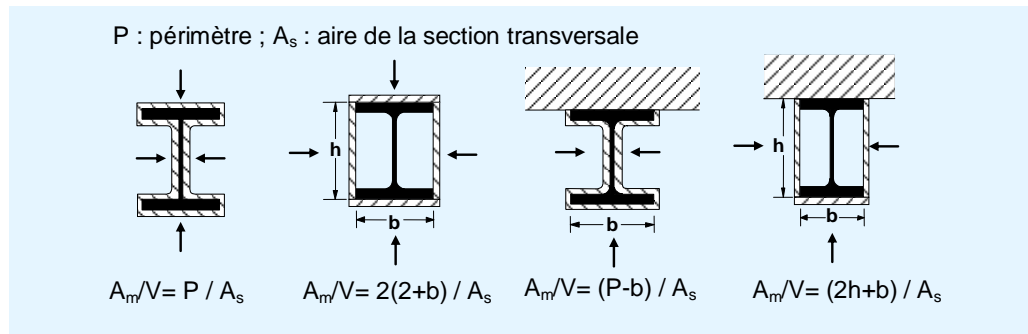


Figure 5.5 Exemple de facteur de massiveté pour des éléments en acier protégés par un matériau de protection contre le feu

Il est important de noter que les caractéristiques thermiques des systèmes de protection contre l'incendie sont déterminées habituellement à partir d'essais au feu réalisés en conditions d'incendie normalisé. Par conséquent, en se référant aux actions thermiques basées sur des feux naturels, l'équation (8) pour le calcul en situation d'incendie d'éléments en acier protégés doit être manipulée avec quelques précautions. Le calcul ne doit être réalisé que si des données appropriées sont disponibles ou s'il peut être montré que les conditions d'incendie n'ont pas d'effet significatif sur les caractéristiques thermiques et l'intégrité du matériau de protection contre le feu. Néanmoins, il est communément admis que les propriétés thermiques d'un matériau de protection peuvent être utilisées en conditions de feu naturel lorsque les températures des gaz chauds restent inférieures à la température maximale atteinte pendant l'essai au feu normalisé du matériau de protection (1100°C environ à 4 heures par exemple, pour la courbe température/temps normalisée).

Les caractéristiques des matériaux données dans le Tableau 5.2 peuvent être utilisées en première approximation, pour calculer l'échauffement d'éléments en acier protégés. Ces valeurs moyennes sont issues d'essais au feu réalisés par des fabricants de matériaux.

Tableau 5.2 Caractéristiques moyennes des principaux matériaux de protection contre le feu

Matériau		Densité ρ_p [(kg/m ³)]	Conductivité λ_p [W/mK]	Chaleur spécifique C_p [J/kgK]
Produits projetés	Fibres minérales	300	0,12	1200
	Vermiculite et ciment	350	0,12	1200
	Perlite	350	0,12	1200
Produits projetés à haute densité	Vermiculite (ou perlite) et ciment	550	0,12	1100
	Vermiculite (ou perlite) et plâtre	650	0,12	1100
Plaques	Vermiculite (ou perlite) et ciment	800	0,2	1200
	Fibres de silicate ou fibres de silicate de calcium	600	0,15	1200
	Fibres-ciment	800	0,15	1200
	Plaques de plâtre	800	0,2	1700
Plaques de fibres compressées	Fibres-silicate, fibres minérales, laine de roche	150	0,2	1200

5.3 Modèles structuraux

Selon les Eurocodes, plusieurs méthodes de calcul simplifiées peuvent être utilisées pour estimer la résistance au feu des structures en situation d'incendie. La première d'entre elles est la méthode de la température critique qui très utilisée pour l'analyse des éléments de structures métalliques, et la seconde concerne les modèles mécaniques simplifiés développés à la fois pour les éléments en acier et pour les éléments mixtes acier-béton.

Il est important de rappeler que les méthodes de calcul disponibles pour les éléments mixtes sont valables uniquement pour une exposition au feu normalisé. De plus, les méthodes de calcul données pour les poteaux ne peuvent être appliquées qu'aux éléments d'ossatures contreventées (où les extrémités des poteaux ne peuvent pas se déplacer horizontalement).

5.3.1 Méthode de la température critique

La température critique est calculée à partir des charges mécaniques appliquées en situation d'incendie, de la résistance de calcul à température normale et de la perte de résistance de l'acier à température élevée. Cette température critique varie généralement entre 500°C et 800°C. Elle peut être obtenue par le calcul à partir des règles simplifiées données dans l'EN 1993-1-2 ou par référence à des valeurs forfaitaires.

Selon la méthode de la température critique, la résistance au feu d'un élément en acier, sans risque d'instabilité, est satisfaite après un temps t si la température de l'acier $\theta_{a,t}$ ne dépasse pas la température critique θ_{cr} de l'élément :

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{cr} \quad (10)$$

La température critique de l'élément peut être calculée à partir d'un taux d'utilisation μ_0 au moyen de l'expression suivante :

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (11)$$

Le taux d'utilisation μ_0 est obtenu au moyen de :

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (12)$$

où :

$E_{fi,d}$ est l'effet des actions de calcul en situation d'incendie, selon l'EN 1991-1-2,

$R_{fi,d,0}$ est la résistance de calcul correspondante de l'élément en acier en situation d'incendie, au temps $t = 0$. Calculer au temps $t = 0$ signifie que, dans toutes les formules permettant de déterminer la résistance de calcul pour la situation de l'incendie, le facteur de réduction pour la limite d'élasticité $k_{y,\theta}$ est égal à 1.

L'expression (11) peut être utilisée pour toutes les classes de sections exceptées les sections de Classe 4 pour lesquelles une température critique conservatrice de 350°C doit être utilisée.

En principe, l'expression (11) s'applique aux éléments en flexion pure, aux éléments comprimés sans flambement et aux éléments tendus, échauffés uniformément ou avec un faible gradient de température. Cependant, lorsque des phénomènes d'instabilité doivent être pris en compte (poteaux élancés, poutres non maintenues au déversement), la méthode devient applicable en calculant la résistance de calcul en situation d'incendie au temps $t = 0$ avec une valeur appropriée de l'élancement réduit de l'élément qui tient compte des effets de la température. Par simplification, l'élancement réduit en situation d'incendie peut être pris égal à $\bar{\lambda}_{\theta} = 1,3\bar{\lambda}$ (où $\bar{\lambda}$ est l'élancement réduit à température normale).

En alternative à la relation (11), l'Annexe Nationale de l'EN 1993-1-2 peut donner des températures critiques forfaitaires.

Pour les éléments tendus et les poutres pour lesquelles le déversement ne constitue pas un mode de ruine potentiel μ_0 peut être calculée à partir de l'expression conservatrice suivante :

$$\mu_0 = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} \kappa_1 \kappa_2 \quad (13)$$

où :

$\eta_{fi,t}$ est le taux de chargement au temps t ,

$\gamma_{M,fi}$ est le coefficient partiel approprié en situation d'incendie
($\gamma_{M,fi} = 1$),

γ_{M0} est le coefficient partiel à température normale ($\gamma_{M0} = 1$),

κ_1, κ_2 sont les facteurs d'adaptation pour prendre en compte une distribution non uniforme de température dans l'élément en acier.

Le niveau de chargement au temps t est défini par :

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d}}{R_d} \quad (14)$$

où :

$E_{fi,d}$ est l'effet des actions de calcul en situation d'incendie, selon l'EN 1991-1-2,

R_d est la résistance ultime à température ambiante.

Pour une durée d'exposition au feu donnée t , en supposant que $\theta_{a,t} = \theta_{cr}$, la valeur maximale du taux d'utilisation μ_0 des éléments en acier non protégés permettant de satisfaire le degré de résistance au feu requis peut être calculée facilement à partir de l'expression (11), en fonction du facteur de massiveté incluant l'effet d'ombre $(A_m/V)_{sh}$. De cette manière, on peut supposer que la résistance au feu des éléments en acier non protégés est satisfaite après un temps t si :

$$\mu_0 \leq \mu_{max} \quad (15)$$

Des taux d'utilisation maximum μ_{max} calculés pour des résistances au feu normalisé R15 et R30 sont donnés à la Figure 5.6. On peut remarquer que pour une résistance au feu R30, les éléments non protégés avec un facteur de massiveté $(A_m/V)_{sh}$ supérieur à 50 m^{-1} ne peuvent atteindre que de très petites valeurs du taux d'utilisation.

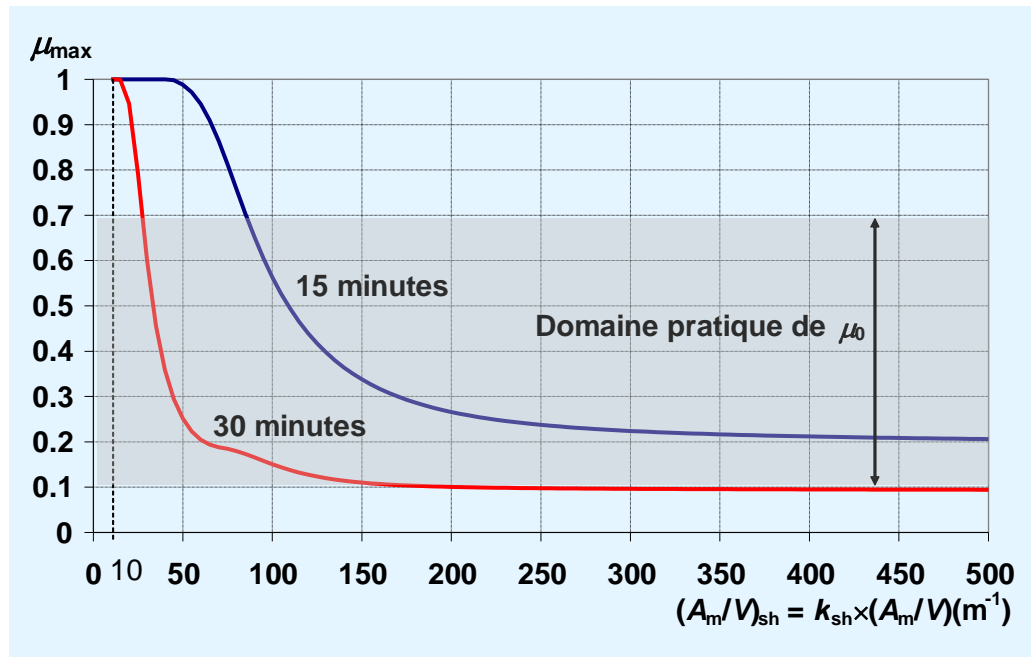


Figure 5.6 Taux d'utilisation maximum en fonction du facteur de massiveté $(A_m/V)_{sh}$

5.3.2 Méthode de calcul simplifiée pour les éléments en acier

Selon l'EN 1993-1-2, la fonction porteuse d'un élément en acier doit être considérée comme maintenue après un temps t si :

$$E_{fi,d} < R_{d,fi,t} \quad (16)$$

où :

$E_{fi,d}$ est l'effet des actions de calcul en situation d'incendie, selon l'EN 1991-1-2,

$R_{d,fi,t}$ est la résistance de calcul correspondante de l'élément en acier, dans la situation d'incendie, au temps t .

Les méthodes de calcul simplifiées présentées ci-après permettent au concepteur d'estimer rapidement la résistance de calcul au feu (résistance au flambement, moment résistant) des éléments en acier. Elles sont fondées principalement sur l'hypothèse d'une température uniforme sur la section transversale des éléments.

Poteaux en acier en compression simple

La résistance de calcul en situation d'incendie, au temps t d'un élément comprimé de section transversale de Classe 1, 2 ou 3 présentant une température uniforme θ_a , doit être déterminée à partir de la relation suivante :

$$N_{fi,t,Rd} = \chi_{fi}(\bar{\lambda}_\theta) \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} k_{y,\theta} N_{Rd} \quad (17)$$

où :

$k_{y,\theta}$ est le facteur de réduction pour la limite d'élasticité de l'acier à la température θ atteinte au temps t ,

- $\gamma_{M,fi}$ est le coefficient partiel en situation d'incendie ($\gamma_{M,fi} = 1$),
- γ_{M0} est le coefficient partiel à température normale ($\gamma_{M0} = 1$),
- N_{Rd} est la résistance de calcul de la section transversale $N_{pl,Rd}$ pour le calcul à température normale selon l'EN 1993-1-1,
- χ_{fi} est le facteur de réduction pour le flambement par flexion dans le calcul à l'incendie.

Le facteur de réduction χ_{fi} pour le flambement par flexion est obtenu à partir de l'élancement réduit $\bar{\lambda}_\theta$ à la température θ en utilisant l'expression :

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad \text{mais} \quad \chi_{fi} \leq 1.0 \quad (18)$$

avec

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right]$$

où :

- α est le facteur d'imperfection pour la courbe de flambement appropriée donné par $\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y}$ où f_y est la limite d'élasticité nominale de l'acier.

L'élancement réduit à la température θ est donné par :

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} \quad (19)$$

où :

- $k_{y,\theta}$ est le facteur de réduction pour la limite d'élasticité de l'acier à la température θ ,
- $k_{E,\theta}$ est le facteur de réduction pour la pente du domaine élastique linéaire à la température θ ,
- $\bar{\lambda}$ est l'élancement réduit à température normale, tel que défini dans la l'EN 1993-1-1 ; mais calculé en considérant la longueur de flambement en situation d'incendie.

L'élancement réduit à température normale est donné par :

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (20)$$

où :

- ℓ_{cr} est la longueur de flambement en situation d'incendie dans le plan de flambement considéré,
- i est le rayon de giration selon l'axe approprié, déterminé en utilisant les propriétés de la section transversale brute.

Dans la pratique, le facteur de réduction χ_{fi} pour le flambement par flexion peut être calculé directement à partir des valeurs données dans le Tableau 5.3, en fonction de la nuance d'acier et de l'élancement réduit de l'élément $\bar{\lambda}$ à température normale. Les valeurs du facteur de réduction χ_{fi} du Tableau 5.3 ont été calculées en supposant un élancement réduit en situation d'incendie égal à $\bar{\lambda}_\theta = 1.3\bar{\lambda}$. Pour des valeurs intermédiaires de l'élancement réduit, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Tableau 5.3 Valeurs du facteur de réduction χ_{fi} en fonction de l'élancement réduit à température normale $\bar{\lambda}$ et de la nuance d'acier

$\bar{\lambda}$	Nuance d'acier			$\bar{\lambda}$	Nuance d'acier		
	S235	S275	S355		S235	S275	S355
0,2	0,8480	0,8577	0,8725	1,7	0,1520	0,1549	0,1594
0,3	0,7767	0,7897	0,8096	1,8	0,1381	0,1406	0,1445
0,4	0,7054	0,7204	0,7439	1,9	0,1260	0,1282	0,1315
0,5	0,6341	0,6500	0,6752	2	0,1153	0,1172	0,1202
0,6	0,5643	0,5800	0,6050	2,1	0,1060	0,1076	0,1102
0,7	0,4983	0,5127	0,5361	2,2	0,0977	0,0991	0,1014
0,8	0,4378	0,4506	0,4713	2,3	0,0903	0,0916	0,0936
0,9	0,3841	0,3951	0,4128	2,4	0,0837	0,0849	0,0866
1	0,3373	0,3466	0,3614	2,5	0,0778	0,0788	0,0804
1,1	0,2970	0,3048	0,3172	2,6	0,0725	0,0734	0,0749
1,2	0,2626	0,2691	0,2794	2,7	0,0677	0,0686	0,0699
1,3	0,2332	0,2387	0,2473	2,8	0,0634	0,0642	0,0653
1,4	0,2081	0,2127	0,2200	2,9	0,0595	0,0602	0,0612
1,5	0,1865	0,1905	0,1966	3	0,0559	0,0565	0,0575
1,6	0,1680	0,1714	0,1766				

Poutres en acier simplement fléchies

Le moment résistant de calcul en situation d'incendie d'une poutre fléchie, non maintenue au déversement, dont la section transversale est de Classe 1, 2 ou 3, présentant une température uniforme θ_a , est donné par l'expression suivante :

$$M_{fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi}(\bar{\lambda}_\theta) \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} k_{y,\theta} M_{Rd} \quad (21)$$

où :

$k_{y,\theta}$ est le facteur de réduction pour la limite d'élasticité de l'acier à la température θ atteinte au temps t ,

M_{Rd} est le moment résistant de la section brute (moment résistant plastique $M_{pl,Rd}$ ou moment résistant élastique $M_{el,Rd}$) pour le calcul à température normale, selon l'EN 1993-1-1,

$\chi_{LT,fi}$ est le facteur de réduction pour le déversement en situation d'incendie. Il peut être calculé de la même manière que le facteur de réduction pour le flambement par flexion mais en utilisant l'élancement réduit approprié.

Pour les poutres maintenues au déversement, la même méthode de calcul peut être utilisée, en adoptant $\chi_{LT,fi} = 1$.

Il est fréquent que la température au sein des éléments structuraux ne soit pas uniforme, en particulier pour les poutres. Un facteur d'adaptation κ_1 peut être introduit pour prendre en compte une distribution de température non uniforme sur la hauteur de la section. Un facteur d'adaptation complémentaire κ_2 peut également être introduit pour tenir compte des variations de température le long de l'élément structural, tel que pour les poutres hyperstatiques. Les valeurs de ces facteurs d'adaptation κ_1 et κ_2 doivent être choisies d'après l'EN 1993-1-2.

Éléments soumis à l'effet combiné d'une flexion et d'une compression axiale

Une méthode de calcul simplifiée est également disponible pour vérifier la résistance au feu des éléments en acier soumis à une sollicitation de flexion composée, comme c'est le cas de poteaux élancés soumis à un chargement excentré ou de poutres longues susceptibles de déverser. Dans ce cas, le modèle de calcul simplifié propose des expressions pour vérifier l'effet combiné d'une flexion et d'une compression axiale à l'aide de formules d'interaction qu'il serait trop long de détailler ici. Le lecteur intéressé trouvera les informations nécessaires au § 4.2.3.5 de l'EN 1993-1-2.

5.3.3 Détermination de l'épaisseur du système de protection contre le feu

Dans les situations où les exigences en termes de résistance au feu sont élevées (généralement plus que R30), l'application des règles prescriptives conduit habituellement à protéger les structures en acier contre l'incendie. Lorsqu'une protection passive est nécessaire, la connaissance de la température critique, du facteur de massivité et du temps de résistance au feu exigé, permet, pour un système de protection contre l'incendie donné (produit projeté, plaque, peinture intumescente), de déterminer l'épaisseur à appliquer. Seuls des produits qui ont été testés et évalués dans des essais au feu normalisés selon les normes européennes EN 13881 peuvent être utilisés dans la pratique.

L'épaisseur exigée peut généralement être déterminée à partir des données techniques publiées par le fabricant. De telles informations, données sous la forme de tableaux ou de diagrammes, sont illustrées à la Figure 5.7. Les données sont généralement relatives à l'épaisseur du matériau de protection contre le feu en fonction du facteur de massivité de l'élément en acier protégé (A_p/V), de la température critique et de la durée de résistance au feu exigée. Pour les bâtiments courants utilisant des profilés standard en I et en H, la valeur du facteur de massivité A_m/V et généralement comprise dans l'intervalle $30 - 450 \text{ m}^{-1}$.

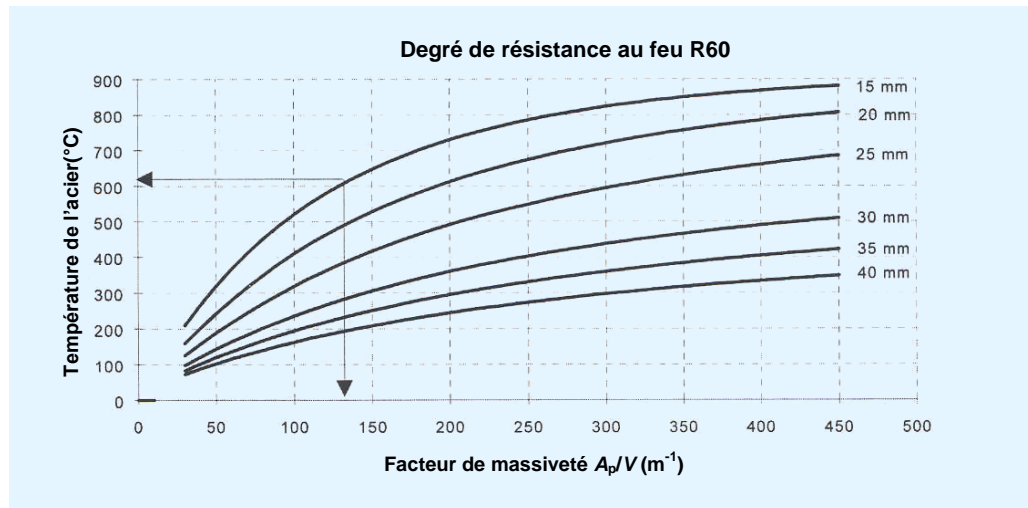


Figure 5.7 Exemple du diagramme français pour les plaques de protection contre l'incendie

En pratique, pour un matériau de protection contre l'incendie donné, l'épaisseur peut être déterminée d'après les étapes suivantes :

- Choix des données relatives à la durée de résistance au feu exigée ;
- Calcul du facteur de massivité en fonction du type de profilé, de la présence ou non de gros œuvres susceptibles d'occulter, pendant toute la durée de l'incendie, le transfert thermique vers une partie du profilé (par exemple une dalle en béton reportant sur la semelle supérieure d'un poutre), du type de protection (selon le contour ou en caisson) ;
- Détermination de l'épaisseur à partir des données du fabricant en utilisant la température critique et le facteur de massivité. Une interpolation linéaire est possible pour déterminer l'épaisseur.

La Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM) a développé des Euro-abaque^[13] qui expriment, pour un temps d'exposition au feu normalisé donné, la température atteinte par des éléments en acier protégés en fonction du facteur $(\lambda_p/d_p) \times (A_p/V)$ qui dépend des caractéristiques de la protection contre l'incendie (λ_p et d_p) et du facteur de massivité A_p/V . Il est à noter que ces Euro-abaque sont déterminés sur la base de la version ENV de la partie feu de l'Eurocode 3. C'est pourquoi ils doivent être utilisés avec précaution. D'autres abaques fondés sur l'EN 1993-1-2 ont été développés récemment^[14].

5.3.4 Valeurs tabulées pour les éléments mixtes

Des tableaux pour les éléments mixtes sont donnés dans l'EN 1994-1-2. Ils ne sont applicables que pour les éléments mixtes acier-béton (poutres ou poteaux mixtes pour lesquels le profilé en acier est partiellement ou complètement enrobé de béton, poteaux mixtes avec profils creux rectangulaires ou circulaires remplis de béton). Ils utilisent des valeurs prédéfinies, basées principalement sur des résultats d'essais au feu normalisé étendus ensuite par des études numériques. Ces tableaux permettent au concepteur d'obtenir rapidement les dimensions des éléments (dimensions minimales des sections transversales, aires d'armatures nécessaires et enrobage minimum de béton) en fonction du niveau de chargement pour des résistances au feu normalisé

courantes. L'avantage le plus important de cette méthode est sa facilité d'application. Elle est cependant limitée par un ensemble très strict de règles géométriques. Par ailleurs, comparativement aux autres modèles de calcul simplifiés ou aux modèles de calcul avancés, elle donne des résultats plus conservatifs. En conséquence, elle devrait seulement être appliquée pour le prédimensionnement d'un bâtiment.

Des informations détaillées sont données dans l'EN 1994-1-2.

5.3.5 Modèles de calcul simplifiés pour les éléments mixtes

Les méthodes de calcul qui sont présentées ci-après ont été développées pour déterminer la résistance d'éléments isolés exposés à la courbe d'incendie normalisé. C'est pourquoi elles ne sont pas applicables sous conditions d'incendie réel.

Seules les méthodes de calcul disponibles pour les éléments de structure mixte les plus courants dans les bâtiments à simple rez-de-chaussée (poteaux mixtes et poutres en béton partiellement enrobées de béton) sont décrites ici.

Poteaux mixtes

Les méthodes de calcul simplifiées pour les poteaux mixtes permettent au La méthode de calcul simplifié donnée pour les poteaux mixtes permet de calculer la résistance en compression axiale pour la durée d'exposition au feu conventionnel exigée, en fonction de la distribution non-uniforme des températures en section et des diminutions de résistance correspondantes. Cette méthode est basée sur le concept de courbe de flambement : la résistance plastique en compression axiale $N_{fi,pl,Rd}$ et la rigidité efficace en flexion $(EI)_{fi,eff}$, sont utilisées pour en déduire un coefficient de réduction au flambement. La méthode est applicable pour tous les types de poteaux mixtes sous réserve que la courbe de flambement appropriée soit utilisée. La vérification d'un poteau consiste à démontrer que la charge de compression axiale (pour la combinaison d'actions considérée en situation d'incendie selon l'EN 1991-1-2) est inférieure à la résistance au flambement du poteau.

Pour une distribution de température donnée sur la section transversale, la résistance de calcul d'un poteau mixte $N_{fi,Rd}$ peut être déterminée à partir de la courbe de flambement appropriée exprimant la capacité portante $N_{fi,Rd}$ en fonction de la résistance plastique $N_{fi,pl,Rd}$ et de la charge critique élastique $N_{fi,cr}$ en situation d'incendie comme suit :

$$N_{fi,Rd} = \chi(\bar{\lambda}_0) \cdot N_{fi,pl,Rd} \quad (22)$$

χ est le facteur de réduction pour le flambement par flexion dépendant de l'élancement réduit en situation d'incendie $\bar{\lambda}_0$. Pour les poteaux mixtes, $\bar{\lambda}_0$ peut être défini comme :

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{N_{fi,pl,R} / N_{fi,cr}} \quad (23)$$

où :

$N_{fi,cr}$ est la charge critique d'Euler ou charge critique élastique,

$N_{fi,pl,R}$ est la valeur de $N_{fi,pl,Rd}$ selon (24) lorsque les coefficients partiels $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,fi,s}$, et $\gamma_{M,fi,c}$, des matériaux sont pris égaux à 1,0.

Le facteur de réduction χ est déterminé comme pour le calcul à température normale mais en utilisant une courbe de flambement appropriée définie en fonction du type de poteau (section en acier partiellement enrobée, section creuse en acier remplie de béton).

La résistance plastique ultime, $N_{fi,pl,Rd}$ de la section transversale est déterminée en additionnant les résistances des différents éléments résultant du maillage de la section transversale, en prenant en compte les effets de la température dans ces éléments mais sans considérer leur interaction (due aux contraintes thermiques différentielles), soit :

$$N_{fi,pl,Rd} = \sum_j (A_a \cdot \frac{f_{ay,\theta}}{\gamma_{M,fi,a}}) + \sum_k (A_s \cdot \frac{f_{s,\theta}}{\gamma_{M,fi,s}}) + \sum_m (A_c \cdot \frac{f_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}}) \quad (24)$$

$N_{fi,cr}$ est la charge critique d'Euler calculée en fonction de la rigidité efficace en flexion de la section transversale $(EI)_{fi,eff}$ et de la longueur de flambement ℓ_θ du poteau en situation d'incendie, c'est-à-dire :

$$N_{fi,cr} = \pi^2 \frac{(EI)_{fi,eff}}{\ell_\theta^2} \quad (25)$$

La rigidité efficace en flexion $(EI)_{fi,eff}$ est déterminée à partir de :

$$(EI)_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (26)$$

où :

$E_{i,\theta}$ est le module caractéristique du matériau i à la température θ . Pour l'acier, c'est le module d'élasticité. Pour le béton : $E_{c,\theta} = 3 E_{c,sec} / 2$ où $E_{c,sec,\theta}$ est la valeur caractéristique du module sécant du béton en situation d'incendie, donnée par le rapport entre $f_{c,\theta}$ et $\varepsilon_{cu,\theta}$,

I_i est le moment d'inertie de flexion du matériau i par rapport à l'axe principal (y ou z) de la section transversale mixte.

$\varphi_{a,\theta}$ (pour un profilé en acier), $\varphi_{s,\theta}$ (pour les armatures) et $\varphi_{c,\theta}$ (pour le béton) sont des coefficients de réduction dépendant des effets différentiels des contraintes thermiques.

Des informations détaillées sont données dans l'EN 1994-1-2 §4.3.5.

Poutres en acier partiellement enrobées

La méthode de calcul simplifiée pour les poutres en acier partiellement enrobées de béton permet au concepteur d'estimer leur tenue au feu en calculant la résistance à la flexion pour la durée d'exposition au feu conventionnel exigée. Elle est fondée sur la théorie du calcul plastique. La méthode requiert la détermination de l'axe neutre plastique et de la résistance à la flexion correspondante, prenant en compte la distribution non-uniforme des

températures dans la section transversale et les réductions de la résistance caractéristique des matériaux correspondantes. Une distinction est faite entre le moment positif (habituellement à mi-portée) et le moment négatif (sur appui, s'il existe). Si le moment appliqué en situation d'incendie est inférieur à la résistance à la flexion de la poutre, l'élément est alors jugé posséder une résistance au feu suffisante.

L'axe neutre plastique de la poutre est déterminé en équilibrant les efforts de traction et de compression agissant dans la section transversale :

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (27)$$

où :

$f_{y,i}$ est la limite d'élasticité nominale pour l'aire d'acier élémentaire A_i prise positive sur le côté comprimé de l'axe neutre plastique et négative sur le côté tendu,

$f_{c,j}$ est la résistance à la compression nominale pour l'aire de béton élémentaire A_j prise positive sur le côté comprimé de l'axe neutre plastique et négative sur le côté tendu.

Le moment résistant de calcul $M_{fi,t,Rd}$ peut être déterminé à partir de :

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (28)$$

où :

z_i, z_j sont les distances entre l'axe neutre plastique et le centre de gravité des aires élémentaires A_i et A_j .

Pour déterminer la valeur de calcul du moment résistant, la section transversale de la poutre est divisée en plusieurs parties, à savoir :

- les semelles du profilé en acier,
- l'âme (parties inférieure et supérieure) du profilé en acier,
- les armatures,
- le béton d'enrobage.

Pour chacune de ces parties de la section transversale, des règles simplifiées qui définissent l'effet des températures et qui permettent le calcul de la résistance caractéristique réduite en fonction de la résistance au feu normalisé R30, R60, R90 ou R120, peuvent être utilisées.

Des informations détaillées sont données dans l'EN 1994-1-2 §4.3.4.

5.4 Règles de calcul spécifiques aux bâtiments à simple rez-de-chaussée

Les réglementations de sécurité incendie de plusieurs pays européens ont été modifiées récemment pour introduire, pour les bâtiments de stockage à un seul niveau ou les bâtiments industriels présentant des risques d'incendie significatifs (charges calorifiques élevées), des exigences spécifiques définies en termes de comportement structural comme alternative aux exigences prescriptives. Les deux critères relatifs au comportement structural des bâtiments de stockage et des bâtiments industriels (structure porteuse, éléments de façade, toiture et murs coupe-feu) qui doivent être vérifiés pour satisfaire les objectifs de sécurité pour les occupants et les pompiers sont les suivants :

- Dans le cas d'un incendie survenant dans l'une des cellules du bâtiment, sa structure (incluant les éléments de façade) ne doit pas s'effondrer vers l'extérieur (critère dit de non-effondrement vers l'extérieur) ;
- Dans le cas d'un incendie survenant dans l'une des cellules du bâtiment, la ruine localisée de la cellule exposée au feu ne doit pas entraîner la ruine des cellules voisines (critère dit de non-effondrement en chaîne).

Pour aider à la conception des bâtiments de stockage et des bâtiments industriels avec une structure en acier, plusieurs méthodes de calcul simplifiées peuvent être utilisées^[5,6]. Ces méthodes de calcul permettent au concepteur de démontrer facilement que le comportement de la structure métallique de ce type de bâtiments en situation d'incendie remplit les deux critères précédemment énoncés. Les méthodes sont implémentées dans le logiciel LUCA^[15].

Les méthodes de calcul permettent au concepteur :

- D'évaluer les forces induites par la ruine de la partie chauffée de la structure. Ces forces sont alors utilisées comme des forces horizontales additionnelles pour la vérification de la stabilité de la partie de la structure qui reste froide pendant l'incendie. Cette démarche peut être réalisée en utilisant les outils de calcul d'analyse des structures en conditions normales ;
- De fournir les déplacements horizontaux maximum qui se développent aux extrémités du compartiment affecté par l'incendie. Ces déplacements sont utilisés pour s'assurer qu'en cas d'incendie, les mouvements de la structure ne remettent pas en cause la stabilité des murs coupe-feu ou des façades du bâtiment. Les méthodes de calcul utilisées pour cette vérification dépendent de la nature des murs (béton léger, béton armé, blocs creux, tôles en acier avec isolant, plaques de plâtre, briques, etc.) et de leur liaison avec la structure en acier.

Les bâtiments suivants peuvent être calculés par ces méthodes :

- Bâtiments de stockage et bâtiments industriels en structure métallique. Soit des portiques en acier constitués de profilés laminés à chaud en I ou en H ou de PRS équivalents, soit des portiques en acier constitués de traverses en treillis et de poteaux fabriqués à partir de profilés laminés à chaud en I ou en H ou de PRS équivalents ;

- Bâtiments de stockage et bâtiments industriels divisés en plusieurs cellules, séparées les uns des autres au moyen de murs coupe-feu. Ces murs peuvent être soit perpendiculaires, soit parallèles aux portiques métalliques (voir Figure 5.8).

Il est à noter que ces méthodes ont été spécialement développées pour les bâtiments de stockage et les bâtiments industriels. Toutefois, elles peuvent également être appliquées à d'autres types de bâtiments à simple rez-de-chaussée.

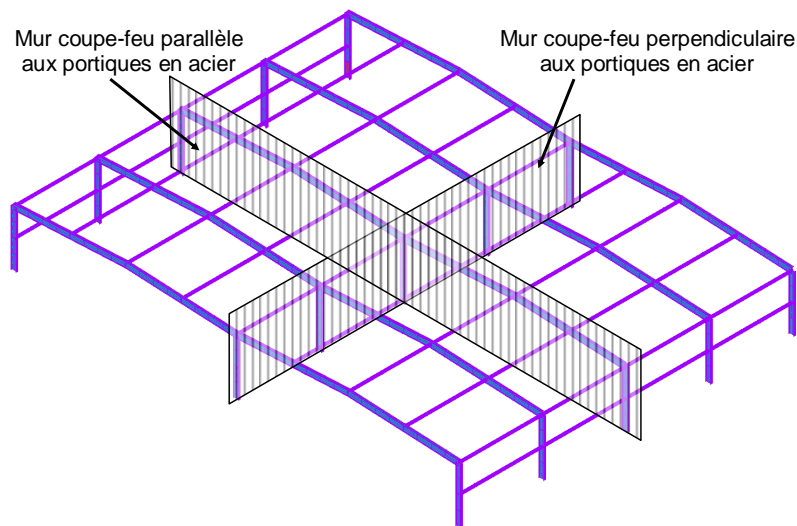


Figure 5.8 Position du mur coupe-feu par rapport aux portiques en acier

Les méthodes de calcul (voir Paragraphe 5.5) ne sont nécessaires que lorsque les murs coupe-feu sont perpendiculaires aux portiques métalliques du bâtiment et que la hauteur de ce dernier dépasse 20 m^[5]. Quand les murs coupe-feu sont parallèles aux portiques, les risques de ruine vers l'extérieur et de ruine progressive (entre différents compartiments de feu) peuvent être évités en suivant simplement les recommandations du Paragraphe 5.5.3.

5.5 Méthodes de calcul simplifiées

Un logigramme explicitant l'application des méthodes de calcul simplifiées est donné à la Figure 5.9.

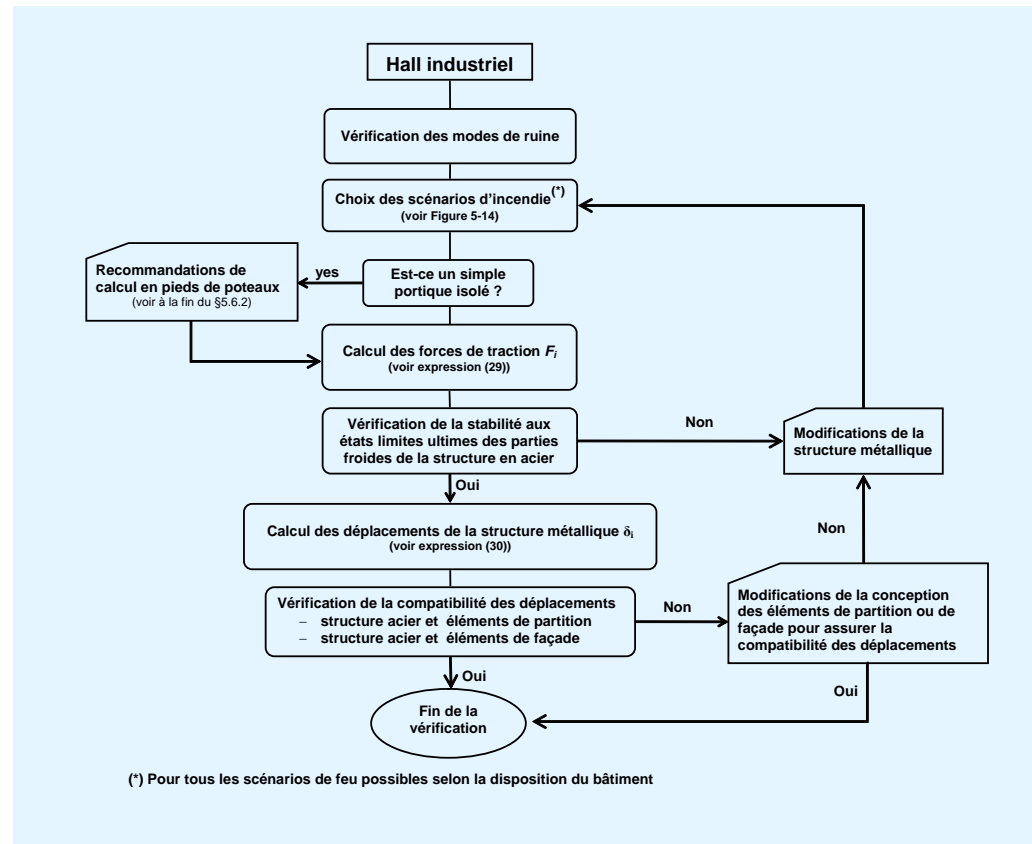


Figure 5.9 Logigramme d'application des méthodes de calcul

Les calculs de la force de traction et des déplacements latéraux aux extrémités du compartiment doivent être effectués pour tous les scénarios de feu possibles. Des exemples de scénarios sont donnés au Paragraphe 5.5.3. Les méthodes de calcul sont détaillées aux Paragraphes 5.5.1 et 5.5.2.

5.5.1 Force de traction aux extrémités du compartiment

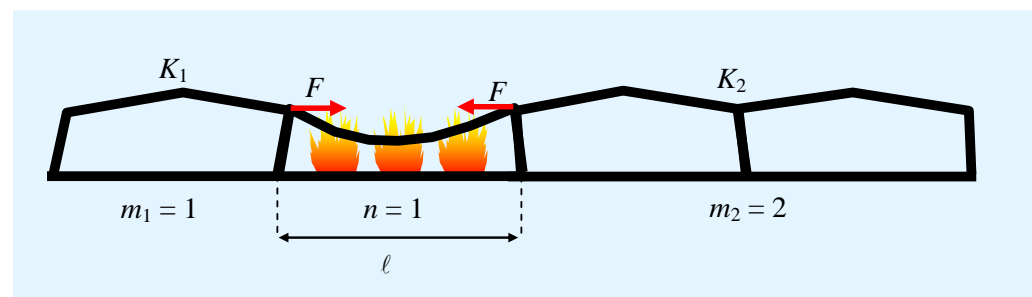


Figure 5.10 Effort de traction horizontal aux extrémités du compartiment

Lorsqu'un incendie survient dans un compartiment du bâtiment, la force de traction horizontale F aux extrémités du compartiment qui résulte de la ruine de structure de la toiture (voir Figure 5.10) et qui est nécessaire pour vérifier la stabilité de la partie froide de la structure (structure métallique des cellules voisines non impliquées dans l'incendie) peut être obtenue à partir de :

$$F = c_p n_{\text{eff}} q \ell \quad (29)$$

où :

c_p est un coefficient empirique (dépendant de la pente de la toiture et du type de structure en acier),

$$c_p = \begin{cases} 1,19 & \text{pour une pente de } 0\% \\ 1,16 & \text{pour une pente de } 5\% \\ 1,10 & \text{pour une pente de } 10\% \end{cases} \quad \text{pour les portiques à âme pleine}$$

$$1,45 \quad \text{pour les portiques à treillis}$$

n_{eff} est un coefficient relatif au nombre total de nefs n dans le compartiment (voir Tableau 5.4),

q est la charge linéaire sur la toiture [N/m] (égale à la charge surfacique multipliée par la distance entre portiques) appliquée sur la traverse et calculée en situation d'incendie ($q = G + \psi_1 \times S_n$), où G est la charge permanente comprenant le poids propre du portique en acier et les charges des équipements, S_n est la charge de neige et ψ_1 est le coefficient de charge selon les combinaisons de charges définies dans l'EN 1990 et les Annexes Nationales correspondantes,

ℓ est la portée de la travée échauffée attachée au poteau [m].

Tableau 5.4 Valeurs du coefficient n_{eff}

Nombre de travées incendiées	Portique à âme pleine		Portique à treillis	
	Position du compartiment		Position du compartiment	
	au bord	au milieu	au bord	au milieu
$n = 1$	$n_{\text{eff}}=0,5$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=0,6$	$n_{\text{eff}}=1,0$
$n \geq 2$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=2,0$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=1,0$

Lorsque les poteaux de rive du portique en acier supportent un écran thermique, ils doivent être calculés (sous réserve que leurs pieds soit suffisamment robustes) pour résister à une force horizontale calculée selon l'équation (29) mais en utilisant $n_{\text{eff}} = 1,0$.

5.5.2 Déplacements latéraux aux extrémités du compartiment

En cas d'incendie, les déplacements des bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée peuvent être de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres. Ces déplacements peuvent donc conduire à la ruine des éléments de façade ou des éléments séparatifs si ces derniers ne sont pas suffisamment ductiles ou s'ils ne sont pas correctement fixés. Ainsi, il est important de vérifier que les éléments de façade et les murs coupe-feu en contact avec la structure métallique, sont compatibles avec les déplacements latéraux qui se développent aux extrémités

des compartiments et qu'ils conservent leur intégrité pour éviter la ruine vers l'extérieur ou la ruine en chaîne.

Les déplacements latéraux maximum δ_i ($i = 1, 2$) induits au sommet des poteaux situés aux extrémités du compartiment, peuvent être obtenus en utilisant l'expression suivante (voir Figure 5.11) :

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{K_t}{K_i} c_{th} nl & \text{lorsque le feu se développe au bord du bâtiment} \\ \text{Max} \left\{ \frac{K_t}{K_i} c_{th} nl; \frac{F}{K_i} \right\} & \text{lorsque le feu se développe au milieu du bâtiment} \end{cases} \quad (30)$$

où :

n est le nombre de travées échauffées,

K_i est la rigidité latérale équivalente de la partie considérée i de la structure [N/m],

K_t est la rigidité équivalente (dépendant des raideurs équivalentes K_1 et K_2) donnée par :

$$K_t = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

ℓ est la portée d'une travée échauffée attachée au poteau [m],

F est la force de traction [N],

c_{th} est un coefficient empirique (dépendant de la pente de la toiture et du type de structure en acier),

$$c_{th} = \begin{cases} 0,01 & \text{pour une pente de } 0\% \\ 0,011 & \text{pour une pente de } 5\% \\ 0,015 & \text{pour une pente de } 10\% \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{pour les portiques à âme pleine} \\ \\ \end{matrix}$$

$$\begin{cases} 0,009 & \text{pour les portiques à treillis} \end{cases}$$

Rigidité latérale K pour un feu situé au milieu d'un portique

Si le compartiment est situé au milieu du bâtiment, comme illustré à la Figure 5.11, K_1 et K_2 doivent être calculés à l'aide d'une méthode élastique.

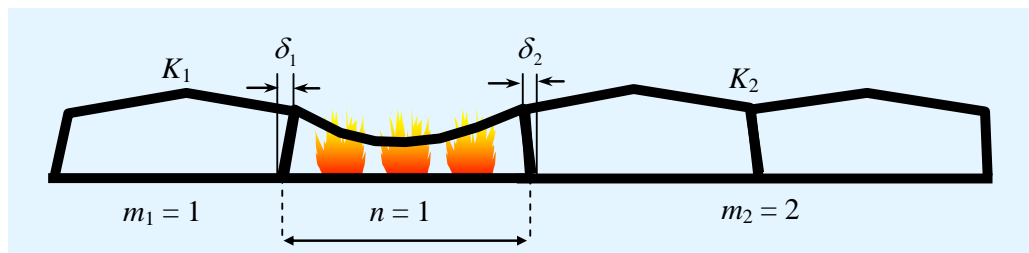


Figure 5.11 Feu localisé dans un compartiment situé au milieu du bâtiment

Cependant, pour les portiques en acier courants (portée constante, mêmes profilés en acier standard d'une portée à l'autre), la rigidité latérale équivalente K_i de la partie de structure située de chaque côté du compartiment exposé au feu peut être calculée de manière approchée selon le nombre de travées froides de la partie de structure considérée (m_i) en utilisant les relations suivantes :

$$K_i = \begin{cases} k & \text{for } m_i = 1 \\ ck & \text{for } m_i \geq 2 \end{cases} \quad (31)$$

avec

$$k = \frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \frac{12EI_c}{(h + f)^3}$$

$$c = 1 + \sum_{j=2}^{m_i} \frac{j}{2} \frac{2\alpha + 1}{1 + 2j\alpha} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{I_b}{I_c} \frac{h + f}{l} \left(1 - \frac{f}{0,6h}\right)$$

où, pour chaque côté, par permutation ($i = 1, 2$) :

- h est la hauteur des poteaux,
- f est la flèche au faîtage,
- l est la longueur de la travée,
- I_b est le moment d'inertie de la traverse,
- I_c est le moment d'inertie du poteau,
- E est le module d'élasticité de l'acier à température normale.

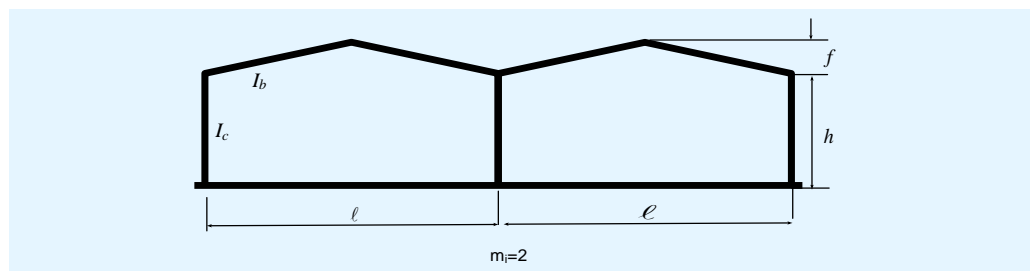


Figure 5.12 Définition des paramètres des parties froides sur le côté i du portique

Rigidité latérale K pour un feu situé à l'extrémité d'un portique

Si le compartiment est à l'extrémité du bâtiment, K_2 doit être calculée comme pour un feu dans un compartiment au milieu du bâtiment. La rigidité K_1 , qui est définie comme la rigidité latérale de la partie du portique située dans le compartiment échauffé, doit être calculée selon :

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} 0,065 k \quad \text{pour } n = 1 \\ 0,13 k \quad \text{pour } n = 2 \\ 0,13 c k \quad \text{pour } n > 2 \end{array} \right\} \quad \text{pour les portiques à âme pleine} \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,2 K_2 \quad \text{pour } n = 1 \\ 0,3 K_2 \quad \text{pour } n \geq 2 \end{array} \right\} \quad \text{pour les portiques à treillis}$$

où k et c sont déterminés à partir de l'équation (32) avec $m_1 = n - 1$, où n est le nombre de travées échauffées comme montré à la Figure 5.13.

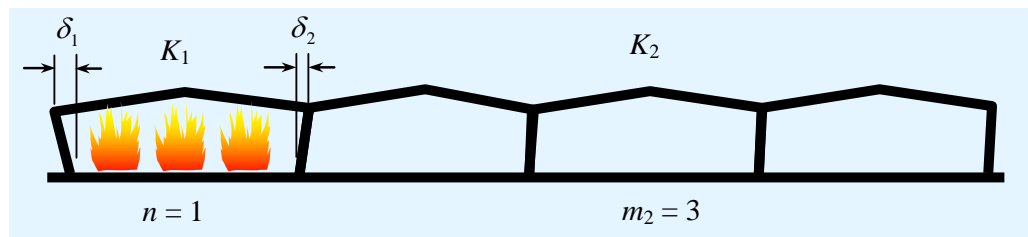


Figure 5.13 Feu dans un compartiment situé à l'extrémité du bâtiment

5.5.3 Exemple de scénarios d'incendie

Les calculs précédents doivent être menés pour tous les scénarios d'incendie possibles. Ces derniers sont définis en fonction des dispositions du bâtiment (structure et compartimentages) comme illustré dans l'exemple de la Figure 5.14.

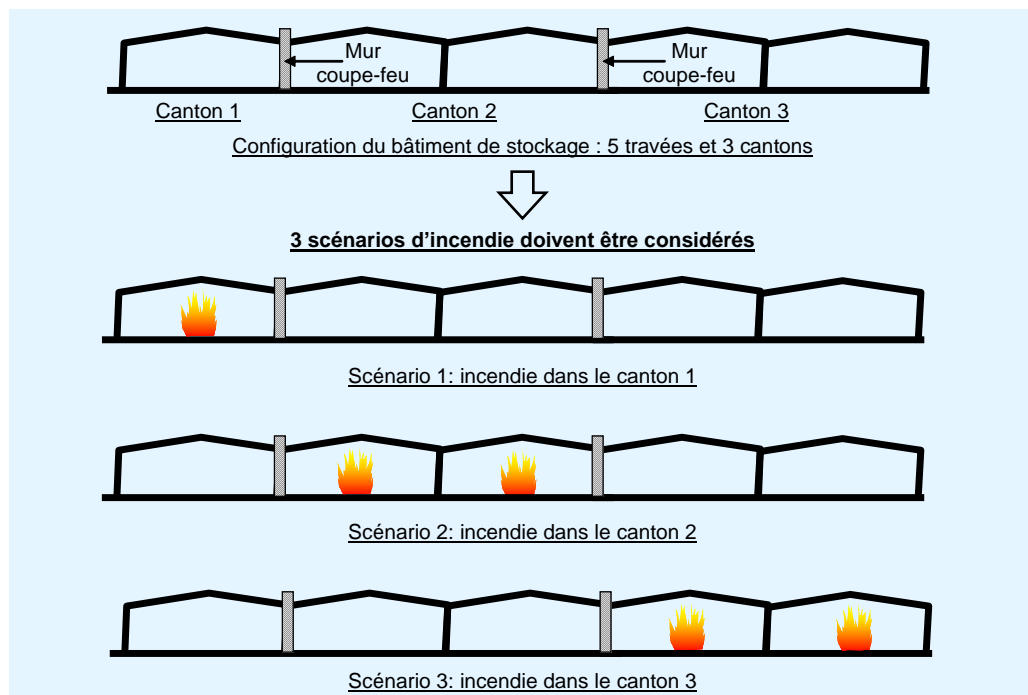


Figure 5.14 Scénarios d'incendie selon l'arrangement du bâtiment

5.6 Recommandations de conception

Des recommandations de conception complémentaires relatives aux murs coupe-feu, aux éléments de façade et aux systèmes de contreventement doivent être mises en pratique pour éviter l'effondrement vers l'extérieur du bâtiment ou la ruine en chaîne de la structure en acier. Bien sûr, ces recommandations doivent également permettre la ruine de la structure exposée au feu, de chaque du mur coupe-feu, sans mettre en danger la fonction du mur.

5.6.1 Murs coupe-feu

Pour limiter la propagation du feu à un compartiment voisin, une solution permettant que le bâtiment soit subdivisé en compartiments indépendants peut être obtenue en appliquant l'un des détails constructifs suivants :

- Création de deux murs coupe-feu indépendants (comme des panneaux sandwich, des panneaux préfabriqués, etc.) fixés chacun à une structure porteuse indépendante (voir Figure 5.15 (a)). Dans ce cas, lorsque l'une des deux structures et sa paroi coupe-feu s'effondrent suite à un incendie, le feu ne peut pas se propager à la structure contiguë, qui reste stable et protégée du feu par la seconde paroi coupe-feu.
- Réalisation d'un seul mur coupe-feu inséré entre les deux structures. Il peut-être auto-stable et totalement indépendant. Il peut également être fixé aux structures voisines par l'intermédiaire d'attaches « fusibles » (voir Figure 5.15 (b)) qui, en cas d'incendie au voisinage de ce mur, permettent de libérer la structure sinistrée par le feu sans mettre en danger la fonction du mur (celui-ci restant fixé à la structure métallique placée de l'autre côté) et la stabilité de la structure voisine restée froide.

Les murs autostables sont couramment utilisés dans la pratique. Cependant, pendant un incendie, cette solution peut s'avérer dangereuse pour les personnes (occupants et pompiers) dans la mesure où ils ont toujours tendance à s'effondrer dans la direction opposée à celle du feu. Ce mode d'effondrement s'explique par la distribution non uniforme des températures dans l'épaisseur du mur et l'effet de dilatation thermique plus important de la face exposée au feu par rapport à la face non exposée qui provoque une courbure dans la direction opposée à celle de l'incendie. Cette courbure conduit à une amplification progressive des effets des charges verticales (poids propre du mur) en générant un moment de flexion additionnel. Ce moment accentue le flambement et finit par provoquer la ruine du mur lorsque la courbure est devenue trop importante. Ils ne doivent donc être utilisés que si leur comportement a été évalué par des modèles de calcul avancés prenant en compte les effets du second ordre. De plus, lorsque l'espacement entre le mur autostable et la structure en acier voisine n'est pas suffisant, il est important d'être sûr que le mur coupe-feu puisse supporter l'effort susceptible d'être induit par les mouvements du bâtiment du fait de la dilatation thermique de la structure de toiture (traverses et pannes) provoqué par l'augmentation de température dans le compartiment en feu.

En alternative aux solutions précédentes, il est possible d'intégrer directement le mur coupe-feu à la charpente métallique du bâtiment à simple rez-de-chaussée comme illustré à la Figure 5.15(c). Un tel mur peut être soit perpendiculaire, soit parallèle aux portiques en acier. Plusieurs solutions

peuvent alors être considérées : mur coupe-feu inséré dans une file de poteaux, mur coupe-feu accolé aux poteaux ou mur coupe-feu décalé par rapport à une file de poteaux. Pour ces solutions, des mesures spécifiques doivent être mises en œuvre afin d'éviter l'endommagement du mur par suite de déformations parfois importantes de la structure en acier. Ces mesures concernent :

- la fixation des murs coupe-feu à la structure en acier,
- la protection contre le feu de la structure en acier au voisinage des murs coupe-feu,
- la toiture au-dessus des murs coupe-feu,
- le système de contreventement.

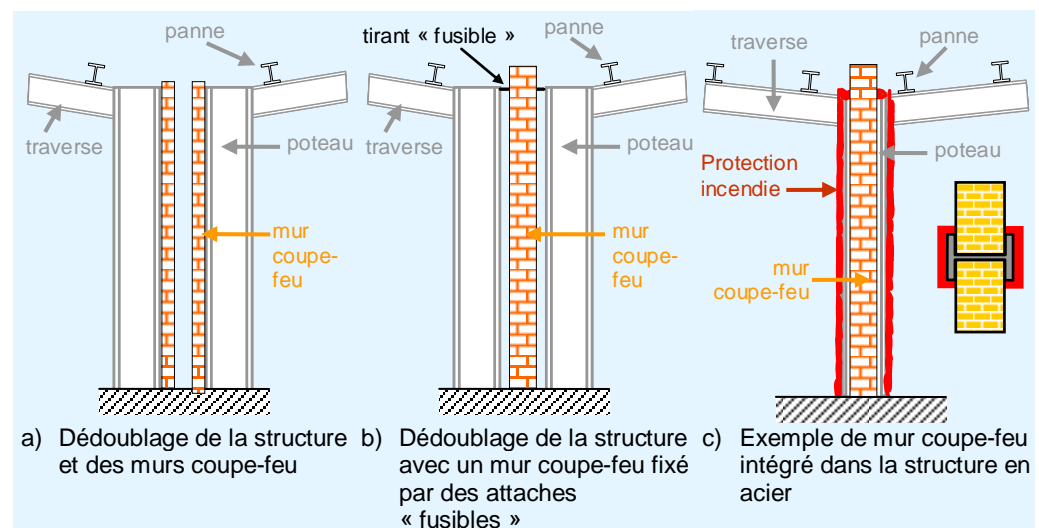


Figure 5.15 Quelques solutions de murs coupe-feu

Fixations d'éléments de façade et de murs coupe-feu à la structure en acier

Les murs coupe-feu et les éléments de façade fixés à la structure en acier des bâtiments à un seul niveau doivent rester solidement attachés afin d'éviter tout risque de dysfonctionnement de ces éléments du fait de déplacements latéraux significatifs de la structure métallique en cas d'incendie et éviter ainsi tout risque de ruine en chaîne ou d'effondrement vers l'extérieur.

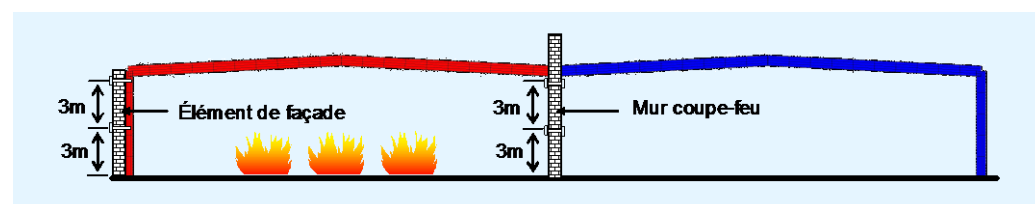


Figure 5.16 Détail de conception pour les éléments de façade et les murs coupe-feu

Une solution consiste à attacher ces éléments aux poteaux de la structure porteuse au moyen de systèmes de fixation appropriés, répartis uniformément sur la hauteur du bâtiment. L'espacement maximum de ces fixations sera déterminé par le fabricant des murs ; il est recommandé que l'espacement n'excède pas 3 m pour les murs construits sur site (béton, maçonnerie, etc.).

En complément, les fixations utilisées pour attacher les murs coupe-feu et les éléments de façade sur les poteaux doivent être conçus pour résister aux efforts générés par le vent et le poids propre des éléments séparatifs sous les effets du déplacement latéral induit par la structure métallique du bâtiment. Si ces fixations sont en acier et ne sont pas protégées contre le feu, chacune d'entre elles doit être dimensionnée à température normale pour résister à l'effort d'arrachement suivant :

$$F = W + 5 p \delta_i d / n \quad (34)$$

où :

- W est la charge de vent caractéristique utilisée pour le calcul à température ambiante et appliquée à chaque fixation [N],
- p est le poids propre du mur [N/m²],
- d est l'espacement entre portiques [m],
- n est le nombre total de fixations (distribué uniformément selon la hauteur),
- δ_i est le déplacement latéral maximum obtenu à partir de la relation (26) [m].

Protection contre l'incendie des éléments en acier proches des murs coupe-feu

L'exigence de non propagation du feu entre différents compartiments et l'absence de ruine en chaîne (à savoir que l'intégrité des murs coupe-feu soit préservée pendant la durée exigée et que les parties froides de la structure restent stables) conduit à imposer que les poteaux utilisés pour supporter les murs coupe-feu soient stables au feu de degré au moins équivalent à celui des éléments séparatifs. Dans les cas courants, ces exigences conduiront à appliquer aux poteaux une protection contre l'incendie. En revanche, les poteaux ne supportant pas de murs coupe-feu n'ont pas besoin de protection contre l'incendie.

Par ailleurs, tous les éléments structuraux qui pourraient endommager les murs coupe-feu (comme les traverses ou les pannes au voisinage de ces murs ou les traversant) doivent également être protégés contre l'incendie.

5.6.2 Recommandations pour les portiques en acier

Mur coupe-feu perpendiculaire aux portiques en acier

La Figure 5.17 illustre la situation où le mur coupe-feu est perpendiculaire aux portiques en acier. Pour cette situation :

- Les poteaux situés à proximité ou intégrés dans un mur coupe-feu doivent être protégés contre le feu.
- Lorsqu'un mur coupe-feu est inséré entre les semelles des poteaux, aucune protection au feu supplémentaire n'est nécessaire pour les poutres de toiture (Figure 5.17 (a)).
- Lorsque les portiques ne possèdent pas de renforts de jarrets et que le mur coupe-feu est attaché à l'une des semelles des poteaux, la protection contre l'incendie doit être appliquée à toutes les poutres qui traversent ce mur, côté

mur, sur une longueur minimale de 200 mm au-delà de la face du mur. Cette protection permet d'éloigner du mur les rotules plastiques qui se forment à chaud, évitant ainsi que la ruine des traverses ne risque d'endommager le mur coupe-feu (voir Figure 5.17 (b)). Lorsque les portiques possèdent des renforts de jarrets, aucune protection contre l'incendie n'est nécessaire pour les traverses.

- Dans cette situation, les pannes ne traversent pas le mur coupe-feu. Par conséquent, elles n'exigent aucune précaution particulière.

L'épaisseur du matériau de protection contre le feu rapporté aux poteaux peut être calculée en considérant une température critique de 500°C et le même degré de résistance au feu que celui exigé pour les murs coupe-feu. La protection contre l'incendie doit être appliquée sur toute la hauteur des poteaux.

Si les traverses sont partiellement protégées, l'épaisseur du matériau de protection contre le feu peut être calculée en considérant une section exposée sur ses quatre faces (pour déterminer le facteur de massiveté), une durée d'exposition au feu normalisé d'une heure et une température critique de 500°C.

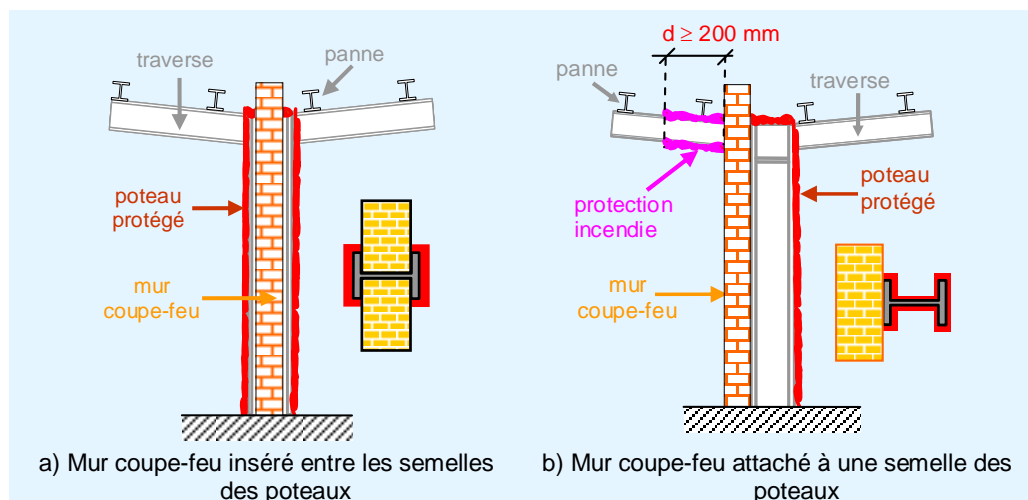


Figure 5.17 Détail de conception à proximité de murs coupe-feu perpendiculaires aux portiques en acier

Mur coupe-feu parallèle aux portiques en acier

La Figure 5.18 illustre la situation où le mur coupe-feu est parallèle aux portiques en acier. Pour cette situation :

- Le mur coupe-feu peut être localisé soit entre deux portiques (décalé ou accolé aux poteaux métalliques), soit dans le plan du portique (intégré à une file de poteaux).
- Les poteaux et les traverses intégrés ou à proximité du mur coupe-feu, doivent être protégés contre le feu.
- Les pannes traverseront les murs coupe-feu. Il est donc nécessaire de protéger contre le feu les pannes continues (sur une distance de 200 mm à partir du mur) ou de concevoir un système de pannes isostatiques. Par exemple, lorsque le mur coupe-feu est dans le plan d'un portique, des

éléments en acier attachés aux traverses doivent être insérés à travers le mur pour pouvoir supporter les pannes.

L'épaisseur du matériau de protection contre l'incendie appliqué aux poteaux et aux traverses peut être calculée en considérant une température critique de 500°C et le même degré de résistance au feu que celui exigé pour les murs coupe-feu. La protection contre le feu doit être appliquée sur toute la hauteur des poteaux.

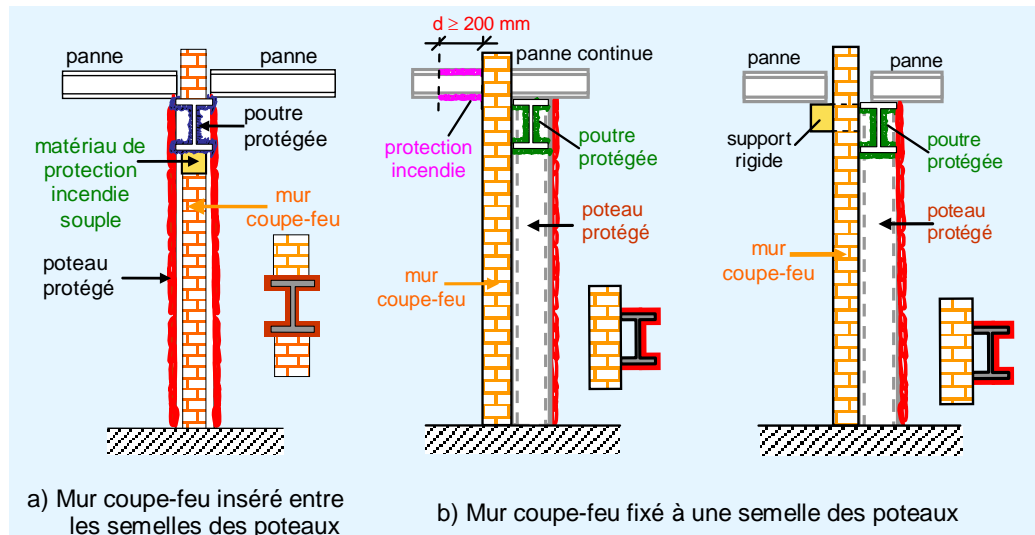


Figure 5.18 Détail de conception à proximité de murs coupe-feu parallèles aux portiques en acier

Si les pannes sont partiellement protégées, l'épaisseur du matériau de protection contre le feu peut être calculée en considérant une section exposée au feu sur ses quatre faces (pour déterminer le facteur de massiveté), une durée d'exposition au feu normalisé d'une heure et une température critique de 500°C.

Recommandations de calcul additionnelles pour les portiques simples en acier

Dans le cas de bâtiments à un seul niveau constitués de portiques à simple nef en acier où le ratio hauteur du poteau/portée de la traverse du portique, (h/l) , est plus grand que 0,4, le mode de ruine vers l'extérieur peut être évité en concevant des assemblages entre les poteaux et les fondations, et les fondations elles-mêmes, tels qu'ils possèdent une résistance suffisante pour supporter les charges verticales correspondant à la situation accidentelle de l'incendie combinée avec un moment fléchissant additionnel pris égal à 20% du moment plastique ultime du poteau à température normale.

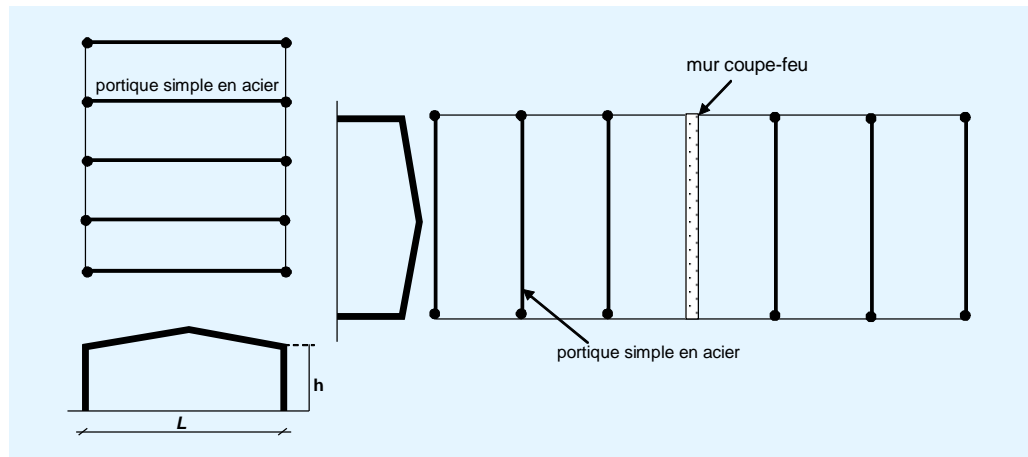


Figure 5.19 Bâtiments à simple rez-de-chaussée avec portiques simples en acier

Exemples de murs coupe-feu

Des illustrations de murs coupe-feu adoptant quelques-unes des recommandations précédentes sont représentées à la Figure 5.20. Elles montrent clairement que les murs coupe-feu n'ont pas été endommagés en dépit de l'effondrement de la structure en acier.



a) Mur coupe-feu autostable inséré entre deux structures en acier indépendantes



b) Traverse en acier partiellement protégée contre le feu traversant un mur coupe-feu fixé aux poteaux en acier

Figure 5.20 : Vues de murs coupe-feu après un incendie dans un bâtiment en acier à simple rez-de-chaussée

5.6.3 Recommandations pour des portiques en acier constitués de traverses à treillis

Mur coupe-feu perpendiculaire aux portiques en acier

La Figure 5.21 illustre la situation où le mur coupe-feu est perpendiculaire aux portiques en acier. Pour cette situation :

- Les poteaux intégrés ou situés près d'un mur coupe-feu doivent toujours être protégés.

- Lorsqu'un mur coupe-feu est inséré entre les semelles des poteaux, les traverses à treillis doivent être protégées contre le feu de chaque côté du mur (voir Figure 5.21 (a)).
- Lorsque le mur coupe-feu est accolé à une semelle, seule la traverse à treillis situé du côté du mur doit être protégée. Une protection contre l'incendie doit être appliquée aux traverses sur une longueur minimale égale à la distance séparant le mur du premier montant vertical de la traverse à treillis (voir Figure 5.21 (b)).
- Les pannes ne traversant pas le mur coupe-feu dans cette situation, aucune disposition particulière n'est exigée.

L'épaisseur du matériau de protection contre le feu appliqué aux poteaux peut être calculée forfaitairement en considérant une température critique de 500°C et le même degré de résistance au feu que celui exigé pour les murs coupe-feu. La protection contre l'incendie doit être appliquée sur la hauteur totale des poteaux.

Si les traverses à treillis sont protégées partiellement, les épaisseurs de protection rapportée sur les éléments constitutifs de la traverse peuvent être déterminées en considérant une section exposée au feu sur trois faces pour les membrures supérieures et sur quatre faces pour les membrures inférieures, les montants verticaux et les diagonales, pour une durée d'exposition au feu normalisé d'une heure et un échauffement limité à 500°C.

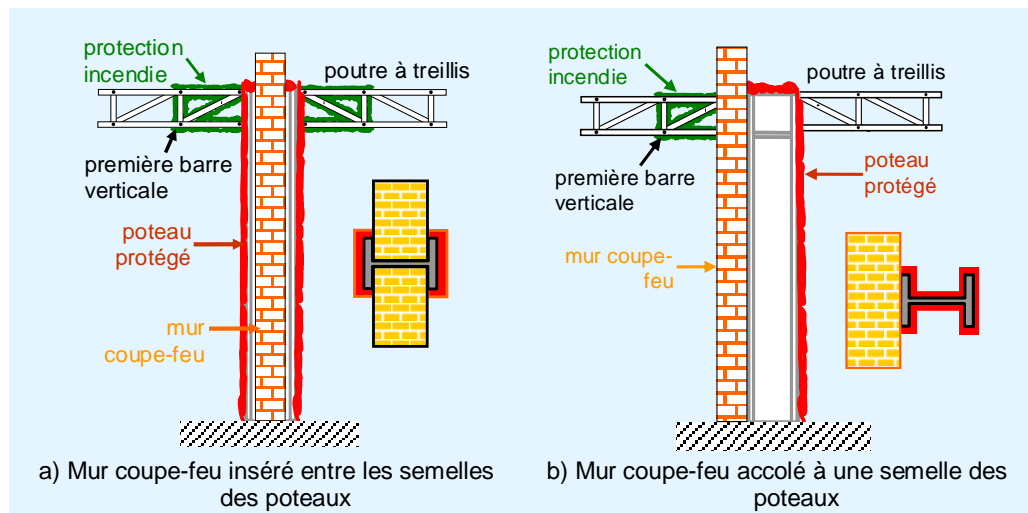


Figure 5.21 Détails de conception près des murs coupe-feu perpendiculaires aux portiques en acier avec traverse à treillis

Mur coupe-feu parallèle aux portiques en acier

La Figure 5.22 illustre la situation où le mur coupe-feu est parallèle aux portiques en acier. Dans ce cas :

- Il n'est pas courant de réaliser un mur coupe-feu dans le plan d'un portique car il est difficile de le rendre continu sur la hauteur de la traverse en treillis. Les murs coupe-feu parallèles au portique sont donc habituellement disposés soit à côté et en contact avec le portique en acier, soit entre deux structures en acier indépendantes.

- Lorsque le mur coupe-feu est attaché à un portique en acier, les poteaux et les traverses doivent être protégés (voir Figure 5.22 (b)). De plus, les pannes et les traverses situées à proximité du mur doivent être protégées au feu sur une longueur minimale correspondant à la distance du mur à l'attache panne/bracon lorsque la structure de toiture est constituée de pannes.
- Lorsque le mur coupe-feu est inséré entre deux structures en acier indépendantes, aucune protection au feu n'est nécessaire (voir Figure 5.22 (a)).

Si les poteaux sont protégés, l'épaisseur du matériau de protection contre l'incendie peut être calculée forfaitairement en considérant une température critique de 500°C et le même degré de résistance au feu que celui exigé pour les murs coupe-feu. Une protection contre l'incendie doit être mise en œuvre sur toute la hauteur des poteaux.

Si les traverses à treillis sont protégées, l'épaisseur du matériau de protection contre le feu peut être calculée en considérant pour le facteur de massivité : une exposition au feu sur quatre faces pour les membrures inférieures, les montants verticaux et les diagonales, et une exposition au feu sur trois faces pour les membrures supérieures. Comme précédemment, le calcul peut être mené pour une durée d'exposition au feu normalisé d'une heure et une température critique de 500°C. Une protection contre l'incendie doit être assurée sur toute la longueur des traverses à treillis.

L'épaisseur du matériau de protection contre le feu appliqué aux pannes et aux bracons peut être calculée en considérant une section exposée au feu sur ses quatre faces (pour déterminer le facteur de massivité), une durée d'exposition au feu normalisé d'une heure et une température critique de 500°C.

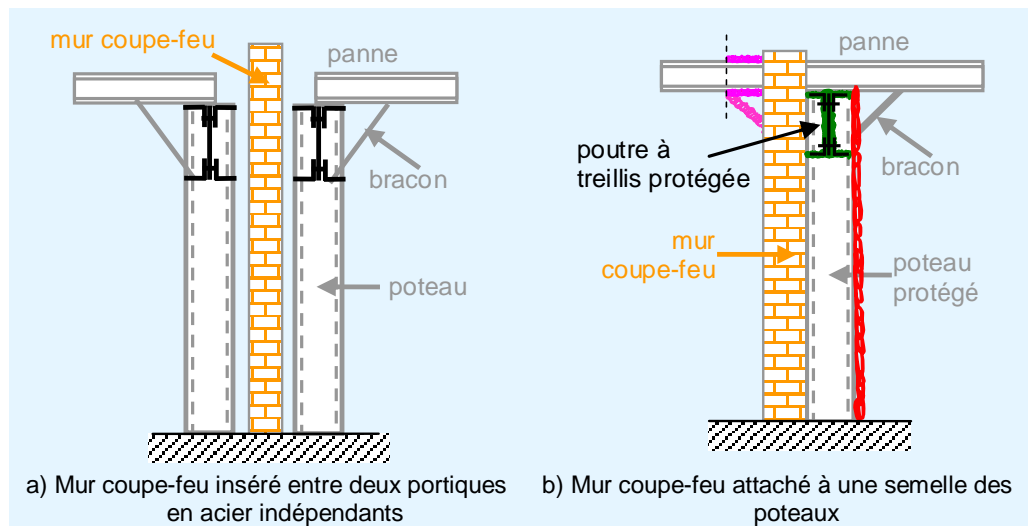


Figure 5.22 Détail de conception à proximité de murs coupe-feu parallèles aux portiques en acier avec une traverse à treillis

5.6.4 Recommandations pour les systèmes de contreventement

L'exigence de non effondrement vers l'extérieur du bâtiment dans la direction longitudinale (perpendiculaire aux portiques en acier) peut être satisfaite en utilisant des systèmes de contreventement appropriés. Chaque compartiment doit notamment posséder son propre système de contreventement.

Mur coupe-feu perpendiculaire aux portiques en acier

La Figure 5.23 (a) illustre la situation où le mur coupe-feu est perpendiculaire aux portiques en acier. Pour cette situation, il convient :

- D'utiliser des systèmes de contreventement verticaux complémentaires aux deux extrémités du mur coupe-feu afin d'assurer l'intégrité du mur. Ces systèmes de contreventement doivent être dimensionnés pour résister à un effort latéral pris égal à 20 % de celui qui est dû aux actions normales du vent (selon la combinaison d'actions en situation d'incendie) calculé pour une aire de pignon limitée par la largeur entre montants.
- De prévoir des systèmes de contreventement doubles (c'est-à-dire avoir un système de contreventement de chaque côté des murs coupe-feu) ou protéger le système de contreventement contre le feu.
- Les systèmes de contreventement doivent être disposés de manière à ne pas causer de problèmes pour le dimensionnement à température normale, par exemple sans brider le mouvement d'un joint de dilatation.

Mur coupe-feu parallèle aux portiques en acier

La Figure 5.23 (b) illustre la situation où le mur coupe-feu est parallèle aux portiques en acier. Pour cette situation, il convient :

- D'installer des systèmes de contreventement (contreventement vertical et contreventement horizontal de toiture) dans chaque compartiment. Cette solution peut conduire à des systèmes de contreventement additionnels en conditions normales.
- De calculer chaque système de contreventement pour qu'il assure une stabilité adéquate en condition normale et qu'il puisse supporter, en situation d'incendie, une charge horizontale uniforme [N/m] prise égale à $F = 1,19 \times (G + \psi_1 \times S_n) \times l_f$, si l_f est la distance entre portiques, G est l'action permanente, incluant les charges des équipements, S_n est la charge de neige et ψ_1 est le coefficient de combinaison fréquente donné dans l'Annexe Nationale de l'EN 1990.
- Lorsque le mur coupe-feu est accolé à une semelle des poteaux, les éléments des systèmes de contreventement doivent être fixés, côté mur, le cas échéant, sur les éléments en acier rigides mis en œuvre pour supporter les pannes.

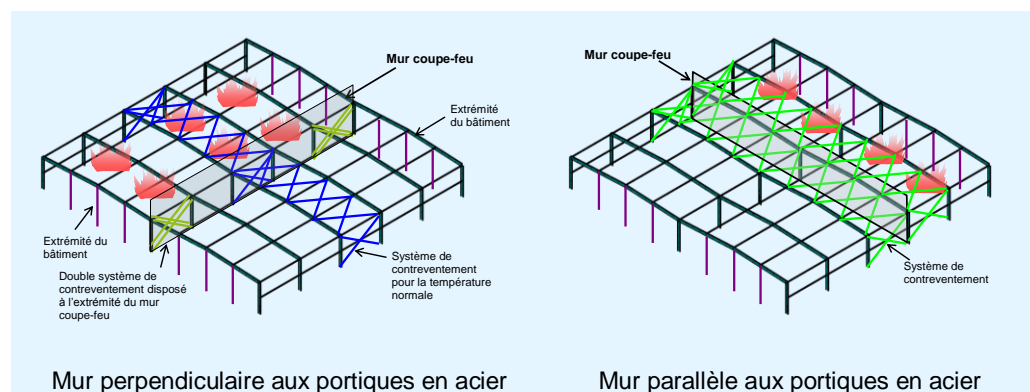


Figure 5.23 Recommandations pour les systèmes de contreventement

5.6.5 Recommandations pour les systèmes de toiture au-dessus des éléments de séparation

La toiture doit être indépendante d'un compartiment à l'autre en adoptant les recommandations suivantes (voir Figure 5.24 (a)) :

- Des pannes doivent être installées de chaque côté du coupe-feu.
- La toiture doit être interrompue de chaque côté du coupe-feu
- La toiture doit comporter une protection contre l'incendie sur une largeur de 2,50 m de chaque côté du mur.

En solution alternative, le mur peut être prolongé au-dessus de la toiture, jusqu'à une hauteur d (voir Figure 5.24 (b)).

Les règles nationales peuvent préciser d'autres exigences spécifiques pour les toitures adjacentes aux murs coupe-feu.

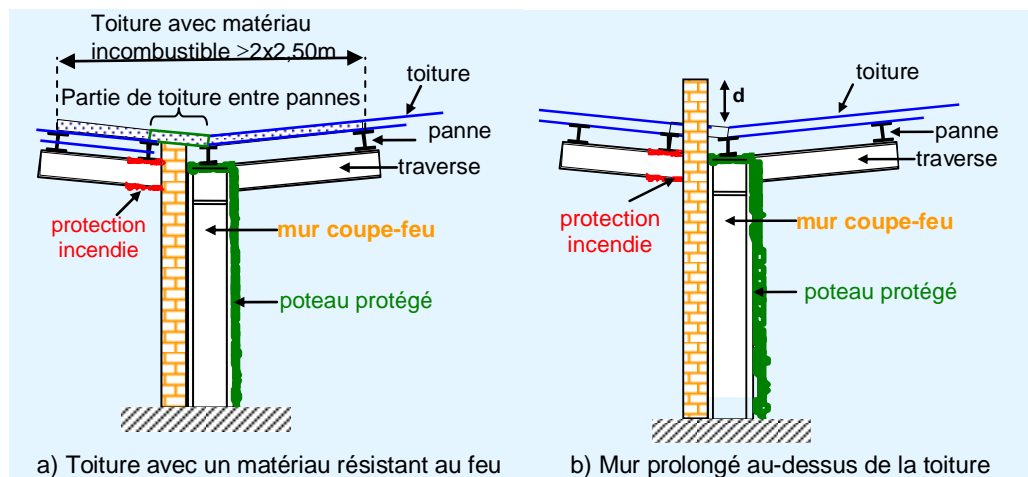


Figure 5.24 Système de toiture au-dessus d'éléments de séparation

6 GUIDE POUR L'UTILISATION DE SOLUTIONS PLUS AVANCÉES

Ce chapitre donne une vue générale des modèles de calcul avancés disponibles pour la modélisation d'un incendie, la modélisation thermique, et la modélisation structurale qui peuvent être utilisés pour les calculs d'ingénierie incendie^[9,16].

6.1 Modèles de feu

Deux types de modèles numériques sont disponibles pour modéliser le développement de feux réels : les modèles de zone et les modèles de champs. Ces modèles permettent de calculer les températures, l'évolution des fumées, la propagation des flammes, le temps correspondant à l'embrasement généralisé et de nombreux autres effets.

6.1.1 Modèles de zones

Le modèle le plus simple est le modèle à une zone représentatif des feux pleinement développés (incendies généralisés), pour lesquels les conditions à l'intérieur du compartiment sont supposées uniformes et représentées par une température homogène.

Le modèle à deux zones peut être utilisé pour les situations précédant l'embrasement généralisé, principalement pour la phase de croissance de l'incendie. Le modèle est basé sur l'hypothèse de stratification des fumées, séparant le compartiment en deux couches distinctes : une couche supérieure chaude (contenant la plus grande partie de la chaleur et des fumées dégagées par le feu), et une couche inférieure plus froide (qui reste relativement peu contaminée par les fumées). Un panache de flammes alimente la zone chaude au droit du foyer de l'incendie. La température, la quantité de produits de combustion toxiques et la taille de chaque couche sont calculées à partir des lois de conservation de l'énergie, de conservation des espèces chimiques et de conservation de la masse respectivement. Des règles simplifiées gouvernent l'entraînement d'air dans le panache du feu, les échanges radiatifs et les mouvements de gaz par les ouvertures vers les compartiments adjacents ou l'extérieur. Les résultats de la simulation sont l'évolution de la température des gaz dans chacune des deux couches, l'évolution de la température des murs, l'évolution des débits passant par les ouvertures et l'évolution de l'épaisseur de chaque couche en fonction du temps. L'épaisseur de la couche inférieure, qui reste à une température relativement froide et qui ne contient pas de produits de combustion, est très importante pour estimer la tenabilité du compartiment pour ses occupants. Les effets du feu à proximité du foyer sont mieux décrits en utilisant un modèle simplifié comme celui d'Hasemi. La combinaison de ce modèle avec le modèle à deux zones permet alors de déterminer le champ de température des gaz à proximité et loin du feu (voir Figure 6.1).

Quand l'épaisseur de la couche inférieure est trop petite comparée à la hauteur du compartiment, l'hypothèse de deux zones n'est plus applicable et le modèle à une zone devient plus approprié. Par ailleurs, si la taille du foyer de l'incendie

est grande comparativement à la surface de plancher, l'hypothèse du modèle à une zone est également plus appropriée que celle du modèle à deux zones.

Certains modèles de zones offrent la possibilité de passer de deux zones à une zone lorsque certaines conditions sont vérifiées (conditions de températures, surface du feu et d'épaisseur de la couche chaude correspondant à l'embrasement généralisé).

Il est également toujours possible de choisir de suivre une stratégie à une ou deux zones pendant toute la durée de l'incendie. Dans ce cas, la simulation complète est menée en considérant une ou deux zones, du début à la fin du calcul. Aucune modification du débit calorifique n'est faite, excepté pour les modèles de combustion.

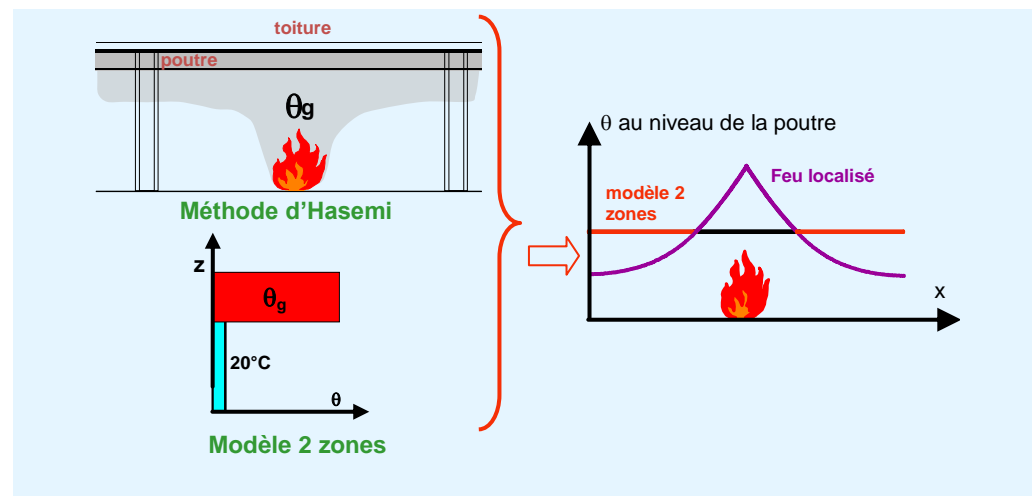


Figure 6.1 Combinaison d'un modèle 2 zones avec la méthode d'Hasemi

Parmi les modèles de zones les plus complexes, certains permettent de calculer les échanges thermiques vers des objets (cibles) situés dans le compartiment. Ils peuvent également prendre en compte plusieurs foyers d'incendie et permettre l'analyse de plusieurs compartiments en tenant compte des échanges entre eux (voir Figure 6.2).

Généralement, les données d'entrée sont : la géométrie du compartiment, les caractéristiques thermiques des parois (incluant tous les murs, planchers et plafonds), les caractéristiques des ouvertures (nombre et dimensions), les caractéristiques du mobilier et les données concernant le feu (telles que la courbe RHR, le taux de pyrolyse, la chaleur de combustion du combustible). Les données de sortie sont en général le calcul du temps d'activation des sprinklers et de déclenchement des détecteurs d'incendie, le temps correspondant à l'embrasement généralisé dans le compartiment, les températures des couches supérieures et inférieures et la hauteur de la couche de fumées.

La charge calorifique peut être considérée comme uniformément distribuée si le matériau combustible est plus ou moins présent sur la totalité de la surface du plancher du compartiment et lorsque la densité de charge calorifique (quantité de combustible par surface de plancher) est plus ou moins uniforme. Par contre, la charge calorifique doit être « localisée » si le matériau

combustible est concentré sur une surface réduite en comparaison à la surface totale de plancher sans combustible.

Un paramètre essentiel pour les modèles de feu avancés est le débit calorifique. Pour le calcul, il est de pratique courante de se référer aux valeurs données dans l'EN 1991-1-2.

Pour les géométries de bâtiments irrégulières et/ou complexes, pour les systèmes de ventilation compliqués ou lorsqu'il faut disposer de plus de détails sur les échanges de chaleur par rayonnement ou par convection sur des cibles spécifiques, il faut considérer l'utilisation d'un modèle de champs.

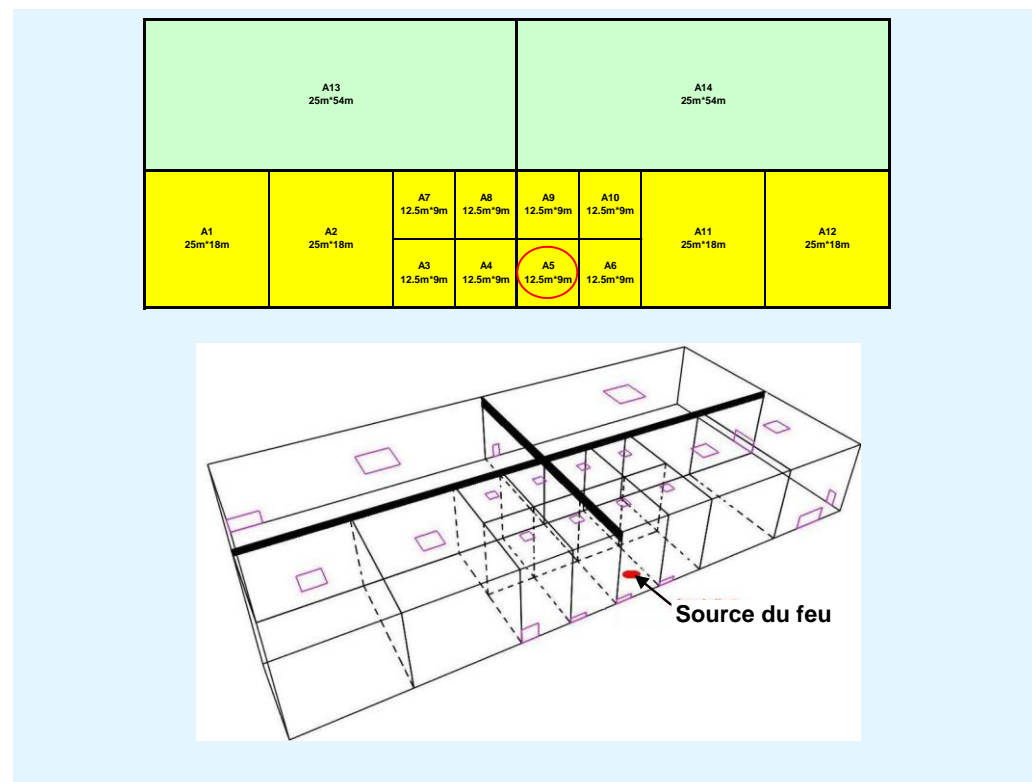


Figure 6.2 Exemple de modélisation incendie utilisant des modèles de zones pour un bâtiment industriel

6.1.2 Modèles de champs

Les modèles de champs (CFD²) sont les modèles les plus sophistiqués pour simuler le développement des incendies en milieu confinés. Ils intègrent des sous-modèles pour la turbulence, le transfert thermique et la combustion.

La technique de modélisation CFD est fondée sur la résolution des équations tridimensionnelles des lois de conservation fondamentales (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) en fonction du temps. Le volume considéré, généralement un compartiment, est divisé en un très grand nombre de cellules (des centaines de milliers ou même des millions). Le nombre approximatif de cellules nécessaires pour le compartiment étudié

² CFD : vient de l'anglais « Computational Fluid Dynamics » qui se traduit par « calcul de dynamique des fluides ».

dépend de sa géométrie, de la précision souhaitée et, d'un point de vue pratique, de la vitesse de calcul et de la taille mémoire disponible.

Trois types de modèles de champs existent, selon le modèle de turbulence implanté dans le modèle :

- Les modèles de type DNS³ : les équations de base sont résolues directement mais elles nécessitent des pas de temps et de volume très petits afin de simuler toutes les échelles temporelles et spatiales issues des processus chimiques et turbulents. Les modèles DNS exigent des ordinateurs puissants. Ils sont donc utilisés pour des cas d'étude académiques ou sont limitées aux applications simples.
- Les modèles de type LES⁴) : les mouvements à grande échelle du fluide sont calculés tandis que les effets à petite échelle sont modélisés en utilisant un modèle de sous-maille. Le modèle de sous-maille le plus couramment utilisé est le modèle de Smazorinsky.
- Les modèles de type RANS⁵ : Les équations de base sont moyennées et toutes les échelles de turbulence sont modélisées. Le modèle utilisé le plus fréquemment est le modèle $k - \varepsilon$.

Les données d'entrée sont les mêmes que celles nécessaires pour les modèles de zones mais elles doivent être fournies avec un niveau de détail plus élevé. Elles concernent la géométrie détaillée du compartiment, les caractéristiques thermiques des parois (incluant tous les murs, planchers et plafonds), les caractéristiques des ouvertures (nombre et dimensions), les caractéristiques du mobilier, les caractéristiques combustible/combustion, les paramètres de turbulence et les paramètres de rayonnement.

Les données de sortie sont les mouvements de chaleur et de la fumée, le calcul du temps d'activation des sprinklers et de déclenchement des détecteurs d'incendie, le temps correspondant à l'embrasement généralisé, les températures dans le volume, les vitesses, la hauteur de la couche de fumée, etc.

En raison de leur complexité et du temps de calcul (CPU) nécessaire, les modèles de champs sont très peu utilisés pour évaluer la résistance au feu des structures, notamment pour un feu pleinement développé. Dans le domaine de l'incendie, l'utilisation des modèles de champs se réduit souvent à des cas spécifiques avec une géométrie sophistiquée.

6.2 Modèles thermiques

Des modèles de transfert thermique avancés peuvent être utilisés pour calculer la distribution des températures dans une structure soumise à un incendie. Ils sont basés principalement soit sur des méthodes de différences finies soit sur des méthodes aux éléments finis. Ils sont souvent utilisés pour estimer les gradients de température dans les éléments de structure réalisés avec des

³ DNS : vient de l'anglais « Direct Numerical Simulations ».

⁴ LES : vient de l'anglais « Large Eddy Simulation ».

⁵ RANS : vient de l'anglais « Reynolds-averaged Navier Stokes ».

matériaux à faible conductivité thermique ou à forte humidité, comme le béton. De plus, ils peuvent être appliqués pour l'analyse des éléments structuraux sous conditions de feu nominal ou de feux réels.

De telles méthodes doivent prendre en compte la non-linéarité due aux conditions aux limites et aux variations des propriétés des matériaux en fonction de la température. Comme cela est généralement admis dans les calculs à l'incendie, les transferts thermiques entre le feu et les surfaces exposées des éléments se font essentiellement par convection et rayonnement.

A l'intérieur des matériaux homogènes, tels que l'acier, le transfert de chaleur se fait uniquement par conduction.

Pour les matériaux poreux, tels que le béton, ou ceux au sein desquels des cavités internes existent (vides), les transferts de chaleur sont plus complexes. Les trois modes de transfert : conduction, convection et rayonnement peuvent agir simultanément, auxquels s'ajoutent les transferts de masse. Cependant, par mesure de simplification, seul le processus d'échange dominant est introduit explicitement dans l'analyse thermique et les processus secondaires sont pris en compte à l'aide d'ajustements appropriés. Dans les calculs à l'incendie, on suppose habituellement que le béton est un matériau homogène et que le transfert de chaleur se fait principalement par conduction. Les transferts de chaleur par convection et par rayonnement survenant dans les pores sont considérés comme des processus secondaires et sont implicitement pris en compte dans les propriétés thermiques disponibles pour ce matériau (conductivité, chaleur spécifique). De plus, les transferts de masse sont généralement négligés et seule l'évaporation de l'eau libre contenue dans le béton est prise en compte. Les effets de l'humidité du béton (supposée uniformément distribuée dans le béton) sont traités de manière simplifiée, en supposant que lorsque la température dans une partie en béton atteint 120°C, toute la chaleur transférée dans cette partie est utilisée pour l'évaporation de l'eau. Ainsi, la chaleur spécifique du béton à 120°C peut être artificiellement augmentée à l'aide d'un pic. En revanche, les mouvements d'humidité sont rarement modélisés.

Pour les éléments mixtes, le contact entre les parties en acier et les parties en béton peuvent être supposés parfaits (absence de vides).

Le rayonnement dans les vides internes (comme dans les sections creuses en acier) doit être considéré dans l'analyse thermique.

En principe, quand les effets d'un incendie restent localisés à une partie de la structure, la distribution des températures le long des éléments structuraux peut être fortement non uniforme. C'est pourquoi un calcul précis des températures devrait être mené à l'aide d'une analyse thermique 3D. Cependant, en raison du temps de calcul élevé d'une telle analyse, il est souvent considéré comme suffisant de réaliser une succession d'analyses thermiques 2D sur les sections transversales des éléments structuraux. Les calculs sont alors menés en des points appropriés le long de chaque élément et les gradients de température sont reconstitués en supposant une variation linéaire des températures entre deux sections successives. Cette approche conduit habituellement à une bonne approximation du champ des températures réelles dans les éléments de

structure et permet une réduction significative des efforts nécessaires pour la modélisation et l'analyse numérique. Dans une analyse thermique 2D, les sections transversales des éléments de structure sont généralement discrétisées au moyen d'éléments plans triangulaires ou quadrilatères prenant en compte la conduction thermique. Toutes les sections rencontrées en Génie Civil peuvent être modélisées ainsi. Chaque élément plan discrétisant une section transversale peut correspondre à un matériau (acier, béton ou matériau de protection) avec ses propres caractéristiques mécaniques variables en fonction de la température.

Les conditions aux limites peuvent être soit des températures imposées, soit des flux thermiques imposés, pour reproduire les transferts de chaleur par convection et par rayonnement entre le feu et les faces exposées des éléments structuraux. Les effets d'une exposition thermique non uniforme peuvent également être introduits dans la modélisation à l'aide de conditions aux limites appropriées.

Négliger les effets des déformations mécaniques (comme le flambement des éléments en acier, les fissures et l'écrasement du béton, etc.) sur l'élévation de température des éléments structuraux, est une pratique courante. Dans ce cas, la géométrie des éléments structuraux étudiés ne varie pas pendant l'analyse thermique.

Comme pour les modèles simplifiés, l'utilisation de modèles avancés exige la connaissance de la géométrie des éléments structuraux, des propriétés thermiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, densité, humidité, etc.) et des coefficients de transfert thermique au niveau des surfaces exposées des éléments (émissivité, coefficient de transfert thermique par convection).

Habituellement, pour un calcul à l'incendie, les propriétés thermiques de l'acier et du béton en fonction de la température, sont obtenues à partir de l'EN 1992-1-2 et de l'EN 1993-1-2 et les coefficients de transfert thermique sont ceux donnés dans l'EN 1991-1-2.

6.3 Modèles structuraux

Les modèles de calcul avancés pour la réponse mécanique doivent être basés sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie de la mécanique des structures. Ce sont généralement des modèles aux éléments finis. Ils peuvent simuler les modes statiques ou dynamiques de tout ou partie de la structure, fournissant des informations sur les déplacements, les états de contrainte et de déformation dans les éléments structuraux ainsi que le temps de ruine de la structure, si celle-ci survient pendant la durée de l'incendie. Les modifications des propriétés mécaniques des matériaux avec la température, tout comme les non-linéarités géométriques et matérielles, doivent être prises en compte dans l'analyse du comportement de la structure.

Ce paragraphe aborde succinctement les principaux aspects de la modélisation du comportement mécanique des bâtiments à simple rez-de-chaussée en charpente métallique ou mixtes acier béton en situation d'incendie, notamment

les aspects relatifs aux modèles de matériaux, procédures de calcul, modélisation structurale, etc.

Les modèles de calcul avancés peuvent être utilisés avec n'importe quelle courbe d'échauffement, sous réserve que les propriétés des matériaux soient connues dans les domaines de température concernés et que les modèles de matériaux sont représentatifs du comportement réel. A température élevée, la courbe contrainte-déformation de l'acier est basée sur un modèle élastoplastique elliptique linéaire, en contraste avec le modèle élastique parfaitement plastique adopté pour le calcul à température normale. Les relations contrainte-déformation de l'acier et du béton données dans l'EN 1993-1-2 et l'EN 1994-1-2 sont généralement utilisées.

En situation d'incendie, le champ de température des éléments de structure varie en fonction du temps. Comme les relations contrainte-déformation des matériaux sont non-linéaires et fonction de la température, un modèle de matériaux approprié doit être adopté dans la modélisation numérique avancée pour permettre le passage d'une courbe de comportement à une autre, à chaque pas de temps (et donc de température). Le modèle de matériaux cinématique est habituellement utilisé pour les structures en acier, en supposant que le passage d'une courbe contrainte-déformation à une autre en raison du changement de température, est effectué en conservant une valeur constante de la déformation plastique entre deux niveaux de température (voir Figure 6.3). Ce modèle s'applique à tout état de contrainte de l'acier (traction ou compression). Pour le béton, le modèle cinématique utilisé est plus complexe puisque le matériau possède un comportement différent en traction et en compression. Par conséquent, différentes règles sont nécessaires pour passer d'une courbe à l'autre selon que le matériau est tendu ou comprimé. En général, le modèle cinématique est utilisé dans la plupart des modèles de calcul avancés employés dans les démarches d'ingénierie de sécurité incendie.

Le comportement de l'acier est souvent modélisé à l'aide d'un critère de plasticité de Von Mises avec écrouissage. Le comportement du béton en compression est modélisé avec un critère de Drucker-Prager avec écrouissage.

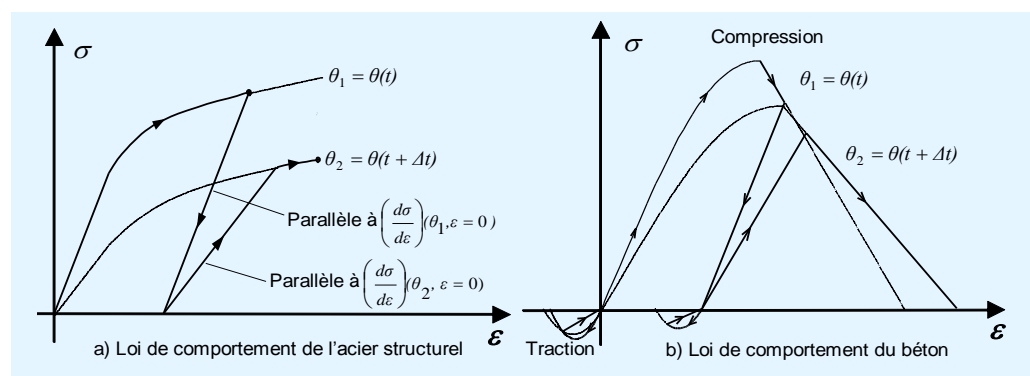


Figure 6.3 Modèles de matériaux cinématiques pour l'acier et le béton

Un autre aspect à noter dans l'application des modèles de calcul avancés pour les structures en acier et mixtes acier-béton sous conditions d'incendie réel, est le comportement du matériau pendant la phase de refroidissement. Il est bien connu que, pour les nuances d'acier les plus courantes, les variations des

propriétés mécaniques en fonction de la température sont considérées comme réversibles, ce qui signifie qu'une fois refroidi après une phase d'échauffement, l'acier retrouve ses propriétés mécaniques initiales. Toutefois, ce phénomène n'est pas vrai pour le béton, dont la composition est totalement modifiée quand il est chauffé à des températures élevées. Après refroidissement, le béton ne peut pas retrouver sa résistance initiale. En effet, sa résistance peut même être encore plus faible après refroidissement que celle correspondant à son échauffement maximal.

Les effets de la dilatation thermique doivent être pris en compte. Ceci est obtenu en supposant que la déformation totale des éléments structuraux exposés au feu est décrite par une somme de termes indépendants :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_\sigma + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr}) + \varepsilon_r \quad (30)$$

où ε_{th} , ε_σ , ε_r et ε_c sont respectivement les déformations dues à la dilatation thermique, à la contrainte mécanique, à la contrainte résiduelle et au fluage. ε_{tr} est la déformation due au régime thermique transitoire et non uniforme du béton (généralement négligée).

Dans les Eurocodes, les déformations de fluage sont supposées être intégrées implicitement dans les relations contrainte-déformation de l'acier et du béton. Les contraintes résiduelles sont généralement négligées, excepté dans le cas d'analyses structurales particulières. La déformation thermique est la dilation ($\Delta L/L$) qui apparaît quand la plupart des matériaux sont échauffés. Habituellement, l'effet des déformations thermiques est négligé pour le calcul à l'incendie des éléments isostatiques en acier. En revanche, elles doivent être prises en compte pour les éléments mixtes acier-béton, les portiques et les systèmes structuraux complexes, notamment lorsque les dilatations des éléments sont empêchées par d'autres parties de la structure (comme c'est le cas pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée divisés en compartiments séparés les uns des autres par des murs coupe-feu). En effet, les déformations thermiques dues, à la fois à l'élévation de température et à son caractère différentiel, peuvent engendrer des sollicitations additionnelles significatives.

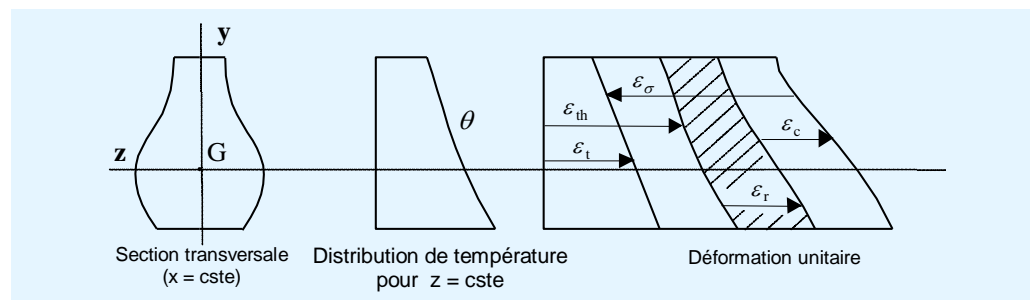


Figure 6.4 Distribution des déformations dans une modélisation numérique avancée

En général, l'analyse d'une structure en situation d'incendie est fondée sur une analyse aux états limites ultimes pour laquelle il y a équilibre entre la résistance de la structure et les sollicitations dues aux charges appliquées. Cependant, des déplacements structuraux significatifs apparaissent inévitablement, dus à la fois à l'adoucissement des matériaux et à la dilatation thermique, qui conduisent à de grandes déformations plastiques. Par

conséquent, une analyse avancée du comportement au feu est un calcul élastoplastique non linéaire, dans lequel à la fois la résistance et la rigidité varient non linéairement. D'un point de vue mathématique, la solution d'une telle analyse ne peut pas être obtenue directement et elle doit être menée en utilisant une procédure incrémentale (pas à pas) et itérative :

- Une analyse pas-à-pas est menée pour trouver l'état d'équilibre de la structure à des instants différents (c'est-à-dire pour des champs de températures différents).
- Pour chaque pas de temps, une procédure de résolution itérative est utilisée pour rétablir l'équilibre de la structure qui se comporte de manière élastoplastique et non-linéaire.

En général, différents types de méthodes de résolution sont utilisés, comme la méthode de Newton-Raphson et la méthode de Newton-Raphson modifiée. La méthode de Newton-Raphson est recommandée pour les structures constituées d'éléments poutres, la méthode de Newton-Raphson modifiée l'est pour les structures constituées d'éléments coques.

Normalement, une analyse statique est suffisante pour simuler le comportement d'une structure en cas d'incendie. Cependant, une ruine locale ou l'instabilité d'un élément de structure (comme le déversement des pannes) n'entraîne pas la ruine globale de la structure. Par conséquent, l'analyse doit être réalisée par une succession d'analyses statiques et dynamiques pour aller au-delà des instabilités locales et obtenir le mode de ruine global afin de prédire l'influence d'une ruine locale sur le comportement global de la structure et suivre une ruine progressive éventuelle. Il convient de garder à l'esprit que le but n'est pas la modélisation précise des effets dynamiques. C'est pourquoi il est possible d'utiliser les valeurs par défaut des paramètres principaux fixés dans les modèles pour déterminer les effets d'accélération et d'amortissement.

Les conditions aux limites réelles doivent être représentées correctement. Il est courant de calculer les structures en supposant, pour les pieds de poteaux, des conditions d'appuis articulés. Cependant, comme ce type de liaison n'est jamais réalisé dans la pratique, il est également possible, si des données sont disponibles, d'introduire des liaisons semi-rigides. Lorsqu'une partie seulement de la structure est modélisée, il convient d'introduire dans la modélisation des conditions de maintien appropriées pour représenter la partie non modélisée. Le choix de ces conditions de maintien additionnelles (entre la sous-structure modélisée et le reste de la construction) doit être fait par le calculateur. En cas de symétrie par exemple, des maintiens en translation le long de l'axe de symétrie et des maintiens en rotation selon les deux axes principaux du plan de symétrie sont introduits dans le modèle.

Habituellement, dans un calcul structural au feu des charpentes métalliques ou mixtes acier-béton, les assemblages poutre-poteau sont supposés parfaitement rigides. Cependant, dans le cas de portiques en acier avec traverses à treillis, les assemblages des éléments de la traverse et les assemblages entre les membrures supérieures et inférieures de la traverse et les poteaux peuvent être supposés articulés ou parfaitement rigides selon le type de treillis.

Deux types de chargement doivent être appliqués aux structures soumises au feu. Le premier est un chargement statique. Il doit correspondre aux combinaisons d'actions pour les situations accidentelles. Le second consiste en l'élévation de température (au-dessus de la température ambiante) des éléments de structure obtenue à partir de l'analyse thermique précédente. Les conditions aux appuis comme les charges mécaniques appliquées à la structure sont supposées rester inchangées pendant toute l'exposition au feu.

Il est important de choisir une stratégie de modélisation structurale appropriée. La simulation du comportement mécanique d'un bâtiment à simple rez-de-chaussée en situation d'incendie peut être réalisée avec une analyse soit 2D, soit 3D.

Dans une analyse 2D, les simulations sont réalisées dans le plan de chaque portique, en supposant un comportement tridimensionnel du portique pour prendre en compte l'instabilité latérale des éléments (poteaux, poutres). Dans une telle modélisation, des conditions de maintien appropriées doivent être introduites pour stabiliser latéralement le portique. En réalité, ces maintiens hors plan sont assurés par la structure de la toiture (telle que les pannes par exemple) et par les éléments de façade fixés sur les poteaux (murs en béton, panneaux sandwich, bardage en acier) empêchant ainsi l'effondrement hors plan de se produire.

Dans une analyse 3D, plusieurs portiques parallèles, la structure de toiture (les pannes notamment) et éventuellement le système de contreventement, sont modélisés explicitement (voir Figure 6.5). La principale différence de l'analyse 3D en par rapport à l'analyse 2D est que les effets d'interaction entre les éléments sont traités directement et que la redistribution des charges des parties échauffées (les parties affaiblies à l'intérieur du compartiment en feu) vers les parties froides (les parties les plus résistantes en dehors du compartiment en feu) peut être prise en compte de manière précise. L'analyse 3D permet d'évaluer le comportement global des structures et par conséquent, d'obtenir une réponse mécanique plus réaliste des structures exposées au feu. Néanmoins, les coûts de calcul d'une telle analyse sont élevés du fait du nombre important d'éléments utilisés dans la modélisation.

Le choix entre une analyse 2D et 3D dépend de plusieurs paramètres, tels que le type de la structure (portiques acier ou mixtes), les dimensions du bâtiment, le scénario d'incendie et les objectifs de calcul structural au feu (pour satisfaire des exigences prescriptives ou pour vérifier un mode de ruine).

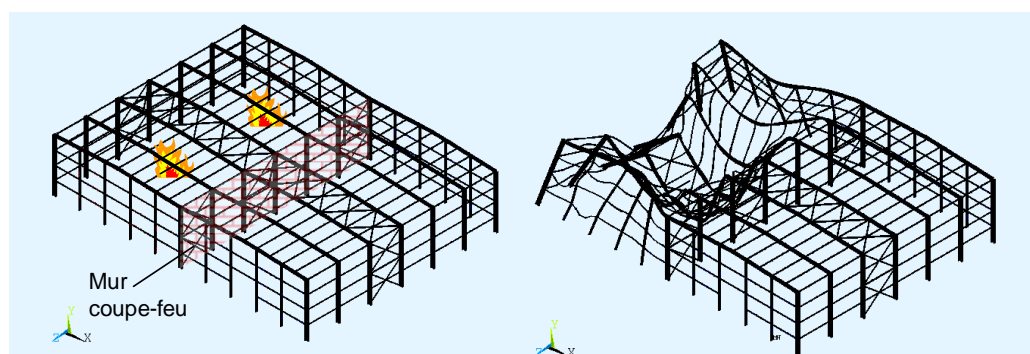


Figure 6.5 Exemple de modélisation mécanique 3D

RÉFÉRENCE

- 1 EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu
- 2 EN 1993-1-2:2003 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu
- 3 EN 1994-1-2:2003 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu
- 4 HOCKEY, S.M., and REW, P.J.
Human response to thermal radiation
HSE Books, UK, 1996.
- 5 VASSART, O., CAJOT, L-G., ZHAO, B., DE LA QUINTA, MARTINEZ DE ARAGON, J. and GRIFFIN, A.
Fire Safety of industrial halls and low-rise buildings : Realistic fire design, active safety measures, post-local failure simulation and performance based requirements
ECSC research project 7210-PR-378.
- 6 RFCS Research : Fire safety of industrial hall, Design Guide, Arcelor Mittal, CTICM, Labein tecnalia, ULG, Directorate-General for research, Research Fund for Coal and Steel Unit, RFS2-CR-2007-00032, Luxembourg, 2007.
- 7 Report to ECCS : Fire building regulations for single-storey buildings in 9 European countries. Document RT915. Version 02 June 2002.
- 8 LENNON, T., MOORE,D., WANG, B. Y. C. and BAILEY, G.
Designers' Guide to EN 1991-1-2, EN 1992- 1-2, EN 1993-1-2 and EN 1994-1-2
Actions on Structures Exposed to Fire and Structural Fire Design
Thomas Telford, 2007.
- 9 DIFISEK - Dissemination of Structural Fire Safety Engineering Knowledge
ECSC research project RFS-C2-03048.
- 10 PURKISS, J.A.
Fire safety design of structures
Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- 11 Risk Based Fire Resistance Requirements Competitive (RISK -REI), ECSC
research project 7210-PR-378.
- 12 SIMMS, W.I., and NEWMAN, G.M.
Single-storey steel framed buildings in fire boundary conditions (P313)
The Steel Construction Institute, 2002.
- 13 ECCS TC3 : Euro-monograms for fire exposed steelwork.
- 14 SD005a-EN-EU, Data : Nomogram for protected members, www.steel-access.com
- 15 RFCS Research : Fire safety of industrial hall, Design Guide, Arcelor Mittal, CTICM, Labein tecnalia, ULG, Directorate-General for research, Research Fund for Coal and Steel Unit, RFS2-CR-2007-00032, Luxembourg, 2007.
- 16 FRANSSEN J. M., KODUR V. and ZAHARIA R.
Designing steel structures for fire safety
Balkema Book, 2009.