

Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 20 (1975)

Artikel: Tenue au feu des constructions en acier ou mixtes

Autor: Sfintesco, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-18242>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

IV

Tenue au feu des constructions en acier ou mixtes

Brandverhalten der Stahl- und Verbundkonstruktionen

Behaviour of Steel and Composite Structures in Fire

D. SFINTESCO

Dr.-Ing.E.h., F.ASCE

Directeur des Recherches, CTICM

Secrétaire Général Technique, CECM

Puteaux, France

SOMMAIRE

- 1. AVANT-PROPOS
- 2. APPROCHE TRADITIONNELLE
- 3. RESISTANCE AUX EFFETS THERMIQUES
 - 3.1. Considérations fondamentales
 - 3.1.1. Processus de réchauffement
 - 3.1.2. Critères limitatifs
 - 3.2. Eléments et structures en acier
 - 3.2.1. Eléments isostatiques
 - 3.2.2. Eléments et systèmes hyperstatiques
 - 3.2.3. Poteaux et autres éléments comprimés
 - 3.3. Eléments mixtes acier-béton
 - 3.4. Effets de dilatations empêchées
- 4. DÉROULEMENT DES INCENDIES NATURELS
 - 4.1. Remarques préliminaires
 - 4.2. Effets des principaux paramètres
 - 4.2.1. Charges calorifique
 - 4.2.2. Géométrie et ventilation des locaux
 - 4.3. Corrélation avec l'incendie conventionnel
- 5. MESURES PREVENTIVES ET DE PROTECTION
 - 5.1. Protection des éléments métalliques ou mixtes
 - 5.2. Performances requises des moyens de protection
 - 5.3. Structures non protégées
 - 5.4. Structures irriguées
 - 5.5. Incidences sur la conception des structures

1. AVANT-PROPOS

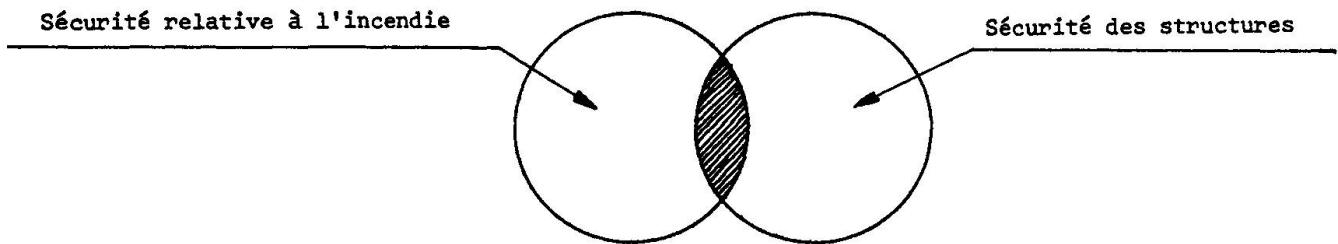
Depuis sa fondation, l'A.I.P.C. a pu accueillir dans ses volumes de mémoires, ses congrès et -plus récemment- ses symposiums et colloques, des rapports traitant de tous les grands thèmes envisageables dans le domaine de la conception, du calcul et de la réalisation des ouvrages ainsi qu'à tous les types de sollicitations ou phénomènes qui peuvent s'imposer à ceux-ci. Tous, sauf un : l'incendie. Et pourtant c'est un sujet qui ne manquait ni d'intérêt ni d'importance. Bien au contraire, la tenue au feu des constructions est un des aspects majeurs dont il faut tenir compte dans l'étude et la réalisation des bâtiments, en vue de leur usage. Elle entre en ligne de compte pour l'ingénieur-projeteur, -ce qui justifie l'intervention de l'A.I.P.C.- mais elle intéresse dans une égale mesure, quoique sous des angles divers, le maître d'ouvrage ou le promoteur, l'architecte, le constructeur et -last but not least- les responsables de la sécurité et l'usager.

Pourquoi alors l'A.I.P.C. n'avait-elle pas abordé le sujet jusqu'à présent et pourquoi le fait-elle maintenant, en lui consacrant une séance à ce colloque et une autre au prochain congrès ?

La raison réside dans le fait que, jusqu'à ces derniers temps, le problème de la tenue au feu des structures avait été traité de façon plutôt empirique, en se fondant sur l'observation fortuite et globale des incendies accidentels et de leurs conséquences, à laquelle s'ajoutaient une expérimentation en laboratoire, faite dans des conditions trop éloignées de celles des cas réels, ainsi que des études ponctuelles sur le comportement et les performances des matériaux de construction et de protection.

Or, tout cela ne suffisait pas pour bâtir une théorie consistante et pour réaliser une approche conforme aux pratiques des sciences de l'ingénieur. En somme, dans cet état des connaissances, l'étude de ce domaine ne s'élevait pas à un niveau compatible avec celui des activités de l'A.I.P.C.

Mais au cours de la dernière décennie il y a eu une évolution importante et une véritable prise de conscience en la matière. Le concept moderne d'une sécurité cohérente des structures par rapport à tous les types de risques a été naturellement étendu au domaine de l'incendie. Par ailleurs, l'analyse objective des diverses sources de risques relatifs à l'incendie a mis en évidence quelle est la part qui revient à la sécurité structurale dans le contexte général de la sécurité vis-à-vis de l'incendie.



Les incidences sur le développement de la construction d'une réglementation établie sans un support scientifique suffisant et donc d'une approche guidée subjectivement par une prudence trop intuitive, ont incité les milieux responsables à mettre à la disposition de la recherche des moyens relativement importants.

Le présent rapport reprend l'essentiel d'un texte initialement destiné à un volume publié en l'honneur du Professeur Otto Steinhardt. Il lui est donc dédié en amical hommage.

Des études théoriques et expérimentales de caractère à la fois scientifique et réaliste ont été effectuées dans le monde, notamment au Japon, en Australie, en Amérique du Nord et sur le plan international européen. C'est d'ailleurs dans ce dernier cadre que, sous l'impulsion de l'auteur, ont été réalisées des conditions expérimentales nouvelles, plus proches de la réalité et donc permettant d'obtenir des résultats plus significatifs que ceux des pratiques classiques : l'expérimentation sur des éléments et des ensembles de grandes dimensions, sous l'effet combiné de sollicitations statiques et thermiques.

Placées dans le contexte du concept global de la sécurité, les données de référence résultant de ces recherches ont permis d'amorcer l'établissement d'une approche scientifique de l'étude de la tenue des structures à l'incendie, permettant d'envisager le calcul et le dimensionnement en fonction des sollicitations thermiques, d'une manière analogue à celle pratiquée pour les autres types de sollicitations.

Cela revient à dire que l'étude des structures à l'incendie vient de faire son entrée dans le domaine des sciences de l'ingénieur. Et c'est ce qui a incité l'A.I.P.C. à l'inscrire à son programme.

A cela, il convient d'ajouter une remarque concernant en particulier la construction métallique, qui se trouve être la plus visée, soit par les dispositions réglementaires en vigueur, soit et surtout par l'application qui en est faite et par un jugement trop sommaire qui règne encore dans les esprits : celui qui associe automatiquement à ce mode de construction la réputation d'impliquer nécessairement un danger en cas d'incendie.

En fait, il s'agit de ne pas perdre de vue quelques vérités essentielles qui permettent de situer le problème de la tenue au feu des constructions en acier, au niveau qui est le sien :

- La sécurité structurale, malgré toute son importance, n'est qu'un élément parmi d'autres qui, dans leur ensemble, constituent et définissent la sécurité vis-à-vis de l'incendie. C'est donc dans cet ensemble qu'il faut la considérer.
- Il y a une hiérarchie de risques, suivant qu'ils concernent les personnes, la construction même, ou les biens matériels qui s'y trouvent et suivant l'importance des dommages possibles.
- Il n'y a pas de matériau de construction susceptible de supporter sans dommage l'action de n'importe quel incendie. Chaque matériau a donc ses problèmes spécifiques et ses limitations et nécessite -le cas échéant- des mesures préventives adéquates.
- L'action d'un incendie réel est très différente d'un cas d'espèce à l'autre. Elle dépend de nombreux paramètres et ne se confond jamais avec celle du programme thermique conventionnel normalisé (courbe ISO).

C'est dans cet esprit qu'il convient de traiter le problème qui constitue le thème de cette séance. De nombreux chercheurs et instituts de Recherches du monde entier travaillent sur ce sujet et diverses manifestations internationales lui ont déjà été consacrées.

Cette séance du colloque marque le premier pas de l'A.I.P.C. dans cette direction.

2. APPROCHE TRADITIONNELLE DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES EN ACIER

Le procédé classique d'évaluation de la résistance au feu d'un élément de construction, -procédé aujourd'hui périmé mais toujours pratiqué dans une large mesure- consistait à se référer à des essais effectués sur un élément isolé, isostatique, de dimensions assez faibles pour être compatibles avec celles des fours existants, muni ou non d'une certaine protection et soumis au programme thermique normalisé.

La durée de résistance d'une telle pièce essayée dans ces conditions était alors tout simplement assimilée à la résistance d'une structure réelle, de dimensions normales, face à un incendie réel.

Ce procédé simpliste et plutôt grossier plaçait presque toujours en sécurité, et souvent trop largement, car il ne tenait aucun compte de paramètres importants tels que les dimensions, la forme et la massivité des éléments de constructions, les incidences du niveau de sollicitation statique, les effets d'encastrement aux extrémités et le comportement d'ensemble de certains types de structures courantes, dû à des redistributions d'efforts et à la formation de rotules plastiques.

Toutefois, cela n'excluait pas pour autant le risque de se trouver en deça des limites de sécurité dans certains cas, par exemple de dilatations empêchées.

Mais le procédé était aussi inexact dans son principe même, puisqu'il ignorait la dissemblance entre le programme thermique normalisé et tout incendie réel et qu'il ne tenait aucun compte des paramètres qui en déterminent le déroulement, l'intensité et la durée :

- quantité, nature, forme et disposition des matières combustibles en présence (charge calorifique)
- dimensions, géométrie et ventilation des locaux, etc.

Sans vouloir nier les aspects positifs des recherches effectuées et des connaissances acquises dans le passé, qui représentent toujours une inestimable source d'information et qui ont permis de construire dans les conditions que l'on connaît, on doit reconnaître que les exigences modernes d'une rigueur de plus en plus grande dans la conception et le dimensionnement des ouvrages et la nécessité croissante de rechercher le compromis optimal entre les impératifs de la sécurité et de l'économie, ne permettent plus de suivre les errements du passé et imposent l'adoption de méthodes nouvelles, dont un très bref aperçu est donné dans la suite du présent rapport.

3. RESISTANCE DES STRUCTURES AUX EFFETS THERMIQUES D'UN INCENDIE

3.1. Considérations fondamentales

3.1.1. Processus de réchauffement

Le fondement de l'étude de la tenue au feu des éléments en acier réside dans la variation des caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de la température : abaissement progressif des limites d'élasticité et de rupture et du module d'élasticité. En effet, à partir d'une certaine température, on observe un phénomène de fluage à chaud dont le début et l'évolution dépendent des caractéristiques du métal, de la vitesse de réchauffement et du niveau de sollicitation statique. La distribution des températures dans la sec-

tion et sur la longueur de l'élément, ainsi qu'une éventuelle protection totale, partielle ou différentielle de celui-ci exercent aussi une influence importante. L'exposition partielle au feu de certains éléments (exemples : poutre en contact avec une dalle de béton ou élément frappé sur une seule face) a pour conséquence une amélioration notable de la tenue au feu.

3.1.2. Critères limitatifs des effets du réchauffement

Pour l'interprétation des résultats expérimentaux, il était nécessaire de définir un seuil limitatif d'admissibilité. Celui-ci a été proposé et adopté suivant différents concepts, tels qu'une certaine vitesse de déformation ou bien un certain rapport entre la flèche et la portée (ou longueur) de l'élément. En fonction du critère choisi et compte tenu des influences mentionnées en 3.1., on déduit une température critique en tant que référence fondamentale pour la tenue au feu.

Cette température peut être définie analytiquement en fonction aussi bien des facteurs thermiques de l'incendie probable considéré, que des paramètres relatifs à l'élément de construction auquel on se réfère.

Outre ces critères, censés représenter la ruine, on peut aussi envisager une limitation plus sévère en valeur absolue des flèches, compte tenu de la destination et des conditions de service de certains bâtiments.

3.2. Eléments et structures en acier

3.2.1. Eléments isostatiques

Il est maintenant démontré et expérimentalement prouvé que les dimensions et la forme de la section d'un élément ont une influence considérable sur sa tenue au feu. Les conséquences de cette influence de la massivité sont cependant moins importantes pour les éléments non protégés que pour ceux munis d'une protection.

Cette massivité est convenablement caractérisée par le rapport entre le contour et l'aire de la section transversale de la pièce. Dans le cas d'éléments partiellement protégés ou qui ne sont pas exposés au feu sur toutes les faces, seules les parties du contour correspondant aux faces exposées sont à considérer.

Un autre paramètre important, agissant sur la température critique, est le niveau de sollicitation statique.

Il est en effet prouvé théoriquement et expérimentalement que les effets des sollicitations statiques et thermiques se cumulent et que, par conséquent, en limitant la contrainte

statique de service ou -ce qui revient au même- en choisissant un profil surabondant on en relève la température critique.

Les études effectuées ont permis d'établir des abaques de dimensionnement pour les profils usuels et divers types de protection. On peut d'ailleurs aussi déterminer les sections et les protections nécessaires par un calcul en plasticité, en tenant compte des influences mentionnées.

3.2.2. Eléments et systèmes hyperstatiques

Les encastrements parfaits ou partiels, la continuité des éléments et, d'une manière générale, les réserves de résistance résultant de l'hyperstaticité des systèmes porteurs interviennent directement dans la tenue au feu, exprimée par une température critique en fonction du rapport entre le niveau de sollicitation en service et le niveau limite plastique.

Déjà la simple continuité des poutres sollicitées en flexion leur confère une résistance au feu notablement supérieure à celle des poutres isostatiques, en travées indépendantes, dans des conditions par ailleurs identiques. Il est donc justifié d'en tenir compte.

Mais la réserve de résistance, donc la tenue au feu, d'un système hyperstatique augmente avec le degré d'hyperstaticité. Cette effet est mis en évidence par les essais de portiques que l'on peut faire, dans un but indicatif, sur des modèles réduits et, dans des conditions plus proches de la réalité, donc donnant des résultats plus significatifs, sur des portiques en grandeur nature.

Les essais de ce type sont maintenant rendus possibles par la création de la station expérimentale préconisée par l'auteur et réalisée en France, en liaison avec une recherche internationale effectuée sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes (CCE) et de la Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM).

La voie est ainsi ouverte à l'étude théorique de la tenue au feu des systèmes porteurs, puisqu'il est maintenant possible d'en vérifier expérimentalement les résultats.

3.2.3. Poteaux et autres éléments comprimés

La résistance des éléments sollicités en compression peut être déterminée théoriquement en introduisant, dans le calcul normal au flambement, l'abaissement des caractéristiques mécaniques du métal en fonction de la température.

Les critères de ruine qui les concernent ne sont cependant pas identiques à ceux mentionnés pour les éléments sollicités en flexion, car la capacité de résistance des poteaux -comme de toutes autres pièces comprimées- est gouvernée par des conditions de stabilité propres à ce type d'éléments.

Il faut cependant tenir compte -le cas échéant- des circonstances particulières suivantes :

- excentricité supplémentaire due aux dilatations thermiques
- contrainte supplémentaire due à l'empêchement de dilatation
- allongements locaux dus à un réchauffement non uniforme.

3.3. Eléments mixtes acier-béton

Les systèmes mixtes constitués de poutres métalliques associées à une dalle de béton armé présentent un comportement nettement supérieur à celui des éléments métalliques seuls. Cette amélioration de la résistance aux actions thermiques du feu est due à plusieurs facteurs, dont notamment :

- le réchauffement différentiel de la section métallique, dont la partie supérieure se trouve en contact avec la dalle et protégée par celle-ci
- l'effet favorable des efforts résultant du réchauffement inégal de l'élément métallique et de la dalle et qui s'opposent à la flexion d'ensemble.

L'effet de protection partielle et le surplus de résistance au feu qui en résulte dépendent de l'importance de la zone protégée et peuvent être augmentés par une extension de cette zone, par exemple en noyant la semelle supérieure de la poutre métallique dans le béton.

Dans le cas des éléments continus sur plusieurs appuis, les différences de réchauffement en section transversale, depuis la poutre métallique et jusqu'à la face supérieure de la dalle, donnent lieu à des moments sur appuis qui viennent décharger les moments en travées, à condition de veiller à une disposition judicieuse des armatures et à leur ancrage correct dans la zone des moments négatifs.

Ces effets favorables ont pour conséquence un relèvement de la température critique. Cela devient particulièrement intéressant lorsqu'on arrive à franchir, sans autre protection, un seuil imposé de durée de résistance qui, autrement, ne serait atteint qu'en enrobant la poutre.

3.4. Effets des dilatations empêchées

L'empêchement de dilatation peut intervenir dans divers types d'éléments et systèmes constructifs, tels que par exemple les poutres continues, les traverses de portiques multiples ou les poteaux de bâtiments à étages, lorsqu'une travée ou un tronçon subit un réchauffement local dû à l'action thermique d'un incendie.

Les parties avoisinantes de la structure jouent alors un rôle d'appuis, le plus souvent élastiques, qui s'opposent à la dilatation. Il en résulte des contraintes et des déformations additionnelles, qui se superposent à celles déjà existantes en service normal.

Les extrémités des éléments qui subissent un tel empêchement de dilatation peuvent présenter -suivant le type de structure- des degrés divers d'encastrement, depuis l'articulation pure jusqu'à l'encastrement parfait, mais ces deux cas extrêmes sont rares. Donc l'encastrement partiel est le cas le plus fréquent.

Une attention particulière doit être apportée aux appuis des éléments susceptibles d'une dilatation empêchée. Leur résistance doit s'accorder avec celle de l'ensemble de la structure. De même, les assemblages doivent être conçus en fonction des efforts et des déformations qui peuvent leur être imposés.

4. DÉROULEMENT DES INCENDIES NATURELS

4.1. Remarques préliminaires

L'incendie, par sa nature même et par son caractère accidentel, est un phénomène complexe dans son essence et éminemment irrégulier dans son déroulement. Cela veut dire que l'évolution de chaque incendie réel constitue un cas d'espèce différent des autres et se prête mal à l'assimilation à un modèle prédéterminé. Il y a donc, en fait, autant d'incendies réels différents qu'il y a d'incendies réels.

Il est cependant possible d'identifier les facteurs qui déterminent l'évolution, l'intensité et la durée d'un incendie et d'étudier par voie expérimentale le rôle de chacun de ces facteurs. En associant les constatations expérimentales et leur interprétation dans une étude d'ensemble, il est également possible de faire une estimation globale de l'intensité et de la durée probables d'un incendie éventuel pouvant se produire dans un local ou un bâtiment donné, donc des sollicitations thermiques qui s'exerceraient alors sur la structure.

Une telle estimation présente des analogies avec celle d'autres actions aléatoires auxquelles peut se trouver confrontée une structure (vent, secousses sismiques, etc.). Elle s'en distingue toutefois dans son principe, en raison du fait qu'il est possible de combattre cette action et que, par conséquent, il y a lieu de prendre en considération non seulement les paramètres qui résultent des caractéristiques du bâtiment et de son utilisation, mais aussi les possibilités d'intervention active (volontaire ou automatique) contre l'incendie et ses conséquences. Il est donc ainsi possible de tempérer les exigences qui doivent raisonnablement être imposées à la structure du bâtiment pour sa résistance à l'incendie.

4.2. Effets des principaux paramètres

4.2.1. Charge calorifique

Il y a une vérité première, bien évidente mais parfois oubliée : un incendie est toujours limité, en dernière instance, par la quantité de matières combustibles en présence. Celles-ci constituent la charge calorifique, qui est l'élément fondamental pour la détermination d'un incendie. De nombreux paramètres viennent cependant corriger, dans un sens ou un autre, les effets de cette charge.

L'évaluation de la charge calorifique et de tous les paramètres qui en affectent l'action en cas d'incendie joue donc,

dans l'étude des risques que peut encourir une structure, un rôle tout à fait analogue à celui de la détermination ou estimation des autres types de charges.

Malgré l'évidence de ce fait, le concept de la charge calorifique a été pratiquement ignoré pendant longtemps par les règlements de sécurité. Ce concept est apparu depuis peu de temps dans certains règlements modernes, dans lesquels l'ensemble des matières combustibles se trouvant dans un local est traduit par un nombre de calories (ou par une quantité équivalente de bois) rapporté à l'unité de surface de plancher.

Il est cependant reconnu maintenant que le nombre de calories disponibles n'est pas seul déterminant de l'action thermique en cas d'incendie. Par exemple, la vitesse de combustion, donc le taux de libération de calories, influe puissamment sur le niveau des températures développées. C'est ainsi que pour des charges calorifiques de nature différente mais correspondant à une même quantité de bois équivalent, on peut enregistrer des effets thermiques très différents.

De plus, la vitesse de combustion et de propagation représente un facteur de première importance vis-à-vis des opérations d'évacuation ou de mise à l'abri des occupants ainsi que pour les interventions de sauvetage et d'extinction.

Cette diversité de paramètres à considérer et la nature inhabituelle pour l'ingénieur de certains d'entre eux, explique le retard avec lequel ce secteur d'étude s'est présenté à notre discipline.

En effet, bien qu'il y ait eu, par exemple aux U.S.A., de très sérieuses études datant de près d'un demi siècle sur les charges calorifiques, c'est récemment seulement que des relevés systématiques ont été effectués pour déterminer statistiquement ces charges suivant les types d'utilisation locaux.

Les études modernes dans ce domaine sont caractérisées par une analyse plus fine, donc plus réaliste, en recensant non seulement les quantités brutes de matières combustibles, mais aussi leur mode de distribution dans les locaux examinés et la forme sous laquelle elles s'y trouvent.

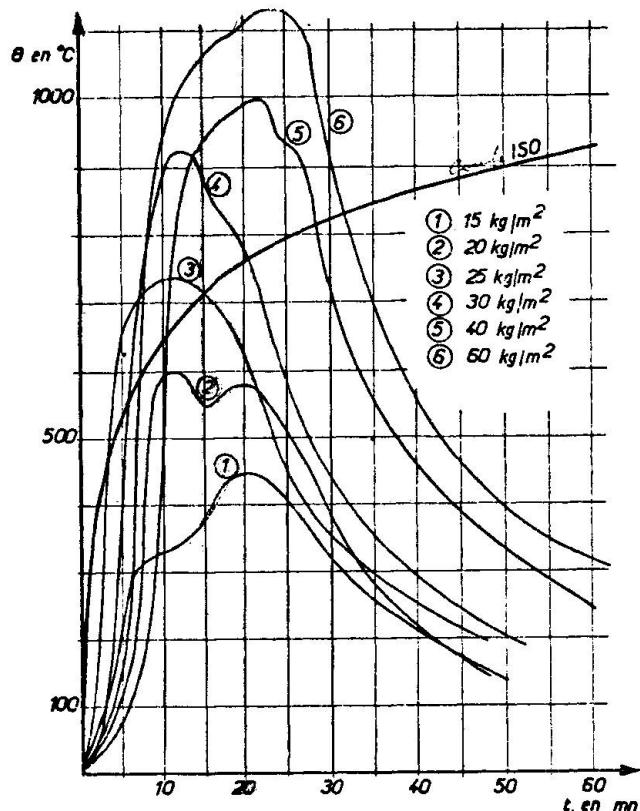
Ainsi, dans les relevés américains, on a distingué pour le bois trois classes d'épaisseurs. Pour les enquêtes statistiques récemment effectuées par la CECM on a essayé de déterminer, pour le papier, des coefficients réducteurs en fonction de la disposition de cette matière.

Des essais ont été faits dans divers laboratoires pour déterminer l'évolution des températures en fonction de la charge calorifique. Dans un but de standardisation, il est de pratique courante de matérialiser cette charge par des tas de lattes de bois dont on contrôle les caractéristiques et le taux d'humidité.

Il a été observé dans ces essais que, pour un taux de ventilation donné, la montée de température est fortement influencée par la valeur de la charge calorifique dans la zone des fai-

bles charges, mais que pour des charges plus fortes cette influence est sans doute limitée par l'apport d'oxygène.

Il est évident que la sévérité d'un incendie est, avant tout, une fonction directe de la charge calorifique, sans être toutefois proportionnelle à celle-ci. Les essais systématiques effectués avec différents niveaux de charge calorifique, mais tous autres paramètres constants, montrent l'effet de ce facteur primordial.



Températures moyennes enregistrées dans un four d'essais pour différentes charges calorifiques et ventilation constante (40 %), comparées au programme thermique normalisé.

4.2.2. Géométrie et ventilation des locaux

Des essais systématiques effectués dans divers pays ont permis de dégager, d'une part, les effets des dimensions et de la forme des locaux et, d'autre part, ceux des dimensions et de la position des ouvertures qui en déterminent la ventilation.

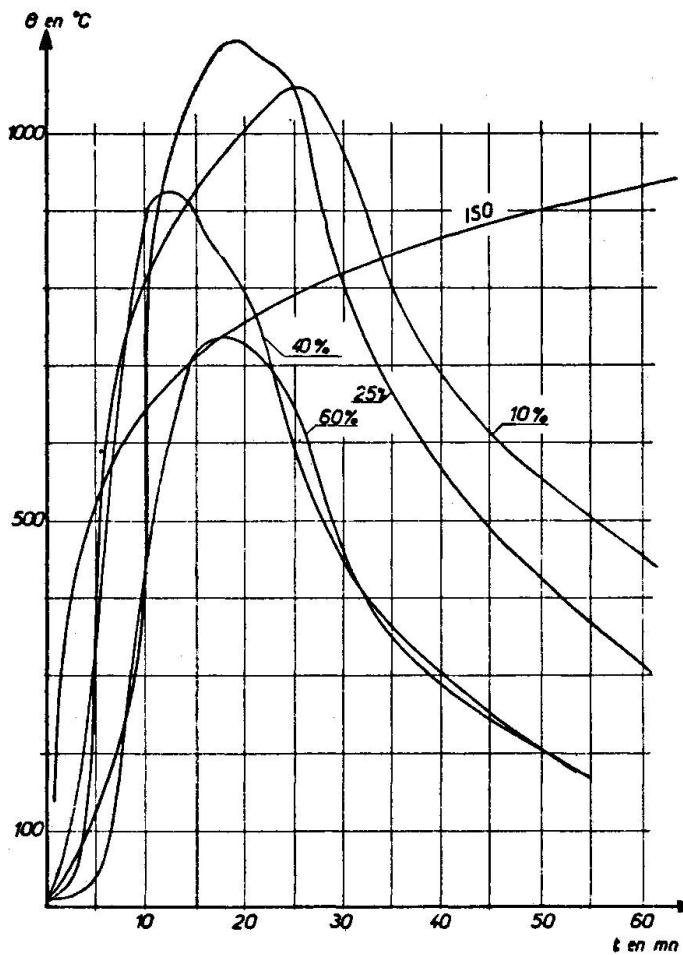
Toute combustion ne pouvant se produire et se développer qu'avec un certain apport d'oxygène, elle serait limitée, en local fermé, par la quantité disponible de ce gaz. Les ouvertures qui permettent le renouvellement de l'air dans l'enceinte en feu jouent donc un rôle important.

Dans un local à faible ventilation, la combustion est relativement lente, la durée de l'incendie est donc allongée. Cet

effet est généralement défavorable, car la structure est soumise pendant plus longtemps à des températures qui, malgré tout, restent assez élevées, même si la valeur maximale atteinte est quelque peu abaissée.

Par contre une forte ventilation permet un apport massif d'air frais, qui provoque une combustion rapide, mais cet apport ainsi que l'évacuation facilitée des gaz de combustion agissent plutôt dans le sens d'un abaissement des températures.

Entre les deux, il y a un taux "optimal" de ventilation, qui conduit aux températures maximales les plus élevées.



Températures moyennes enregistrées dans un four d'essais pour une même charge calorifique (30 kg/m^2) et pour différents taux de ventilation, comparées au programme thermique normalisé.

4.3. Corrélation avec l'incendie conventionnel

Le programme thermique conventionnel représenté par la courbe normalisée (ISO) correspond à un processus purement expérimental, d'un type qui ne peut jamais se produire dans un incendie réel.

En effet, tout incendie qui se développe à partir d'une quantité quelconque de matières combustibles se trouvant dans une enceinte,

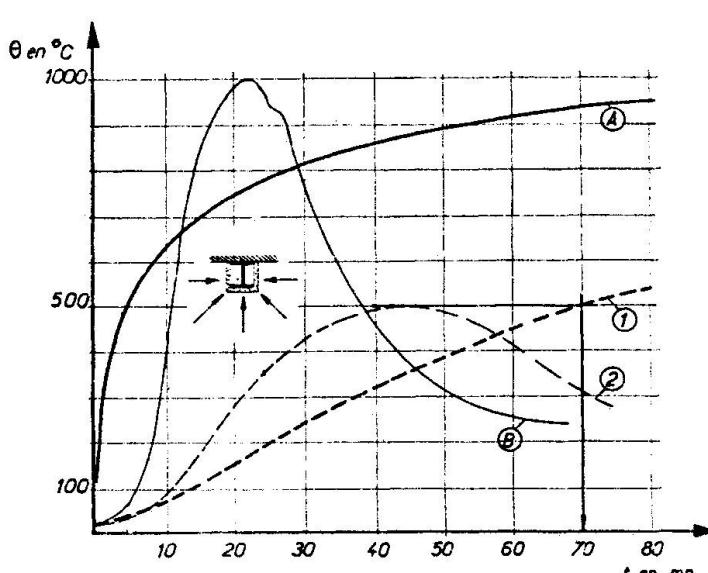
comporte tout d'abord une phase d'ignition, suivie d'une élévation plus ou moins rapide des températures jusqu'à un niveau maximal, mais les températures descendent ensuite progressivement jusqu'à complète extinction, pour revenir finalement à l'ambiente.

"L'incendie" normalisé auquel on doit exposer les matériaux ou éléments dans les essais de classement est caractérisé par la courbe ISO, qui ne comporte pas de branche descendante. Par conséquent, ce programme thermique ne peut être réalisé qu'artificiellement, en laboratoire, par une alimentation permanente en combustible. Il ne reflète donc pas un déroulement possible d'un incendie naturel. Son mérite réside cependant dans son unicité.

En effet la courbe ISO, universellement reconnue, a servi de base à la plupart des essais effectués dans le monde. C'est donc par rapport à cette courbe que les matériaux et les éléments de construction ainsi que les moyens de protection ont été classés. Il est bien évident qu'il est préférable de se référer à un incendie unique, même s'il est irréel, plutôt qu'à une infinité d'incendies différents.

Il n'en reste pas moins que les résultats obtenus dans les essais effectués avec le programme thermique normalisé peuvent être assez éloignés de la réalité, aussi bien d'ailleurs dans un sens favorable que dans un sens défavorable. Il est donc nécessaire d'établir une corrélation qui permette la transposition des résultats. Des méthodes ont été préconisées à cet effet, mais il faut reconnaître qu'elles ne sont pas encore entièrement satisfaisantes pour l'application pratique.

Une méthode qui a retenu notre attention consiste à relever les températures maximales atteintes dans des éléments témoins au cours d'un incendie naturel effectué avec une charge calorifique et un taux de ventilation donnés et à déterminer par ailleurs le temps nécessaire pour atteindre les mêmes températures avec le programme thermique normalisé.



Température dans la chambre :

A Courbe ISO

B Incendie naturel

Température dans le profilé :

1 Incendie normalisé

2 Incendie naturel

Temps équivalent : 43 mn

Détermination du temps équivalent résultant de la confrontation de l'évolution des températures résultant d'un incendie naturel avec celles provenant du programme thermique normalisé, pour un profilé donné muni d'une protection également donnée.

L'inconvénient de cette méthode, intéressante en soi, vient du fait que cette corrélation est influencée par des facteurs autres que les programmes thermiques comparés et qui tiennent au profil de la pièce de référence, à sa protection et même aux caractéristiques du four, ce qui rend son utilisation complexe.

La corrélation peut aussi être faite par une méthode numérique applicable à chaque cas particulier, compte tenu de tous les paramètres.

5. MESURES PREVENTIVES ET DE PROTECTION

Ce n'est pas l'objet du présent rapport de commenter l'ensemble des aspects de la sécurité relative à l'incendie, son thème étant limité à ce qui concerne en particulier la résistance des structures et de leurs éléments constitutifs. Nous nous bornerons donc à rappeler que la résistance structurale exigée doit résulter du rôle assigné au système porteur dans le contexte des conditions de sécurité envisagées.

Le degré de résistance ainsi requis pour la structure -établi suivant les catégories de bâtiments et la destination des locaux et éventuellement allégé ou renforcé en fonction de divers facteurs en présence- est toujours spécifié sous la forme d'une durée de résistance à l'action du programme thermique normalisé, dans une enceinte fermée (four).

Dans la mesure où la structure nue n'assure pas cette résistance, elle doit être munie d'une protection garantissant la tenue au feu demandée.

5.1. Protection des éléments métalliques ou mixtes

Pour les éléments métalliques, il s'agit de maintenir leur température, pendant le temps prescrit, en-dessous de la température critique correspondant à leurs caractéristiques.

Pour les éléments mixtes comportant une partie en béton, il faut, en outre, s'assurer contre l'éclatement de celui-ci, en fonction de l'épaisseur de recouvrement des armatures.

Pour certains systèmes particuliers, tels que par exemple les planchers avec dalle de béton coulée sur tôle nervurée collaborante, il faut tenir compte du comportement spécifique de ces systèmes sous l'action du feu.

Les matériaux de protection se présentent en général sous forme de produits commercialisés, dont les performances doivent être officiellement reconnues, ou bien prouvées expérimentalement. La gamme de ces produits est très large, depuis les matériaux classiques tels que le plâtre et jusqu'aux formules nouvelles qui apparaissent sans cesse sur le marché. Ils se présentent essentiellement sous l'une des formes suivantes :

- plaques pouvant constituer des caissons d'enrobage
- matières à enduire ou à projeter sur les surfaces à protéger
- peintures intumescentes.

Le choix du type et du matériau de protection résulte notamment de considérations technologiques et économiques, tandis que les épaisseurs nécessaires sont déterminées soit expérimentalement, soit - comme indiqué plus haut - par voie analytique.

En fait, même s'il est théoriquement possible d'envisager l'étude séparée du transfert de chaleur à travers la couche de protection et des effets qui en résultent pour l'élément protégé, le tout constitue un problème unique à étudier dans son ensemble, et cela qu'il s'agisse d'une approche expérimentale ou analytique.

5.2. Performances requises des moyens de protection

Bien évidemment, la principale performance requise de tout moyen de protection relève de sa fonction essentielle. Elle concerne donc sa capacité d'isolation thermique.

Mais cette performance seule n'est pas suffisante pour assurer une protection efficace. Le matériau doit en outre posséder des qualités physiques, chimiques et mécaniques prémunissant contre divers phénomènes secondaires qui risqueraient de compromettre l'effet de protection.

Ainsi, le matériau utilisé doit, non seulement être incombustible et exempt de tout risque de dégagement de gaz, mais aussi ne pas être susceptible de fissurations, éclatements ou déformations excessives, pouvant livrer passage aux flammes et modifier notamment le flux thermique.

Il est également indispensable d'éviter le risque de décollement, tant sous l'effet de la chaleur que tout simplement par vieillissement.

La protection doit aussi présenter une résistance mécanique suffisante pour ne pas trop risquer d'être avariée accidentellement.

Toutes ces qualités additionnelles ne peuvent être vérifiées qu'expérimentalement.

Pour des raisons pratiques et économiques, il peut être avantageux d'attribuer plusieurs fonctions à une même couche protectrice. Ainsi, on peut envisager des enrobages qui constituent en même temps un habillage avec la finition requise pour l'usage et l'esthétique, ou bien qui remplissent aussi un rôle d'insonorisation, ou encore qui participent à la résistance statique du système porteur.

Lorsque la protection est constituée de plaques ou d'éléments juxtaposés, il ne suffit pas de garantir la résistance de ceux-ci ; il faut aussi assurer l'étanchéité des joints et la résistance des moyens de fixation afin de ne pas risquer de laisser passer les produits de combustion.

Suivant les conditions particulières de chaque cas d'espèce, on peut être parfois conduit à renoncer à certaines qualités habituellement exigées des matériaux de protection, compte tenu des avantages compensateurs qu'il peut présenter par ailleurs.

Un cas très exceptionnel est celui de la protection de poteaux métalliques par un habillage en bois, donc combustible. En cas d'incendie, cet habillage exerce un effet isolant et retardateur pendant un certain temps qui peut être jugé suffisant. Il remplit donc une double fonction

puisqu'en dehors de son rôle décoratif éventuellement souhaité par l'architecte, il protège l'élément métallique pour un temps limité.

5.3. Structures non protégées

Contrairement à une certaine réputation des structures non protégées, celles-ci présentent une résistance non négligeable à l'incendie, notamment en raison des facteurs que l'on sait prendre en compte. Cette résistance peut suffire, donc rendre inutile toute protection, lorsqu'elle atteint la valeur exigée pour le bâtiment concerné, en fonction de l'usage et des caractéristiques de celui-ci.

Il est évident que, du point de vue économique, le seuil de passage d'une structure non protégée à une structure devant être munie d'une protection -si minime soit-elle- est beaucoup plus important que tout dosage des épaisseurs d'enrobage. C'est pourquoi il convient d'accorder une attention particulière à la délimitation du domaine d'admissibilité des structures non protégées et à l'étude de la résistance de ces structures.

Suivant les caractéristiques des éléments du système porteur, cette résistance peut se situer dans la gamme des 10, 15, 20 ou 30 minutes pour des structures courantes et même au-dessus dans certains cas extrêmes.

Ces durées de résistances peuvent être suffisantes dans de nombreux cas définis par un ensemble de facteurs tels que :

- faibles charges calorifiques
- possibilité d'évacuation sûre et rapide des occupants
- utilisation des locaux par des groupes d'usagers organisés, garantissant une prompte évacuation (écoles) !
- rapidité et efficacité des moyens d'extinction (par exemple : proximité d'une poste de pompiers)
- présence de moyens automatiques d'extinction, etc.

Les considérations techniques et économiques doivent être observées concurremment pour prendre certaines options dans le sens le plus avantageux.

On peut envisager par exemple, l'emploi d'un profil surabondant ou d'un acier à résistance plus élevée, si l'on peut ainsi atteindre le niveau de résistance exigé sans avoir à recourir à une protection.

Dans la mesure où la sécurité des personnes est assurée et où l'endommagement ou la ruine éventuelle du bâtiment n'entraîne pas de conséquences indirectes intolérables, on peut mettre le sort du bâtiment à la suite d'un incendie qui serait poursuivi jusqu'à consommation totale de la charge calorifique, en balance avec le coût de la protection nécessaire pour prémunir contre un effondrement. Il est donc loisible, dans un tel cas, de prendre le risque qui résulterait d'une défaillance éventuelle des opérations d'extinction, si cela apparaît comme économiquement justifiable.

5.4. Structures irriguées

L'idée de l'emploi de profils creux irrigués pour réaliser des structures résistant à l'incendie a été lancée et développée à peu près simultanément en France, en Allemagne et aux Etats-Unis d'Amérique et des

brevets ont été enregistrés pour garantir des systèmes fondés sur ce principe.

Des réalisations pratiques fort intéressantes quoique limitées en nombre, sont apparues dans ces mêmes pays au cours des dernières années. Parmi celles-ci, la plus spectaculaire est sans nul doute l'immeuble de soixante quatre étages, avec des poteaux extérieurs irrigués, de la US Steel Corporation, Pittsburgh.

Parmi les divers systèmes qui avaient été préconisés, celui choisi pour ces réalisations comporte des poteaux en profil creux remplis d'eau, communiquant avec un réservoir placé en tête et avec une colonne descendante reliée à la base des poteaux.

L'ensemble fonctionne comme un système de refroidissement, actionné par la différence de densité entre le liquide chaud et le liquide froid. Il s'agit donc d'une circulation qui s'amorce automatiquement dès que le liquide subit un réchauffement dans une zone quelconque.

Sur le plan de la thermophysique, le processus est très simple et facile à reproduire mathématiquement par un calcul exact.

Pratiquement, le transfert de chaleur est largement favorisé par la bonne conductibilité thermique de l'acier. Il en résulte un gradient très plat dans l'épaisseur des parois métalliques et un faible écart de température entre la face intérieure de celle-ci et le liquide.

Toutes ces températures, y compris celles de l'acier, se situent donc forcément à un niveau modéré, puisque la température du liquide -aussi longtemps qu'il en reste- ne peut pas dépasser celle de son ébullition. Le système est donc très sûr, quant à son efficacité.

Le problème qui peut se poser vis-à-vis des températures hivernales, notamment dans le cas des poteaux extérieurs, est facilement réalisé par l'addition d'un produit antigel. Les limitations de l'adoption d'un tel système résident dans l'obligation d'employer des profils creux à l'exclusion de tout autre type de sections, dans la nécessité d'installer un système de circulation et de veiller à son étanchéité, à son bon fonctionnement et au maintien de son remplissage, mais aussi et surtout dans le coût de cette installation, comparé à celui d'une protection classique.

C'est donc, une fois de plus, l'incidence économique qui commande en dernier ressort.

5.5. Incidences sur la conception des structures

Les études récentes, tant expérimentales que théoriques, ont fait ressortir combien il était peu réaliste de juger de la tenue au feu des structures en se référant à celles d'éléments isolés.

Même si la ruine d'un élément, dans certains cas, peut entraîner celle de toute la structure ou d'une partie importante de celle-ci, un élément n'est pas -en règle générale- représentatif du comportement de la structure.

De plus, la tenue de l'élément est, le plus souvent, directement influencée par la situation de celui-ci dans la structure, donc par le type de système porteur et par la nature des attaches.

Enfin, la tenue de la structure est encore plus importante en soi que celle d'un seul élément. Il est donc essentiel de la concevoir et de la réaliser en conséquence, quoiqu'il soit difficile d'énoncer des règles générales pour cela.

Nous avons déjà mentionné la supériorité des éléments et systèmes hyperstatiques. Il y a donc intérêt à leur accorder une préférence.

Les éléments qui assurent la stabilité d'ensemble de certains systèmes (contreventements, tirants, etc.) doivent faire l'objet d'une attention particulière en ce qui concerne leur protection.

La stabilité des systèmes porteurs d'ouvrages importants, tels que les bâtiments de grande hauteur, ainsi qu'en particulier celle des parties de structures qui abritent des installations essentielles pour le fonctionnement et la sécurité de ces ouvrages doit être assurée en tout état de cause.

Les appuis et les assemblages des éléments susceptibles de subir des déformations ou sollicitations importantes sous l'effet de l'incendie doivent être proportionnés de façon à pouvoir les supporter sans provoquer d'effondrement.

Les conséquences possibles des déformations dues aux actions thermiques dans les systèmes structuraux doivent être examinées en tenant compte des points fixes et du déplacement des extrémités des travées libres. En particulier, l'assise des appuis libres doit être suffisamment large pour éviter la chute de tels éléments (poutres ou fermes) par suite de leur déformation éventuelle.

En ce qui concerne le détail des éléments et leur position dans l'ouvrage, il est avantageux de profiter de toute protection partielle possible, en les plaçant de façon à se trouver en contact avec, par exemple, une dalle ou une paroi qui les abrite. Même partielle et incomplète, une protection est toujours mieux que rien.

En somme, il est conseillé d'analyser -même grossièrement- la tenue du système par rapport aux situations pouvant entraîner un effondrement et de prendre des mesures pour éviter qu'un tel évènement ne se produise.

B I B L I O G R A P H I E

SFINTESCO D.
Feu et acier
Publimétal, Paris 1964

J. F. R. O.
Behaviour of structural steel in fire
Symposium N°2, Boreham Wood, 1967

SFINTESCO D.
La station expérimentale de résistance au feu à Maizières-les-Metz
Construction Métallique N°4/1968

SFINTESCO D.

La construction métallique et l'incendie
Acier-Stahl-Steel, N° 1/1970

ARNAULT P., EHM H., SFINTESCO D.

Recherches incendie
C E C M III-71-1

SFINTESCO D.

Theme Report

ARNAULT P., LAW M.

Fire loads, natural fires and standard fire

EHM H.

Behaviour of the structure under fire

C.T.I.C.M.

Recherche sur la tenue au feu des constructions métalliques -

Rapport final

C E C M 3 - 74/8, Mai 1974

C E C M - Commission 3

Sécurité à l'incendie dans la construction métallique

C E C M - III-74-2

*Joint Committee on Tall Buildings
TC 8 : "Fire and Blast".
International Conference Aug. 1972
Proceedings*

RESUME

La tenue au feu des constructions métalliques, pendant longtemps traitée empiriquement, fait maintenant l'objet d'études théoriques et expérimentales plus scientifiques et plus réalistes, qui ont déjà fourni des renseignements précis sur les sollicitations thermiques dues aux incendies réels et sur la résistance des structures métalliques ou mixtes, permettant ainsi d'envisager des calculs de dimensionnement selon les critères habituels des sciences de l'ingénieur. La sécurité et l'économie s'en trouvent améliorées.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Brandverhalten der Stahlkonstruktionen, das lange empirisch behandelt wurde, wird nun theoretisch und versuchsmässig in einem wissenschaftlicheren und realistischeren Sinne untersucht. Die dadurch erhaltene, genauere Einsicht in die von Naturbränden verursachten thermischen Beanspruchungen und das Widerstandsverhalten der Stahl- und Verbundkonstruktionen erlaubt bereits Bemessungsberechnungen gemäss den üblichen Kriterien der Ingenieurwissenschaften und führt zu einer Verbesserung der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit.

SUMMARY

The behaviour of steel structures in fire was rather empirically treated but recent theoretical and experimental research along more scientific and realistic lines have led to precise information on the thermal actions of natural fires and on the resistance of steel and composite structures, thus allowing to adopt design methods in accordance with the usual criteria of engineering science. This results in improved safety and economy.