

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 10 (1976)

Artikel: Calcul et conception des structures métalliques ou mixtes en vue de
leur résistance à l'incendie

Autor: Sfintesco, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-10388>

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: 23.02.2026

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

IIIb

Calcul et conception des structures métalliques ou mixtes en vue de leur résistance à l'incendie

Bemessung von Stahl- und Verbundbauwerken gegen Brandeinwirkungen

Design of Steel and Composite Structures for Fire Resistance

D. SFINTESCO

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

Conseiller Scientifique, CTICM

Secrétaire Général Technique, CECM

Puteaux, France

Comportement au feu des structures en acier ou mixtes

SOMMAIRE

1. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES
2. ASPECTS FONDAMENTAUX DU COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES METALLIQUES
 - 2.1. Effets du réchauffement sur les propriétés des aciers de construction
 - 2.2. Critères de référence pour la tenue d'un élément de construction
 - 2.3. Influence de la massivité des sections
 - 2.4. Effets des dilatations thermiques
 - 2.5. Effets de l'empêchement du déplacement des extrémités d'une poutre
 - 2.6. Effets du gradient de température
 - 2.7. Effet de l'hyperstaticité
 - 2.8. Effets du taux d'utilisation de la capacité portante
3. TENUE AU FEU DES ELEMENTS PORTEURS ET DES STRUCTURES EN ACIER
 - 3.1. Eléments sollicités en traction
 - 3.2. Eléments sollicités en flexion
 - 3.3. Eléments sollicités en compression
 - 3.4. Remarques générales relatives aux structures
 - 3.5. Structures non protégées
4. PROTECTION DES ELEMENTS PORTEURS ET DES STRUCTURES EN ACIER
 - 4.1. Protection par couche isolante
 - 4.2. Protection par transfert de chaleur
5. STRUCTURES MIXTES ACIER-BETON
6. SECURITE DES STRUCTURES EN CAS D'INCENDIE
7. BIBLIOGRAPHIE

1. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

Toute structure de bâtiment comporte certains risques de dommages en cas d'incendie. L'importance de ces risques dépend de nombreux facteurs ayant trait aussi bien aux caractères du bâtiment qu'à son utilisation et à son contenu, ainsi qu'aux éventuelles mesures de prévention et de protection.

Les dangers encourus peuvent être classés en trois grandes catégories, selon qu'ils concernent les personnes, les biens matériels ou le bâtiment même. Le présent rapport ne se réfère qu'à cette dernière catégorie de risques et traite uniquement des bâtiments à structure portante en acier ou mixte (acier-béton).

L'étude du comportement des structures de bâtiments sous l'effet des actions thermiques d'un incendie a progressé considérablement au cours de la dernière décennie, les résultats les plus significatifs étant enregistrés dans le domaine des structures en acier.

Une meilleure connaissance des phénomènes, en fonction des conditions et circonstances précises dans lesquelles ils se produisent et se développent, permet de serrer la réalité de plus près et de mieux doser les mesures destinées à limiter les risques et leurs conséquences. Or, la résistance des structures n'est qu'un aspect partiel dans l'ensemble des problèmes de la sécurité vis-à-vis de l'incendie. Il convient donc, bien sûr, d'assurer cette résistance dans toute la mesure nécessaire, mais sans exagération inutile et anti-économique, qui serait éventuellement réalisée aux dépens des mesures de sécurité prioritaires, concernant par exemple directement les personnes.

La conscience de la nécessité d'une connaissance aussi précise que possible du comportement au feu des structures a largement contribué à susciter et à encourager les recherches dans ce domaine, dont les résultats sont sommairement reflétés dans le présent rapport.

2. ASPECTS FONDAMENTAUX DU COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES METALLIQUES

2.1. Effets du réchauffement sur les propriétés des aciers de construction

Le processus de réchauffement d'un corps, sous l'effet d'un flux thermique donné, dépend notamment de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique du matériau. Ces propriétés caractéristiques sont assez bien connues pour les aciers de construction, en fonction de leur composition chimique. En particulier en ce qui concerne la conductivité thermique -propriété qui détermine le gradient de température dans la phase de réchauffement- les études expérimentales ont montré qu'elle varie en fonction du niveau de température et, plus précisément, qu'elle subit une légère diminution au fur et à mesure que la température monte.

La complexité des données fondamentales et les dispersions inhérentes aux études expérimentales dont elles résultent, conduisent cependant à l'adoption de valeurs considérées moyennes dans le domaine d'application pratique envisagé. Le degré de précision de ces valeurs semble acceptable en ce qui nous concerne.

L'élévation de température due aux actions thermiques d'un incendie exerce une influence directe sur les principales caractéristiques mécaniques de l'acier, qui déterminent la tenue des éléments de construction : limite d'élasticité σ_y , résistance à la rupture σ_R et module de déformation E .

La variation de ces caractéristiques en fonction de la température a été étudiée expérimentalement par divers chercheurs. On connaît ainsi avec assez de précision l'abaissement progressif de la limite d'élasticité et du module de déformation E , dû à l'élévation de température. On a également constaté, pour la résistance à la rupture en traction, un léger accroissement à partir de l'ambiante, avec un maximum vers 200-250° C, suivi d'un abaissement progressif de résistance au-delà de cette température. Enfin, il est bien connu que les aciers de construction présentent certaines caractéristiques de fluage pour des températures supérieures à 400-450° C (figure 1).

Les diagrammes de traction obtenus expérimentalement sur des aciers courants de construction sous diverses températures montrent, par exemple, l'abaissement progressif et finalement la disparition de la limite d'élasticité avec l'élévation de la température. Implicitement, ils font ressortir la variation du module de déformation E , ainsi que le fluage prématuré aux températures élevées (figure 2).

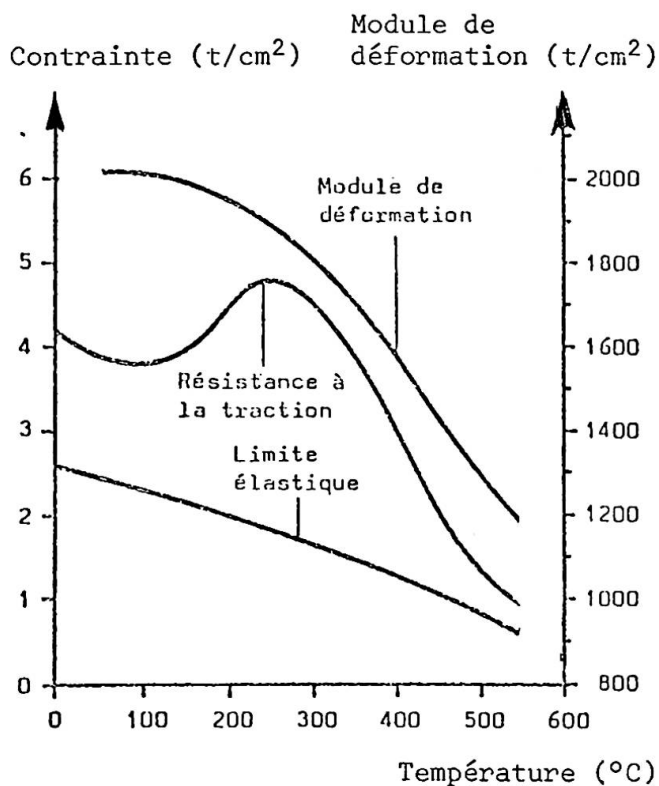
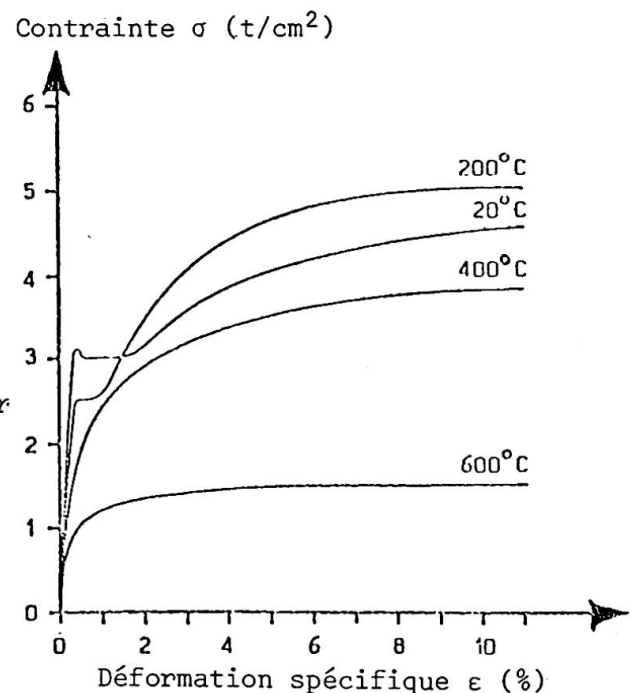


Figure 1

Caractéristiques de l'acier Ac 24/37 à différentes températures.

Figure 2

Diagramme contrainte-déformation de l'acier doux ASTM A.36 à différentes températures



Les résultats de ces recherches accusent une certaine dispersion due sans doute aux conditions d'essai respectives, mais les conclusions qui s'en dégagent sont suffisamment concordantes pour être acceptées comme bases des études de la tenue au feu des structures métalliques. Or, la connaissance du comportement de l'acier sous l'effet des températures élevées est une condition préalable pour le dimensionnement des éléments de construction exposés à de telles températures.

2.2. Critères de référence pour la tenue d'un élément de construction

De même que pour l'étude de résistance et de stabilité des structures et de leurs éléments constitutifs sous l'effet des charges statiques ou dynamiques, l'étude de la tenue au feu doit se rapporter à une certaine limite conventionnellement ou réglementairement adoptée comme critère de référence.

Sur un plan général, une telle limite correspond à un seuil accepté comme représentatif de la cessation d'une fonction essentielle de l'élément ou de la structure. Pour un élément porteur, cette limite peut traduire soit la rupture, soit l'affaissement ou une déformation excessive, annulant ou compromettant sa capacité portante : il s'agit alors d'un critère de ruine. On peut cependant aussi envisager la référence à d'autres critères, liés à des aspects fonctionnels de "serviceabilité".

Pour ce qui est de la tenue au feu, le critère de référence peut être défini de différentes manières. En effet, il peut se traduire soit par une limite de déformation, soit par l'affaissement de l'élément, soit enfin par une température critique.

Ainsi, par exemple, les règlements belge et français prescrivent, pour les éléments sujets à flexion, un critère de ruine très simple représenté par une limite de flèche à 1/30 de la portée.

Ce critère présente l'avantage de la simplicité, mais il se prête mal à la définition d'une température critique, qui dépend de nombreux paramètres qui n'apparaissent pas dans cette approche trop sommaire et globale.

Un autre critère, largement appliqué dans la pratique expérimentale, est défini par rapport à une "flèche spécifique", ou vitesse de déformation, en application de la formule préconisée par Ryan et Robertson :

$$\frac{\Delta_f}{\Delta_t} = \frac{l^2}{9000 h} \quad \text{cm/min}$$

où Δ_f , l et h sont respectivement l'accroissement de la flèche, la portée de l'élément et la hauteur de la section (en cm)

et Δ_t l'intervalle de temps considéré (en min).

Un tel critère fondé uniquement sur la déformation peut servir pour définir conventionnellement le point de ruine et se traduire par une température critique lorsqu'il s'agit d'un élément isostatique dont les caractéristiques géométriques sont bien définies par ailleurs.

Il est cependant possible de définir la température critique indépendamment du système statique, comme étant celle pour laquelle la vitesse de déformation devient infinie :

$$\frac{\Delta_f}{\Delta_t} = \infty$$

Ce critère est facile à établir. De plus, il permet la comparaison directe entre les essais sur éléments de construction et les essais de fluage sur éprouvettes de traction. Il présente donc un certain intérêt pour la recherche.

L'étude plus en plus poussée du comportement des structures et de l'incidence d'ensemble des divers paramètres, a conduit au concept plus élaboré de la température critique en tant que critère de référence dépendant de toutes les influences entrant en ligne de compte.

Ainsi, il est maintenant reconnu que la température critique dépend largement de la distribution des températures dans l'élément considéré, aussi bien en section que sur la longueur. Selon que l'élément est également frappé par l'action thermique sur toutes ses faces ou qu'il se trouve partiellement protégé, par exemple au contact d'une dalle (collaborante ou non), on peut enregistrer une distribution différente de la température critique dans la section : elle est sensiblement uniforme dans le premier cas, mais peut présenter un gradient non négligeable dans le second.

De même, des différences de réchauffement sont souvent constatées entre les zones centrales des travées et celles proches des appuis. Elles ont une influence notable sur la température critique.

L'influence des distributions non uniformes des températures a fait l'objet d'études expérimentales et théoriques concordantes, qui permettent déjà d'en tenir compte dans le dimensionnement des éléments. Ces différences de réchauffement sont d'autant plus marquées que l'élévation de température est plus rapide. Donc, influence de la vitesse de réchauffement.

Un autre aspect majeur de la détermination de la température critique résulte du fait que, dans les structures réelles de bâtiments, les éléments frappés par l'action thermique d'un incendie ont toujours à supporter les charges statiques qui leur sont normalement imposées. Il y a donc simultanéité d'action des charges statiques et des actions thermiques.

Les charges statiques dont il s'agit dans ce cas ne sont pas les charges de calcul, mais celles qui correspondent à l'utilisation probable du bâtiment à un moment quelconque. Elles correspondent donc, sauf cas exceptionnels, à un niveau de contrainte inférieur à celui résultant de l'utilisation maximale admissible de la résistance à l'ambiante.

Il est donc important de reconnaître que la température critique d'un élément de construction varie avec le degré d'utilisation de sa capacité portante. Ce degré s'exprime par le rapport M/M_u ou F/F_u entre le moment ou l'effort supposé réel et le moment ou l'effort maximum correspondant à la capacité de résistance de l'élément à l'ambiante (20° C).

Enfin, il y a lieu de remarquer la similitude entre le comportement plastique des structures sous l'effet des charges statiques et leur comportement en présence des actions thermiques. Logiquement cette remarque vaut aussi pour l'intervention combinée de ces deux types d'actions.

En particulier, la ruine du système porteur se produit, dans un cas comme dans l'autre, de façon semblable par la formation de rotules plastiques et la constitution de mécanismes. Le fait que le réchauffement agisse sur les résistances plutôt que sur les sollicitations n'altère pas le caractère du processus.

La conséquence directe en est que, tout comme pour les charges statiques, l'hyperstaticité du système apporte un surplus considérable de résistance des structures vis-à-vis de l'incendie.

On constate, en conclusion, que la température critique qui caractérise la tenue d'un élément sous l'effet des actions thermiques dues à un incendie, dépend d'un grand nombre de facteurs dont aucun ne doit être négligé si l'on veut atteindre une approche correcte du problème.

2.3. Influence de la massivité des sections

Le processus de réchauffement des éléments exposés au flux thermique dépend évidemment de l'importance de celui-ci par rapport à la masse métallique à réchauffer.

Or, le flux thermique se présente, par convection et par radiation sur les faces exposées de l'élément, à l'exclusion donc de celles accolées à une dalle ou à tout autre élément massif protecteur.

De ce fait, on fait intervenir dans les calculs un facteur U/F , dit "de massivité" dans lequel U est le contour de la section transversale ou la partie de ce contour exposée au flux thermique et F est l'aire de la section transversale de l'élément étudié.

Ce facteur représente, en fait, l'inverse de la massivité, car plus la pièce est massive, plus ce facteur est faible.

L'incidence du flux thermique sur les faces de l'élément métallique et, par conséquent, le processus de réchauffement qui en résulte, diffèrent considérablement selon que cet élément est protégé ou non et, dans le premier cas, selon le type, la nature et l'épaisseur de la protection. Il est donc logique que la protection des éléments métalliques entre, elle aussi, pleinement en ligne de compte dans la détermination des effets d'un programme thermique donné.

Pour la commodité des applications pratiques, il est indiqué de considérer conjointement l'influence du rapport géométrique proprement dit U/F et celle de la protection. Les valeurs ainsi déterminées représentent donc, en fait, une massivité fictive puisqu'elles englobent les deux influences.

Ce procédé simplifié s'impose en vue de la confrontation des études théoriques avec les résultats d'essais, puisque ces deux influences sont indissociables expérimentalement.

En considérant séparément le cas des éléments métalliques dont une face se trouve en contact avec une dalle de béton -cas fréquent des planchers mixtes- ou celui des éléments partiellement enrobés, on peut déterminer les valeurs de ce facteur en tenant compte de ces influences additionnelles.

Enfin, on peut considérer à part le cas des éléments pour lesquels il y a lieu d'admettre comme température critique celle qui intervient dans une partie de la section, déterminante pour la tenue de l'élément, par exemple dans la semelle tendue d'une poutre en flexion.

Les valeurs ainsi déterminées du facteur de massivité (fictive) sont données, pour les profils laminés courants, sous forme de tableaux ou abaques pour l'usage pratique, permettant le dimensionnement de chaque élément par simple choix direct du profil.

2.4. Effets des dilatations thermiques

L'élévation de température d'un élément métallique provoque une dilatation de celui-ci, donc une variation de sa longueur. Cette variation reste sans effets sur la tenue au feu tant qu'il s'agit d'un élément isostatique, dont la dilatation est libre.

Cependant la dilatation des éléments constitutifs d'une structure est souvent entravée, et parfois même empêchée, par la résistance que les éléments adjacents opposent au déplacement des noeuds.

Il en est ainsi par exemple, des poteaux de bâtiments à étages ou des traverses de portiques multiples.

Les majorations de contraintes pouvant en résulter dans ces éléments doivent être déterminées avec discernement, compte tenu, d'une part, de la distribution des températures sur la longueur de l'élément considéré (effet modérateur d'une distribution non uniforme, par rapport à celui d'une distribution supposée uniforme de la température du point le plus sollicité thermiquement) et, d'autre part, de la résistance effective rencontrée par la dilatation ainsi déterminée, en fonction des caractéristiques du système de structure.

Dans la détermination de ces majorations de contraintes, il y a lieu de tenir compte du fait que dans toute pièce comprimée il y a une certaine interdépendance entre la flèche et la contrainte.

2.5. Effet de l'empêchement du déplacement des extrémités d'une poutre

La flèche que prend sous l'effet du réchauffement une poutre isostatique sur appuis libres, a pour conséquence un rapprochement de ses extrémités. Cela implique des précautions pour empêcher la chute de la poutre entre ses appuis.

Mais lorsque les extrémités d'une poutre sont tenues par des attaches qui empêchent leur déplacement axial, la flèche s'en trouve réduite par rapport à celle qui se produirait dans le cas des appuis libres. C'est le cas, par exemple, d'une travée intermédiaire d'un portique multiple, où la rigidité des files de poteaux situées de part et d'autre s'oppose à ce déplacement.

De cette entrave au déplacement des extrémités, il résulte un relèvement considérable de la température critique définie en fonction de la flèche.

Cet effet a été prouvé expérimentalement.

2.6. Effets du gradient de température

Un autre aspect essentiel est le gradient de température qui se produit entre une face exposée et une face non exposée au feu d'un élément. La dilatation différentielle qui en résulte donne lieu à une courbure qui se superpose à celle due au réchauffement général de la poutre.

C'est notamment le cas des solives et poutres de planchers mixtes, supportant une dalle de béton (associée ou non), ainsi que celui des poteaux exposés au feu sur un seul côté.

2.7. Effets des encastrements

Lorsqu'un élément isostatique sur deux appuis prend une flèche, ses extrémités subissent une rotation dans le plan de flexion. Cette rotation se produit alors librement.

Par contre, dans un élément faisant partie d'une structure et notamment d'un système hyperstatique, les attaches aux extrémités de la barre et les éléments adjacents s'opposent à la rotation des noeuds. Il s'agit alors d'une rotation entravée, dont on peut déterminer la valeur selon les méthodes classiques du calcul des structures.

Le cas limite de cet effet est celui d'un encastrement parfait (ou quasi parfait) dans un milieu rigide, tel qu'un massif en béton.

Le degré d'encastrement exerce une influence considérable sur le comportement de l'élément et donc sur sa résistance sous l'effet des actions thermiques.

L'effet d'encastrement joue pleinement dans le cas des travées intermédiaires des poutres continues.

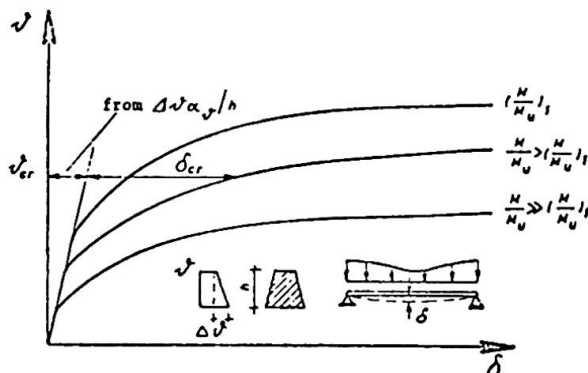
2.8. Effets du taux d'utilisation de la capacité portante

La température critique d'un élément porteur dépend fortement de son niveau de sollicitation statique en service, celui-ci étant caractérisé -suivant le mode de sollicitation- par le rapport entre la charge ou le moment du à ce niveau de sollicitation et la charge ou le moment ultime à l'ambiante (F/F_u ou M/M_u).

Des essais systématiques sur éléments de construction différemment chargés ont confirmé les résultats des considérations théoriques à ce sujet et ont permis d'établir avec une précision suffisante cette influence.

Le diagramme de la fig. 3, résultant de tels essais sur une poutre en flexion fait apparaître cette influence. On y remarque, au départ, une zone linéaire correspondant au gradient de température en section, suivie par une plastification progressive accompagnée de fluage à chaud.

Figure 3



Il est important de noter qu'il ne s'agit pas des sollicitations nominales de calcul, mais bien de celles qui avec une probabilité suffisante, seraient rencontrées à un moment quelconque en service normal.

Cette influence peut être exploitée dans certains cas dans lesquels il est possible d'atteindre une durée de résistance exigée, avec une protection réduite ou même sans protection, en choisissant un profil plus fort. Le critère de l'opportunité d'une telle mesure est alors de nature économique.

3. TENUE AU FEU DES ELEMENTS PORTEURS ET DES STRUCTURES EN ACIER

3.1. Éléments sollicités en traction

La ruine (critère de référence) d'un élément tendu se rapporte soit à une perte de résistance, soit à un allongement excessif entraînant des désordres inadmissibles dans le système porteur.

Les éléments tendus qui assurent la stabilité de la structure ou de sous-ensembles importants appellent une attention particulière et une marge de sécurité accrue.

C'est le cas notamment des barres de contreventement et de certains tirants dont la mise hors service compromettrait la stabilité du bâtiment.

3.2. Poutres sollicitées en flexion

Quoiqu'il soit toujours possible de recourir à un calcul en élasticité, pour lequel l'état limite serait en principe le même que dans le cas des charges statiques, le caractère du processus de ruine dû au réchauffement s'apparente, en fait, au comportement plastique sous charges statiques, avec la formation de rotules plastiques conduisant à la constitution d'un mécanisme. C'est donc par un calcul en plasticité qu'il convient de traiter le problème.

Schématiquement et en se fondant sur le concept d'analyse plastique du premier ordre, Vinnakota propose un diagramme très suggestif qui fait apparaître les niveaux des sollicitations limites selon le mode de calcul (figure 4).

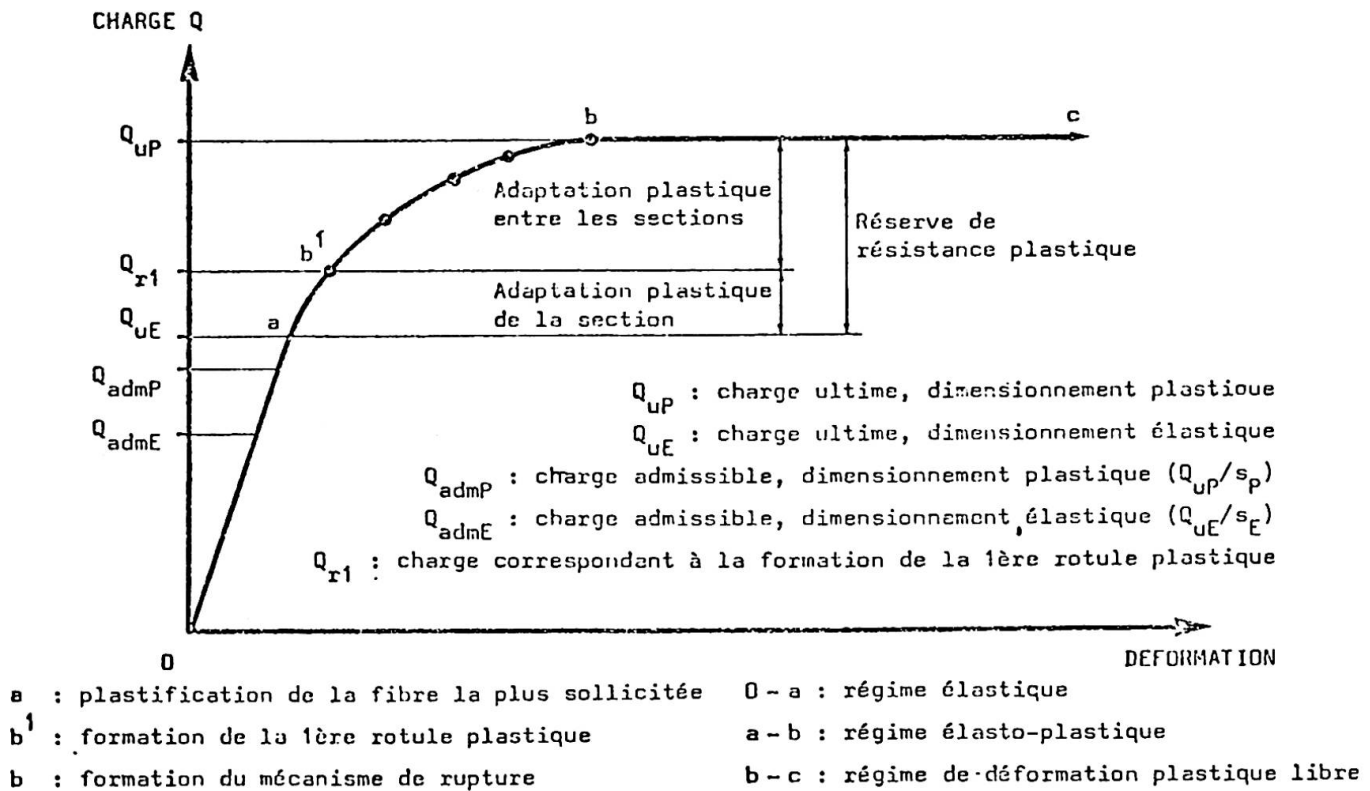

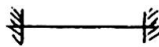


Figure 4

Courbe charge-déformation d'une structure métallique

Nous nous bornons ici à reproduire un tableau récapitulatif des résultats obtenus en Suède, par Thor, dans une étude systématique relative à une poutre sur deux appuis, car elle met très clairement en évidence les effets des facteurs mentionnés ci-après.

Distribution des températures	Système	Degré d'utilisation %	Température critique °C
a) uniforme, avec élévation lente		50	530
b) non uniforme dans la section, avec élévation rapide et avec un gradient donnant dans la semelle supérieure une température supérieure de 100° C à celle de la semelle inférieure		50	590
a)		25	620
b)		25	720
a) uniforme, avec élévation lente		50	560
b) non uniforme sur la longueur, avec élévation rapide et une température aux extrémités inférieure de 100° C à celle de la zone centrale		50	640
a)		25	640
b)		25	800

Résultats des recherches de Thor sur l'influence
- de l'hyperstaticité du système
- de la distribution des températures
- du degré d'utilisation de l'élément
sur le niveau de la température critique

Ainsi, par exemple, pour la poutre isostatique sur deux appuis, la température critique est celle qui correspond à la formation d'une rotule plastique, tandis qu'il faut trois rotules pour créer un mécanisme à un degré de liberté dans la poutre encastree aux deux extrémités.

D'une manière générale, on peut constater que de tous les types d'éléments porteurs, les poutres en flexion représentent la catégorie dont la tenue au feu a été le mieux explorée expérimentalement, permettant ainsi d'étayer les conclusions des études théoriques par des résultats d'essais suffisants.

Il a donc été possible d'établir, pour les types de profilés courants, des moyens pratiques et simples -sous forme d'abaques ou de tableaux- pour le choix des sections et la détermination des protections nécessaires en fonction des résistances exigées.

3.3. Éléments comprimés

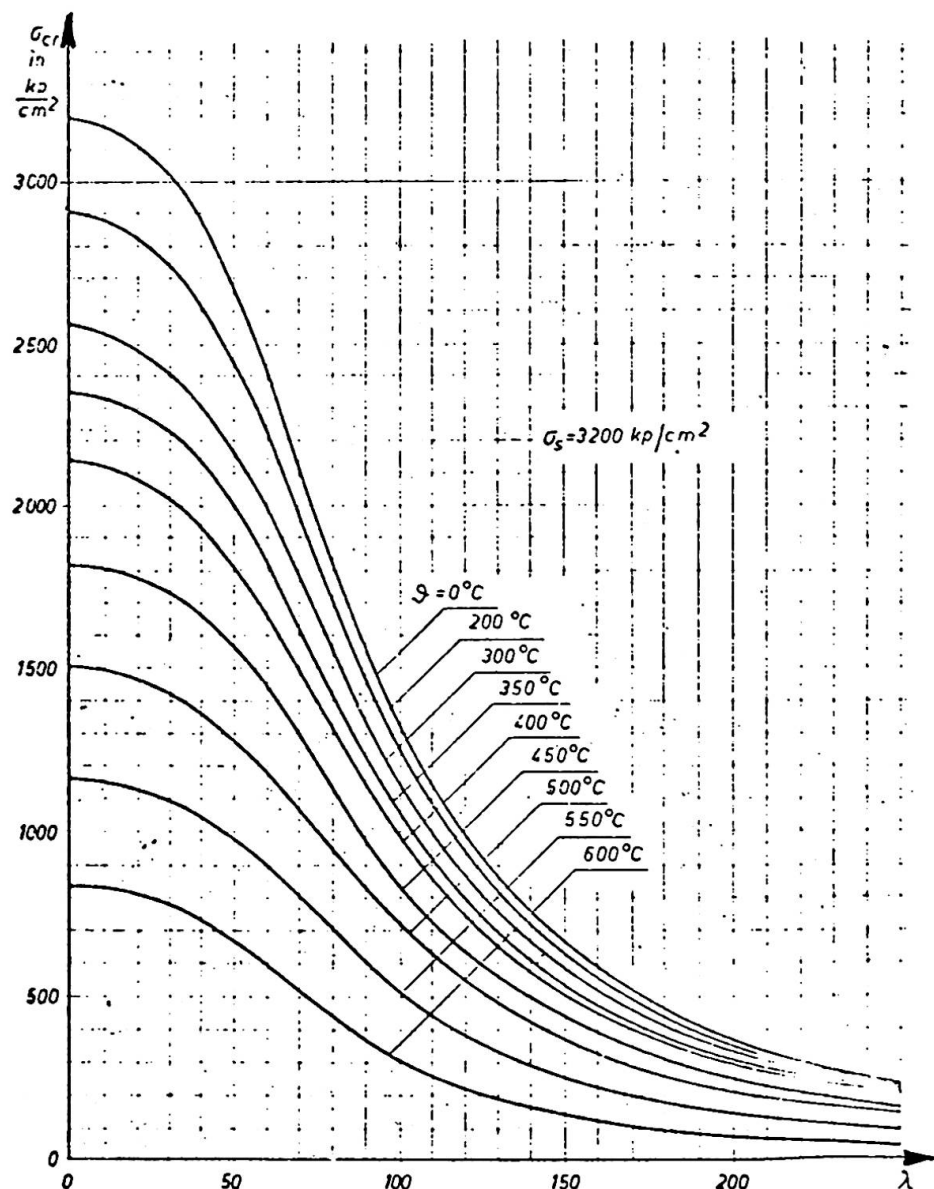
Le comportement des poteaux et autres éléments comprimés n'a pas encore fait l'objet d'une expérimentation aussi complète que celui des poutres fléchies. Toutefois, certaines séries d'essais récents ou en cours constituent déjà une base d'appréciation non négligeable.

L'action thermique influe de diverses manières sur la capacité portante d'un élément comprimé par :

- la réduction des caractéristiques mécaniques du métal
- l'excentricité supplémentaire pouvant résulter des déformations d'origine thermique
- les contraintes supplémentaires résultant d'un empêchement de dilatation
- l'effet de torsion dû à un réchauffement non uniforme ou les moments pouvant résulter d'un empêchement de cette torsion
- les phénomènes de fluage qui interviennent aux températures élevées.

En se fondant sur les théories générales du flambement et en y appliquant les influences des effets thermiques, il a été possible d'établir des courbes de flambement pour un élément bi-articulé, en compression axiale et en fonction de la température.

Figure 5



Des essais effectués sur poteaux protégés ou non, semblent révéler des résistances légèrement supérieures aux indications théoriques, mais il serait prématuré de conclure dans ce sens avant de disposer des résultats d'une expérimentation plus complète.

Ces essais se réfèrent à une température critique définie comme étant la température moyenne en section, à partir de laquelle l'élément métallique cesse de remplir sa fonction portante.

La pratique expérimentale courante dans la plupart des essais de poteaux effectués à ce jour a été fondée sur la prédiction des conditions de ruine à partir des températures mesurées de l'élément métallique (protégé ou non). Cette méthode semble conduire à des résultats acceptables, mais il n'en reste pas moins que l'essai en charge donnera toujours les indications les plus fiables.

3.4 Remarques générales relatives aux structures

Les aspects fondamentaux qui concourent à la tenue au feu des éléments structuraux en acier sont maintenant assez bien connus, grâce aux études théoriques et aux expériences qui en ont fourni les bases ou en ont confirmé les résultats.

De même, les processus de comportement des structures en acier et de leurs éléments constitutifs sous l'effet du feu apparaissent nettement en superposant les influences d'origine thermique à l'étude classique de la stabilité et de la résistance des systèmes porteurs.

Par ailleurs, l'étude expérimentale correspondante a pris récemment une tournure très réaliste et significative, par l'orientation vers des essais d'éléments et de sous-ensembles en grandeur nature, avec application simultanée de charges statiques et des programmes thermiques reflétant les conditions d'un incendie réel. La CECM a joué un rôle décisif dans ce sens, par la création d'une station d'essais conçue à cet effet.

Quelques lacunes subsistent cependant encore dans cet enchaînement, au niveau de la corrélation entre les résultats observés dans un four et ceux qu'un même programme thermique provoque dans l'enceinte d'un bâtiment, où les parois -suivant leur nature- ont des caractéristiques d'émissivité et de réflexion différentes.

Par ailleurs, il faut reconnaître que s'il reste encore beaucoup à faire dans le domaine de l'analyse du comportement de certaines catégories d'éléments porteurs, l'extrapolation des connaissances acquises à l'étude des structures n'en est qu'à ses tout premiers débuts.

Il n'est certes pas envisageable pratiquement de procéder à une large expérimentation dans ce domaine, mais la complexité de l'étude fondée sur les effets concurrents d'un grand nombre de paramètres exige au moins une confirmation ponctuelle des résultats par des essais sur des sous-ensembles en grandeur nature, corroborés avec des essais plus systématiques sur modèles réduits.

Ces perspectives de recherches qui s'ouvrent encore dans le domaine de la résistance au feu des structures en acier, doivent conduire à mieux définir les types de structures par rapport à leur tenue à l'incendie et à guider le choix des systèmes porteurs et des dispositions constructives en fonction de leur tenue au feu.

3.5. Structures non protégées

La détermination des conditions et des limites dans lesquelles la protection d'un élément ou d'une structure en acier n'est pas nécessaire, est une question de première importance, tant du point de vue de la sécurité que de l'économie et de la réalisation de l'ouvrage.

L'analyse de cette question s'inscrit dans l'étude d'ensemble de la sécurité à l'incendie, qui se situe en dehors du sujet précis du présent rapport. Notons toutefois que dans de nombreux cas il est inutile de protéger la structure en acier, soit parce qu'un incendie possible en fonction de la charge calorifique et des conditions géométriques et de ventilation du local ne pourrait pas donner lieu à une élévation de la température au-dessus du niveau critique dans les éléments affectés, soit en raison des exigences minimales de résistance au feu qui découlent de l'utilisation des locaux et de l'ensemble des mesures de protection existantes.

Prévoir alors néanmoins une protection serait une mesure anti-économique injustifiée.

Les critères généraux concernant la résistance des structures mentionnés en 2.1. à 2.8. et les indications données en 3.1. à 3.3. sont valables sans restriction dans le cas particulier des structures non protégées. Leur application permet donc d'établir des moyens pratiques de dimensionnement en fonction des mêmes paramètres que pour les éléments protégés.

Ainsi l'abaque de la figure 6, tracé à partir de considérations théoriques, fait apparaître l'influence de la température critique sur la résistance des poutres en acier non protégées, exprimée en minutes, par référence aux essais en four conduits sous le programme thermique normalisé.

Il est également important de ne pas confondre la résistance à un incendie naturel avec celle rapportée au programme thermique normalisé. Or, la durée de résistance d'un profil donné varie fortement en fonction de l'évolution et de l'intensité de l'incendie. Cela apparaît, par exemple, dans la figure 7 qui représente des courbes de résistance des éléments en acier non protégés, pour différents programmes thermiques. Ces courbes sont tracées sur la base de résultats d'essais, ce qui les rend incontestables.

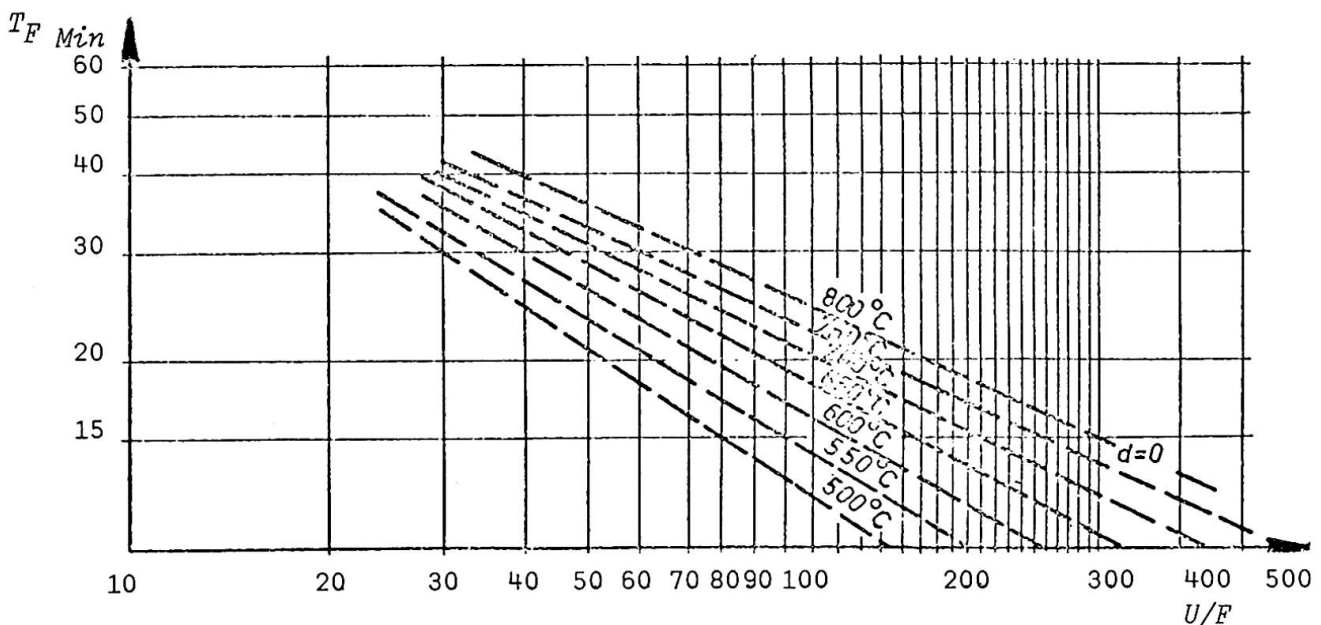
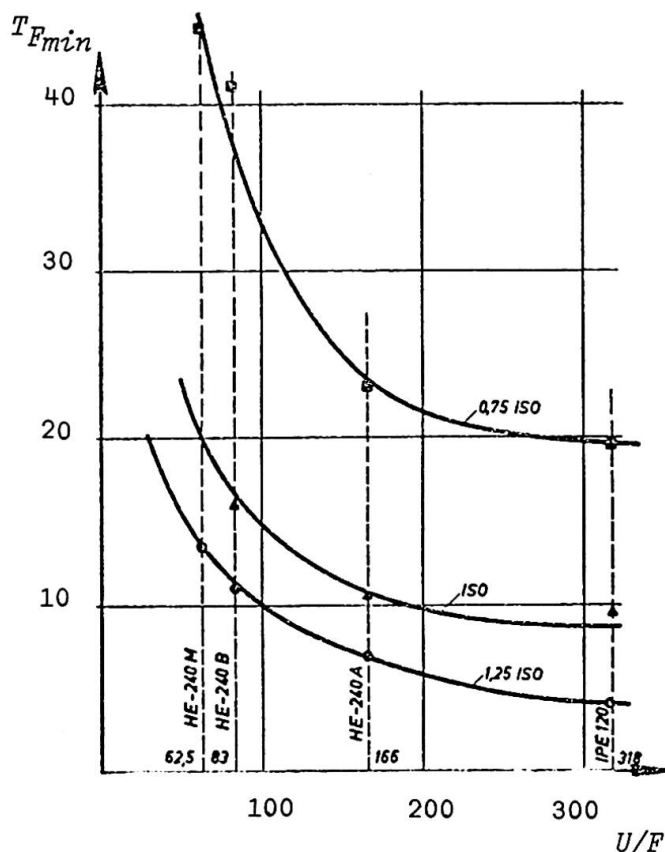


Figure 6

Figure 7



Dans le cas particulier des solives ou poutres de planchers supportant une dalle de béton, la protection partielle offerte par celle-ci n'est pas négligeable, car elle entraîne une augmentation sensible de la résistance au feu du profilé nu, exprimé par une diminution de la température critique.

Les aspects à considérer sont donc multiples. Leur étude permet de bien définir les limites d'acceptabilité de telles structures.

4 PROTECTION DES ELEMENTS PORTEURS ET DES STRUCTURES EN ACIER

4.1. Protection par couche isolante

Lorsque la résistance de la structure nue est insuffisante, elle doit être protégée. Le procédé classique consiste à interposer une couche protectrice, qui peut se présenter soit sous forme de plaques rigides disposées en caisson, soit d'une couche épousant le profil de l'élément à protéger.

L'effet protecteur de ces couches -en fonction de leur nature et de leur épaisseur- se détermine expérimentalement pour chaque type de profil. Cette méthode est sûre, car elle fait apparaître directement la résistance réelle au feu de l'élément protégé. Elle a toutefois l'inconvénient d'être globale et de ne pas permettre de dégager clairement les propriétés de la couche protectrice.

Cependant, le transfert de chaleur à travers cette couche a fait l'objet d'études qui ont conduit à des méthodes plus ou moins élaborées, tenant compte des propriétés thermiques du matériau isolant (conductivité et capacité thermique), du gradient de température dans la couche protectrice, de la transmission de chaleur par radiation, etc. Il est donc possible de connaître avec précision le pouvoir isolant d'une couche de protection.

Les peintures intumescentes récemment développées représentent une catégorie à part, dont l'intérêt est certain dans le domaine limité des résistances qu'elles peuvent couvrir.

4.2. Protection par transfert de chaleur

Des systèmes depuis longtemps préconisés, mais qui n'ont connu que des applications pratiques récentes et peu nombreuses, sont fondés sur le transfert de chaleur par irrigation de la structure.

Ce mode de protection est parfaitement sûr et peut être rigoureusement contrôlé par le calcul. Son développement est conditionné par les particularités structurales qu'il impose (usage exclusif d'éléments creux, dispositifs de circulation et équipements annexes) et surtout par ses incidences économiques.

5. STRUCTURES MIXTES ACIER-BETON

La tenue au feu des structures mixtes résulte, d'une part, du comportement spécifique de chacun des matériaux associés et, d'autre part, de l'incidence de la présence d'un matériau sur le comportement de l'autre.

Les aspects relatifs à l'acier sont brièvement exposés dans le présent rapport, ceux qui concernent le béton armé ou précontraint font l'objet d'un rapport distinct.

Les effets de protection partielle des poutres métalliques dans les planchers mixtes ont été également mentionnés dans le présent rapport.

Un domaine important est celui des poteaux mixtes : poteaux en acier enrobés de béton ou tubes en acier remplis de béton. Les essais effectués sur ces deux catégories d'éléments permettent déjà d'en évaluer la tenue au feu, mais des investigations plus poussées et des études théoriques plus complètes sont encore nécessaires.

La place importante occupée par les systèmes mixtes dans la construction justifierait un effort accru de recherche dans ce domaine.

6. SECURITE DES STRUCTURES EN CAS D'INCENDIE

L'incendie est un événement qui doit être classé dans la catégorie correspondant aux charges exceptionnelles.

La résistance des éléments de construction et des systèmes porteurs vis-à-vis des actions thermiques du feu doit par conséquent être traitée comme telle, par application des coefficients de sécurité affectés à cette catégorie des charges.

En ce qui concerne les combinaisons de charges à prendre en compte dans les calculs, il faut également appliquer les mêmes principes, en associant les sollicitations thermiques aux charges les plus probables en régime normal de service et en écartant la simultanéité d'intervention de charges exceptionnelles à leur niveau maximal.

C'est ainsi seulement qu'une sécurité effective et suffisante, mais raisonnable, peut être garantie.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ARNAULT P., EHM H., SFINTESCO D. Recherches incendie CECM III-71.1
- C.E.C.M., Commission 3 La sécurité à l'incendie dans la construction métallique CECM III-74-2
- C.E.C.M., Commission 3 La sécurité à l'incendie dans la construction métallique Symposium international, La Haye, octobre 1974 CECM (publication en préparation)
- C.T.I.C.M. Recherches sur la tenue au feu des constructions métalliques. Rapport final. CCE, eur 5180, août 1974
- Joint Committee on Tall Buildings International Conference Proceedings, Aug. 1972 Vol. II, TC 8
- LIE T.T. et HARMATHY Z. A numerical procedure to calculate the temperature of protected steel columns exposed to fire. N.R.C. of Canada, Div. of Bldg. Res., Doc. 12355, March 1972
- PETTERSSON O. Principer för en kvalificerad brandteknisk dimensionering av stålvarverk. Stålbyggnadsdagen 1968, Stockholm
- SAITO H. Fire resistance design for steel structures. Bldg. Res. Inst., Tokyo, May 1972
- SFINTESCO D. La station expérimentale de résistance au feu à Maizières-lès-Metz Construction Métallique no 4/1968
- SFINTESCO D. Tenue au feu des constructions en acier ou mixtes. Symposium AIPC, Dresde 1975, Rapport introductif. AIPC, Zurich, 1974
- THOR J. Deformations and critical loads of steel beams under fire exposure conditions. Nat. Swedish Bldg. Res., Doc. D16/1973
- VINNAKOTA S. Comportement des structures métalliques en cas d'incendie Construction Métallique no 2/1975 (en préparation)
- WITTEVEEN J. Theoretische Ueberlegungen zum Brandverhalten von Stahlkonstruktionen Stahlbautagung Hannover, 1968. D.St.V., Köln, 1969
- Behavior of structural steel in fire. Proceedings, Boreham Wood Symposium, Jan. 1967 H.M. Stationery Office, London 1968

RESUME

Principes et aspects fondamentaux de la tenue au feu des éléments et structures en acier.

Effets des principaux paramètres.

Brèves remarques sur les structures mixtes et la sécurité au feu des structures.

ZUSAMMENFASSUNG

Grundsätze und grundlegende Aspekte des Brandverhaltens der Bauteile und Tragwerke aus Stahl.

Einwirkung der wichtigsten Parameter.

Kurze Bemerkungen über Verbundkonstruktionen sowie über die Sicherheit der Tragwerke im Brandfall.

SUMMARY

Principles and basic aspects of the behavior of steel members and structures in fire.

Effects of the main parameters.

Brief remarks on composite structures and on the fire safety of structures.