

Méthodes des dimensionnements des ouvrages en béton exposés à l'action du feu

Autor(en): **Radojicic, Alexandre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **116 (1990)**

Heft 11

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77256>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Méthodes de dimensionnement des ouvrages en béton exposés à l'action du feu

1. Introduction

L'évaluation de la résistance d'une structure en béton soumise à une charge calorifique lors d'un incendie passe par l'évaluation de la résistance de ses éléments porteurs principaux: colonnes, dalles, murs, etc.

PAR ALEXANDRE RADOJICIC,
CHAVANNES-PRÈS-RENNES

Par «charge calorifique», il faut comprendre la chaleur totale Q en MJ dégagée par la combustion totale de tous les matériaux combustibles se trouvant dans un secteur incendié, y compris le mobilier, les revêtements du plancher et des murs, le toit, ainsi que des parties combustibles de la structure elle-même.

Selon le rôle qu'un élément doit jouer en cas d'incendie, l'évaluation de la résistance au feu de cet élément comprend la vérification des états limites suivants:

- la capacité portante (éléments porteurs: colonnes, dalles);
- l'étanchéité au feu et l'isolation thermique (murs de séparation, dalles).

Pour l'état limite d'étanchéité au feu, la plupart des pays possédant une norme pour la protection des ouvrages contre l'incendie admettent les critères suivants:

$\Delta T \leq 140^\circ\text{C}$ - accroissement de la température moyenne de la face non exposée au feu par rapport à sa température initiale

$\Delta T \leq 180^\circ\text{C}$ - accroissement maximal de la température à n'importe quel point de la face non exposée au feu par rapport à sa température initiale

$T \leq 220^\circ\text{C}$ - température maximale à n'importe quel point de la face non exposée.

Pour l'évaluation de l'état limite de la capacité portante des éléments, on utilise généralement l'une des trois méthodes suivantes:

- méthode de la courbe température/temps normalisée de l'ISO 834 [3]¹
- méthode du temps équivalent
- méthode de simulation des incendies naturels (Naturbrand, natural fire).

2. Méthode de la courbe température/temps normalisée

Cette méthode, purement empirique, est fondée sur les résultats de nombreux essais normalisés de l'ISO 834.

Ces essais spécifient:

- le type d'élément et la charge à laquelle il est soumis;
- les conditions d'échauffement, c'est-à-dire la fonction température/temps normalisée de l'ISO 834;
- les autres conditions et observations, telles que la capacité portante de l'élément, la déformation, l'isolation, l'intégrité;
- le critère de ruine pour l'élément.

Ils se déroulent selon le même protocole conformément à l'ISO 834 dans le monde entier, ce qui permet la comparaison de tous les résultats. De cette façon, il a été possible d'établir des tables indiquant les dimensions minimales, ainsi que l'épaisseur minimale d'enrobage des aciers pour les différents éléments (dalles, colonnes, murs, etc.) en fonction des différentes classes de résistance au feu.

Le critère de cette classification est la durée en minutes pendant laquelle un élément peut être exposé à l'échauffement selon la courbe ISO 834 (fig. 1), sans perdre ni sa capacité portante, ni son étanchéité au feu.

Cette courbe de montée en température est une fonction logarithmique:

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (1)$$

où:

t = temps en minutes

T = température au temps t , en $^\circ\text{C}$

T_0 = température initiale (température ambiante avant l'échauffement)

Selon la classification internationale, les intervalles de temps suivants peuvent être requis: F 30, F60, F90, F120, F180, F240 où les chiffres représentent le temps d'exposition au feu requis en minutes.

Le choix de la classe adéquate de protection contre le feu se fait essentiellement sur la base d'essais au feu normalisés, mais dépend aussi des facteurs suivants:

- type d'ouvrage et utilisation prévue
- intensité de la charge calorifique
- importance de l'élément de structure considéré pour la stabilité de la structure entière
- existence d'un système d'alarme incendie, d'un réseau de sprinklers, de sorties de secours, etc.

Pour satisfaire aux critères de stabilité de l'ouvrage, l'élément porteur sollicité par les charges de service et exposé au programme thermique normalisé ne doit pas s'effondrer pendant la durée requise pour sa classe de résistance au feu. Le critère de stabilité comprend tous les états limites: en flexion, torsion, cisaillement, flambement, etc. En outre, les déformations ainsi que les vitesses de déformation ne doivent pas dépasser certaines valeurs bien définies pour chaque type d'élément porteur.

Un grand avantage de la fonction température/temps normalisée est qu'elle est admise partout dans le monde, permettant ainsi la comparaison de tous les résultats d'essais au feu, en vue de la classification des matériaux et éléments de construction les plus divers, selon leur résistance au feu. De plus, elle sert de base aux programmes de calcul des températures dans une section.

La distribution de la température dans une section sous l'action du feu suit la loi de Fourier:

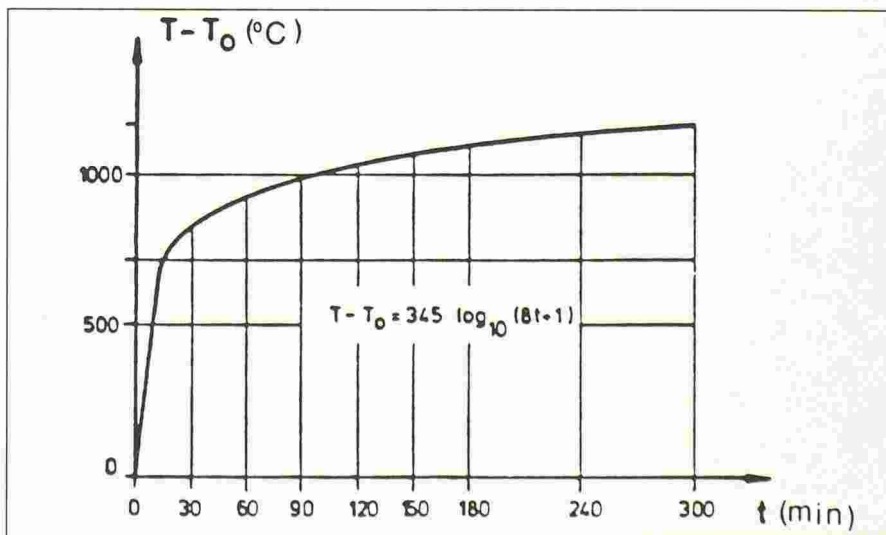


Fig. 1. - Courbe normalisée de montée en température.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + R \quad (2)$$

où :

T = température

t = temps

λ = conductivité

c = chaleur spécifique

ρ = densité

R = source d'énergie

Les conditions aux limites sont définies par les lois d'échange par convection et rayonnement. La distribution des températures dans l'élément est fonction de la profondeur et de la durée de l'essai. L'influence de l'acier sur la distribution de la température dans une section en béton armé ou précontraint peut être négligée.

L'équation différentielle de Fourier, qui se résout en général par la méthode des éléments finis, permet d'établir la température en chaque point d'une section de l'élément considéré.

Il existe une série de sections types de différents éléments, avec des isothermes en fonction du temps d'exposition au feu, établis par l'ISO 834 (fig. 2).

Connaissant les caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier, en fonction de la température, il est possible de déterminer la capacité portante réduite par l'échauffement pour toute section. Ce calcul s'effectue également par la méthode des éléments finis.

Dans la plupart des cas, une méthode approchée se révèle suffisante. Les Suédois [11] ont mis au point un programme d'analyse simple permettant de calculer la capacité portante réduite des sections exposées au feu.

La méthode part de l'hypothèse que la capacité portante du béton est nulle lorsque la température dépasse 500°C et qu'elle est entière tant que la température reste inférieure à 500°C. La capacité portante des armatures se calcule au moyen des diagrammes contraintes/déformations en fonction de la température (fig. 4 et 5).

Cette méthode simplifiée a été vérifiée par une étude analytique du comportement et de la capacité portante de diffé-

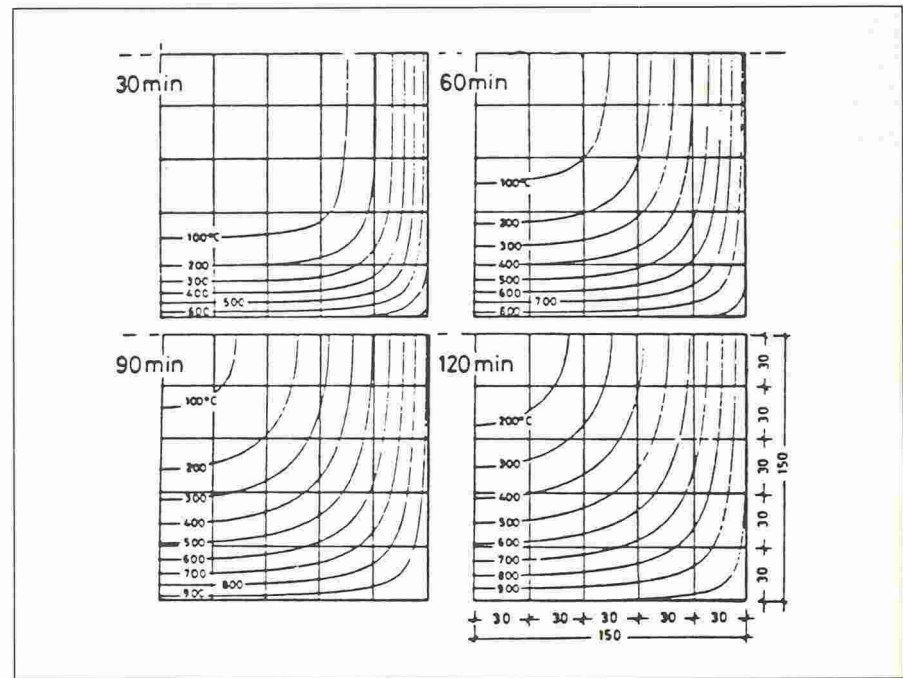


Fig. 2. - Isothermes - Programme thermique standard. Un quart de section des poteaux exposés sur 4 faces pendant des durées égales à 30, 60, 90 et 120 minutes.

rents types de sections, chargées par une force normale, un moment de flexion ou leur combinaison et exposées au feu symétriquement ou asymétriquement; elle s'est montrée suffisamment précise.

La distribution de la température dans une section peut être déterminée à l'aide de tables d'isothermes semblables à celles de la figure 2 mises au point par l'ISO 834 pour différents types de sections, conditions d'échauffement et durée d'exposition au feu. La figure 3 montre trois exemples de sections réduites, limitées par l'isotherme de 500°C.

Seule la zone de béton située à l'intérieur de l'isotherme de 500°C peut être prise en considération pour le calcul de la capacité portante. En revanche, toutes les barres d'armature, y compris celles se trouvant en dehors de l'isotherme de 500°C, sont prises en considération avec la capacité portante définie en fonction de leur température (fig. 4 et 5).

L'inconvénient majeur de la méthode

de la courbe température/temps normalisée, c'est qu'elle ne garantit la résistance, voire l'intégrité d'un élément que jusqu'au temps requis pour sa classe (F30, F60, etc.). Elle ne donne en revanche aucun renseignement sur la survie ou la possibilité de réparation de la structure après un incendie.

Elle ne tient pas compte non plus de l'intensité et de la répartition de la charge calorifique, de la présence de ventilations ou d'appareils anti-incendies, etc.

3. Méthode du temps équivalent

L'expérience a cependant montré que l'influence de l'intensité de la charge calorifique ainsi que des ouvertures de ventilation sur l'évolution d'un incendie réel, c'est-à-dire sur la montée en température et la durée d'incendie, est très grande.

La figure 6 présente des courbes température/temps d'incendies naturels avec la charge calorifique variable par sur-

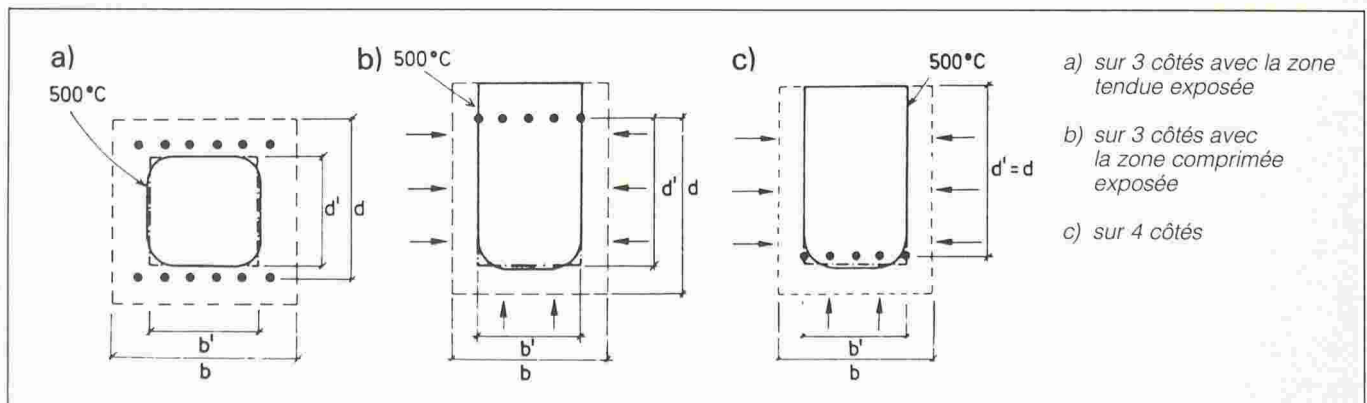


Fig. 3. - Sections réduites d'une poutre en béton armé exposées au feu.

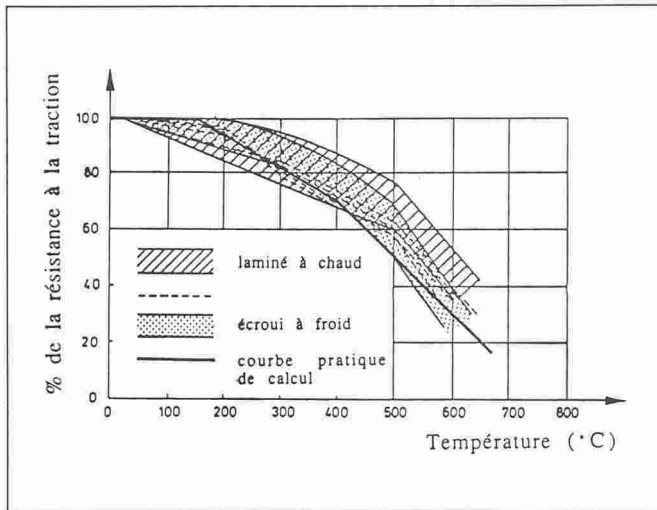


Fig. 4. - Résistance à la traction de l'acier en fonction de la température.

face unitaire du plancher du secteur incendié.

Le facteur de ventilation y est admis constant:

$$\frac{A_w}{A_f} \cdot \sqrt{h_w} = 0,157 \text{ [m}^{1/2}\text{]}$$

où:

A_w = surface des fenêtres et des ouvertures de ventilation en m^2

A_f = surface de l'enveloppe du secteur incendié en m^2

h_w = hauteur moyenne de toutes les fenêtres et ouvertures de ventilation en m^1

On peut constater que ces courbes diffèrent passablement de la courbe normalisée de l'ISO 834, également représentée à la figure 6.

La méthode du temps équivalent relie d'une manière aisée les résultats d'essais selon l'ISO 834 avec les résultats d'essais et l'expérience acquise dans les conditions d'incendies naturels.

Le temps équivalent signifie la durée d'échauffement d'un élément selon la courbe normalisée de l'ISO 834 (fig. 7) afin d'arriver à la même résistance que lors d'un incendie naturel.

Une analyse comparative des résultats d'essais selon l'ISO 834 et selon l'échauffement dans les conditions d'incendies naturels a permis d'établir la formule suivante:

$$t_e = 0,067 \frac{A_f}{A_f} \cdot \frac{q_t}{\sqrt{\frac{A_w \sqrt{h_w}}{A_f}}} \cdot K_f \quad (3)$$

où:

t_e = temps équivalent

A_f = surface du plancher du secteur incendié

q_t = charge calorifique par surface unitaire du plancher en MJ/m^2

K_f = coefficient sans dimension dépendant des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du secteur incendié

Le coefficient K_f tient compte du degré d'absorption de chaleur par l'enveloppe (dalles et murs) du secteur incendié. Plus ce degré est élevé, moins grand est l'échauffement de l'élément considéré.

Pour le calcul pratique, on peut admettre:

$K_f = 1$: dalles en béton; murs en briques de terre cuite, de ciment ou silico-calcaires

$K_f = 0,9$: dalles et murs en béton

$K_f = 1,3$: dalles en béton; murs avec isolation thermique (en plâtre et laine de verre)

$K_f = 1,7$: dalles et murs avec isolation thermique n'absorbant pas de chaleur.

La classe de résistance F d'un élément peut être définie comme étant le produit du temps équivalent t_e (3) et d'un

coefficient de sécurité tenant compte des impondérables:

$$F = \gamma \cdot t_e \quad (4)$$

Il serait raisonnable d'admettre:

$\gamma = 1,3$: en général pour tous les éléments porteurs

$\gamma = 0,65$: pour les éléments dont la ruine est sans conséquence sur la stabilité de la structure.

Si l'on obtient des valeurs intermédiaires entre deux classes de résistance normalisées, on admettra la classe supérieure, par exemple:

$30 < F < 60 \text{ min} \rightarrow F = F60$.

A défaut de données plus précises, pour la détermination de la charge calorifique q_t , on peut utiliser le tableau 1 tiré de la recommandation pour la protection contre l'incendie SIA 183.

Le temps équivalent correspond, comme nous l'avons vu, à la résistance

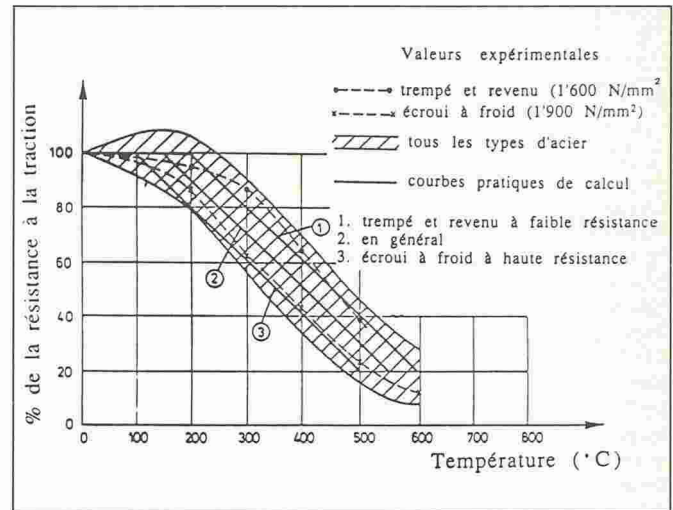


Fig. 5. - Résistance à la traction de l'acier de précontrainte en fonction de la température.

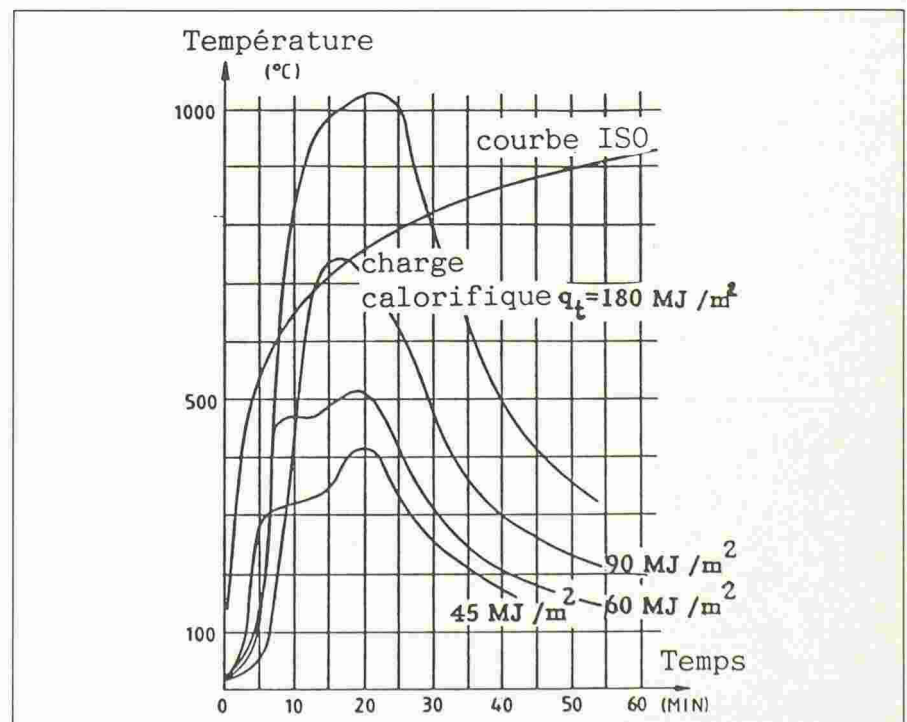


Fig. 6. - Courbes température/temps d'incendies naturels pour différentes charges calorifiques.

TABLEAU 1. - Détermination de la charge calorifique q_f .

Affectation	Charge calorifique permanente [MJ/m ²]	Charge calorifique mobile [MJ/m ²]	Charge calorifique totale [MJ/m ²]	Résistance au feu requise
Expositions	250	80-500	330-750	F60
Parkings fermés	100-250	300-600	400-800	F30-F60
Musées	250	300	550	F60
Ecoles	250	300	550	F60
Hôpitaux	250	300	550	F60
Habitations	300	300	600	F60
Hôtels	300	300-500	600-800	F60
Homes	300	400	700	F60
Surfaces de vente	400	400	800	F60
Bureaux	200	600-800	800-1000	F60
Industries	50-300	40-5000	90-5300	F120
Dépôts	50-300	600-50 000	650-50 300	F60-F120

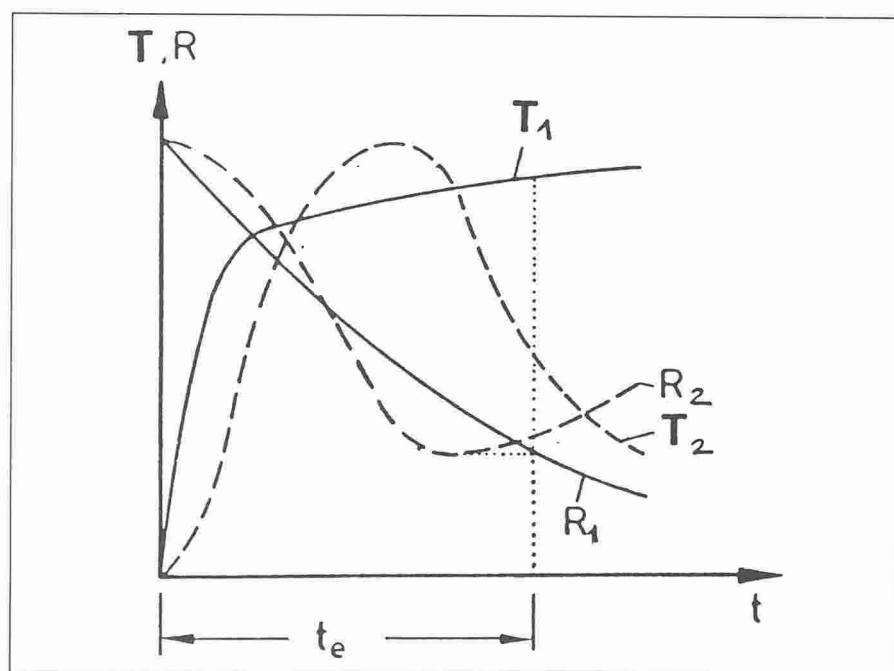
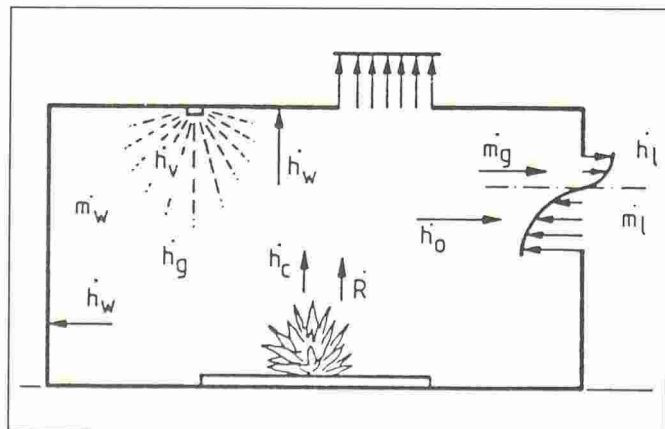
Fig. 7. - Temps équivalent t_e . T_1 = courbe normalisée de l'ISO 834 T_2 = courbe température/temps d'un incendie naturel R_1 = résistance d'un élément en béton soumis au programme thermique de l'ISO 834 R_2 = résistance du même élément sous l'échauffement lors d'un incendie naturel

Fig. 8. - Flux énergétique et massique dans un compartiment avec des ouvertures de ventilation.

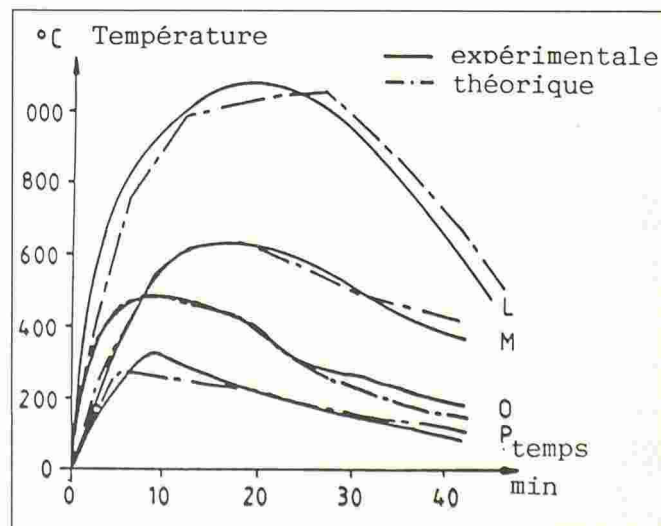


Fig. 9. - Courbes température/temps pour différents incendies naturels.

minimale de la structure (ou de ses éléments exposés à l'action du feu) au moment où la température atteint la valeur maximale. Etant donné que le temps requis F est toujours plus long que le temps équivalent t_e , la structure dimensionnée d'après la méthode du temps équivalent peut résister au feu sans l'intervention des pompiers jusqu'à la combustion totale de tous les matériaux combustibles se trouvant dans le secteur incendié.

4. Méthode de simulation des incendies naturels

La combustion des matériaux inflammables et le dégagement de gaz qui en résulte sont relativement peu importants au début d'un incendie. Le moment critique de l'incendie est atteint lorsqu'il se produit une explosion de ces gaz condensés (flashover). La période qui s'ensuit est décisive pour la capacité portante de la structure. Les facteurs les plus importants qui l'influencent sont:

- la quantité et le type des matériaux combustibles dans le compartiment (secteur incendié)
- la porosité et la forme de ces matériaux
- la distribution des matériaux combustibles dans le compartiment
- la quantité d'air frais entrant dans le compartiment par unité de temps
- la géométrie et les ouvertures de ventilation
- les propriétés thermiques de l'enveloppe du compartiment (murs et dalles)
- l'existence des sprinklers.

Afin de pouvoir englober tous ces paramètres dans l'analyse d'un incendie naturel, il a été nécessaire d'établir des programmes à l'ordinateur (d'abord en Suède et ensuite en Allemagne fédérale, Angleterre, aux Etats-Unis, en Suisse, etc.) qui soient en mesure de déterminer

très exactement la courbe température/temps d'un incendie naturel.

La solution de ce problème très complexe s'obtient en résolvant le système de trois équations différentielles de la thermodynamique:

- l'équation différentielle du bilan énergétique
- l'équation différentielle du bilan des masses
- l'équation différentielle de Fourier.

Pour le compartiment (secteur) considéré (fig. 8), la condition que la somme de l'énergie produite et absorbée soit égale à zéro doit être remplie.

De la même façon, la somme des masses de tous les gaz doit être égale à zéro.

L'équation différentielle du bilan énergétique s'écrit:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_t + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_v) = 0 \quad (5)$$

où:

$\dot{h}_c$: énergie libérée par combustion dans le compartiment incendié

$\dot{h}_t$: énergie perdue par convection à travers des ouvertures de ventilation

$\dot{h}_w$: énergie absorbée par les murs et les dalles du compartiment (convection et rayonnement)

$\dot{h}_o$: énergie perdue par rayonnement à travers des ouvertures de ventilation

$\dot{h}_g$: énergie nécessaire pour l'échauffement de l'air dans le compartiment

$\dot{h}_v$: énergie absorbée par l'action des sprinklers

L'équation différentielle du bilan des masses est:

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_t + \dot{R} + \dot{m}_w) = 0 \quad (6)$$

où:

$\dot{m}_g$: masse de gaz sortant du compartiment

$\dot{m}_t$: masse d'air entrant dans le compartiment

$\dot{m}_w$: masse de l'eau des sprinklers (peut être négligée)

$\dot{R}$: masse des matériaux en combustion

En établissant des relations physiques entre les termes énergétiques de l'équation (5), en déterminant les températures à l'aide de l'équation de Fourier et en tenant compte de l'équation (6), il est possible d'écrire les équations suivantes:

$$F = F(T_g, T_w, \dot{m}_t)$$

$$U = U(T_g, T_w)$$

$$M = M(T_g, \dot{m}_t)$$

où figurent T_g , T_w et $\dot{m}_t$ comme inconnues.

T_g = température de l'air dans le compartiment

T_w = température de l'élément en béton

$\dot{m}_t$ = masse de l'air entrant dans le compartiment

Les équations F , U et M se résolvent à l'aide de l'ordinateur par la méthode «pas à pas». Pour le pas, on prend l'intervalle de temps de 1 à 10 secondes. De cette façon, on peut obtenir la température du gaz dans le compartiment en fonction du temps, aussi bien que la température dans une section d'un élément en béton.

Connaissant les propriétés mécaniques du béton et de l'acier en fonction de la température, il est possible de calculer la résistance effective de l'élément à n'importe quel moment. La résistance minimale est donc atteinte au moment où la température est maximale dans la section de l'élément.

Les éléments structuraux dimensionnés selon cette méthode «survivent» à l'incendie sans intervention des pompiers.

La figure 9 représente les courbes température/temps pour différents incendies naturels obtenues expérimentalement [8].

Les courbes théoriques (trait-point) calculées selon le modèle analytique présenté dans [9] correspondent parfaitement aux courbes expérimentales.

5. Conclusion

Les méthodes d'évaluation de la résistance des structures exposées à l'action du feu, au début purement empiriques, sont devenues de plus en plus analytiques avec le développement fulgurant des programmes très puissants à l'ordinateur.

Il est possible de prévoir déjà maintenant qu'à l'avenir les normes traiteront l'action du feu comme un cas de l'action accidentelle avec un concept semi-probabiliste.

$$\frac{\min R(t)}{\gamma_R} \geq S_d (\gamma_G \cdot G, \gamma_Q \cdot Q, \psi_1 \cdot Q_1, \dots, \psi_n \cdot Q_n)$$

où:

$\min R(t)$: résistance minimale sous l'action du feu

γ_R : facteur de résistance

S_d : sollicitation interne due aux différentes combinaisons des actions

G : poids propre

Q : action prépondérante

Q_b, Q_n : actions concomitantes

γ_G : facteur de charge du poids propre ($\gamma_G = 1$)

γ_Q, ψ_1, ψ_n : facteurs de charge des autres actions

($\gamma_Q \leq 1, \psi \leq 1$)

A l'aide des facteurs γ et ψ , on prend en considération la probabilité de l'action simultanée de toutes les charges.

Ainsi, le dimensionnement d'une structure exposée à l'action du feu devient

Bibliographie

- [1] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON: «Fire design of concrete structures», *Bulletin d'information*, N° 174, 1987.
- [2] CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT (CIB): *Design guide structural fire safety*, 1985.
- [3] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO): «Fire resistance tests - Elements of building construction», International standard 834, 1975.
- [4] BRYL, S.; FRANGY, T.; SCHNEIDER, U.: «Simulation von Modellbränden in Räumen», *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Heft 15, Zurich, 1987.
- [5] RADOJICIC, A.: «Les structures en béton face à l'incendie», Documentation SIA N° 93.
- [6] FAVRE, J.-P.: «L'intégration de la protection incendie au niveau de la conception des bâtiments. Les concepts de protection incendie et leur optimisation», (sera publié en 1990).
- [7] FONTANA, M.: «Simulation von Bränden in Parkgaragen», *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Heft 51-52/1988.
- [8] BUTCHER, E.G.; CHITTY, T.B.; ASHTON, L.A.: «The temperature attained by steel in building fires», *Fire Research Technical Paper*, N° 15, Joint Fire Research Organization, Borehamwood, Herts, 1966.
- [9] BUTCHER, E.G.; BEDFORD, B.K.; FARDELL, P.J.: «Further experiments of temperatures reached by steel in building fires», Symposium No. 2 Behaviour of Structural Steel in Fire, held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts on 24th January, 1967; Proceedings, London, 1968.
- [10] MAGNUSSON, S.E.; THELANDERSSON, S.: «Temperature/time curves for the complete process of fire development. A theoretical study of wood fuel fires in enclosed spaces», *Acta Polytechnica Scandinavica*, Ci 65, Stockholm, 1970.
- [11] RECOMMANDATION SIA 183 «Brandschutz», édition 1989.
- [12] ANDERBERG, Y.; PETTERSON, O.; THELANDERSSON, S.; WICKSTRÖM, U.: «Fire engineering design of concrete structures», Manual (en préparation).

une vérification complémentaire de l'analyse structurale effectuée par l'ingénieur.

Adresse de l'auteur:

Alexandre Radojicic
Ingénieur SIA
1^{er} assistant à l'IBAP-EPFL
20, rte de Praz-Véguey
1022 Chavannes-près-Renens