

Dimensionnement au feu des charpentes métalliques: simulations numériques

Autor(en): **Schleich, Jean Baptiste**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **113 (1987)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76392>

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.

Dimensionnement au feu des charpentes métalliques : simulations numériques

par Jean Baptiste Schleich, Luxembourg

Lorsqu'un incendie se déclare dans une construction, d'importants dommages sont inévitablement causés aux personnes et aux biens, si l'ossature du bâtiment vient à s'effondrer. Une bonne résistance au feu de la structure portante est une condition insuffisante mais nécessaire pour préserver l'intégrité d'une construction, secourir les occupants et donner aux sapeurs-pompiers le temps d'intervenir efficacement. Par conséquent, le besoin de disposer de modèles analytiques permettant de simuler le comportement thermique et statique des structures en cas d'incendie se fait de plus en plus sentir.

Des progrès considérables ont été réalisés en matière de conception de méthodes analytiques simples, particulièrement pour l'acier et les éléments mixtes acier-béton. Désormais, dans plusieurs pays, l'évaluation pratique de la résistance au feu des éléments de structure peut être effectuée au moyen de ces modèles de calcul simplifiés [1] [2] [3] [4] [5]¹.

Malheureusement, cette approche ne s'applique pas à toutes les situations pratiques ; ces méthodes sont même sérieusement limitées lorsqu'on veut analyser une structure de façon plus réaliste.

Simulations numériques

Au Département Ponts et charpentes de l'Université de Liège (Belgique), de nou-

velles recherches ont été réalisées sur des structures en acier et mixtes acier-béton, sous la conduite d'Arbed-Luxembourg et avec l'aide financière de la Communauté européenne du charbon et de l'acier [6]. Le premier but de cette étude était d'établir un programme d'ordinateur destiné à l'analyse de structures en acier et mixtes exposées au feu. Le calcul numérique en question est fondé sur la méthode des éléments finis, utilisant des éléments du type poutre à section transversale subdivisée en maillage rectangulaire. La structure soumise à des charges ou températures croissantes est analysée par itérations successives. Le problème thermique est résolu au moyen d'une méthode aux différences finies fondée sur l'équilibre thermique entre les mailles adjacentes de la section transversale.

Ce programme Ceficoss - abréviation de «Computer Engineering of the FIRE resistance for COMposite and Steel

Structures» - a été essentiellement développé pour et appliqué à des structures mixtes et en acier.

En fait, les lois relatives aux propriétés des matériaux figurant dans ce programme sont bien sûr fonction de la température. Les relations pour l'acier et le béton, prévues pour l'instant mais pouvant toujours être améliorées par la suite, sont données aux figures 1 à 3.

La figure 1, représentant le diagramme contraintes-dilatations de l'acier, montre que l'effet d'écroûissage a été pris en considération par le biais d'un palier d'étréage légèrement incliné. En effet, suivant des essais pratiques de comportement au feu, cet effet d'écroûissage de l'acier influence sérieusement les déformations totales à température élevée [6] [7].

La figure 2 montre le diagramme contraintes-dilatations du béton, dont les contraintes diminuent pour des valeurs élevées des dilatations [8] [9].

La figure 3 précise les lois de la conductibilité thermique et de la chaleur spécifique de l'acier et du béton [2] [10].

Le principe de l'organigramme du programme Ceficoss est illustré à la figure 4. A température ambiante, la charge est appliquée de manière progressive ; à chaque augmentation de charge, l'équilibre de la structure est rétabli suivant la méthode Newton-Raphson. Lorsque la charge de service est atteinte, elle est maintenue constante au cours de la simulation d'incendie qui suit. A présent, les températures de chaque maille des sections transversales sont calculées à des intervalles de temps très courts. Après simulation de l'incendie pendant environ une minute, l'analyse thermique est interrompue. La partie statique du programme calcule alors les déplacements de la structure pour les tempéra-

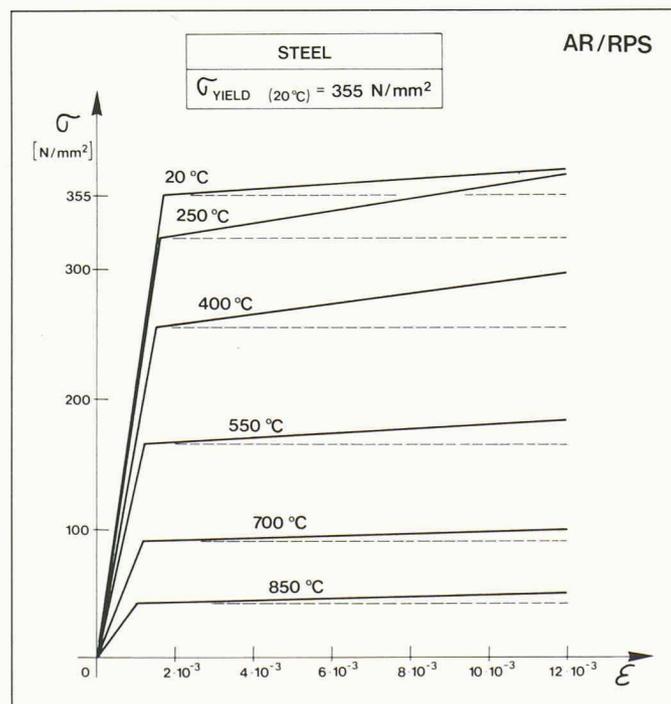


Fig. 1. — Diagramme contraintes-dilatations de l'acier à diverses températures.

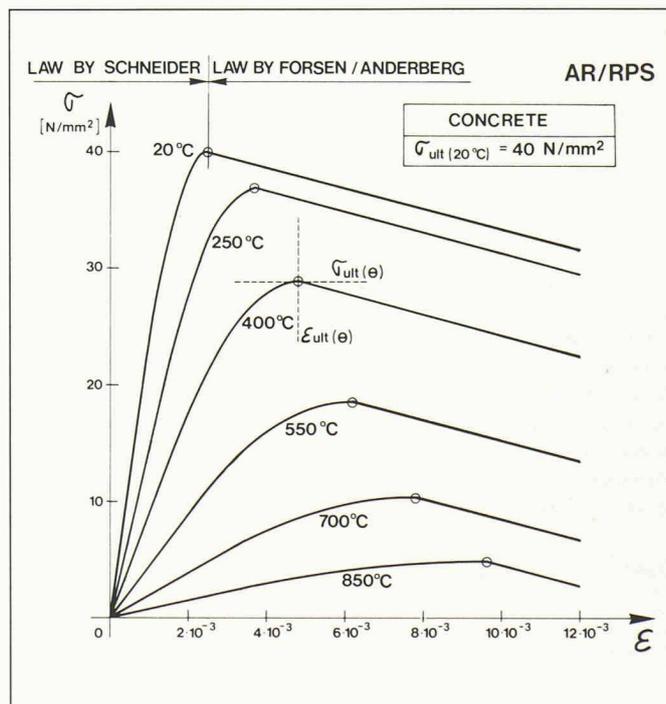


Fig. 2. — Diagramme contraintes-dilatations du béton à diverses températures.

res obtenues à ce moment, après quoi la méthode Newton-Raphson est de nouveau utilisée afin de rétablir l'équilibre.

Cette procédure consistant en des calculs thermiques et statiques alternés est poursuivie jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de rétablir l'équilibre de la structure. Ce moment correspond au temps de résistance ultime au feu de l'élément de structure étudié.

Afin de vérifier les résultats de simulation fournis par le programme Ceficoss et d'évaluer de manière plus précise certains paramètres physiques fondamentaux, il fut décidé de procéder à une nouvelle série d'essais de comportement au feu à l'échelle réelle et en se fondant sur la courbe de température ISO-834. Cela permit de mieux comparer les résultats de la simulation numérique aux résultats des essais pratiques. Il s'en dégagea par ailleurs des enseignements des plus intéressants au sujet d'un nouveau type de structure mixte mis au point par l'Arbed [11] [12] [13] [14].

Essais à l'échelle réelle

1. Tests du comportement au feu sous charge de colonnes en acier, protégé ou non, et de colonnes mixtes

A l'Université de Gand [15] furent réalisés des essais sur colonnes d'une longueur de 4,14 m, soumises à une charge longitudinale présentant une excentricité de 180 mm par rapport à l'axe faible. Le profil d'acier testé était une poutrelle américaine à larges ailes W 14 × 16 × 500 qui, dans le cas d'une colonne, n'était pas protégé contre l'action directe du feu. Ces essais ont montré qu'une massivité importante - le facteur de forme F/V de ce profilé d'acier était de 27 m⁻¹ - fournit une bonne résistance au feu même à des profilés en acier non protégé. Seuls des logiciels de calcul numérique, définissant le gradient de température sur l'épaisseur de l'acier, permettent de prédire correctement le comportement au feu d'éléments en acier massif non protégé. De fait, l'essai donna lieu à un

temps de résistance au feu de 45 min, alors que la simulation suivant Ceficoss permettait de prédire 46 min. Le champ des températures calculées, correspondant à ce premier type d'essais, est donné à la figure 5.

Des colonnes mixtes spéciales furent testées dans le four d'essai à Gand. L'une de ces colonnes était composée de trois profilés laminés en double T, soudés ensemble et remplis de béton entre les ailes. Le béton de cette colonne, de section transversale octogonale, ne comportait pas d'armature (fig. 6). Le programme Ceficoss donnait une résistance au feu de 170 min, correspondant à 99% du temps effectif mesuré de 172 min. Au cours de l'essai, cette colonne d'une longueur de 4,14 m eut un comportement excellent, malgré les quatre ailes en acier visibles et donc directement exposées à l'action du feu.

Deux colonnes du type AF 30/120 furent testées à l'Université de Brunswick [16], avec une excentricité de charge de 98 mm par rapport à l'axe faible. Ces colonnes

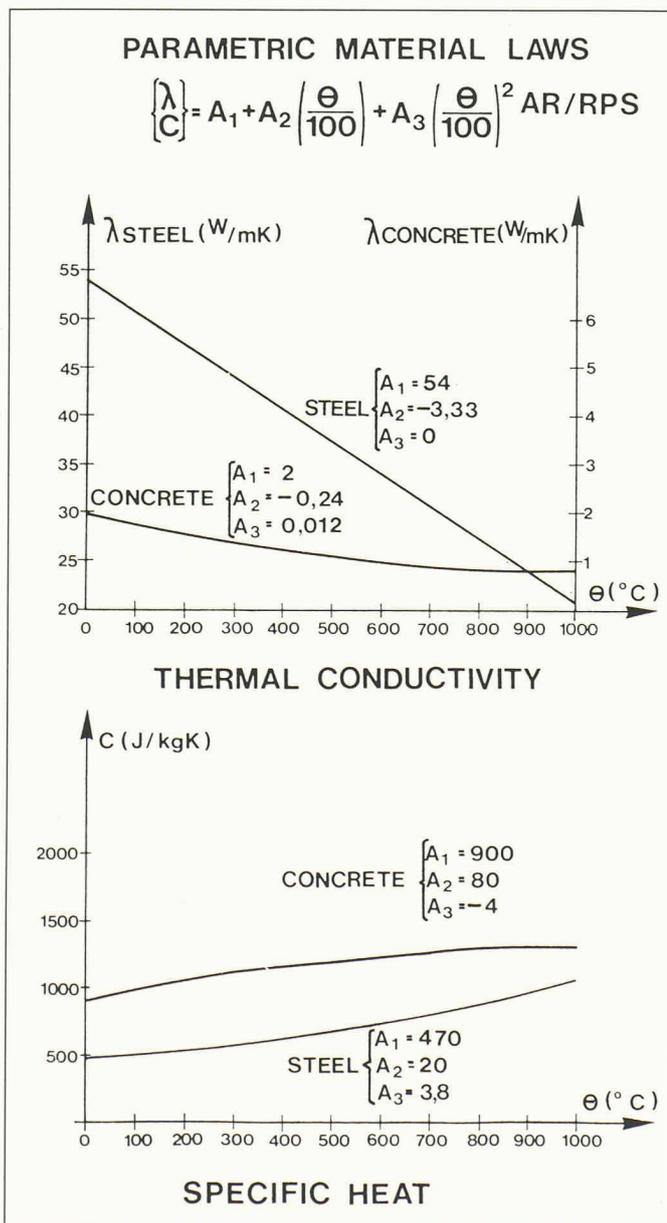


Fig. 3. - Acier et béton : conductibilité thermique et chaleur spécifique.

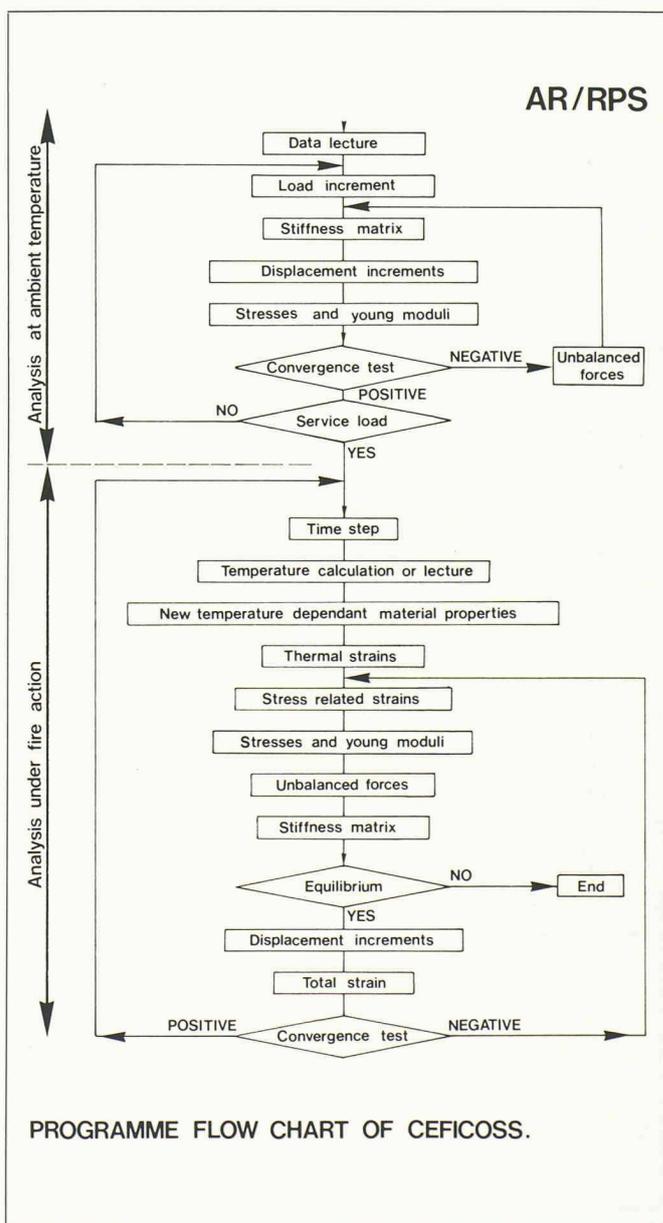


Fig. 4. - Organigramme d'une simulation d'incendie.

avaient des longueurs respectives de 3,74 m et 5,71 m. Pour cette dernière colonne, l'essai de comportement au feu fournit un temps de résistance de 120 min, alors que la simulation par Ceficoss donnait 114 min (95%).

Afin de pouvoir reprendre des moments de flexion plus grands autour de l'axe faible, il est avantageux de remplacer les barres d'armature du béton par des profilés en T soudés sur l'âme du profil principal (fig. 6). Deux colonnes de ce type, d'une longueur de 5,71 m, furent testées avec succès à Brunswick [16]. Pour la colonne présentant une excentricité de charge de 150 mm, le temps de résistance au feu mesuré fut de 157 min, alors que la

simulation numérique prévoyait 140 min. Les valeurs calculées et mesurées des déformations longitudinales et transversales correspondent par ailleurs fort bien.

2. Tests du comportement au feu sous charge de poutres mixtes

Quatre poutres furent testées dans le four d'essai adéquat à Gand [15]. Ces poutres étaient constituées du profil mixte AF supportant une dalle en béton, normalement reliée par l'intermédiaire de gou-

jons connecteurs à l'aile supérieure du profil en acier. La première poutre testée, à section transversale en forme de T, était isostatique avec une portée de 6 m. En appliquant le critère de la flèche $f \leq L/30$ pour définir le temps de résistance au feu, la correspondance entre le résultat de l'essai (171 min) et la simulation (165 min) se révèle très bonne (96%).

Pour le quatrième essai, aucun goujon connecteur n'avait été installé entre la poutrelle mixte AF et la dalle de béton,

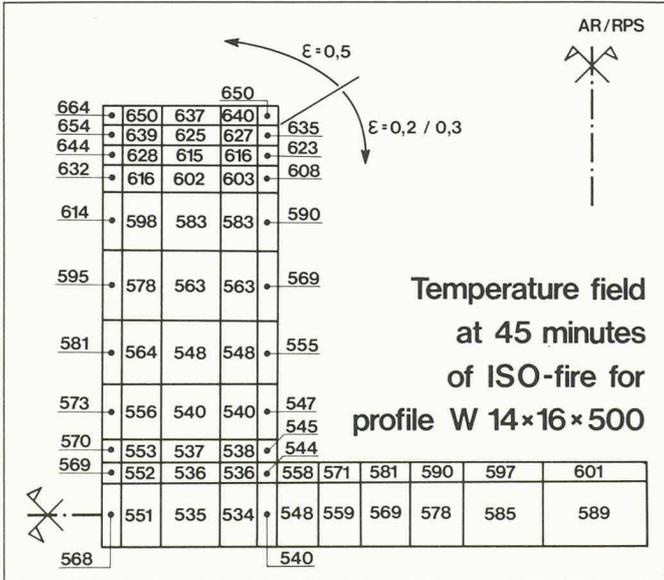


Fig. 5. - Champ des températures calculé à l'intérieur du profil d'acier W 14 x 16 x 500.

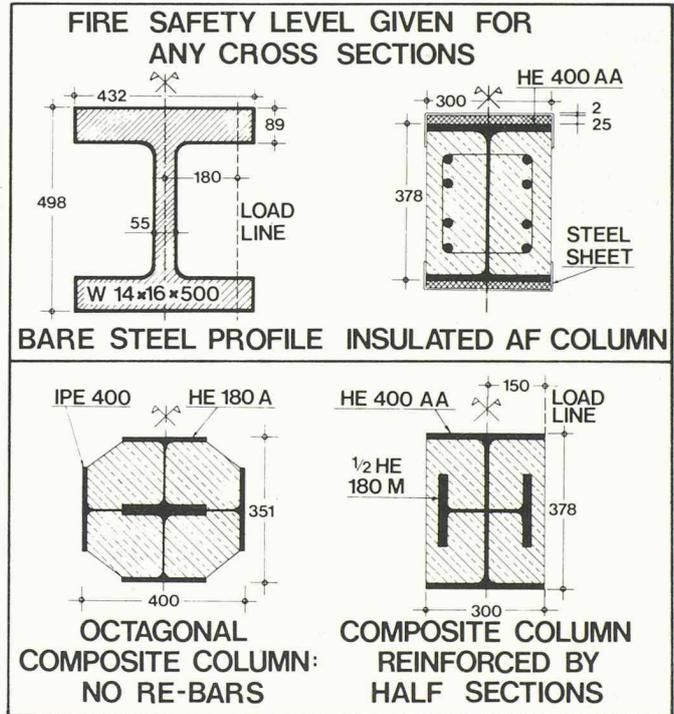


Fig. 6. - Diverses sections transversales de colonnes à base de profils laminés.

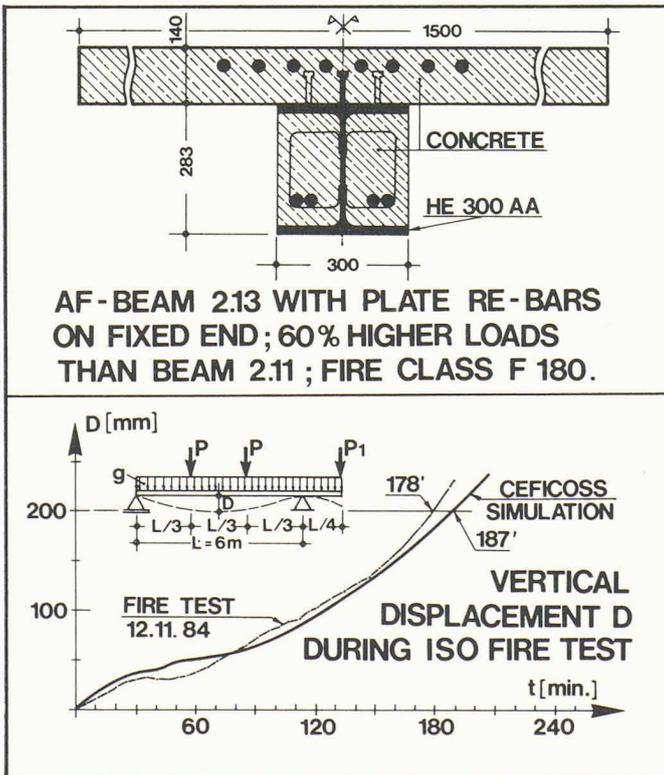


Fig. 7. - Flèche mesurée et calculée à mi-portée d'une poutre mixte appuyée-encastée.

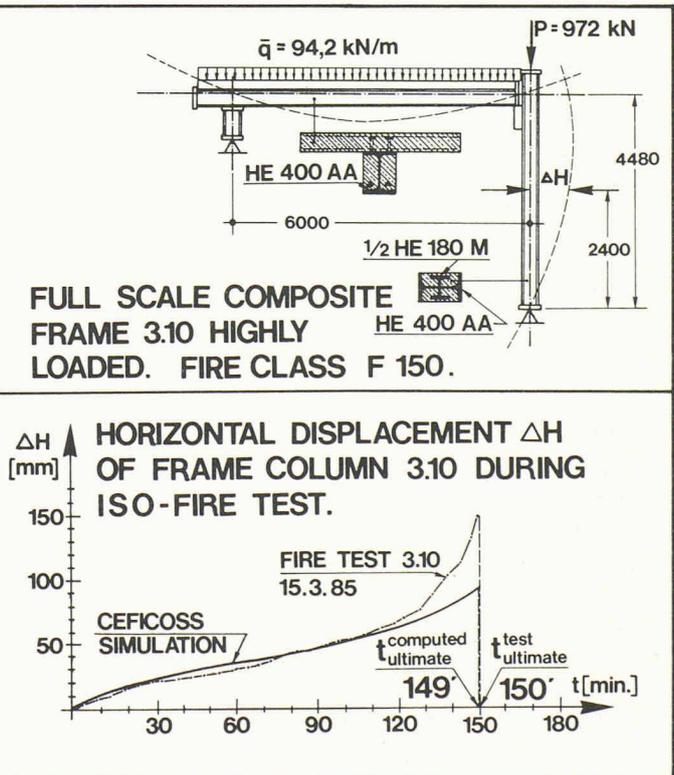


Fig. 8. - Colonne et poutre du type de cadre testé avec déformation latérale de la colonne.

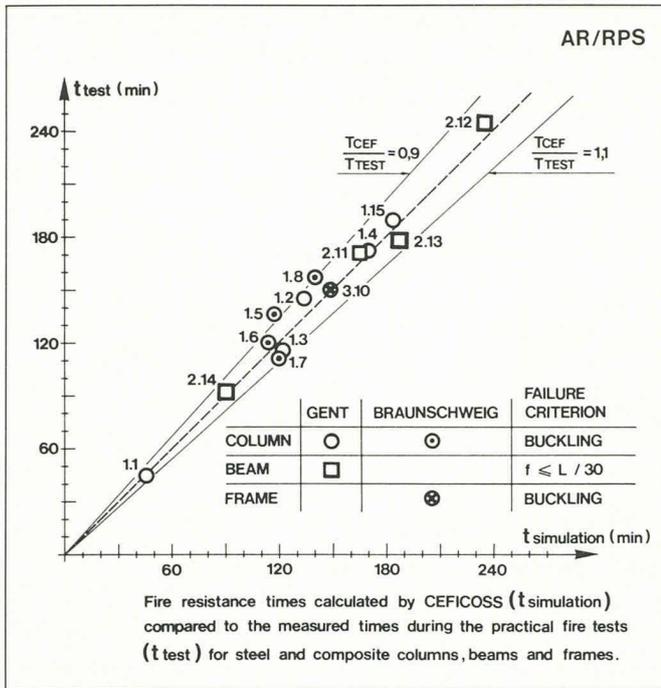


Fig. 9. — Résumé des différents essais de résistance au feu.

qui reposait donc simplement sur l'aile supérieure du profil métallique. La dalle devait être prise en compte dans le calcul de la distribution des températures, mais n'intervenait pas dans la résistance statique de la poutrelle. Dans ce cas également, les temps de résistance au feu mesurés au cours de l'essai (92 min) et calculés par Ceficoss (90 min) concordent fort bien (98%). Les deuxième et troisième poutres mixtes, toutes deux avec une portée libre de 6 m, furent tes-

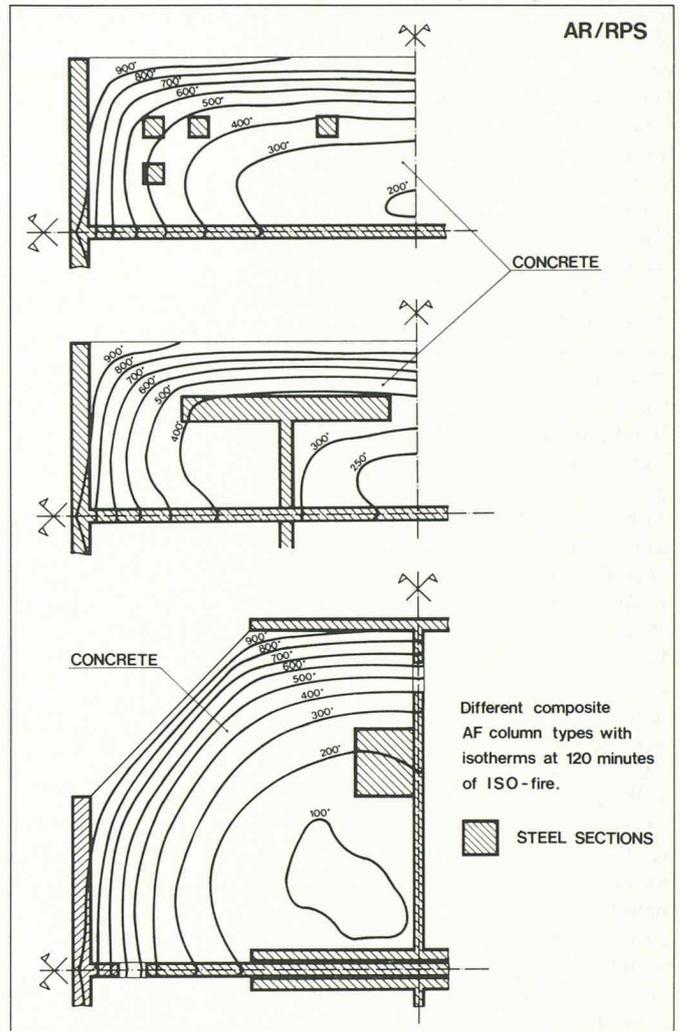


Fig. 10. — Champ des températures dans quelques sections transversales de colonnes mixtes.

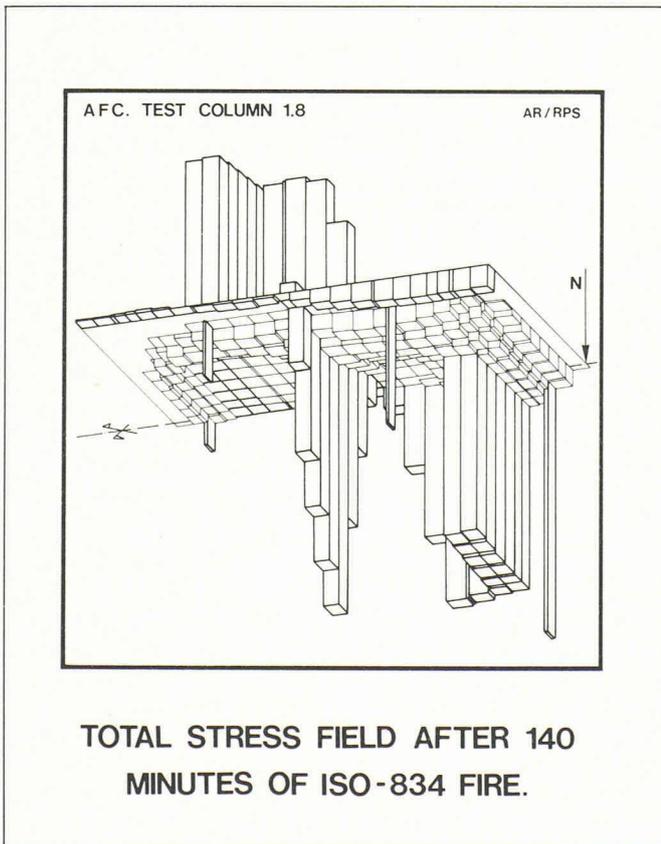
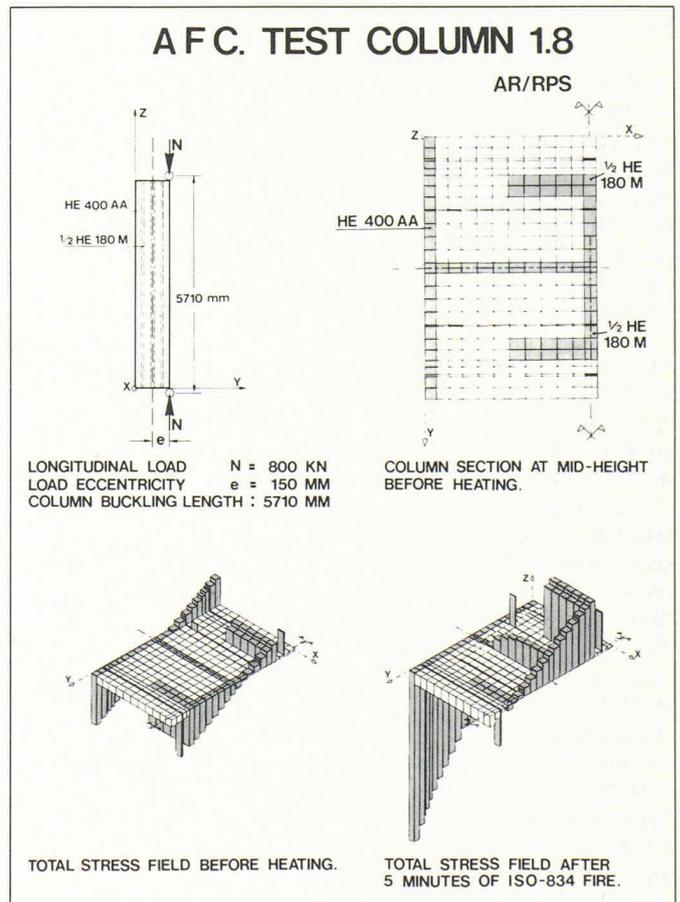


Fig. 11. — Colonne mixte à charge excentrée, avec champ des contraintes totales intérieures.



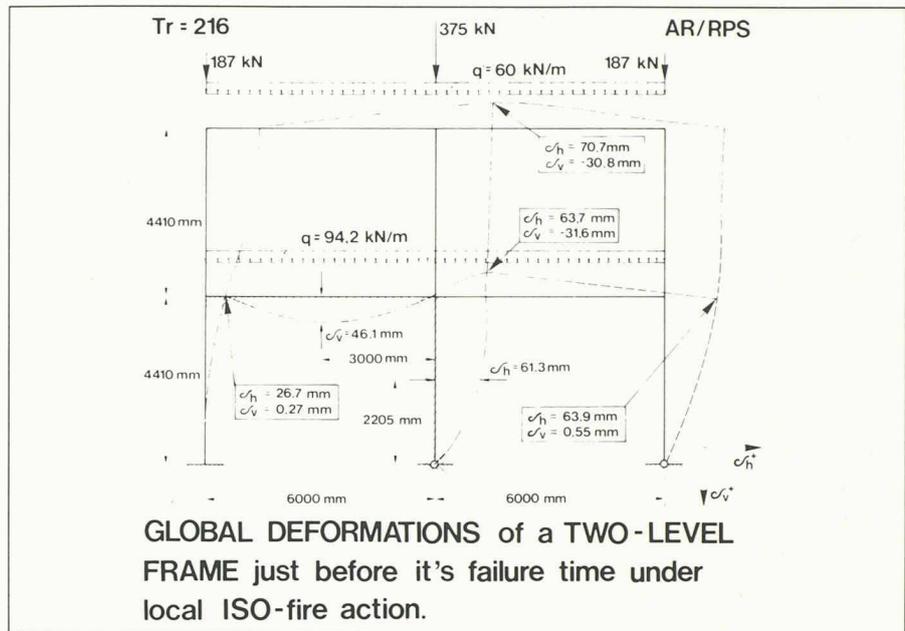
tées avec une extrémité simplement appuyée et l'autre extrémité pratiquement encastrée. Dans les deux cas, une rotule plastique prévue par la simulation numérique fut observée à proximité de l'encastrement. Les temps de résistance au feu selon le critère de la flèche $f \leq L/30$, calculés suivant Ceficoss et mesurés au cours des essais, concordent parfaitement. La figure 7 montre l'évolution de la flèche mesurée et simulée pour la troisième poutre testée.

Des conclusions pratiques très intéressantes peuvent être tirées de ces quatre essais sur poutres mixtes. Comme illustré lors du quatrième essai, la classe ISO F 90 peut être garantie par ce type de poutre, même sans aucune collaboration statique de la part de la dalle en béton, et malgré un niveau de charge très élevé (46,1 kN/m). Il est bien sûr important de profiter de l'avantage de la collaboration entre dalle en béton et poutrelle mixte AF, étant donné que le temps de résistance au feu monte de 92 min, cas de la quatrième poutre testée, à 171 min, pour la première poutre. De plus il est avantageux de tenir compte de la continuité réelle des poutres, sans pour autant renforcer la dalle en béton, comme illustré par l'essai sur la seconde poutre mixte, dont le temps de résistance au feu est allé jusqu'à 244 min. Cependant, le meilleur choix consiste évidemment à renforcer la dalle en béton au droit de l'appui continu, ce qui permet de reprendre des charges de loin supérieures; en effet, la troisième poutre testée, soumise à une charge de 74,5 kN/m, pouvait ainsi pratiquement être rangée dans la classe ISO F 180 (fig. 7).

3. Tests du comportement au feu sous charge de cadres mixtes

Une étude fort utile, dorénavant réalisable au moyen du programme de calcul numérique Ceficoss, est l'analyse de l'effet d'un feu sur l'ensemble d'une ossature. Bien entendu, il n'existe aucun four capable de tester une construction entière soumise à l'action d'un incendie. Cependant, l'un des fours de l'Université de Brunswick permet de tester des cadres simples composés d'une colonne et d'une poutre. Dès lors, deux essais pratiques furent réalisés en 1985 par l'Arbed sur des demi-cadres à l'échelle réelle [17]. Ces essais confirmèrent par ailleurs les résultats numériques fournis par le programme de simulation [6]. Les types de colonnes et de poutres composant ces deux cadres sont donnés à la figure 8. Pour l'ossature 3.10 soumise à la plus forte charge, cette figure montre également la bonne concordance entre les déplacements horizontaux mesurés et calculés pratiquement à mi-hauteur de la colonne.

Afin d'apprécier pleinement cette tentative réussie, sans précédent, de simuler des essais plus complexes que de simples poutres ou colonnes mixtes, il serait utile



GLOBAL DEFORMATIONS of a TWO-LEVEL FRAME just before it's failure time under local ISO-fire action.

Fig. 12. - Déformation globale d'une ossature à deux niveaux.

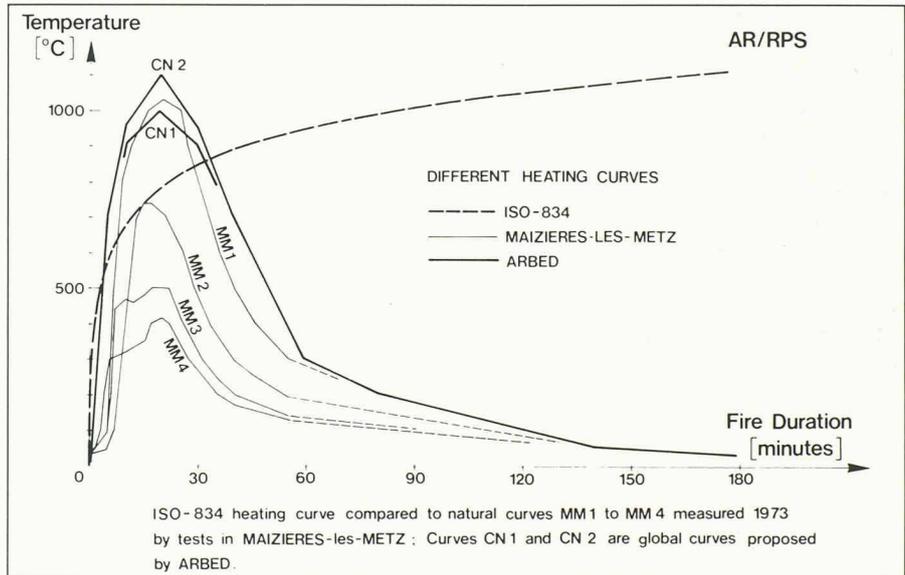


Fig. 13. - Courbes d'échauffement naturel MM1 à MM4, comparées à la courbe ISO-834.

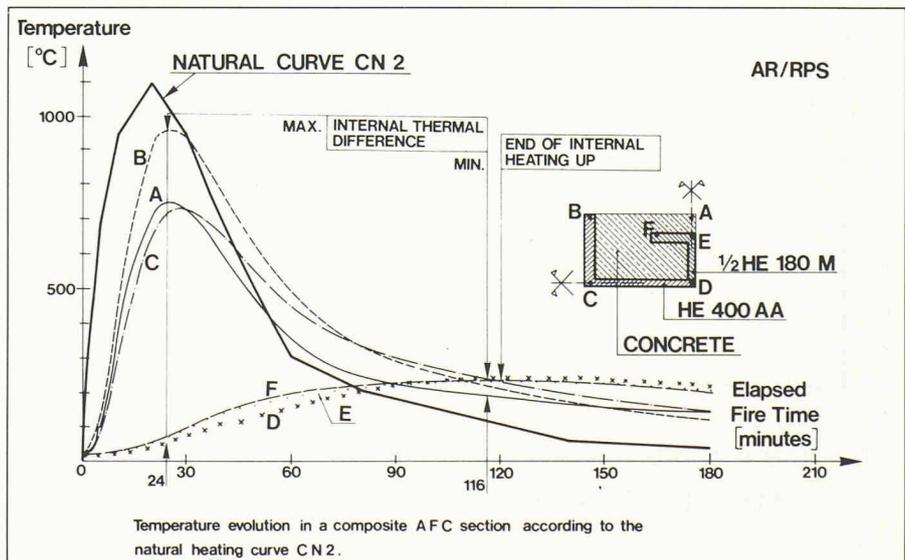


Fig. 14. - Evolution de la température à l'intérieur d'une section transversale mixte par suite de la courbe d'échauffement naturel CN2.

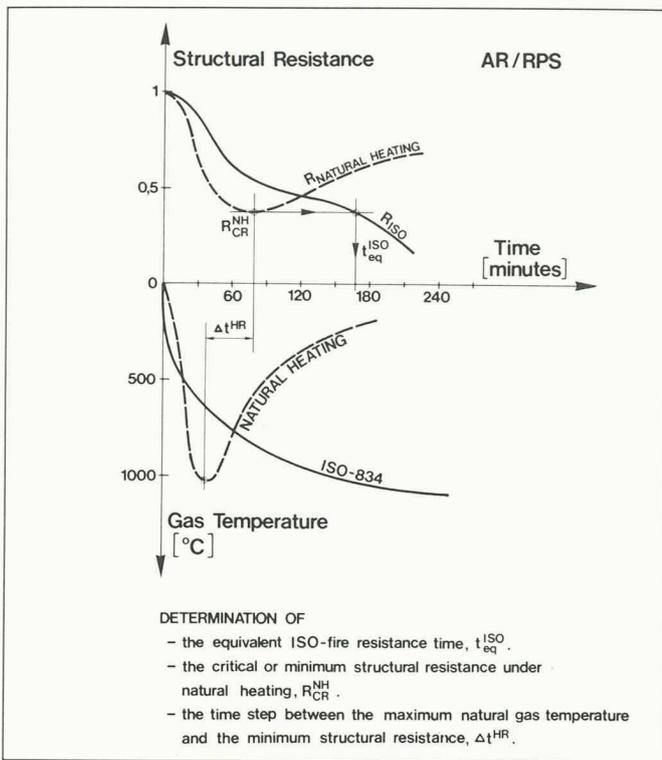


Fig. 15. — Concept du temps de résistance ISO équivalent.

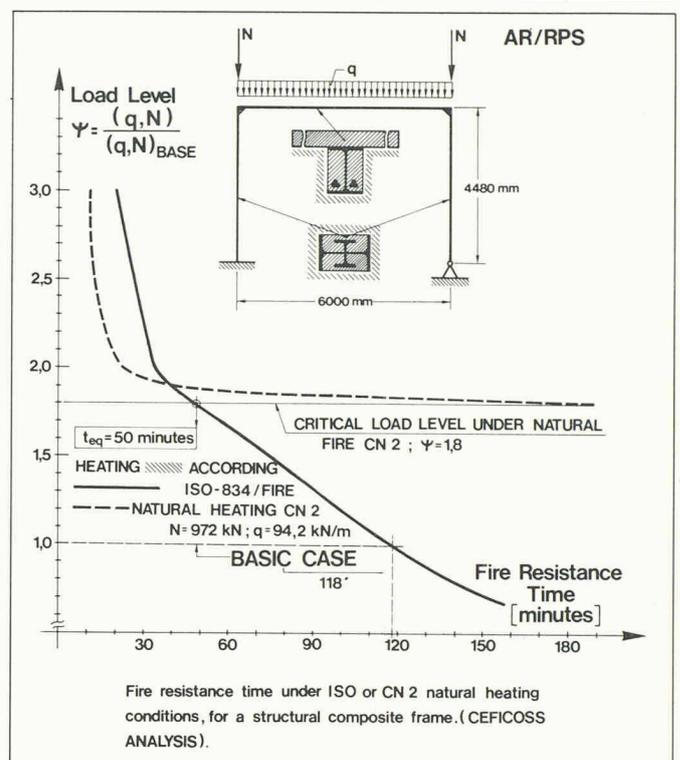


Fig. 16. — Analyse d'un cadre sous feu ISO et sous feu naturel.

d'examiner la liaison rigide entre poutre et colonne. L'effort de cisaillement y est repris par l'intermédiaire d'une plaque épaisse soudée à l'aile de la colonne, alors que le moment de flexion négatif peut être repris grâce aux boulons situés dans la dalle de béton relativement froide. De plus, cet assemblage poutre-colonne est très commode, puisqu'il permet de monter sur chantier des éléments mixtes entièrement préfabriqués.

En conclusion de ces résultats d'essais et de simulations, il faut admettre qu'un calcul numérique à l'aide de Ceficoss permet de décrire de façon très réaliste le comportement d'une structure soumise à un feu ISO. La figure 9 montre une présentation générale de tous les essais réalisés jusqu'à présent. On peut y relever la remarquable concordance entre les résultats théoriques et les résultats des essais [6] [18].

L'ingénierie de la résistance au feu

Ceficoss est un programme de calcul numérique général et thermomécanique permettant de prédire le comportement au feu des éléments constitutifs d'une construction tels que colonnes, poutrelles ou cadres rigides. Ces éléments de structure peuvent être composés soit de profilés métalliques, protégés ou non, soit de profilés mixtes de sections transversales quelconques (fig. 6). Ceficoss est un nouvel outil permettant de procéder à une multitude d'analyses, en vue d'améliorer de façon substantielle nos connaissances dans le domaine de la sécurité réelle au feu des structures.

En tout premier lieu, les champs des températures et des contraintes intérieures

peuvent être déterminés pour n'importe quelle section transversale. De ce fait le dimensionnement au feu est optimisé et les frais d'une protection excessive contre l'incendie sont évités. Les armatures métalliques peuvent être prévues à des endroits judicieusement choisis grâce à la connaissance des champs thermiques (comme ceux de la fig. 10). Les champs des contraintes intérieures peuvent nous fournir l'explication physique correcte pour certains types de défaillances.

Dans cette optique, la figure 11 montre une colonne mixte soumise à une charge excentrée, composée du profil européen à larges ailes HE 400 AA et renforcée par

deux demi-profilés 1/2 HE 180 M noyés dans du béton. On peut y observer le champ des contraintes intérieures provoquées par l'action simultanée de la charge excentrée N et du champ des températures différentielles intérieures, donné à 140 min d'un échauffement ISO; c'est à ce moment que se produit le flambement de la colonne. La représentation tridimensionnelle des contraintes montre la compression du béton, dont les couches extérieures sont écrasées bien avant le flambement. Alors que l'âme du profil principal HE 400 AA se trouve en état de compression due à son niveau d'échauffement supérieur à celui des demi-profilés, ces derniers comprennent

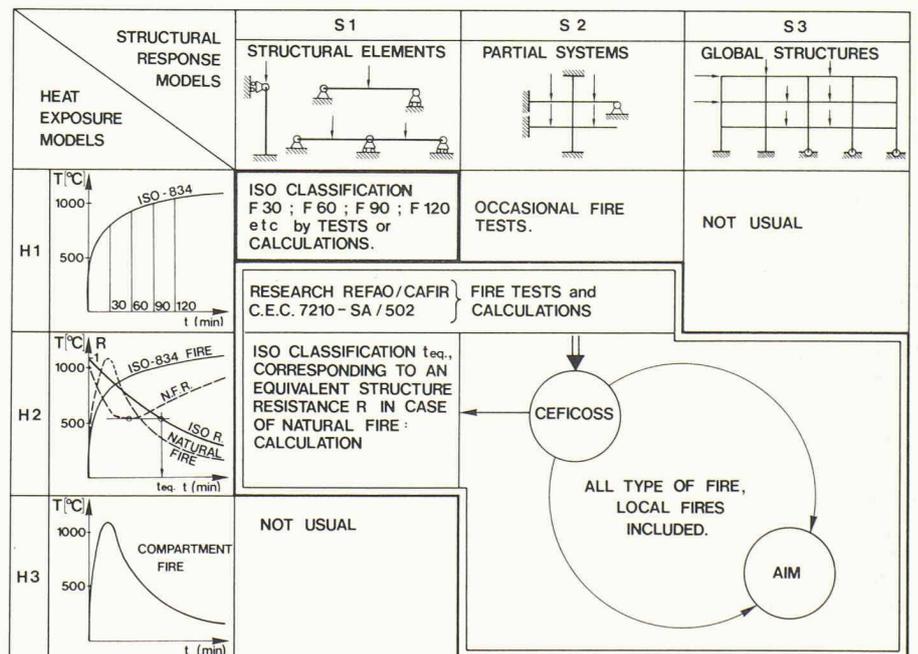


Fig. 17. — Modèles d'échauffement et modèles de calcul statique.

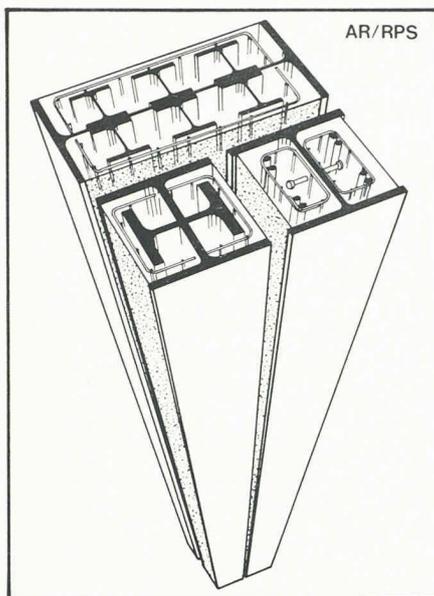


Fig. 18. — Colonnes mixtes à sections transversales rectangulaires avec semelles en acier visibles.

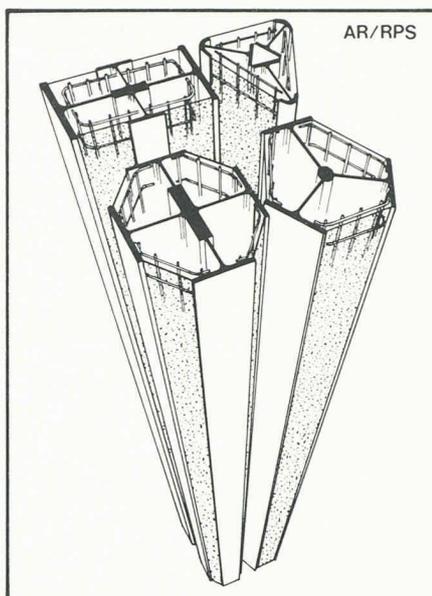


Fig. 19. — Colonnes mixtes à sections transversales polygonales avec surfaces en acier visibles.

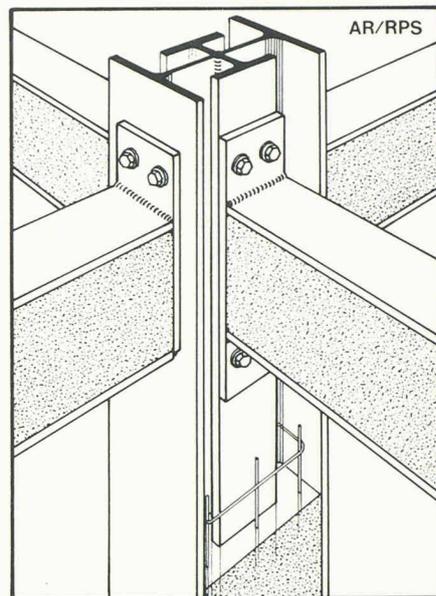


Fig. 20. — Construction mixte AF avec assemblages poutrelle-colonne.

des zones de traction et de compression et supportent dès lors principalement le moment de flexion (test 1.8 [6]).

De plus, la déformation globale d'une construction peut être calculée afin de montrer soit son évolution en fonction du temps, soit sa situation juste avant la ruine. L'exemple de la figure 12 montre la déformation d'une ossature à deux niveaux soumise à un feu ISO local. Cette ossature, comportant des colonnes et des poutres constituées de sections transversales mixtes identiques à celles de la figure 8, présente une déformation continue et logique encore juste avant la ruine. L'effondrement se produit après 216 min de feu ISO local, par flambement de la partie inférieure chauffée de la colonne centrale.

L'ingénieur-conseil disposera à l'avenir d'outils pratiques de dimensionnement au feu, par exemple pour colonnes soumises à des charges centrées ou pour colonnes supportant charges verticales N et moments de flexion M [19]. Ces diagrammes d'interaction N - M , tenant compte de la longueur de flambement des colonnes, seront établis pour différentes classes au feu ISO.

En outre il sera dorénavant possible de considérer, à côté de la courbe standard ISO-834, toute autre courbe d'échauffement naturel. La figure 13 montre les courbes naturelles MM1 à MM4, déterminées sur base d'essais pour différentes charges au feu de 60 à 15 kg de bois par m^2 de plancher et un facteur d'ouverture de 0,157 $m^{1/2}$ [20] [21]. C'est la courbe d'enveloppe globale CN2 qui sera utilisée dans les exemples de calcul suivants.

Notre connaissance du comportement au feu des structures sera sérieusement enrichie par l'étude de l'évolution des champs des températures intérieures de sections transversales mixtes soumises à un feu naturel. La figure 14, correspon-

dant à une section renforcée par des profils en T, montre que ces demi-profilés n'atteignent que 240°C au maximum. Cela signifie que, dans le cas d'un échauffement naturel, il existe un seuil critique de charge en dessous duquel l'élément de structure ne saurait plus périr. La figure 15 donne une généralisation de ce concept en définissant le temps de résistance ISO équivalent pour lequel la résistance de la structure soumise à un feu ISO est identique à la résistance minimale de la structure soumise à un feu naturel donné [22].

Une première tentative fut réalisée de calculer par Ceficoss le temps de résistance ISO équivalent par rapport à la courbe d'échauffement naturel CN2, pour un cadre de structure d'un niveau, illustré à la figure 16. Lors du calcul de cette structure soumise à un niveau de chargement de base $\psi = 1$, la résistance au feu ISO est de 118 min. Cependant, il n'apparaît aucune défaillance pour ce même niveau de charge lors de l'échauffement naturel CN2. Afin d'atteindre la résistance minimale de la structure soumise à ce feu naturel, le niveau de charge doit être augmenté à $\psi = 1,8$. Néanmoins, le temps de résistance correspondant au feu naturel CN2 est alors encore supérieur à 180 min, tandis que le temps de résistance ISO équivalent n'est plus que de 50 min. Etant donné que l'échauffement naturel correspondant à la courbe CN2 peut toutefois être considéré comme un incendie relativement sévère, cet exemple confirme clairement que des structures partielles ou globales devraient être dimensionnées, soit en fonction d'un échauffement naturel, soit en fonction d'une classe inférieure de feu ISO, par exemple F 60 au lieu de F 120. Bien entendu, l'analyse statique sous charges de service et à température ambiante doit toujours être effectuée et

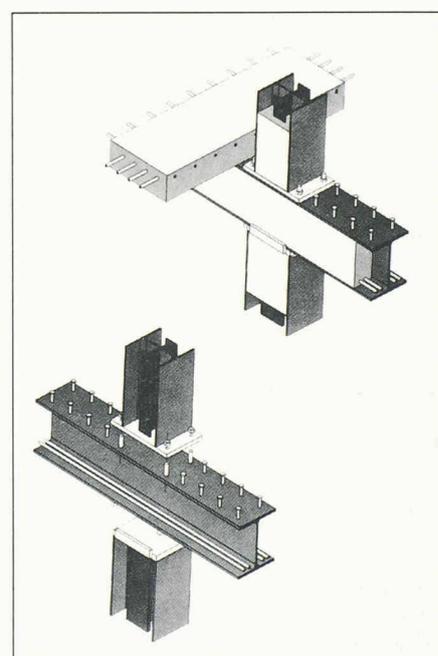


Fig. 21. — Eléments mixtes AF complètement préfabriqués.

deviendra probablement plus souvent le cas de charge déterminant.

Ces considérations conduisent à la matrice de la figure 17 montrant les relations possibles entre les modèles d'échauffement et les modèles de calcul statique. Ceficoss, en tant que programme numérique, thermomécanique et général, permettra d'exploiter pratiquement la matrice H-S proposée par la CECM et le CIB [22] [23].

Néanmoins, pour être complet, il faut relever que le dimensionnement d'une structure soumise à un feu naturel n'est possible actuellement que de façon qualitative. En effet, les lois de comportement du béton sont encore trop mal connues pour la phase de refroidissement d'un feu naturel.

Le point de vue de l'architecte

En fin de compte, cette méthode de calcul numérique contribuera à améliorer l'image de marque de la construction en acier.

En effet, d'une part, le maître d'œuvre pourra être convaincu que des économies substantielles sont désormais garanties, étant donné qu'un niveau précis de sécurité incendie pourra être atteint sans entraîner de protection incendie excessive. De plus, tout élément de structure n'offrant pas la sécurité requise sera éliminé en connaissance de cause, de sorte que les pertes résultant de l'effondrement d'une construction suite à un incendie seront considérablement diminuées.

D'autre part, l'architecte aura enfin le libre choix en matière de forme et de composition des sections mixtes transversales des éléments de structure. Cependant, ce sont des éléments de construction à faces visibles en acier qui deviendront disponibles pour n'importe quel niveau de sécurité incendie. Cet aspect important est illustré dans les figures 18 et 19, qui montrent quelques possibilités de sections transversales pour colonnes mixtes, fondées sur les profils laminés en double T et présentant une alternance systématique des surfaces en acier et en béton. Ce « système de construction universelle AF » permet assurément la création d'éléments de construction parfaitement esthétiques et offre de vastes possibilités architecturales.

D'ailleurs, les caractéristiques suivantes rendent ce système mixte tout à fait compétitif :

- une flexibilité extrêmement élevée est garantie, étant donné que de nombreux types d'assemblage sont disponibles, offrant toujours une solution pratique réalisable comme le montre la figure 20;
- une rapidité de construction insoupçonnée peut être assurée, étant donné qu'une préfabrication complète est réellement possible suivant, par exemple, la figure 21;
- les sections transversales les plus petites possibles sont concevables, conduisant à des constructions plus élancées.

Conclusions

Les considérations qui précèdent expliquent pourquoi, jusqu'à présent, plus d'une trentaine de bâtiments ont été érigés en Europe sur la base des éléments de construction traditionnelle AF [3] [4] [5]. L'utilisation appropriée du programme numérique Ceficoss devrait cependant donner lieu à une plus grande expansion des éléments de construction universelle AF adaptables à n'importe quelle configuration technique [14] [24] [25] [26]. Cependant, il sera aussi possible, à l'avenir, d'apporter la preuve d'une certaine

Bibliographie

- [1] JUNGBLUTH, O.; FEYEREISEN, H.; OBEREGGE, O.: «Verbundprofilkonstruktionen mit erhöhter Feuerwiderstandsdauer», *Bauingenieur*, 55, 1980.
- [2] ECCS-TC3: *European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1983.
- [3] SCHLEICH, J. B.; HUTMACHER, H.; LAHODA, E.; LICKES, J. P.: «A New Technology in Fireproof Steel Construction», *Acier/Stahl/Steel*, 3, 1983.
- [4] SCHLEICH, J. B.: *Fire Safety, Design of Composite Columns*, Official Publication of the European Community, EUR 10116, Luxembourg, 1985.
- [5] JUNGBLUTH, O.: *Verbund- und Sandwichtragwerke*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1986.
- [6] Arbed-Research Center, Luxembourg/Department of Bridges and Structural Engineering, University of Liège, Belgium: *REFAO-CAFIR, Computer-Assisted Analysis of the Fire Resistance of Steel and Composite Concrete-Steel Structures*, CEC Research 7210/SA-502, Final Report, Luxembourg, March, 1986.
- [7] BABA, S.; NAGURA, H.: *Effect of material properties on the deformation of steel frame in fire*, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., vol. 2.1, 1985.
- [8] ANDERBERG, Y.: *Fire-exposed hyperstatic concrete structures, an experimental and theoretical study*, Lund Institute of Technology, 55, 1976.
- [9] SCHNEIDER, U.: *Behaviour of concrete at high temperatures*, Rilem Committee 44-PHT, 1983.
- [10] DOTREPPE, J. C.: *Méthodes numériques pour la simulation du comportement au feu des structures en acier et en béton armé*, thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur, Université de Liège, 1980.
- [11] Arbed S.A.: *BA 751, Eléments mixtes renforcés par demi-profilés / BA 785, Joint de colonne-poutrelle mixte / BA 796, Poutrelles composites polygonales*, Luxembourg, 1983/1985.
- [12] SCHLEICH, J. B.: «Tendance nouvelle en construction mixte acier-béton», *Echo de l'industrie (FEDIL)*, 3-4, Luxembourg, 1986.
- [13] FRANSSSEN, J. M.: «Comportement de profils massifs en acier soumis à l'incendie», *Construction Métallique*, 1, 1986.
- [14] BAUS, R.; SCHLEICH, J. B.: *Résistance au feu des constructions mixtes acier-béton, détermination d'un niveau précis de sécurité*, Mémoire CERES-Université de Liège, N° 59, mars 1986.
- [15] MINNE, R.; VANDELDELDE, R.; ODOU, M.: *Fire test reports No. 5091 to 5099*, Laboratorium voor Aanwending der Brandstoffen en Warmte-overdracht, University of Gent, 1985.
- [16] KORDINA, K.; HASS, R.: *Untersuchungsbericht Nr. 85636*, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Technische Universität Braunschweig, 1985.
- [17] KORDINA, K.; WESCHE, J.; HOFFEND, F.: *Untersuchungsbericht Nr. 85833*, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Technische Universität Braunschweig, 1985.
- [18] FRANSSSEN, J. M.: *Etude du comportement au feu des structures mixtes acier-béton*, thèse de doctorat, Université de Liège, février 1987.
- [19] Arbed-Recherches: *Outils pratiques de dimensionnement pour éléments mixtes acier-béton soumis à l'incendie, compte tenu de l'interaction entre l'effort normal N et le moment de flexion M*, Recherche CCE 7210-SA/504, RT3, Luxembourg, mars 1987.
- [20] ARNAULT, P.; EHM, H.; KRUPPA, J.: *Rapport expérimental sur les essais avec des feux naturels exécutés dans la petite installation, Maizières-lès-Metz*, Doc. CECM 3/73, 11F, 1973.
- [21] KRUPPA, J.: «Comportement des constructions métalliques lors d'incendies simulés, essais in situ du CTICM», *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, 443, mars-avril 1986.
- [22] ECCS-TC3: *European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, Design Manual*, Doc. ECCS, 35, 1985.
- [23] CIB W14: «Design Guide, Structural Fire Safety - CIB W14 Workshop Report», *Fire Safety Journal*, vol. 10 N° 2, March, 1986.
- [24] SCHLEICH, J. B.: *Numerical Simulations, a more realistic fire safety approach in structural stability. New Technology to reduce fire losses & costs*, International Conference in Luxembourg, Elsevier Science Publishers, London and New York, 2-3 October, 1986.
- [25] SCHLEICH, J. B.: *ISO-Fire resistance tests on full scale building elements, future developments by numerical simulation*, International meeting of fire research and test centres, ITSEMAP, Avila, 7-9 October, 1986.
- [26] SCHLEICH, J. B.: *New technical developments in steel construction*, Stalbyggnadsdagen SBI, Stockholm, 6-7 November, 1986.
- [27] Arbed-Recherches: *Outils pratiques de dimensionnement pour colonnes en acier non protégées soumises à l'incendie, avec prise en compte de l'interaction N-M*, Recherche CCE 7210-SA/505, RT1, Luxembourg, mars 1987.
- [28] Studiengesellschaft Für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl E.V.: *Untersuchungen zur realistischen Erfassung des Gesamtbauwerksverhaltens Brandbeanspruchung*, Forschung KEG 7210-SA/112, D-F-L-NL-UK, 1986-1989.

résistance au feu des constructions en acier même non protégé [27] [28]; en effet, il faut savoir procéder à une simulation plus réaliste des conditions d'environnement, notamment en analysant le comportement global des structures, en simulant l'incendie naturel et localisé, ainsi qu'en réduisant de façon logique les surcharges statiques en cas d'incendie.

Adresse de l'auteur:
Jean Baptiste Schleich
Chef de service du Département
Recherches et promotion technique
Structures
Arbed-Recherches
Luxembourg