

COMPORTEMENT DE POUTRE METALLIQUE A UNE SEULE TRAVEE SOUS DES CONDITIONS DE FEU

A. Kada*, **N. Benlakehal**, **B. Lamri***, **B. Achour****, **H. Bouchair*****

* *Université H.B.Bouali de Chlef, Département de Génie Civil, kada_abdel@yahoo.com*

***Université de Mostaganem, Département de Génie Civil*

*** *Polytech'Clermont-Ferrand (ex. CUST), Département Génie Civil*

RESUME

Le feu est l'une des actions accidentelles de très courte durée auxquelles les structures peuvent être exposées pendant leur durée de service ; et dans le contexte d'un incendie, l'acier à une mauvaise réputation. Bien qu'il soit incombustible, on lui reproche une faible résistance aux températures élevées en plus de faciliter la propagation de chaleur par conduction. Dans le cas d'un incendie majeur, les éléments métalliques sans protection sont endommagés ou ruinés. Ceci est principalement dû à une réduction de la capacité de résistance des éléments métalliques:

Ce travail présente une méthode d'analyse par l'ingénierie d'incendie appliquée au calcul de la résistance au feu des poutres et la prise en compte de la réduction des propriétés mécaniques des matériaux et les recommandations de l'EC3 dans l'évaluation des caractéristiques thermiques de l'acier.

Le comportement de poutres à une seule travée selon le teste de Cardington est comparé au test standard ISO 834.

Mots clés :

Charpente métallique, Acier, Feu, Protection incendie, Résistance au feu, Ingénierie incendie

1- Introduction:

D'énormes changements sont intervenus durant le demi siècle passé dans la conception des bâtiments de charpente métallique dont la structure est passée du simple au composite, et dans la philosophie de conception qui a évolué de l'approche élastique au calcul aux états limites. Les propriétés des matériaux ont été aussi améliorées et même la qualité des fournitures rarement naturelles est le plus souvent à base de fibre et de mousse.

Tous ces changements influent sur le comportement au feu de la structure qui doit être conçu en tenant compte de ce qui suit:

- Variations des propriétés thermomécaniques de l'acier
- Facteur de massivité de la section de l'élément en CM
- Choix ou non de la protection et de son type
- Des conditions aux limites de l'élément à analyser
- Résistance au Feu

De nombreux travaux de recherche, expérimentaux et de modélisations numériques ont été réalisés par des chercheurs tel que A. Nadjai de l'université d'Ulster [4], Bailey et Wang de l'université de Manchester, Vila Real de l'université d'Aviero, Buchanan de l'université de Canterbury, Franssen [8] de l'université de Liege dont le but est de mieux comprendre le comportement des éléments de structure sous des scénarios de feu les plus divers.

Notre travail expose l'implication de l'ingénierie incendie pour l'amélioration de la résistance des structures métalliques sous des conditions de feu.

La méthode par modèles simplifiés de l'Eurocode [1] a été adoptée dans ce travail en vue de comparer le problème du comportement de poutre dont la section est chauffée selon la courbe standard ISO834 par rapport au comportement réel selon les tests de Cardington.

2- Phases d'un incendie

Un incendie (Feu) réel dans un bâtiment se développe et décroît en fonction de l'équilibre de masse et d'énergie existant dans le compartiment où il se produit Figure 1.

L'énergie produite dépend de la quantité et du type de combustible disponible et de conditions de ventilation en plus des facteurs tel que l'inertie thermique et le taux de chaleur émis [3].

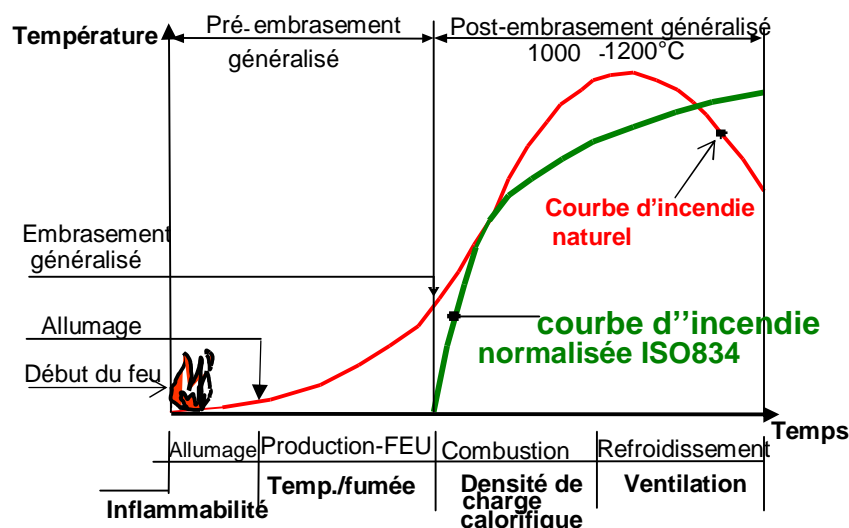


Figure 1: Phases d'un incendie naturel, en comparant les températures ambiantes à la courbe d'incendie conventionnel ISO 834.

3- Température :

Les durées de résistance au feu spécifiées dans la plupart des règles de bâtiment nationales concernent le comportement à l'essai lorsque l'augmentation de température est réalisée selon une courbe temps-température d'incendie "conventionnel" (ou "normalisé") internationalement agréée et définie dans l'ISO 834 Fig. 1. (spécification ISO, 1975) [4], qui est définie par :

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad \text{avec } t - \text{temps (minutes) et } T_0 - \text{température ambiante (}^{\circ}\text{C)}$$

4- Facteurs influents le comportement de l'acier sous l'effet d'incendie :

4.1- Propriétés thermiques de l'acier :

Chaleur spécifique

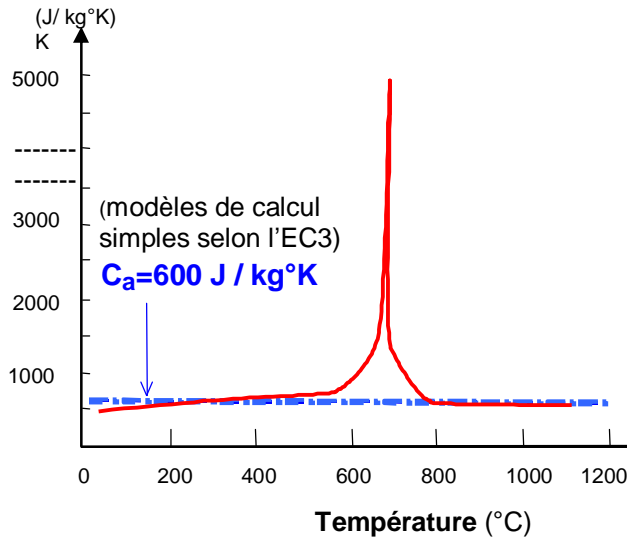


Figure 2 : Variation de la chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température.

Conductivité thermique

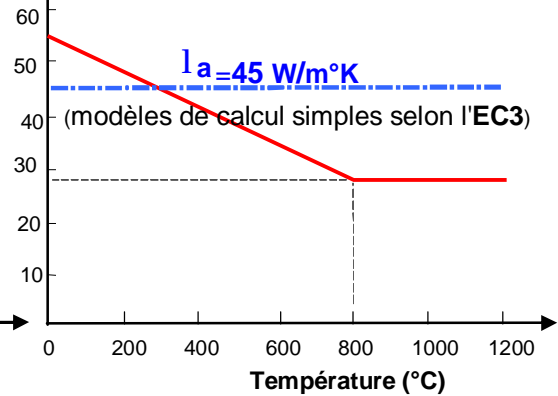


Figure 3 : Représentations de la variation de la conductivité thermique

- La **chaleur spécifique** C_p de l'acier. Elle varie plus ou moins avec la température dans la plus grande partie de la plage, comme on le voit dans la Fig. 2, mais sa valeur subit une modification très importante dans la plage de 700-800°C [8].
- La **conductivité thermique**. Une version simplifiée de la modification de conductivité avec la température, définie dans l'EC3, est illustrée dans la Fig. 7. L'utilisation de la valeur constante sécuritaire de 45W/m°K est autorisée des calculs de conception simples.

4.2- Propriétés mécaniques de l'acier:

La masse volumique de l'acier est de $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ et ne varie pas avec la température

La déformation de l'acier à hautes températures s'exprime par une variation de déformation.

Pour des températures ambiantes, le coefficient de dilatation est généralement égal à $11.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Pour des hautes températures la valeur du coefficient augmente et une rupture se produit entre 700 et 800°C.

L'eurocode3 [8] propose une valeur du coefficient égale à $14.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, d'où une élévation thermique de l'acier $\Delta L/L$ pouvant être approximer (Fig. 4) par une fonction linéaire de la température $T(^\circ\text{C})$ donnée par : $\Delta L/L = 14 \times 10^{-6} (T - 20)$.

Elongation Thermique

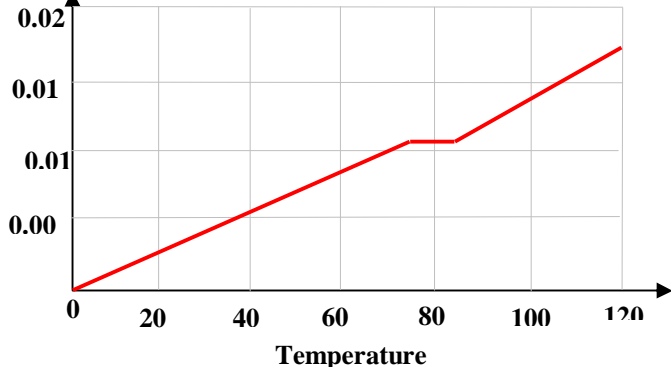


Figure 4 : Variation de l'élongation /Température

Contraintes (N/mm²)

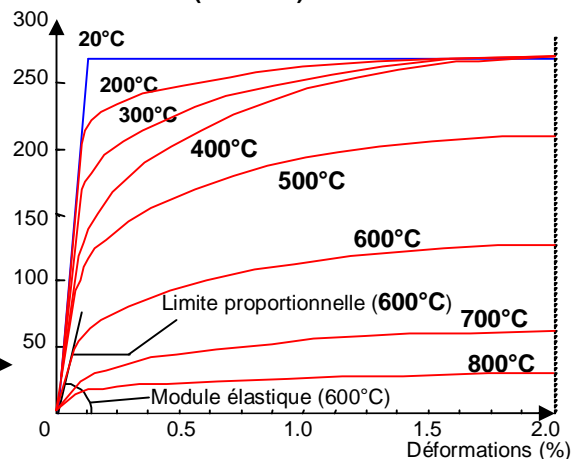


Figure 5 : Réduction contraintes-déformations fonction de la température pour l'acier S275

La diminution du module d'élasticité est d'une même allure que celle de la réduction de la contrainte limite et l'Eurocode3 [2] donne des courbes de diminution de la contrainte limite et du module d'élasticité de l'acier en fonction de la température jusqu'à 1000°C.

La plupart des matériaux de construction subissent

Pour l'acier, on peut voir une perte progressive de résistance et de rigidité au fur et à mesure que leur température augmente. Fig. 5 [8] dès que les températures modérées de l'ordre de 300°C sont atteintes. Bien qu'il ne se produise aucune fusion avant 1500°C, seule 23% de la résistance à température ambiante subsiste à 700°C. A 800°C cette résistance se réduit à 11% et, à 900°C, à 6%.

Enfin il existe trois autres dont deux dérivées de celles citées à savoir **l'inertie thermique** $k \cdot r \cdot C_p$, ($W^2 s/m^4 K^2$) et la **diffusion thermique** donnée par $a = k / r \cdot C_p$, (m^2/s), et la troisième **l'émissivité** e_a , sans dimension, qui représente l'énergie dégagée par rapport à celle d'un corps noir à la même température.

Acier 0 à 20°C	$I_a=45.8$	$Cp=460$	$a = 1.26 \times 10^{-5}$	$k \cdot r \cdot C_p = 1.6 \times 10^8$	$e_a = 0.625$ (EC3)
----------------	------------	----------	---------------------------	---	---------------------

On notera que le module de poisson ν n'est que peu ou pas du tout affecté par l'augmentation de température et il est pris égal à 0.3 par l'Eurocode.

5- Influence de la section du profilé métallique :

La protection des profilés métalliques dépend de leurs 'facteur de section', appelé parfois, 'facteur de massivité' section, A_m/V (m^{-1})

Le "Facteur de massivité" A_m/V utilise le périmètre *exposé* pour calculer une valeur appropriée de A_m désignant la surface réellement exposée au rayonnement et à la convection [6].

On en déduit qu'un élément ayant un facteur faible, se chauffe moins vite que celui qui possède un facteur élevé Figure 6.

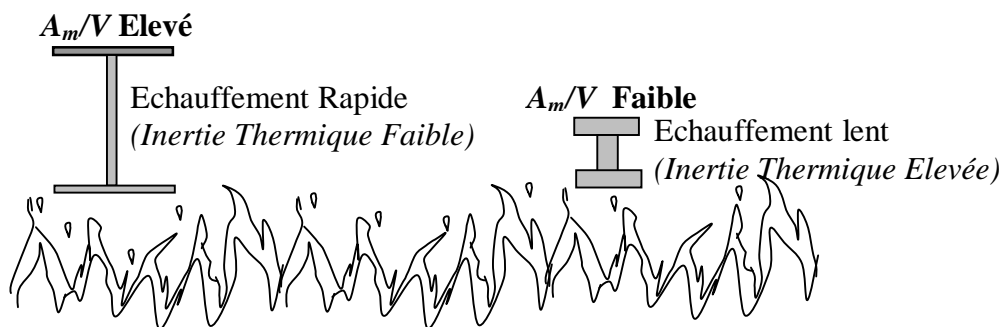


Figure 6 : Influence du Facteur de Massivité

6- Approches de détermination de la résistance au feu par l'Eurocode3

Les Eurocodes permettent d'établir la résistance au feu dans 3 "domaines" :

- Ø Temps : $t_{fi,d} > t_{fi,requ}$ utilisable dans des modèles de calcul avancés
- Ø Capacité portante: $R_{fi,d} \cdot t > E_{fi,d}$ Calcul manuel possible.
 permet de trouver la résistance de calcul à la température critique
- Ø Température : $\theta_{cr,d} > \theta_d$ Méthode simplifiée selon l'Eurocode3. Donne la température critique pour un chargement, à comparer avec la résistance de calcul

7- Procédure par la méthode simplifiée:

La méthode par modèles simplifiés de l'Eurocode [1] a été adoptée dans ce travail en vue de comparer le problème du comportement de poutre dont la section est chauffée selon la courbe standard ISO834 Le processus général d'évaluation de la température critique $q_{cr,d}$ d'un élément de structure exposé au feu ISO 834 est représenté dans la figure 7.

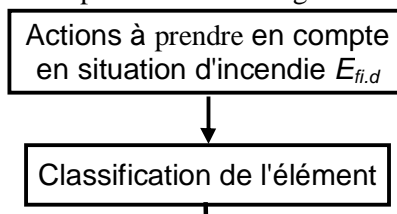


Figure 7 : Organigramme pour la détermination de la température critique d'une section de profilé métallique

8- Calcul des poutres dans le domaine des températures ISO 834:

Hypothèses : On considère ce qui suit :

- La température de la poutre métallique est uniformément distribuée le long de sa travée, alors que la température dans sa section transversale peut être considérée variable figure 8.
- La répartition de la température dans la poutre est indépendante de la distribution de ses contraintes.
- Un modèle élasto-plastique idéal est utilisé pour modéliser la relation contrainte déformation de l'acier sous hautes températures. La non linéarité géométrique n'a pas d'effet sous des températures ambiantes.



Figure 8 : Poutre à une seule travée sous Feu ISO 834

Formulation du problème :

Résistance en flexion sous hautes températures :

Le moment résistant de calcul de la section à température uniforme est :

$$M_{fi,q,Rd} = k_{y,q} \left[\frac{g_{M,0}}{g_{M,fi}} \right] M_{Rd}$$

ou
$$M_{fi,q,Rd} = k_{y,q} \left[\frac{f_y}{g_{M,fi}} \right] W_{pl}$$

M_{Rd} - moment de résistance plastique de la section à température normale de calcul

W_{pl} - module plastique de la section

$k_{y,q}$ - facteur de réduction donnant la résistance limite de l'acier à une température θ_a au temps t

$g_{M,0}$ - coefficient de sécurité partielle pour la résistance d'une section à température normale.

$g_{M,fi}$ - coefficient de sécurité partielle sous des conditions de feu.

f_y - contrainte ultime effective

La température critique est donnée par :

$$q_{a,cr} = 482 + 39.29 \ln \left[\frac{1}{0.967 m_0^{3.833}} - 1 \right]$$

$$m_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

$R_{fi,d,0}$ -résistance de calcul en condition de feu au temps $t=0$ ($\theta=20^0C$)

$$E_{fi,d} \leq R_{d,fi,t} \quad \text{Sollicitant} < \text{Résistant}$$

9- Comportement de la poutre test du Bâtiment de Cardington:

9.1 – Test 1 du bâtiment CM de Cardington :

Dés 1995 le BRE (British Research Establishment) de Cardington en GB à démarré des essais au feu à grande échelle sur un bâtiment de huit étages de hauteur 33m avec une superficie par étage d'environ 1000 m². Le bâtiment est conçu avec une charge permanente de 2.85kN/m² (G_k) et une surcharge de 2.4 kN/m² (Q_k). Une partie des observations faites et des analyses établies serviront à l'amélioration des codes de calcul pour de nouvelles approches de conception. Les travaux d'exploitation des données des Tests de Cardington sont toujours en cours.

Notre intérêt porte sur le test1 Figure 9 et l'analyse du comportement de la poutre non protégé UB 305x165x40 . Notre choix du profilé est justifié du fait de la similarité en dimension avec le profilé UB 305x165x46 testé en 1980 par British Steel selon la courbe de Feu ISO834 et ayant conduit à l'établissement des tables des températures limites de l'Eurocode3, Partie 1,2

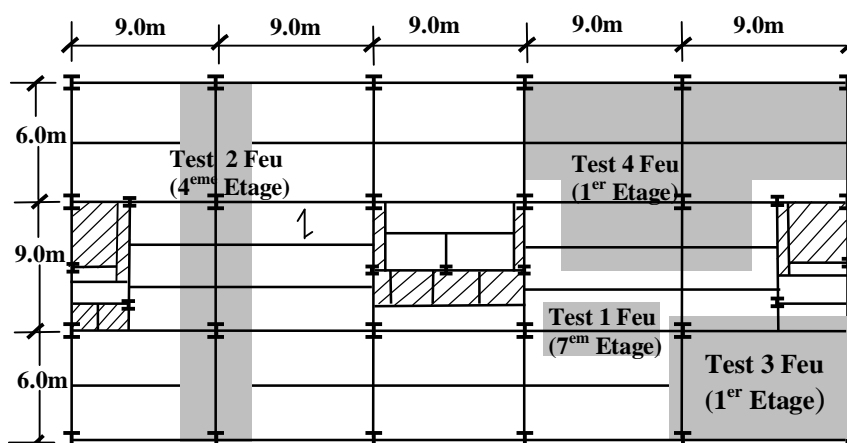


Figure 9: Plan d'un étage du bâtiment de Cardington indiquant les position des tests au Feu

9.2 Analyse par le modèle simplifié

La poutre de travée 9m du test 1 à été analysée les données et résultats obtenus sont tabulés :

Température critique :

Nuance- Acier	Profile	Classe
S235	UB 305x105x40	C1

Charge (kN/m)	$M_{Rd,pl}$	M_{Ed}
G_k	$Q_{k,1}$	(kN.m)
17.1	14	146.4
		134.4

A Température ambiante 20°C		
γ_{M1}	$\gamma_{M1,fi}$	$M_{fi,q,Rd}$ (kN.m)
1.1	1.0	161.04

Exposition au Feu						
$R_{fi,d}$				$E_{fi,d,t}$		
k_1	k_2	k_{vq}	$M_{fi,t,Rd}$	y	h_{fi}	$M_{fi,d}$ (kN.m)
0.7	1.0	1.0	230.06	0.5	0.544	73.11

Facteur de Massivité	Température Critique	
A_m/V (m ⁻¹)	m_0	q_{cr} (°C)
209	0.318	655.4

Estimation de la résistance au feu :

Le temps que prend l'élément métallique pour atteindre sa température critique est déterminé par le logiciel de transfert thermique dans les sections de profilés métalliques usuels [3].

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

**Evolution de la Température dans les
 Eléments Métalliques**

Elément : UB305x105x40

Nombre de Faces exposées : 3

Type de Protection : Non Protégé

Données de base de l'Acier:

coeff d'emissivité : $\epsilon_s = .50$

densite de l'acier : $\rho_{au} = 7850.00$ (Kg/m³)

coeff de transfert thermique: $h = 25.0$ (W/m²K)

coeff de massivité : $A_m/V = 209.0$ (m⁻¹)

Temps de calcul : T = 60.0 (minutes)

Temps (minutes)	Température de l'Acier Ta	Température du FEU ISO Tf	Difference de Température Tf - Ta	Augmentation de Température DT de L'ACIER
.00	20.00	184.61	164.61	9.38
5.00	262.43	583.55	321.12	26.79
10.00	494.02	682.08	188.06	18.38
15.00	647.30	741.02	93.72	11.88
15.50	659.18	745.81	86.63	10.92
20.00	727.26	783.20	55.95	3.55
25.00	760.59	816.09	55.49	6.24
30.00	819.99	843.03	23.05	4.41
40.00	877.16	885.67	8.51	2.04
45.00	896.25	903.17	6.91	1.77
50.00	912.96	918.83	5.87	1.56
60.00	941.41	945.96	4.55	1.29

La Résistance au Feu de la poutre représenté par le temps que prend l'acier pour atteindre sa température critique est estimé à $t = 15 \div 15.50$ minutes

10- Comparaison au comportement réel :

La poutre du test1 de Cardington ne présente aucune protection et son comportement est comparé par rapport au test standard sous feu ISO834.

La température critique évaluée par la méthode simplifiée $q_{cr} = 656$ °C pour la poutre de travée 9m est très significatif en comparaison au test standard. Ce dernier à été réalisé pour une travée de 4.5m , et la température de 705°C est obtenue en un temps de 22 minutes.

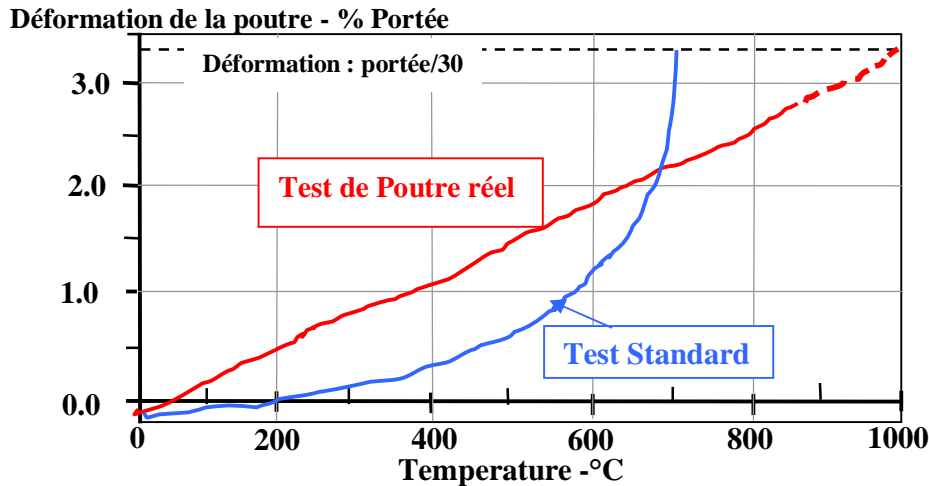


Figure 10 : Comparaison du comportement de la déformée de la poutre sous des conditions de test standard et de bâtiment réelle

Par contraste, la poutre dans le cas du test réel qui est de travée 9 m, et qui est soumise à des restraints considérables par des effets de continuité inter-éléments, possède un comportement totalement différent. La poutre a résisté à des températures atteignant 875°C à partir desquelles le test s'est interrompu suite aux pannes d'instrumentations de mesures, ce qui laisse penser que la progression des déformations de celle-ci, pouvait aller au delà de 1000°C.

11- Conclusion:

Le calcul de la résistance au feu par la méthode simplifiée de l'Eurocode3 est très pratique pour un calcul rapide utile. Cependant le fait de supposer que les éléments de charpente s'affaissent à une température critique de 550 °C, s'avère très conservatrice.

Tenant compte du fait que la protection des structures en acier contre l'effet d'incendie est coûteuse, il est alors nécessaire, de poser une question fondamentale sur l'efficacité du test standard ISO 834 afin d'optimiser la protection des différents éléments en acier.

- Ø La résistance au feu d'une poutre est exprimée traditionnellement comme une période de temps durant laquelle la déformation reste inférieure ou égale à la portée/30 sous un feu ISO 834. Testée sans protection cette résistance est estimée entre 15 à 25 minutes, avec une déformation limite atteinte à une température variant entre 550 à 700 °C en fonction de la charge appliquée.
- Ø La poutre a atteint des températures de plus de 1 000 °C, et pourtant la structure est restée stable grâce à l'action d'ensemble la traction de membrane dans la dalle de plancher mixte.

Références :

- [1] EC1 (1994). Eurocode 1: Bases de Calcul et Actions sur les Structures. Part2-2: Actions sur les Structures Exposées au Feu.
- [2] EC3 (1995). Eurocode 3: Calcul des Structures en Acier. ENV 1993-1-2: Règles Générales: Calcul du Comportement au Feu.
- [3] Jean-Marc Franssen, Raul Zaharia , "Design of Steel Structures subjected to Fire " Les Editions de l'Université de Liege, 2005
- [4] Nadjai A., Vassart O., Faris A, Talamona D (2006)"Performance of cellular composite floor beams at elevated températures "proc. SIF 2006 pp. 813-823
- [5] Jean-Marc Franssen, Raul Zaharia , "Design of Steel Structures subjected to Fire " Les Editions de l'Université de Liege, 2005

- [6] Benlakehal N., Kada A., Lamri B., Achour B. (2006). " Transfert de chaleur dans les structures métalliques et leur protection selon l'Eurocode 3", Colloque Algéro-Français sur les matériaux : Applications Multifonctionnelles, C.A.F.M.C.06
- [7] Kada A., Lamri B., Benlakehal N., Achour B. (2006). "Structures en acier sous l'effet de hautes températures : Pour une optimisation de la protection", Journées Internationales sur les risques industriels et impact sur l'environnement, Skikda JIRITE2006.