
Comportement de poutres métalliques de grande portée sous l'effet de hautes températures

A. Kada^{1*}, N. Benlakehal², A. Bouchaïr³, B. Lamri⁴, B. Achour⁵

^{1,3} Polytech'Clermont-Fd, Laboratoire de Mécanique et Ingénierie, France

^{2,4} Université H.B.Bouali de Chlef, Dépt. G.C, Algérie

⁵ Université de Mostaganem, Département de Génie Civil, Algérie

*kada_abdel@yahoo.com (abdelhak.kada@polytech.univ.bpclermont.fr)

RESUME. Le feu est l'une des actions accidentelles de courte durée auxquelles les structures peuvent être exposées pendant leur durée de service. Bien qu'il soit incombustible, on reproche à l'acier sa faible résistance aux températures élevées en plus de son rôle dans 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 a pour but d'analyser le comportement des poutres métalliques sous l'effet d'augmentation de températures uniformes. Une modélisation du comportement non-linéaire matériel et géométrique par éléments finis des poutres à une seule travée a été réalisée par le logiciel ANSYS. On tiendra compte de l'influence de différents paramètres tels que les niveaux de chargement avec variation des conditions aux limites et la réduction des propriétés mécaniques des matériaux.

L'analyse des résultats porte sur la variation du déplacement, des contraintes et de la température critique en fonction de l'évolution de la température.

ABSTRACT. Fire is one of accidental actions that a building structure is bound to be subjected to during its life time. Although steel material is non-combustible, it bears the bad reputation of having weak resistance to high temperatures besides allowing heat propagation by conduction. In the case of fire, structural steel elements without protection are damaged due to reduction of strength of steel members. The modelling of these steel beams takes into account the load level and several boundary conditions to deduce their effects. The analysis of their behaviour is done using the effect of material properties reduction and the Eurocode recommendations in estimating thermal and mechanical steel properties. This work intends to do the analysis of the behavior of long span steel beams under several load ratios with uniform temperature rise. A numerical modelling of material and geometric non-linear behavior using finite elements ANSYS software is done to analyse single long span beams. Analysis of the results is related to the variation of the deformation, stresses, and critical temperature with respect to temperature change.

Mots clés : Feu, poutre métallique, plasticité, Ingénierie incendie

Keywords: Fire, Steel beam, plasticity, fire engineering

1. Introduction

L'effet de hautes températures sur la structure suite à un incendie peut être décrit en considérant le flux de chaleur, transmise par radiation et convection due à une différence de températures entre les gaz chauds et les éléments de structure en acier. L'exposition du matériau acier à ces actions engendre des dégradations de ses propriétés physiques et chimiques, une réduction de la résistance et du module d'élasticité et provoque une amplification de contraintes dans les structures hyperstatiques.

Le comportement au feu de la structure doit tenir compte, en plus des particularités citées ci-dessus, de plusieurs paramètres influents. Ces paramètres concernent les variations des propriétés thermomécaniques de l'acier, les facteurs de massivité des sections, de l'utilisation ou non d'une protection et sa nature et des conditions aux limites de l'élément à analyser.

De nombreux travaux de recherche, expérimentaux et de modélisations numériques, ont été réalisés dans le but de mieux comprendre le comportement des éléments de structure sous l'effet de hautes températures et sous des conditions de scénarios de feu les plus variés.

Ce travail a pour but d'analyser le comportement des poutres métalliques sous l'effet d'augmentation de températures uniformes. La modélisation des poutres métalliques tient compte de la non linéarité géométrique et celle du matériau acier pour les poutres à âme pleine, qui servira de base de validation et de comparaison par rapport à une approche plus large qui s'intéressera au même type de profilé PRS avec ouvertures d'âme. Plusieurs niveaux de chargement avec variation des conditions aux limites ont été considérés.

2. Phases d'un incendie et feu ISO 834

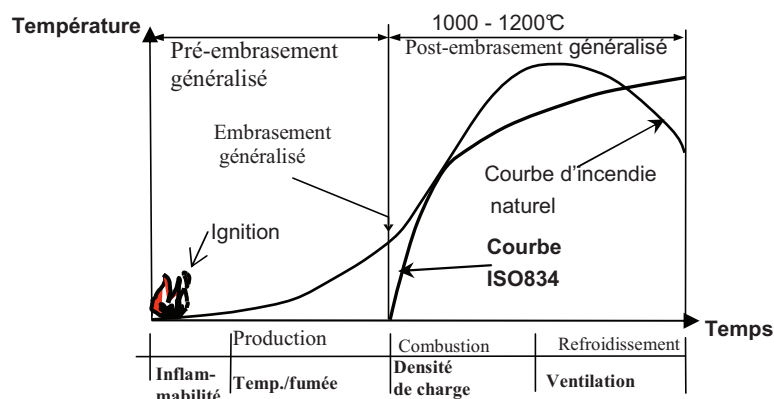


Figure 1. Incendie naturel, et courbe ISO 834.

Un incendie 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), (Andrew H. Buchanan). Les durées de résistance au feu spécifiées dans la plupart des règlements nationaux de bâtiment concernent le comportement à l'essai lorsque l'augmentation de température est réalisée selon une courbe temps-température d'incendie conventionnel (ou "normalisé") ISO 834 [2] (figure 1), qui est définie par la relation suivante:

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

3. Propriétés à hautes températures

La réponse des structures métalliques exposées au feu est gouvernée par les propriétés mécaniques, thermiques, et de déformations (V.Kodur et al.).

Les propriétés thermiques déterminent le profil de températures dans la section d'acier due à son exposition au feu alors que les propriétés mécaniques gouvernent la perte de la résistance et de la rigidité en fonction de la température. Les propriétés de déformation déterminent les flèches limites des éléments métalliques sous des conditions de feu.

Dans la présente étude, l'acier de nuance S355 avec un module de Young $E=210000\text{N/mm}^2$ et la température est considérée avec une distribution uniforme le long de la travée.

3.1. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont introduites dans l'équation de la chaleur [2] appliquée en considérant l'échauffement dans une seule direction sans source de chaleur interne. Une température uniforme est considérée dans la section. Cette hypothèse est réaliste à cause de la forte conductivité thermique de l'acier nu. La résolution de cette équation donne la formule d'échauffement de l'acier [3].

$$c_a \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial (\lambda_a \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x})}{\partial x} = 0 \quad [2]$$

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot h_{net} \cdot \Delta t \quad [3]$$

h_{net} : flux thermique total à l'élément en W/m^2

Comportement des poutres métalliques sous l'effet de hautes températures

θ_a : température de l'acier en °C (supposée uniforme)

t : temps en seconde

A_m : aire de la surface exposée au feu de l'élément en m^2/m

V : volume en m^3/m

A_m/V représente le coefficient de massivité qui est un paramètre révélateur de la vitesse d'échauffement de la section (figure 2).

La chaleur spécifique C_a et la conductivité thermique λ_α de l'acier sont dépendantes de la variation de température. Elles sont exprimées par les formules empiriques de l'Eurocode [2] qui permet d'utiliser une valeur constante $C_a = 600 J/Kg \text{ } ^\circ K$ et $\lambda_a = 45 W/mK$ pour les calculs simplifiés.

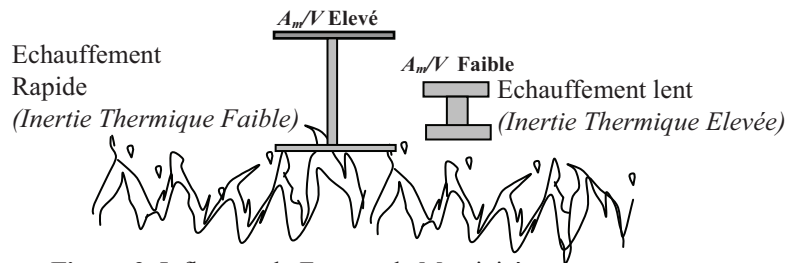


Figure 2. Influence du Facteur de Massivité

3.2. Propriétés mécaniques

Les évolutions non linéaires des propriétés mécaniques sont prises en compte dans la modélisation de la réponse des structures métalliques aux effets des hautes températures due au feu. Les propriétés considérées sont le module d'élasticité E , la limite élastique f_y et la relation contrainte-déformation (figure 3). La modélisation est réalisée par le logiciel ANSYS.

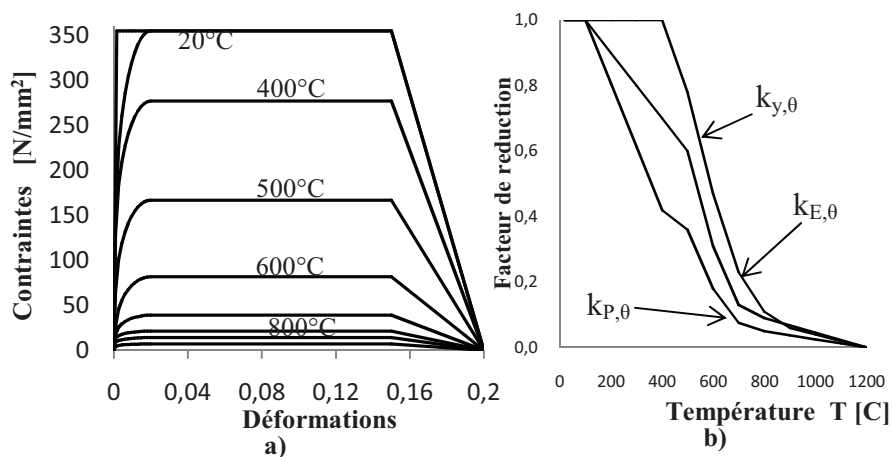


Figure 3 Evolution des propriétés mécaniques en fonction de la température
a. contraintes-déformations, **b.** facteurs de réduction $k_{y\theta}$, $k_{p\theta}$, $k_{E\theta}$

Les facteurs de réduction sont définis de la façon suivante :

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad \text{limite d'élasticité efficace, par rapport à la limite d'élasticité à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad \text{limite de proportionnalité, par rapport à la limite d'élasticité à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad \text{pente du domaine élastique linéaire, par rapport à la pente à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

La déformation de l'acier à hautes températures s'exprime par la quantification de l'élongation thermique de l'acier $\Delta L/L$ pouvant être approximée en fonction de la température θ ($^\circ\text{C}$) selon les formules empiriques de l'Eurocode3, prEN 1993-1-2

$$(\Delta L/L)_a = - 2.416 \cdot 10^{-4} + 1.2 \cdot 10^{-5} \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \theta^2 \quad \text{pour } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$(\Delta L/L)_a = 11 \cdot 10^{-3} \quad \text{pour } 750 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 860 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$(\Delta L/L)_a = - 6.2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \theta \quad \text{pour } 860 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad [4]$$

Le coefficient de dilatation thermique α_0 est considéré dans notre analyse numérique variant en fonction de la température. A noter que l'EC3 propose une valeur constante $\alpha_0 = 14.0 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ pour les calculs simplifiés.

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

4. Position du problème

4.1. Modèles de poutres

On considère dans notre travail deux types de poutres différentes de part leurs dimensions et la classification de leurs sections et trois modèles numériques ou les conditions d'appui double-double et double-simple (rouleau) sont adoptés, tableau 1.

Pour l'ensemble de ces modèles une travée L de 15 mètres est considérée.

Dimensions de section (mm)	Modèles		
	1	2	3
h	1200		1000
b	450		300
t _f	16		25
t _w	9.5		13
r	-		27
h/L	1/15		1/15
Conditions d'appuis	double-rouleau		double-double

Tableau 1. Dimensions et conditions d'appui des modèles

$P_{fi,d}$ représente la charge uniformément répartie de calcul pour un moment de flexion correspondant $M_{fi,sd}$

Le modèle 1 est un PRS reconstitué à base de tôles et a été considéré sur la base celui de R. Mourao et al. avec une nuance d'acier différente et est utilisé pour la comparaison. Les modèles 2 et 3 sont reconstitués de profilés laminés HEA 600.

4.2. Résistance en flexion sous hautes températures selon l'Eurocode 3

La charge $P_{fi,d}$ appliquée aux différents modèles est déterminée par l'équation [8]

$$R_{fi,d,t} > E_{fi,d} \quad [5]$$

$$M_{fi,sd} = \eta \cdot M_{Rd} \quad [6]$$

$$M_{R,d} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [7]$$

$$P_{fi,d} = \eta \cdot \frac{8}{l^2} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [8]$$

$$k_{y0} = \eta / \gamma_{M0} \quad [9]$$

M_{Rd} - Moment de résistance plastique

W_{pl} - Module plastique de la section

$\gamma_{M,0}$ - Coefficient de sécurité partielle à température normale.

f_y - Contrainte limite

Le chargement mécanique $P_{fi,d}$ est spécifié à des taux η variant entre 0.2 à 1.0. Une comparaison sera faite dans l'étude entre k_{y0} et η/γ_{M0} pour des températures critiques issues de l'analyse par ANSYS.

5. Modélisation numérique

5.1 Hypothèses

Le modèle numérique tient compte des non linéarités géométrique et matérielle et s'appuie sur l'élément fini "beam24" qui permet de considérer l'évolution

progressive de la plasticité sur la hauteur de la section. La poutre est considérée maintenue vis-à-vis des déplacements latéraux.

5.2 Discrétisation

Les poutres sont discrétisées par 6 à 15 éléments "beam24" le long de la travée et de 12 divisions sur la hauteur de la section (figure 4).

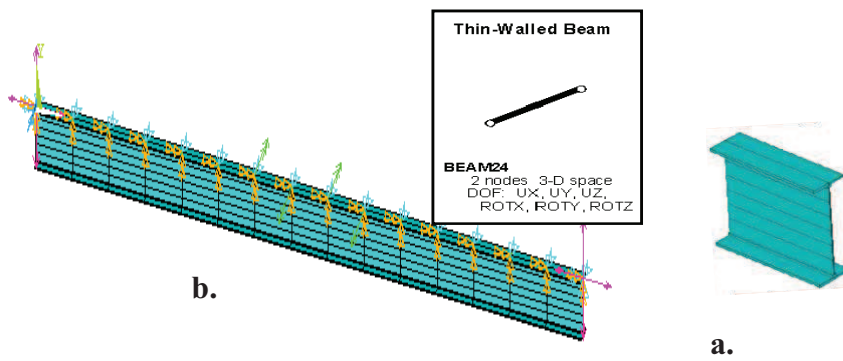


Figure 4. Poutre discrétisé par EF "beam24"
 a. le long de la travée
 b. en hauteur de la section

5. Analyse des résultats

Le calcul est exécuté en considérant des pas de températures de 50°C jusqu'à l'atteinte de la capacité maximale de résistance de la poutre. On considère dans tous les cas que la charge mécanique est fixe et que la température augmente jusqu'à atteindre la température critique.

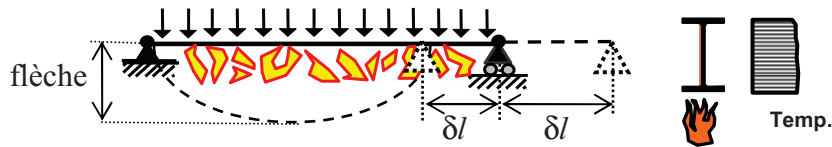


Figure 5. Flèche et déplacement horizontal modèle 2

Pour des températures relativement faibles la dilatation thermique δl augmente, mais la réduction du module d'élasticité du matériau conduit à une augmentation de

Comportement des poutres métalliques sous l'effet de hautes températures

la déformation figure 6, ce qui provoque un renversement du déplacement horizontal au niveau de l'appui.

Le déplacement horizontal au niveau du rouleau varie linéairement jusqu'à une certaine limite (équation [10])

$$\delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta \theta \quad [10]$$

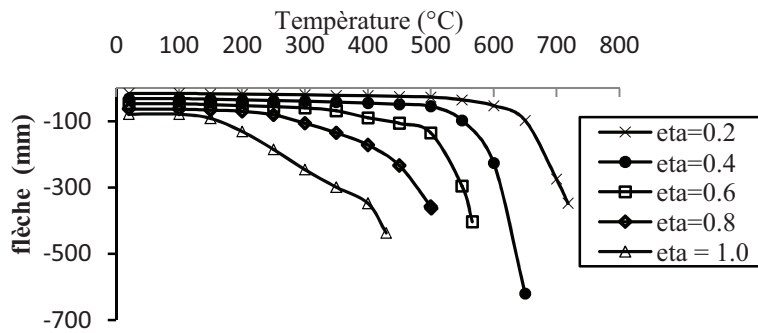


Figure 6. Flèche en fonction de la température - modèle 2

Ensuite, le déplacement horizontal diminue suite à la déformation de la poutre figure 7. Dans des cas réels les appuis sont maintenus ou sont partiellement restreints et les valeurs de δl seront inférieures à celles présentées dans la figure 7.

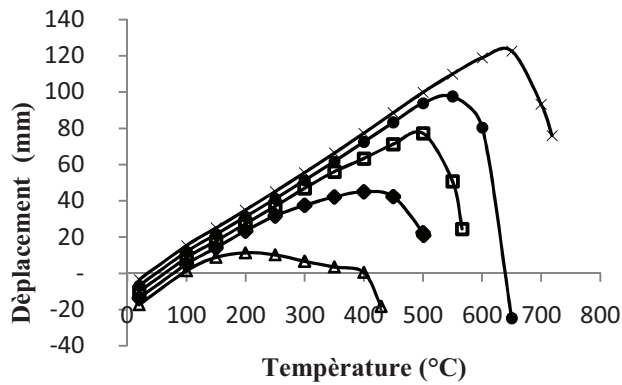


Figure 7. Déplacement horizontal en fonction de la température - modèle 2

Les températures critiques dépendent des niveaux de chargement η (figure 8). Elles peuvent être déterminées par la méthode simplifiée de l'Eurocode 3.

Des valeurs de $k_{y,\theta}$ déterminées sur la base des températures critiques par l'analyse de la méthode avancée par ANSYS sont comparées à celles de

l'Eurocode 3 de la formule [8], tableau 2. Les valeurs présentées dans ce tableau confirment la méthode simplifiée de l'Eurocode qui reste une bonne approximation.

Pour les mêmes conditions d'appuis et le même rapport l/h , les modèles 1 et 2 présentent des allures similaires et sont sensiblement proches.

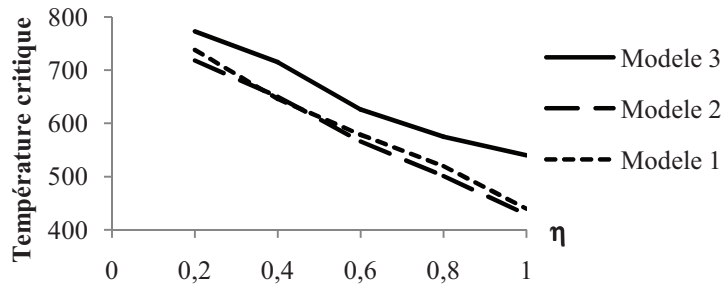


Figure 8. Température critique -Niveau de chargement

η	θ_{cr} (°C) Analyse ANSYS	$k_{y\theta}$ (θ_{cr})	$\eta/1.1$ Eurocode 3
0.2	718	0.208	0.182
0.4	650	0.350	0.364
0.6	566	0.575	0.545
0.8	501	0.777	0.727
1.0	429	0.936	0.909

Tableau 2. Comparaison entre η et θ_{cr}

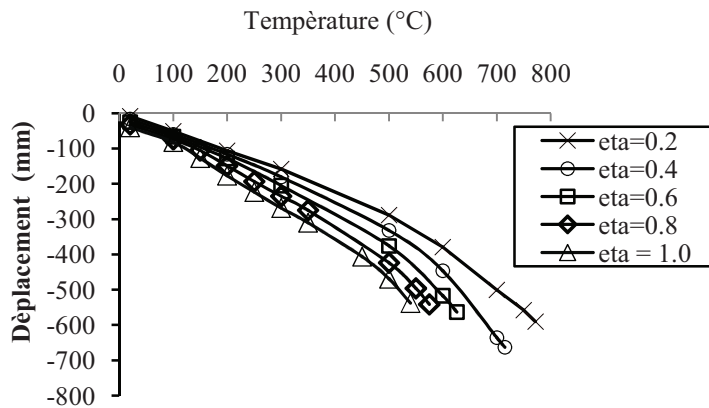


Figure 9. Déformation en fonction de la température -modele3

6. Conclusion

Les méthodes avancées permettent d'analyser au mieux le comportement des éléments métalliques sous l'effet de hautes températures dues à l'incendie.

L'Eurocode 3 considère que les éléments métalliques résistent jusqu'à une température de référence de 550°C au-delà de laquelle il y a ruine, ce qui s'avère très conservatif. L'étude qui tient compte de la non linéarité des propriétés du matériau en plus de l'effet des grands déplacements montre que les poutres peuvent résister à des températures plus importantes.

Les déformations thermiques provoquent des déplacements si les poutres ne sont pas prémunies contre les déformations et des contraintes si les appuis sont bloqués. L'effet des conditions limites exposés dans les modèles 2 et 3 selon plusieurs niveaux de charges η est illustré par les figures 6 et 9 montrant une flèche plus importante dans le cas du modèle 3.

Le déplacement horizontal varie linéairement jusqu'à une limite au-delà de laquelle il diminue due aux grands déplacements des poutres.

Les températures critiques déterminées par la méthode avancée sont plus élevées que celles de la méthode simplifiée suite à la comparaison du tableau 2.

7. Bibliographie

- Buchanan A.H., *Structural Design for Fire Safety*, John Wiley&Sons 2001
- Bailey CG, Newman GM., "The design of Steel framed buildings without applied fire protection" *The structural Engineer*, 1998; 76(5), p. 77-81.
- Eurocode 3, *Calcul des Structures en Acier. prEN 1993-1-2: Règles générales- Calcul du comportement au feu*, 2003.
- H.R. Muraio, V.P. Silva, "On the behaviour of single-span steel beams under uniform heating", *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, 2007, p.115-122
- J.-M.Franssen, R. Zaharia, *Design of Steel Structures subjected to Fire*, Les Editions de l'Université de Liege, 2005.
- O.Vassart, A. Bouchaïr, J.P Muzeau, A. Nadjai " Analytical model for the web post buckling in cellular beams under fire " *Proc. SIF 2008*, p.813-823.
- V.Kodur, M.Dwaikat, R. Fike, "High temperature properties of steel for fire resistance modeling of structures ", *ASCE May 2010*, p.423-434.