

## COMPORTEMENT DES STRUCTURES METALLIQUES SOUS L'EFFET D'INCENDIE: APPLICATION DU TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES PROFILS METALLIQUES SELON L'EUROCODE 3

BENLAKEHAL Nourredine <sup>1</sup>, KADA Abdelhak <sup>1</sup>, LAMRI Belkacem <sup>1</sup> et ACHOUR Belkacem <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie Civil, Université Hassiba Benbouali, Chlef,

<sup>2</sup>Département de Génie Civil, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem

**RESUME :** Les récents accidents à la suite d'incendies, à Skikda dans le complexe de Sonatrach (Algérie), à Londres dans des dépôts de carburant (UK), et aux Etats Unis provoquant l'effondrement des tours jumelles, ou en mer du nord dans des plateformes pétrolières (Scotland), montrent que le risque potentiel d'un incendie doit être une préoccupation majeure.

Cette communication présente les mécanismes de transfert de chaleur dans les éléments en acier dans le cas d'un incendie et porte aussi sur la prospection de différents types de protection et leurs impacts sur l'évolution de la température des profilés métalliques exposés à des courbes temps-températures conventionnelles. Un programme de simulation du processus pour des sections d'acier non-protégées et protégées a été développé.

**MOTS- CLES :** transfert thermique, sécurité incendie, hautes températures, constructions métalliques

### 1. Introduction

Le comportement des structures exposées au feu dépend de la vitesse à laquelle ces éléments sont échauffés et de la répartition des températures en section et sur la longueur des éléments. Les propriétés mécaniques des matériaux diminuent avec l'augmentation de la température et, par conséquent, la résistance mécanique des éléments et donc la structure diminue également. L'effondrement se produit au moment où la résistance devient égale à l'action des charges appliquées. Ceci peut se produire en un temps très court lorsque la montée de la température est rapide. A cet égard, les éléments métalliques non protégés présentent, dans certaines situations, un comportement défavorable en raison de la très forte conductivité de l'acier [1]. En comparaison, les éléments mixtes ou protégés par un système isolant présentent un meilleur comportement, car l'inertie thermique des éléments est plus importante et la conductivité thermique du matériau isolant est plus faible.

L'Eurocode 3 ENV 1993-1-2 « Règles générales – Calcul du comportement au feu » [2], donne de simples règles pour calculer l'évolution de la température dans les éléments métalliques soumis à un feu standard (ISO 834, fig 1). Ces règles sont basées sur les principes généraux du transfert thermique. Cependant, les caractéristiques thermiques sont données selon des formules semi empiriques dont le but est la convergence des résultats de calcul avec les résultats des tests conventionnels utilisant des feux standards.

Cette étude traite des mécanismes de transfert de chaleur dans les éléments en acier dans le cas d'un incendie. Un programme de simulation du processus pour des sections d'acier non protégées et protégées a été établi.

### 2. Les processus du transfert de chaleur

Lors d'un incendie, la température de l'acier augmente de la même façon que la température des gaz chauds mais avec un décalage (fig. 1). Ce décalage dépend de l'inertie thermique de l'élément aussi bien que l'intensité du transfert thermique s'effectuant à sa surface extérieure. Si l'élément est protégé, le décalage est plus important. En ce qui concerne les éléments non protégés, le décalage dépend de la massivité de l'élément ( $A_m/V$  où  $A_m$  [m<sup>2</sup>/m] : surface du contour par unité de longueur exposé au feu et  $V$  [m<sup>3</sup>] : la section transversale de l'élément).

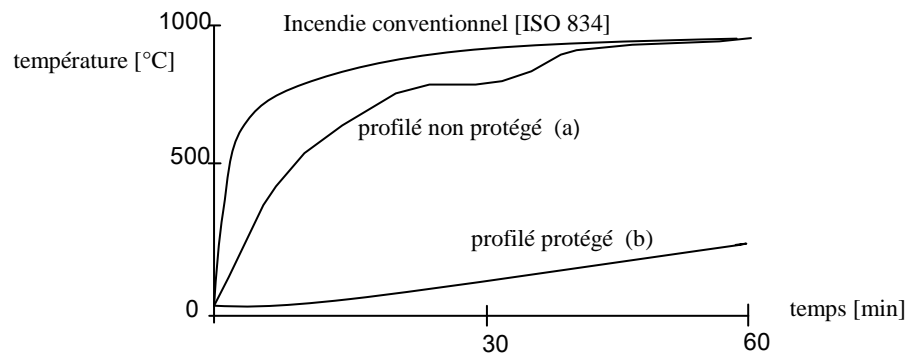


Figure 1 : Echauffement d'un profilé en acier en fonction du type de protection thermique

Dans l'incendie conventionnel ISO 834 [3], la température  $T$  (°C) est définie par :

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

Où  $t$  [min] est le temps et  $T_0$  [°C] est la température ambiante

Le transfert de chaleur entre l'environnement en feu et l'élément se produit par les trois processus de conduction, convection et rayonnement.

### 2.1. Echauffement par conduction

En régime permanent, le transfert de chaleur par conduction est proportionnel au gradient thermique entre deux points et à la conductivité thermique  $\lambda_a$  suivant la relation [4]:

$$\dot{q}'' = \lambda_a \frac{dT}{dx}$$

Où  $\dot{q}''$  : le flux de chaleur par unité de surface [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda_a$  : la conductivité thermique [W/m K]

$T$  : la température [°C ou K]

$x$  : la distance dans la direction du flux de chaleur [m]

Le calcul en régime permanent ne prend pas en considération le taux de chaleur nécessaire pour changer la température de l'élément chauffé.

### 2.2. Echauffement par convection

La convection est le transfert de chaleur par mouvement des fluides (gaz ou liquide). Il est un facteur important dans l'étendue du feu par la montée de la fumée et des gaz chauds au plafond ou hors d'une pièce en feu à travers une fenêtre.

Le transfert de chaleur par convection est proportionnel à la différence de température entre les deux matériaux (solide et fluide) et le flux de chaleur par unité de surface est donné par la relation [4] :

$$\dot{q}'' = h \cdot \Delta T$$

Où  $h$  : coefficient de transfert thermique par convection

$\Delta T$  : différence de température entre la surface du solide et le fluide environnant

Pour les conditions habituelles de convection,  $h$  peut être prise égale à 25 W/m<sup>2</sup> K.

### 2.3. Echauffement par rayonnement

Le rayonnement est très important dans la propagation des feux car c'est le mécanisme principal dans le transfert de chaleur des flammes vers les surfaces du combustible, ou de la fumée chaude vers des objets d'une construction ou enfin d'une construction en feu vers une construction adjacente.

Le flux de chaleur par rayonnement  $\dot{q}''$  (W/m<sup>2</sup>) d'une surface d'émission vers une surface de réception est donné par [4] :

$$\dot{q}'' = \varphi \varepsilon \sigma (T_f + 273)^4 - (T_a + 273)^4$$

avec :

- $\varphi$  : facteur de configuration égal à 1
- $\varepsilon$  : émissivité des deux surfaces égale à 0.5 dans EC1 (1995)
- $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann égale à :  $5.67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

## 3. Calcul de la température des sections métalliques lors d'un feu conventionnel

A partir des actions thermiques définies par un modèle feu (ISO 834), l'échauffement des éléments de structures (poteaux, poutres, assemblages,...) est déterminé à partir des méthodes analytiques (méthode pas à pas) dites **méthodes de calculs simplifiées** des parties « feu » des EUROCODES [2],[3] pour les cas suivants :

- Eléments métalliques non protégés,
- Eléments métalliques protégés sur le contour de l'élément et protection par écran

### 3.1. Sections métalliques non protégées

Sous des conditions de feu, la quantité de chaleur transférée sur la surface  $A_m$  de l'élément en acier dans l'intervalle de temps  $\Delta t$  (s) est égale à la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de l'acier par  $\Delta T$  (°C) en supposant que la température est uniforme sur la section de l'élément. On peut écrire :

$$\dot{q}'' A_m \Delta t = \rho_a C_a V \Delta T$$

où  $\rho_a$  est la densité de l'acier (Kg/m<sup>3</sup>),  $C_a$  est la chaleur spécifique de l'acier (J/kg K),  $A_m$  est la surface du contour par unité de longueur exposé au feu (m<sup>2</sup>/m),  $V$  est la section transversale de l'élément (m<sup>2</sup>), et  $\dot{q}''$  est la quantité de chaleur transférée sur la surface de l'élément (W/m<sup>2</sup>), donnée par :

$$\dot{q}'' = h(T_f - T_a) + \varepsilon \sigma [(T_f + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$

Où :  $T_f$  est la température des gaz chauds (ou feu K), et  $T_a$  est la température de l'acier pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  (s).

Les deux équations peuvent être réarrangées pour donner [2] :

$$\Delta T = \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho_a C_a} [h(T_f - T_a) + \varepsilon \sigma ((T_f + 273)^4 - (T_a + 273)^4)] \Delta t$$

La solution de cette équation donne, pas à pas, l'évolution de la température de l'élément métallique au cours de l'incendie.

### 3.2. Sections métalliques protégées

Les éléments métalliques protégés chauffent lentement que d'autres sans protection à cause de l'isolement thermique appliquée qui protège l'acier de l'absorption rapide de la chaleur.

Il existe deux grands groupes de systèmes de protection [6]:

- les protections rapportées autour des éléments métalliques ;
- les protections par écrans formant des cavités dans lesquelles sont situés les éléments.

Pour les protections rapportées, l'échauffement de l'acier est régi par les mêmes paramètres que précédemment avec, en plus, l'épaisseur du matériau de protection mis en œuvre et l'efficacité de ce matériau principalement caractérisée par sa conductivité thermique.

L'équation du transfert de chaleur s'écrit [2] :

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p \rho_a C_a} \frac{A_p}{V} \frac{1}{(1 + \phi/3)} (\theta_f - \theta_a) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_f$$

où :  $\phi$  : la chaleur stockée dans la couche de protection égale à :  $\phi = \frac{C_p \rho_p}{C_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$

$C_p$  : la chaleur spécifique du matériau de protection (J/kg K)

$\lambda_p$  : la conductivité thermique du matériau de protection (W/m K)

$d_p$  : l'épaisseur du matériau de protection (m)

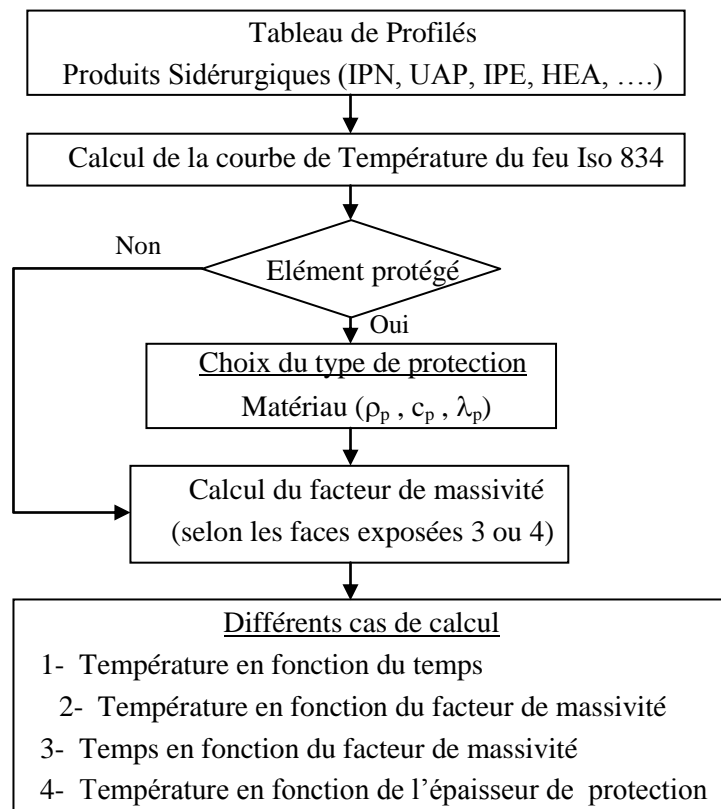
$\rho_p$  : densité du matériau de protection (Kg/m<sup>3</sup>)

$A_p/V$  : facteur de massivité de l'acier protégé

Les isolants les plus couramment utilisés et leur coefficient de conductibilité thermique sont donnés par la référence [8].

#### 4. Conception d'un logiciel de calcul de transfert thermique dans les éléments en aciers nus ou protégés

Ce programme a été élaboré dans le but de mettre, à la disposition des ingénieurs concepteurs des structures métalliques, un outil de calcul automatique des différentes températures atteintes dans les sections nues ou protégées lors d'un incendie et selon les nouvelles normes Eurocodes.



## 5. Applications et discussions

### CAS 1 :

L'évolution de la température en fonction du temps de deux éléments métalliques non protégé soumis au feu standard ISO 834 est présentée en fonction de leur facteur de massivité  $A_m/V$ .

Le premier élément, IPE 80, possède un facteur de massivité élevé ( $430.6 \text{ m}^{-1}$ ) tandis que le deuxième, HEM 300, possède un facteur de massivité faible ( $60.4 \text{ m}^{-1}$ ).

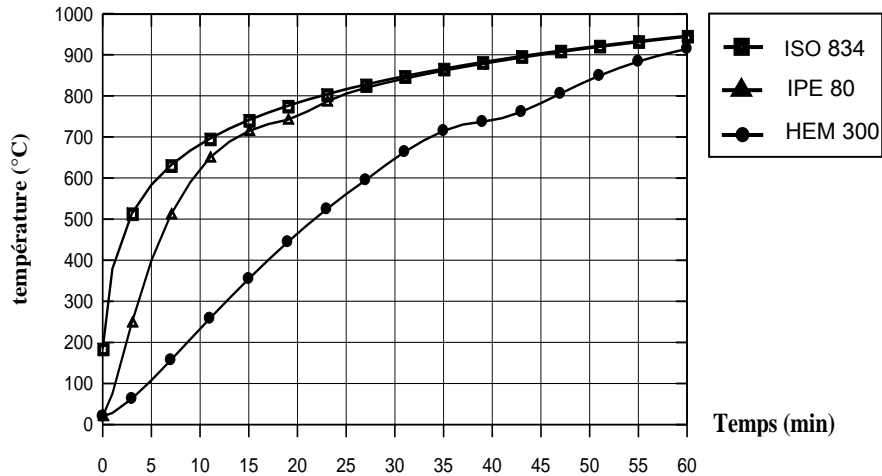


Figure 2 : L'évolution de la température de deux éléments non protégés

D'après la figure (2), l'élément en IPE 80 atteint la température de  $600 \text{ °C}$  en 9 minutes tandis que l'élément en HEM 300 atteint la même température en 27 minutes.

### CAS 2 :

L'évolution de la température d'éléments métalliques, non protégé, soumis au feu standard ISO 834 est présentée en fonction de leur facteur de massivité  $A_m/V$ .

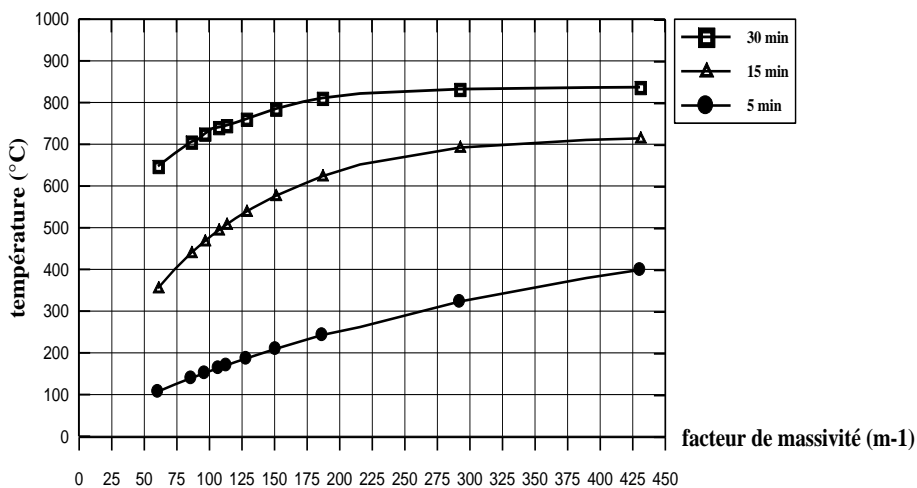


Figure 3: Evolution de la température en fonction de  $A_m/V$  pour 5, 15 et 30 min

La figure (3) indique la température atteinte par des sections d'acier de massivité différente après 5, 15 et 30 minutes d'incendie conventionnel. Si on prend une température critique de  $600 \text{ °C}$  et une durée de feu égale à 15 minutes, le facteur de massivité maximal sera égal à  $168 \text{ m}^{-1}$ . On présente

également l'évolution du temps en fonction du facteur de massivité des différents profilés, non protégé, selon différentes températures.

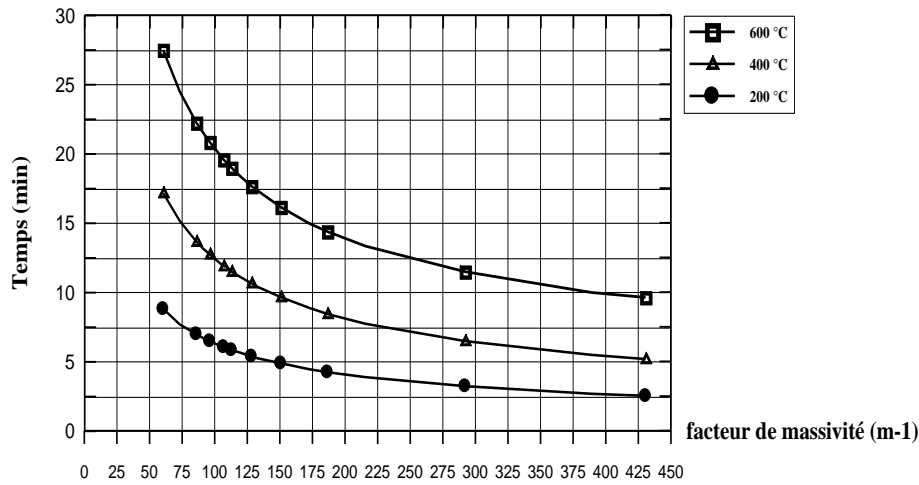


Figure 4: Evolution du temps en fonction de  $A_m/V$  pour 200, 400, et 600 °C

La figure (4) montre l'effet du facteur de massivité sur l'évolution du temps d'incendie d'éléments en acier soumis à des températures de 200, 400 et 600 °C. On remarque que lorsque le profilé est au contact avec une dalle ayant une conductivité plus basse que celle de l'acier, ceci entraînera une diminution de la surface exposée au feu et par conséquent une diminution du facteur de massivité. Ceci augmentera le temps de résistance de l'élément au feu.

CAS 3 :

Dans ce cas, on utilise un matériau de protection rapporté à l'élément métallique. Des plaques en plâtre de différentes épaisseurs sont utilisées. Ces dernières ont une densité égale à 800 Kg/m<sup>3</sup>, une chaleur spécifique égale à 1700 J/kg K et une conductivité thermique égale à 0.2 W/m K. L'élément en acier est exposé au feu standard (ISO 834) sur trois ou quatre faces pendant une durée de 1h 30 mn .

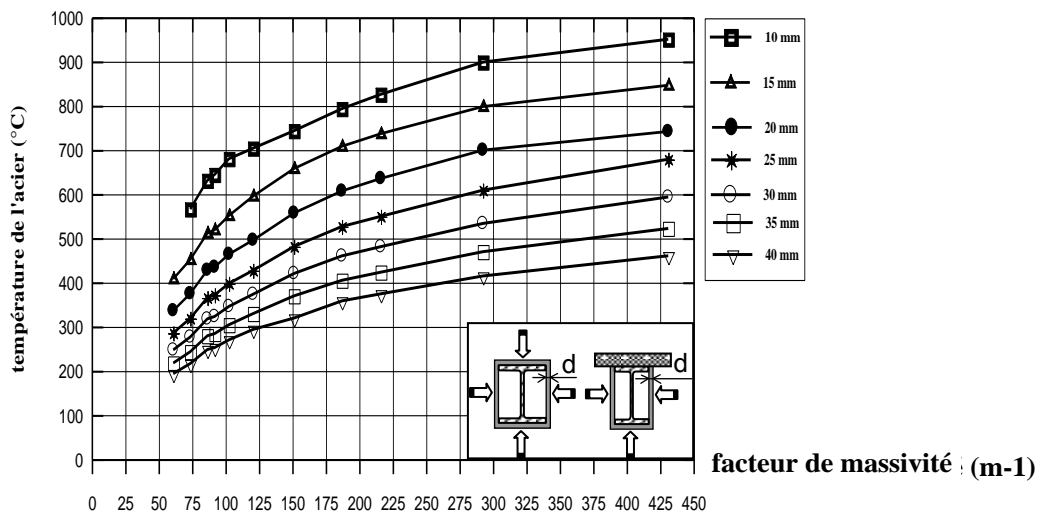


Figure 5: Température en fonction de  $A_m/V$  pour des aciers protégés après 1h 30mn d'incendie

La figure (5) peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur de protection à appliquer de telle manière que la température de l'acier ne dépasse pas la température critique de l'élément. Par exemple pour un

élément en HEA 200 ( $A_m/V = 211.9$ ) exposé sur ces quatre faces à une température critique de 600 °C, il faut appliquer une épaisseur (en placoplâtre) de 22 mm pour que l'élément, HEA200, soit stable pendant une durée de 1h 30mn.

Le matériau de protection peut être représenté par la caractéristique  $d_p/\lambda_p$ . Le temps pour qu'un élément atteigne une certaine température, est dépendant du facteur  $d_p.V/\lambda_p.A_p$  qui pour des valeurs de températures critiques est représenté dans la Figure (6).

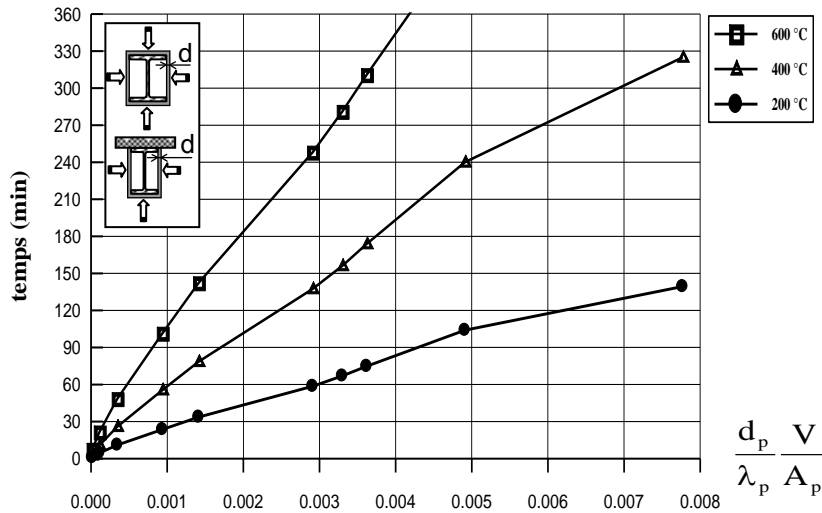


Figure 6: Temps de résistance en fonction du facteur ( $d_p V/\lambda_p A_p$ )

On montre qu'il est pratique de retrouver graphiquement pour des valeurs estimées de  $\lambda_p$  l'épaisseur  $d_p$  nécessaire du matériau de protection pour une température critique et un temps de résistance au feu voulu. Comme exemple d'illustration, on reprend le cas 3 pour le profilé HEA 200 où la température et le temps sont donnés ( $T = 600$  °C ;  $t = 90$  minutes). Le facteur  $d_p.V/\lambda_p.A_p$  possède une valeur de 0.0008 déduite de la courbe figure (6) ce qui permet de calculer l'épaisseur de protection  $d_p$ . Connaissant les valeurs de  $A_p/V$  et de  $\lambda_p$  égales respectivement à 145 et 0.2,  $d_p$  est égale à 23 mm.

## 6. Conclusion

Dans un premier temps, on a présenté les mécanismes de transfert de chaleur dans les éléments de structures métalliques dans leur rôle de poutre ou de poteau selon l'effet de la courbe d'échauffement ISO 834.

Un programme d'automatisation de calcul des méthodes analytiques décrivant ces mécanismes a été établi dans les cas de sections en acier nues ou protégées.

Les résultats du code de programmation donnent l'évolution de la température dans les différents types de profilé que ce soit par rapport au facteur de massivité ou par rapport au facteur dépendant de l'épaisseur et du type de protection selon le règlement Eurocode 3.

Les représentations graphiques peuvent être utilisées pour l'évaluation de la durée d'échauffement d'un profilé nu et de prévoir la résistance au feu appropriée selon le type de protection.

## 7. Bibliographie

- [1] Kada A., Lamri B., Benlakehal N. , Achour B. , *Structures en acier sous l'effet de hautes températures*, JIRITE 2006
- [2] Eurocode 3, partie 1.2, *Calcul du comportement au feu des structures en acier*, ENV 1993 partie 1-2, septembre 1995
- [3] Eurocode 1, partie 2.2, *Actions en cas d'incendie*, ENV 1991 partie 2-2, Février 1995

- [4] Drysdale D., *An introduction to Fire Dynamics*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & sons
- [5] Moaveni S., *Finite element analysis, theory and application with ANSYS*, Prentice Hall 1999
- [6] APK, *Construction métallique et mixte acier-béton*, édition Eyrolles, 1996
- [7] Kruppa J., *Le comportement réel des structures en acier en cas d'incendie*, les entretiens de la technologie, 3<sup>e</sup> édition, 1994
- [8] ECCS , *Fire resistance of steel structures*, technical notes, 1995