

## SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT NON-LINEAIRE DES PORTIQUES MÉTALLIQUES EN SITUATION D'INCENDIE

*BENLAKEHAL NOURREDINE<sup>1</sup>, LAMRI BELKACEM<sup>1</sup>, KADA ABDELHAK<sup>1</sup>,  
BOUCHAIR ABDELHAMID<sup>2</sup>, MESQUITA LUIS M.R.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> LABORATOIRE DE STRUCTURES, GEOTECHNIQUE ET RISQUES, UNIVERSITÉ HASSIBA BENBOUALI  
DE CHLEF, FACULTE DE GÉNIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE, DEPARTMENT DE GÉNIE CIVIL, BP 151,  
ROUTE DE SENDJAS, CHLEF 02000, ALGERIA. E-MAIL: N\_BLK@YAHOO.FR

<sup>2A</sup> CLERMONT UNIVERSITÉ, UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL, INSTITUT PASCAL, BP 10448, 63000  
CLERMONT FERRAND, FRANCE

<sup>2B</sup> CNRS, UMR 6602, INSTITUT PASCAL, 63171 AUBIÈRE, FRANCE

<sup>3</sup> APPLIED MECHANICS DEPARTMENT, POLYTECHNIC INSTITUTE OF BRAGANÇA, AP. 1134, 5301-857  
BRAGANÇA, PORTUGAL

### Thème N°10 : Risque d'incendie

#### Résumé

*Pour des raisons pratiques d'exploitation et de durabilité, les bâtiments industriels, sont dans la majorité des cas conçu en charpente métallique. Cependant le matériau acier quoi que ductile, il reste vulnérable aux excès de températures. Les récents événements d'incendies concernant les structures et bâtiments industriels de Sonatrach, à Alger dans une zone urbaine ou à Skikda dans une zone industrielle, nous rappellent le danger réel et le risque potentiel des incendies. Les nouvelles normes Européennes définissent des exigences actives et passives concernant le comportement au feu des bâtiments industriels.*

*L'objectif de ce travail concerne l'étude du comportement non-linéaire des structures industrielles en acier selon plusieurs scénarios de feu. L'analyse numérique par la MEF et utilisant le logiciel ANSYS est considérée afin d'évaluer la résistance de ces structures et d'optimiser leur protection au feu. Une analyse, utilisant les non linéarités géométrique et matérielle, est conduite avec une variation progressive des températures jusqu'à la ruine. Différents taux de chargement ainsi que différents scénarios de feu seront utilisés pour évaluer la température critique ainsi que les déplacements des portiques en fonction de l'évolution de la température.*

**Mots clés:** *bâtiments industrielles, portiques métalliques, incendie, hautes températures, simulation numérique*

### 1. INTRODUCTION

L'incendie représente un risque majeur dans le domaine du génie civil et notamment dans le bâtiment. Il peut causer des pertes humaines et matérielles considérables. Lors d'un incendie, les éléments d'un bâtiment perdent de leur résistance mécanique du fait de l'augmentation de la température, ceci entraîne la ruine plus ou moins importante du bâtiment. Ceci est dû essentiellement au mauvais comportement du matériau acier sous l'effet de hautes températures où la limite élastique  $f_y$  et le module de Young  $E$  subissent une dégradation importante [1].

De nombreuses études tiennent compte de leurs effets sur des éléments de structures poutres ou poteaux pris isolément et sous des conditions limites les plus divers [2-5]. Cependant l'étude de leur comportement structural dans un contexte de portique, en 2D où dans un ouvrage industriel en 3D, nécessite des modèles numériques plus élaborés auxquelles les nouvelles normes Européennes datant du 5 Aout 2002 répondent par des exigences prescriptives [6]. Ces dernières sont énumérées comme suit :

- En cas d'incendie se déclarant dans une des cellules du bâtiment, il ne doit pas y avoir d'effondrement de la structure vers l'extérieur.

- En cas d'incendie se déclarant dans une des cellules du bâtiment, la ruine de cette cellule ne doit pas entraîner la ruine des cellules avoisinantes.
- Le comportement de la structure au voisinage des éléments séparatifs coupe- feu doit permettre à ces derniers de conserver leur qualité coupe-feu pendant la durée requise.

Afin de répondre à ces critères de performance, plusieurs études paramétriques pour les bâtiments industriels en charpente métallique ont été menées dans le cadre d'un projet de recherche Européen. Ces études ont permis d'élaborer des méthodes simplifiées de dimensionnement, essentiellement prescriptives selon des scénarios d'incendie [7].

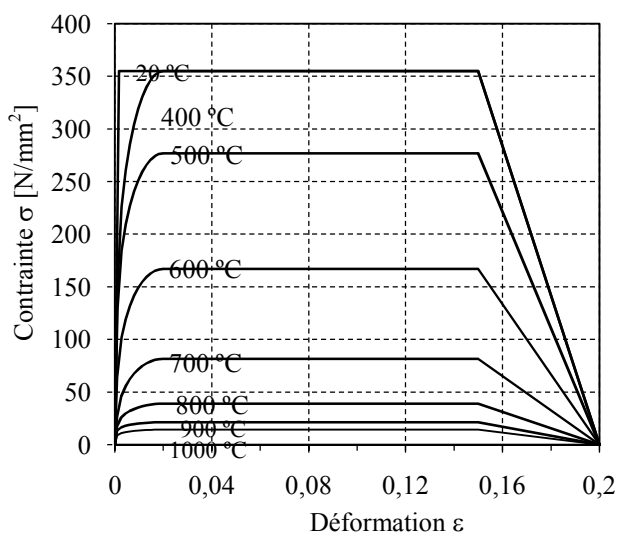
Cependant le comportement réel des bâtiments industriels en situation d'incendie nécessite la considération de paramètres plus complexes tels que le comportement non-linéaire du matériau acier et la dégradation des caractéristiques thermomécaniques de ce dernier. Seul un calcul avancé utilisant la modélisation par des logiciels en éléments finis permet une analyse globale de la structure (ANSYS, ABAQUS, SAFIR, ...) en prévoyant des scénarios de feu les plus divers [8-10].

Cet article a pour objectif de procéder, par une simulation numérique, à l'étude du comportement non-linéaire de portiques à double versants. Les modèles sont élaborés selon plusieurs scénarios de feu sous incendie ISO 834 [11] en utilisant le logiciel ANSYS [12]. L'analyse, utilisant la non linéarité géométrique et la non linéarité du matériau, est conduite avec une variation progressive des températures jusqu'à la ruine. Différents taux de chargement ainsi que différents scénarios de feu sont utilisés pour évaluer la température critique ainsi que les déplacements des portiques en fonction de l'évolution de la température. Les résultats de cette étude seront comparés à ceux calculés par les méthodes simplifiées de l'EC3 [1].

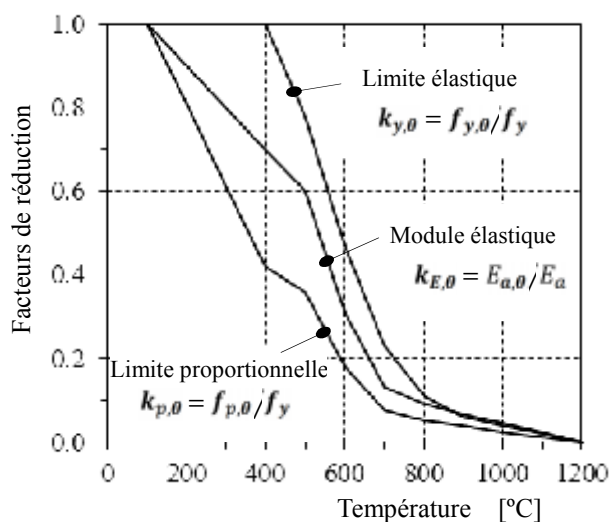
## 2. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ACIER AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

### 2.1 Relations contrainte-déformation

Pour les matériaux tels que l'acier, l'accroissement de température conduit à la diminution des propriétés mécaniques tels que la limite d'élasticité  $f_y$  et le module de Young  $E$ .



**Figure 1 :** Contraintes-déformations de l'acier S355 à différentes températures



**Figure 2 :** Coefficient de réduction de l'acier aux températures élevées

On peut constater que la perte significative en résistance pour l'acier commence à 400 °C. A 600°C, sa résistance est réduite approximativement de 50%. En revanche, sa raideur pourrait être réduite de 70% d'environ.

L'Eurocode 3 [1] donne une formule approximative du facteur de réduction pour la limite d'élasticité  $k_{y,\theta}$  en fonction de la température  $\theta$  :

$$k_{y,\theta} = \left[ 0.96741 \left( 1 + e^{\left( \frac{\theta-482}{39.19} \right)} \right) \right]^{-1/3.833} \quad (1)$$

et du facteur de réduction du module de Young  $k_{E,\theta}$  selon la figure 2.

## 2.2 Dilatation thermique

Pour le matériau acier, l'Eurocode 3 [1] propose des formules empiriques de la dilatation thermique  $\Delta L/L$  en fonction de la température.

$$\begin{aligned} (\Delta L/L)_a &= -2.416 \cdot 10^{-4} + 1.2 \cdot 10^{-5} \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \theta^2 && \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C} \\ (\Delta L/L)_a &= 11 \cdot 10^{-3} && \text{pour } 750^\circ\text{C} \leq \theta \leq 860^\circ\text{C} \\ (\Delta L/L)_a &= -6.2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \theta && \text{pour } 860^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2)$$

Pour des calculs simplifiés, l'EC3 [1] propose une valeur constante de  $\alpha$  égale à  $14 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

## 3. DONNÉES DE BASE

### 3.1 Modèles d'incendie

Bien que les paramètres qui gouvernent les conditions de développement d'un incendie réel sont nombreux (quantité et nature des matériaux combustibles, types de parois du compartiment et conditions de ventilation), un modèle de feu plus sévère, ISO 834, a été adopté, figure 3. Cette dernière représente l'action d'un incendie dans un bâtiment à compartiment dit confiné selon la formule donnée par l'Eurocode 1 partie 1-2 [11]:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3)$$

Où :  $\theta_g$  est la température des gaz en  $[\text{ }^\circ\text{C}]$  et  $t$  est le temps en  $[\text{min}]$

### 3.2 Evolution de la température dans les profilés métalliques

La courbe d'évolution de la température dans la section des profilés métalliques, IPE300 et IPE360, constitue la sollicitation thermique adoptée dans le modèle étudié [13]. L'accroissement de la température  $\Delta\theta_{a,t}$ , pour les sections non protégées, est donné par la formule (4) [1]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{1}{c_a \rho_a} \cdot \left( \frac{A_m}{V} \right) \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

Où  $k_{sh}$  est le facteur de correction pour l'effet d'ombre;  $A_m/V$  est le facteur de massiveté pour les éléments en acier non protégés;  $c_a$  est la chaleur spécifique de l'acier  $[\text{J/kgK}]$ ;  $\dot{h}_{net,d}$  est la valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface  $[\text{W/m}^2]$ ;  $\Delta t$  est l'intervalle de temps  $[\text{s}]$ ;  $\rho_a$  est la masse volumique de l'acier  $[\text{kg/m}^3]$ .

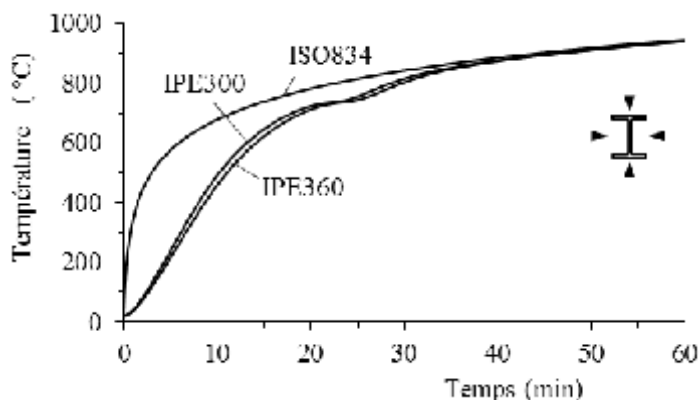


Figure 3 : Courbe ISO834 et profils de température /temps dans les sections

### 3.3 Données structurales et sollicitations

Le but est d'étudier un portique à double versant représentatif de structure de contreventement pour les bâtiments industriels dont les montants sont bi-articulés à leurs bases par soucis d'allègement des fondations.

Le modèle choisi du portique est de hauteur égale à 7.5 m et d'une traverse de longueur égale à 20 m. La hauteur du portique à mi-travée est de 8 m, donnant une inclinaison à la traverse de 5% dans chaque extrémité. Les données de sollicitations représentant, le poids de la toiture et des pannes est de  $0.25 \text{ kN/m}^2$ , le poids du bardage des façades est de  $0.15 \text{ kN/m}^2$ , le poids de la neige est de  $0.55 \text{ kN/m}^2$  et la charge du vent est de  $0.555 \text{ kN/m}^2$ .

Un dimensionnement à froid du portique a été mené en utilisant le logiciel «Portal» établi par le CTICM [14]. Ceci a donné pour les montants un profil IPE 360 et pour la traverse un profil IPE 300. L'acier considéré est de nuance S355 en conformité avec les exigences sévères d'un environnement sous de très hautes températures. Aux extrémités de la traverse, la liaison de cette dernière aux montants est considérée comme rigide. A leurs bases, les montants sont articulés aux socles des fondations.

Pour le calcul aux températures élevées, seules les charges verticales dues à G (toiture et bardage) et S (neige) sont considérées dans l'analyse.

Le modèle choisi est représenté sur la figure 4.

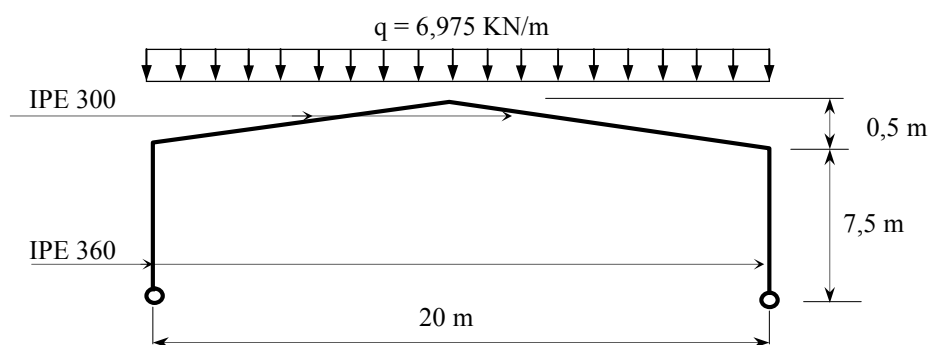


Figure 4 : Modèle de portique à analyser

## 4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE UTILISANT LE LOGICIEL ANSYS

Le but de cet article est de produire un modèle numérique permettant de reproduire le comportement des portiques métalliques à double versant sous des conditions d'incendie et intégrant les paramètres

thermomécaniques de l'acier ( $c_a, E, f_y, \alpha$ ) variant en fonction de la température.

Le logiciel aux éléments finis ANSYS a été utilisé pour permettre cette modélisation utilisant les non linéarités géométrique et matérielle. L'élément «beam189» a été choisi pour modéliser au mieux les lois de comportement du matériau acier et en particulier l'évolution progressive de la plasticité sur la hauteur de la section. La non linéarité du matériau est établie par les diagrammes contraintes-déformations de la figure 1. Le coefficient de dilatation thermique est fonction de la température selon les équations (2).

#### 4.1 Hypothèses

Le modèle numérique tient compte des hypothèses suivantes:

- Température uniforme dans les éléments métalliques,
- Non linéarité géométrique en grands déplacements,
- Non linéarité matérielle  $\sigma$ - $\varepsilon$ , *comportement Multi- linéaire élastique sans "Strain Hardening"*,
- Les éléments du portique sont prémunis contre les déplacements latéraux.

#### 4.2 Discrétisation et modèle numérique

Les montants et la traverse ont été discrétisés respectivement en 15 éléments et 40 éléments selon leurs longueurs. L'élément «beam189» permet aussi la division selon la hauteur de la section pour permettre la prise en compte de la non linéarité du matériau. Pour les montants et la traverse, la section a été divisée en 8 éléments (voir figure 5).

Pour éviter tout déplacement latéral, les nœuds de la semelle supérieure pour les éléments verticaux (montant) et horizontaux (traverse) sont bloqués latéralement (sens z).

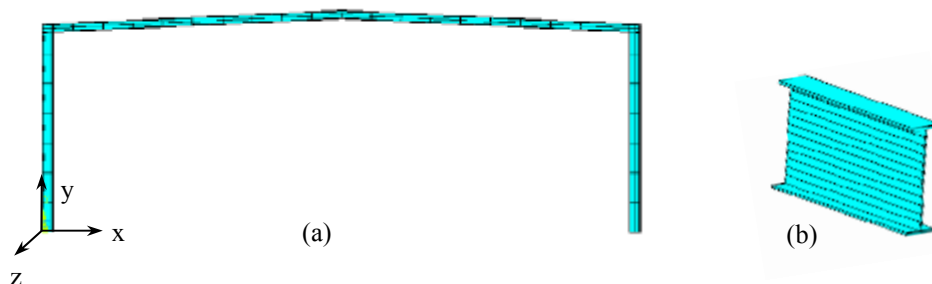


Figure 5 : Modèle numérique

(a) Discrétisation du portique      (b) discrétisation de la section

### 5. Analyse et résultats

Le calcul mécanique est effectué pour des températures dans les sections variant selon les courbes de la figure 3 pour un intervalle de temps pris égal à une seconde.

Un premier scénario (dit scénario 1) de feu représentant le cas d'un embrasement généralisé qui considère que toute la structure, figure 6, est soumise à l'action du feu ISO834 est considéré. Pour ce cas, un taux de chargement  $\eta$ , défini comme le rapport des effets des actions en situation d'incendie et ceux en situation à température normale, est pris variant entre 0.2 et 0.8.

La température critique est considérée atteinte quand le modèle cesse de converger.

Les valeurs des déplacements maximums au milieu de la traverse ainsi qu'à l'extrémité sont données par les figures 7 et 8.

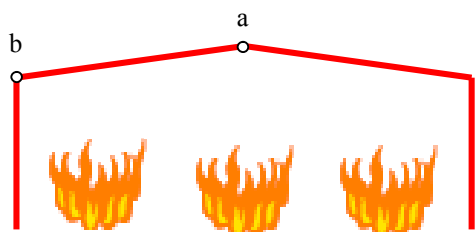


Figure 6 : Scénario (1) - Portique sous charge du feu généralisé

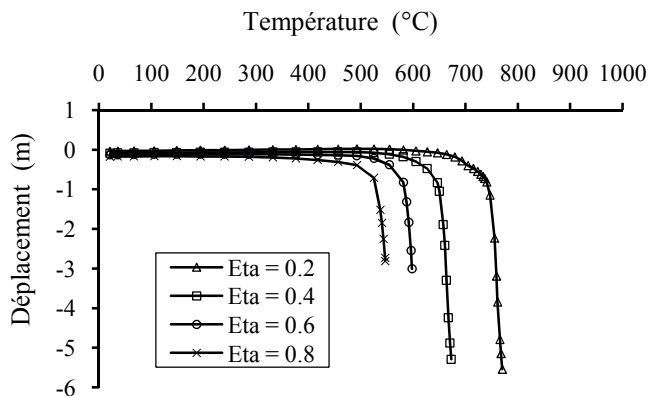


Figure 7 : Déplacement vertical du nœud a

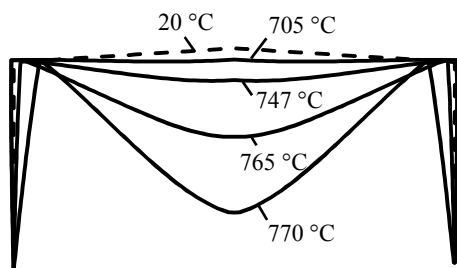


Figure 9 : Déformation du portique pour différentes températures (Eta=0.2)

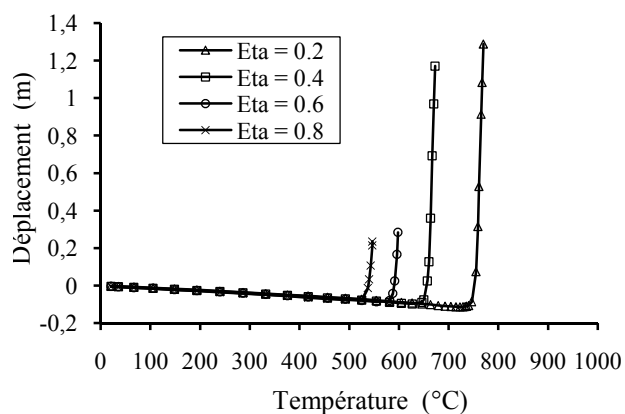


Figure 8 : Déplacement horizontal du nœud b

Les figures 7 et 8 montrent que la température critique diminue de 770 °C à 546 °C pour des taux de chargement  $\eta$ , variant de 0.2 à 0.8 respectivement.

Après analyse de ce premier scénario, il en découle que le mode de ruine de portiques de bâtiments industriels se développe vers l'intérieur du bâtiment comme stipulé par les exigences des normes Européennes citées auparavant [6]. D'après les figures 7 et 8, on constate durant l'échauffement, que le portique se déforme légèrement vers l'extérieur à cause de la dilatation thermique de la traverse. Pour une température proche de la température critique, le portique revient brusquement vers l'intérieur entraîné par l'effet de corde de la poutre.

En plus du taux de chargement, les scénarios d'incendie peuvent aussi avoir une influence sur les déplacements de la structure et par conséquent sur son mode de ruine. Dans cette analyse, deux autres scénarios d'incendie ont été choisis en fonction de la protection des montants ou dans le cas d'un feu localisé impliquant un montant et une partie de la traverse, voir figure 10.

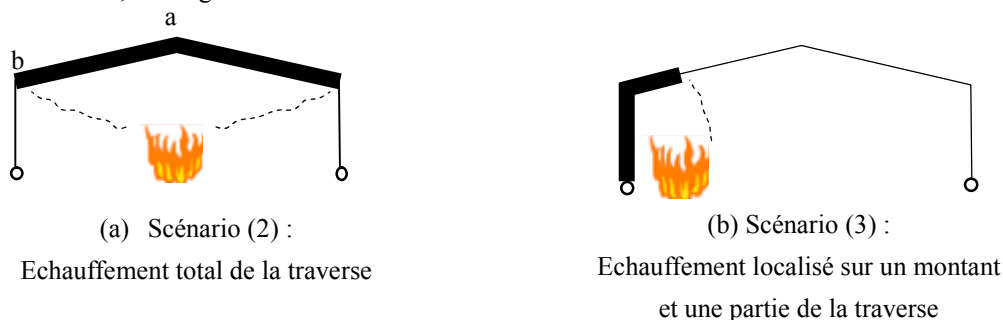


Figure 10 : Profils d'échauffement du modèle pour différents scénarios d'incendie

Les figures 11 et 12 présentent les valeurs des déplacements au milieu de la traverse et en tête du montant en fonction des températures pour un taux de chargement égal à 0.2. Le choix de ce dernier est justifié par les effets des surcharges qui sont moindres pour les poteaux de hauteur inférieurs à 8 m [15].

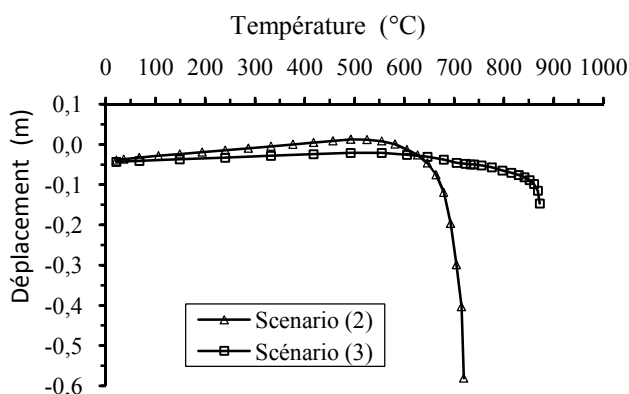


Figure 11 : Déplacement vertical du nœud a

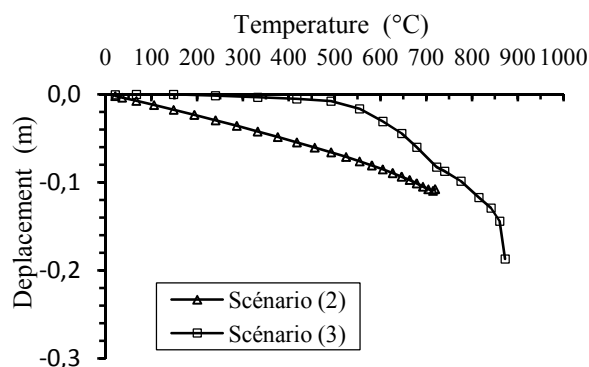


Figure 12 : Déplacement horizontal du nœud b

Les scénarios 2 et 3 révèlent des déplacements inférieurs à ceux du précédent ce qui est prédictible du fait que l'incendie n'est pas généralisé. Song [16] a montré que des simulations qui tiennent compte de l'approche dynamique peuvent divulguer des déplacements beaucoup plus importants si on ne désire pas se limiter à ceux du cas étudié dit statique.

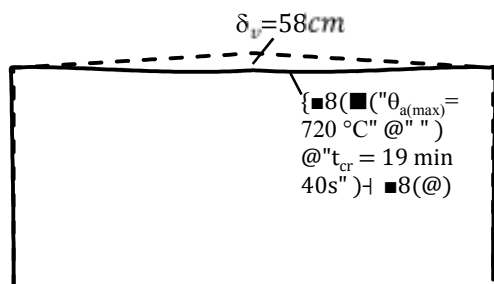


Figure 13 : Déformation du portique  
Scénario 2

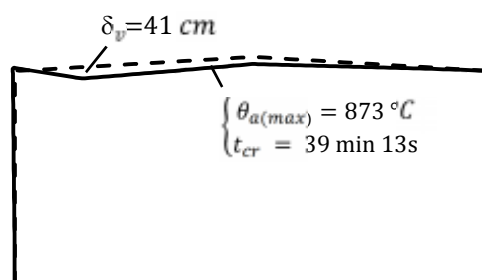


Figure 14 : Déformation du portique  
Scénario 3

Les figures 13 et 14 expriment des instabilités locales telles que la formation des rotules plastiques au niveau de la traverse du fait du type d'incendie qui est localisé pour ces deux cas de scénarios.

Un résumé regroupant les températures critiques calculées par le modèle numérique selon les trois profils de feux et celles calculées en utilisant les formules simplifiées de l'Eurocode 3 est donné par le tableau 1.

Le taux d'utilisation  $\mu_0$ , rapport de l'effet d'action sur la résistance de calcul correspondante de l'élément en situation d'incendie [11] présent dans la formule (5) de la température critique, est déterminé par le logiciel «Portal».

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (5)$$

Pour les deux modèles de calcul, Les valeurs des températures critiques du tableau 1, sont déterminées pour un même taux de chargement égal à 0.2.

**Tableau 1:** Températures critiques selon le modèle numérique et le modèle de l'EC3

Modèle numérique (ANSYS)		EC3		
Profils d'échauffement	$\theta_{cr}$ (°C)	Elément	$\mu_0$	$\theta_{cr}$ (°C)
1	770	Traverse	0,302	663
2	720	Montants	0,226	707
3	873			

Comme prévisible, les valeurs des températures critiques de l'Eurocode 3 (tableau 1) sont conservatives et celles de l'analyse par ANSYS révèlent la possibilité d'avoir des résistances au feu supérieures.

## 6. Conclusion

Cet article expose la simulation numérique en vue d'étudier le comportement des portiques de bâtiments industriels à double versants sous des conditions d'incendie. Les modèles sont analysés par le logiciel ANSYS et tiennent compte du comportement non-linéaire du matériau acier sous l'effet de hautes températures. Les paramètres qui influent sur le comportement au feu de ses structures, tels que le taux de chargement ainsi que les scénarios de feu, ont été étudiés. Les résultats obtenus en terme de déformation confirment ce comportement spécifique aux structures industrielles et reportés dans les rapports à savoir que celles-ci ont tendance à s'affaisser vers l'intérieur par rapport à la position initiale. Ce genre de comportement est d'autant plus souhaitable qu'il permet d'éviter la propagation de l'incendie aux structures proches. Aussi il relève de cette analyse que le taux de chargement a une influence sur la résistance des portiques métalliques à double versants qui s'exprime par une différence d'environ 220 °C entre les températures critiques minimale et maximale pour  $\eta$  variant de 0.2 à 0.8.

Enfin, la considération de scénarios d'incendie allant du feu généralisé à des feux localisés a montré que pour le premier scénario le comportement reste sévère et peut être évité en faveur des deux autres scénarios qui ont été analysés à cet effet. Il est donc recommandé de prendre les dispositions constructives adéquates pour les bâtiments industriels afin de favoriser les scénarios de feu localisés engendrant les mécanismes d'instabilité locale.

## Bibliographie

- [1] Eurocode 3, Calcul des Structures en Acier. EN 1993-1-2: Règles générales- Calcul du comportement au feu, 2003.
- [2] Abdelhak KADA, Belkacem LAMRI, Nourredine BENLAKEHAL, Belkacem ACHOUR, Abdelhamid Bouchaïr, Analyse non-linéaire de poutres métalliques PRS de longues travées sous l'effet de hautes températures dues à l'incendie, Revue Nature & Technologie, A-Sciences fondamentales et Ingénierie, N°8, Janvier 2013, pp. 27-34
- [3] L.M.R. Mesquita, P.A.G. Piloto, M.A.P. Vaz, P.M.M. Vila Real, Experimental and numerical research on the critical temperature of laterally unrestrained steel I beams, Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 1435–1446
- [4] H. R. Mauroa, V.P. Silva, On the behaviour of single span steel beams under uniform heating, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci & Eng. 2007, pp 115-122.

- [5] D. Talamona, J.M. Franssen, J.B. Schleich, J Kruppa, Stability of steel columns in case of fire: Numerical modeling, *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, N°6, pp. 713-720, 1997.
- [6] A.H. Buchanan, *Structural design for fire safety*, John Wiley & Sons 2001.
- [7] European Commission – Fire safety of industrial halls and low-rise buildings: realistic fire design, active safety measures, post-local failure simulation and performance based requirements, technical steel research, 2007
- [8] Vassart O., Cajot L.G., O'Connor M., Shenkai Y., Fraud C., Zhao B., *3D simulation of Industrial Hall in case of fire. In: Benchmark between ABAQUS, ANSYS and SAFIR*, Proceedings of the 10th international conference, vol. 2, London UK, Interscience Communication Limited, 2002.
- [9] P.J. Mossa, R.P. Dhakal a, M.W. Bongb, A.H. Buchanana Design of steel portal frame buildings for fire safety, *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 1216\_1224
- [10] V. de Souza Junior\*, G. J. Creus, and J.-M. Franssen, numerical modelling of a single storey industrial building at elevated temperature -comparison between the 2d and 3d analyses, *Mecanica Computacional* Vol. XXI, pp. 1986-1997.
- [11] Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-2: Règles Generales , actions sur les structures exposées au feu, 2002.
- [12] ANSYS 10.0, - Ansys user's Manuel for Revision 10.0, Analysis Systems, 2005.
- [13] Benlakehal N., Kada A., Lamri B., Achour B., Protection des structures métalliques sous l'effet d'incendie : Application du transfert de chaleur dans les profilés selon l'Eurocode 3, ALGERIE Equipement, *Revue Technique de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics*, N°47 Mai 2010
- [14] Portal V1.1, Logiciel de calcul des portiques selon CM66 et Eurocode 3, CTICM, France
- [15] Wong Y.S. (2001), "The Structural Response of Industrial Portal Frame Structures in Fire", PhD thesis, University of Sheffield.
- [16] Song YY et al., The behavior of single-storey industrial steel frames in fire. *International Journal of Advanced Steel Construction* 5(3):289-302, 2009.
- [17] J. Morel, *Calcul des structures métalliques selon l'EC3*, Edition Eyrolles, 1993.