
Modélisation multi physique du comportement au feu des colonnes en béton armé

N. Otmani (née Benmehidi)¹, J-M Franssen², M. Guenfoud³

¹ Laboratoire Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, Benmehidi_Nadial@yahoo.fr

² Département ArGENCo, Université de Liège, Belgique, jm.franssen@ulg.ac.be
www.argenco.ulg.ac.be/se

³ Laboratoire de Génie Civil et d'hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 45, Guelma, Algérie, Gue2905M@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Cet article est consacré à la modélisation numérique non linéaire des colonnes en béton armé soumises à un incendie. Dans ce travail nous analysons des colonnes en béton armé chargées par des efforts de compression excentrés et soumises à un feu normalisé. Du fait que les poteaux ont un rôle extrêmement important dans une construction, la vérification de leur résistance au feu dans les conditions d'incendie est cruciale. L'analyse se divise en deux étapes. Dans la première étape nous procédons à l'étude thermique des colonnes. Nous en déduisons les températures en fonction du temps que nous utilisons dans la deuxième étape pour l'étude mécanique. Lors de cette dernière nous obtenons les variations de différents paramètres tels que le moment fléchissant, les contraintes, les déplacements et le module tangent.

ABSTRACT. This paper is devoted to nonlinear numerical modeling of reinforced concrete columns subjected to fire. In this work we analyze reinforced concrete columns loaded by eccentric compressive forces and exposed to a standard fire. That the columns have an extremely important role in building, the verification of fire resistance in fire conditions is crucial. The analysis is divided into two steps. In the first step we make the thermal study of column. It follows the temperatures depending of time that we use in the second stage for the mechanical study, where we get the variation of different parameters such as bending moment, stresses, displacements and tangent modulus.

MOTS-CLÉS : Colonne, Résistance, Feu, Béton, Acier.

KEY WORDS: Column, Resistance, Fire, Concrete, Steel.

1. Introduction

Lors d'un incendie, les structures d'un bâtiment perdent de leur résistance mécanique suite à l'augmentation de la température, ce qui entraîne la ruine du bâtiment. La résistance au feu a pour but de préserver la stabilité des édifices et de s'opposer à la propagation rapide du feu pendant le temps nécessaire à l'alarme et à l'évacuation des occupants. Elle se mesure, pour un élément structurel par son temps de ruine. Dans ce travail nous faisons une analyse multi-physique (tenant compte de la physique de transfert de chaleur et de la mécanique des solides) non linéaire de colonnes en béton armé chargées par des efforts de compression excentrés et soumises au feu ISO 834 [ENV 91]. Dans le but d'évaluer leurs réponses, l'analyse se divise en deux étapes. Dans la première étape nous déterminons les températures à chaque instant et à chaque point des poteaux, en résolvant les équations transitoires de transfert de chaleur par la méthode des éléments finis. Pour ce faire, la section des poteaux est discrétisée en éléments bidimensionnels de type quadrilatères. Dans cette analyse non linéaire; la non linéarité matérielle et la non linéarité géométrique sont prises en compte. Elle a pour but la détermination: des nouvelles caractéristiques mécaniques dans chaque particule du milieu (module tangent, contraintes, déformations) ainsi que le temps de ruine de l'élément. L'analyse tient en compte la dégradation des caractéristiques mécaniques du milieu suite à l'élévation des températures. Les résultats importants obtenus lors de cette étude expriment bien : l'influence de la température et l'importance de la sollicitation mécanique sur le temps de ruine de l'élément étudié. Dans cette étude nous employons le logiciel SAFIR [FRA 87] (qui est un logiciel universitaire dynamique encours de développement consacré aux structures soumises à l'incendie, il a été réalisé au laboratoire ArGenCO université de Liège en Belgique par le professeur J-M Franssen).

2. Les caractéristiques mécaniques du béton vis-à-vis du feu

2. 1. Résistance en compression du béton normal (jusque C50/60)

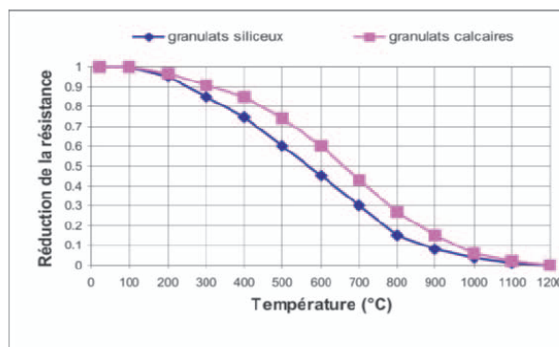


Figure 1. Evolution de la résistance du béton en fonction de la température et du type de granulats [DEN, 07]

Pour le béton, la perte de résistance résulte surtout de la formation de fissures internes et de dégradation/désintégration de la pâte de ciment. En effet la pâte se contracte alors que les granulats se dilatent. Outre ces fissures internes, on assiste, à des températures très élevées, à la formation de fissures entre la pâte de ciment et les granulats. Le graphique ci-dessus (Figure 1.) montre l'évolution de la résistance du béton en fonction de la température et du type de granulats utilisés [DEN, 07]. L'éclatement explosif est *improbable* lorsque la teneur en eau du béton est inférieure à k % du poids total du béton. Au niveau européen, la valeur recommandée est 3.

2.2. Evolution du module d'élasticité

2.2.1 Module d'élasticité en compression [GAW 04]

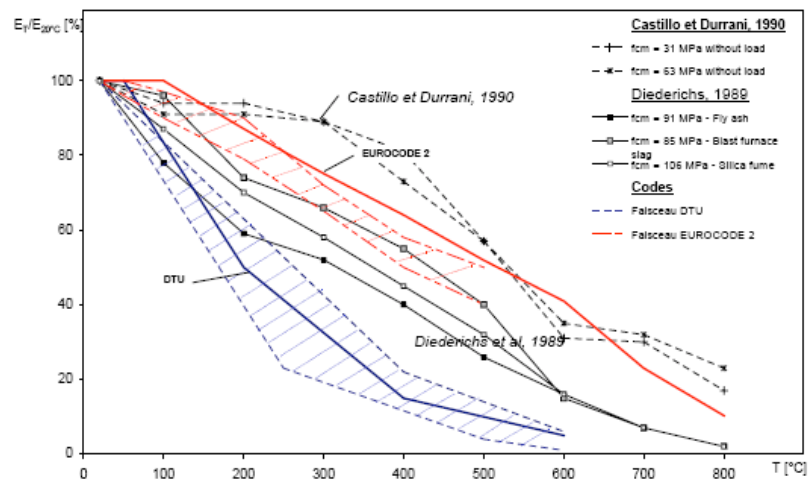


Figure 2. Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition

Diederichs et al. 1992 et Castillo et Durrani, 1990 ont mesuré les déformations des éprouvettes au cours des essais de compression à hautes températures. Au fur et à mesure de l'augmentation des températures nous pouvons observer : la réduction de la pente de la première partie linéaire de la courbe et l'augmentation de la déformabilité des bétons.

3. Comportement mécanique du béton vis-à-vis du feu

Tableau 1. Relation entre les différents paramètres du modèle de la figure 3

<p>DOMAINE I:</p> $\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \left[3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right\} \right]$
<p>DOMAINE II:</p> <p>Pour des applications numériques il convient d'adopter une branche descendante</p>

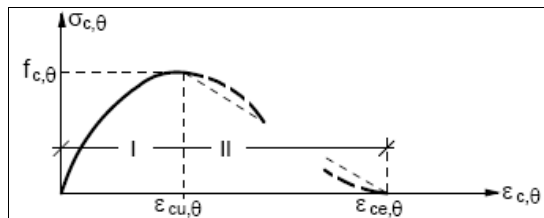


Figure 3. Modèle mathématique à température élevée des relations contrainte-déformation du béton en compression proposée par L'eurocode 4 [ENV, 94]

$\varepsilon_{c,\theta}$ déformation du béton en situation d'incendie

$\varepsilon_{ce,\theta}$ déformation maximale du béton en situation d'incendie

$\varepsilon_{cu,\theta}$ déformation du béton correspondant à $f_{c,\theta}$

4. Evolution des températures dans un poteau en béton armé [BRA 05]

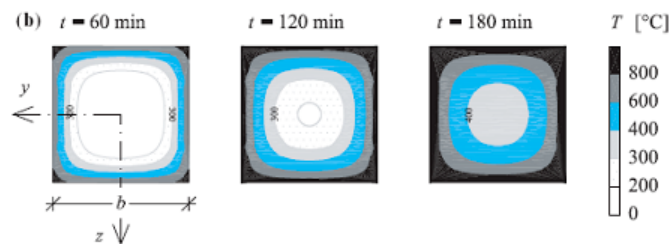


Figure 4. Distribution des températures le long de l'axe $z = 0$ aux temps $t = 60$ min, $t = 120$ min, Et $t = 180$ min,

5. Etude numérique des colonnes en béton armé, analyse mécanique à chaud

De nombreuses études numériques ont traité le problème du comportement des colonnes exposées au feu citons par exemple (Lie et Celikkol, 1991 ; Dotreppe et al., 1999; Elling wood et Lin, 1991; Huang et al, 1999; Lie et Irwin, 1993; Sidibe' et al, 2000; Zha, 2003 ; Bratina et al, 2005). Dans notre travail nous utilisons le logiciel Safir qui se base sur les lois de comportement des Eurocodes. Le fichier de données de l'analyse mécanique se réfère à celui de l'analyse thermique pour utiliser les températures des éléments en fonction du temps. Ce dernier contient les dimensions du poteau (hauteur et section), le nombre d'élément poutre égale à 10, le nombre de nœuds égal à 21, le nombre de gauss (nombre de points d'intégration dans chaque direction de l'élément. Pas moins de 1, ne dépasse pas 3) égal à 2, le chargement et l'enrobage de 3 [cm]. Les caractéristiques des deux matériaux utilisés (béton et acier d'armatures) qui se trouvent dans le fichier de données sont les suivantes : pour le béton selon l'Eurocode 2 [ENV, 92], le coefficient de poisson

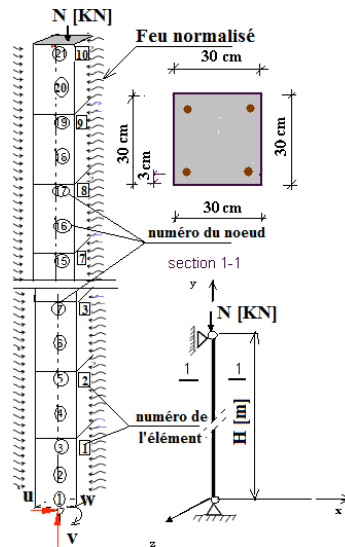


Figure 5. Schématisation des colonnes considérées

$\nu = 0.2$, la résistance à la compression $f_{b,c,0} = 25 \cdot 10^6$ (N/m²), la résistance à la traction $f_t = 0$ et le module de Young $E_b = 11000(f_{c,28})^{1/3}$ (N/m²). Pour l'acier d'après l'Eurocode 3 [ENV, 93], le coefficient de poisson $\nu = 0.3$, la résistance à la compression $f_{c,a} = 500 \cdot 10^6$ (N/m²) et le module de Young $E_a = 210 \cdot 10^9$ (N/m²). La teneur en eau du béton est inférieure à 3 % de son poids. Ce qui veut dire que l'éclatement explosif est *improbable (invérifiable)* d'après l'eurocode 2 partie 1-2, en d'autres termes les pressions de l'eau, le type de granulat, la perméabilité du béton et la vitesse d'échauffement ne sont pas considérés dans notre cas. L'exposition au feu des colonnes est symétrique des quatre côtés.

6. Résultats de l'analyse thermique

En tenant compte de la symétrie par rapport à l'axe y , nous considérons la demi section de béton armé, le fichier de données de l'analyse thermique comporte : Le nombre de nœuds égal à 276, le nombre d'éléments solide égal à 242, les coordonnées des nœuds, la numérotation des éléments désignés avec leurs nœuds, la température initiale égale à 20 (°C) ainsi que la désignation des cotés des éléments de la demi section qui sont soumis à l'action du feu « FISO » [ENV 91] . Dans la figure 6 la température varie d'un point à l'autre, elle diminue au fur à mesure qu'on s'éloigne de la surface de la colonne pour aller vers l'intérieur. Ces résultats sont identiques à ceux donnés dans l'Eurocode 2 partie 1-2. Ils sont aussi en accord avec les valeurs trouvées par Bratina [BRA, 05].

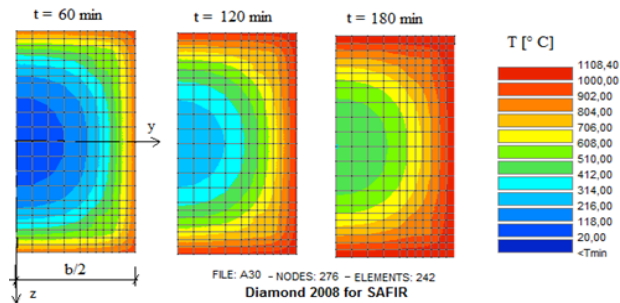


Figure 6. Calcul iso thermal aux temps : $t = 60, 120, 180 \text{ min}$

7. Résultats de l'analyse mécanique

Tableau 2. Résistance au feu et température critique des colonnes

Colones, $C=3 \text{ cm}, 4020$ $A=30 \times 30 \text{ cm}^2$	H [m]	e [cm]	N [kN]	N_{Rd} [kN] = 2037,5 μ [%]	Résistance au feu [min]	Température critique θ [°C]
B ₁	3	0	300	14,7	163	1092.3
B ₂	3	0	500	24,5	111	1034.6
B ₃	3	1.5	700	34,4	75	/
B ₄	3	2	800	39,3	65	/
D ₁	4	0	300	14,7	109	1031.8
D ₂	4	0	500	24,5	80	985.8
D ₃	4	0	700	34,4	64	948.7
D ₄	4	2	700	34,4	57	/
D ₅	4	0	800	39,3	58	/
D ₆	4	2	800	39,3	49	/

Référence n°5

7. 1. Comportement des colonnes, cas de la colonne D₅

Les caractéristiques des matériaux (béton et acier), d’après la littérature diminuent sous l’effet des hautes températures. Dans notre étude numérique nous avons déterminé le module tangent pour les colonnes étudiées ; au début de l’exposition au feu seuls les coins changent de couleur (diminution de E_T , Figure 7), du fait que la surface de contact est faible, l’effet du feu est important en premier lieu au niveau des coins. Au temps de ruine (58 min) le module tangent au centre de la section est nul, les éléments du bord de section ont des valeurs relativement faibles. Dans certains endroits éloignés du centre et du bord de la section, le module tangent garde des valeurs acceptables.

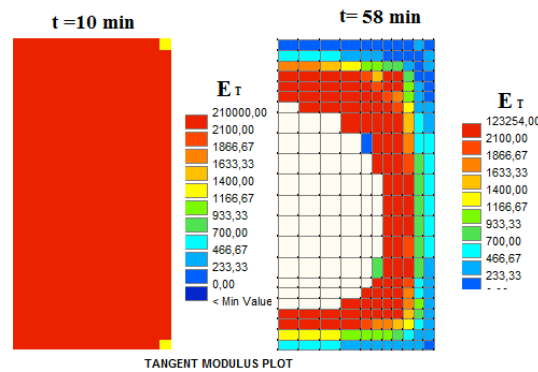


Figure 7. Module tangent au début et à la fin de la durée d’échauffement

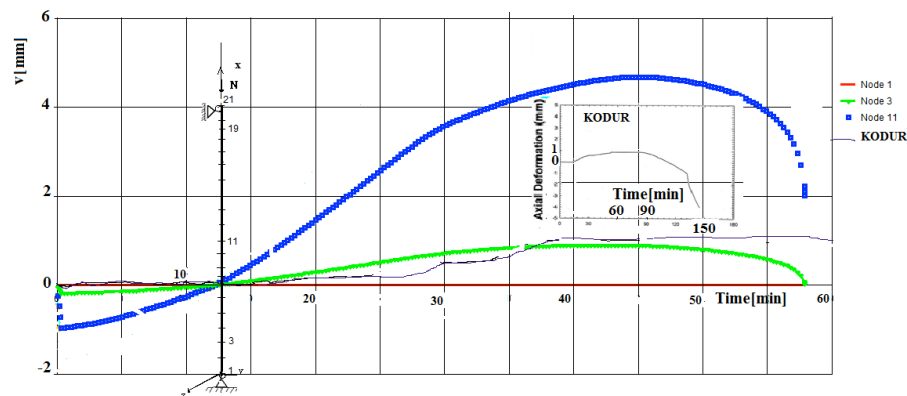


Figure 8. Déplacements verticaux (axiaux) des nœuds 1, 3, 11

Dans la figure 8 nous comparons les déplacements axiaux avec le résultat obtenu par Kodur. Il a utilisé le béton à haute résistance afin d’étudier le phénomène d’écaillage

qui se produit essentiellement pour le HSC. Il a donc obtenu des résistances au feu nettement supérieures aux miennes dont le résultat d'une colonne se trouve sur la figure 8. Nous constatons d'après celle-ci, pour notre cas, qu'au début le déplacement vertical est négatif pendant 12 min, (raccourcissement du à la sollicitation mécanique). La sollicitation thermique a provoqué des déplacements positifs (dilatation due à l'augmentation des températures), ce qui entraîne la dégradation des caractéristiques des matériaux (tels que le module tangent et la résistance du béton). La sollicitation mécanique représentée par l'effort de compression centré de 800 kN, dans ces conditions devient dangereuse et provoque la ruine de la colonne. Les valeurs des rotations (Figure 9) sont insignifiantes jusqu'à 30 minutes d'exposition au feu. A partir de ce moment, il y a une augmentation. Le nœud 11(milieu de la hauteur de la colonne) ne subit aucune rotation. Les autres nœuds subissent des rotations symétriques par rapport à ce dernier. La colonne D₅ a une résistance au feu de 58 min, après cette durée elle présente une courbure (phénomène de flambement), sa température critique est de 933°C.

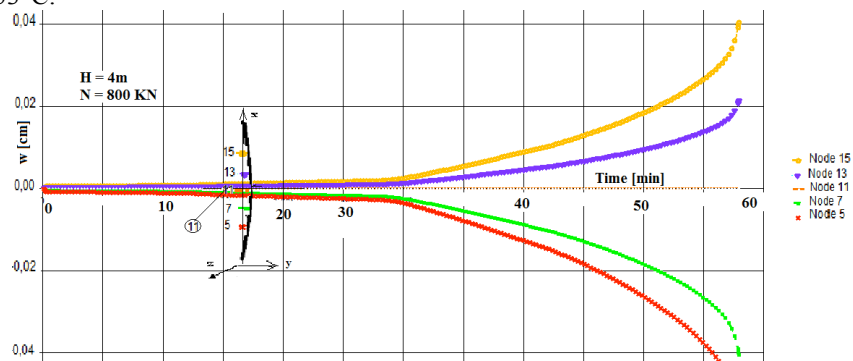


Figure 9. Rotations des nœuds 5, 7, 11, 13, 15

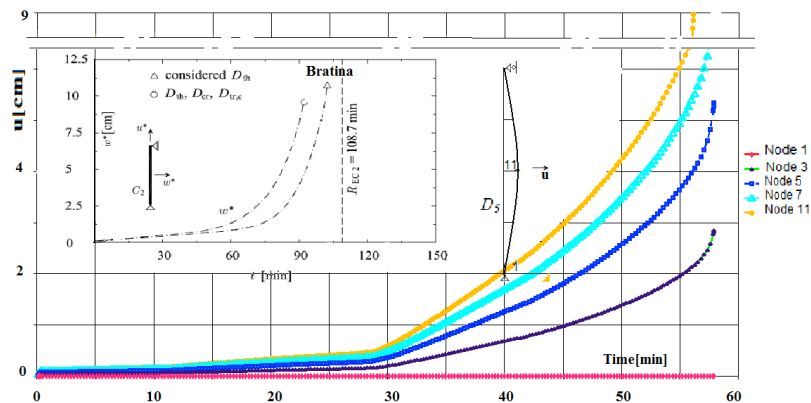


Figure 10. Déplacement latéral des nœuds 1, 3, 5, 7, 11

Concernant le déplacement latéral (Figure 10), à mi-hauteur de la colonne (nœud 11), se trouve la valeur maximale qui est de 9cm. Pour le nœud 1 qui correspond à l'extrémité inférieure de la colonne le déplacement est nul ce qui est en accord avec le choix des conditions aux limites (déplacements et rotations bloqué à l'extrémité inférieure).

7. Conclusions

L'étude multi-physique des colonnes en béton armé, tenant compte du comportement non linéaire des matériaux, de l'effet des grandes déformations et de la dégradation des matériaux nous a permis de soulever les conclusions suivantes :

- L'accroissement de la sollicitation thermique a causé une dégradation des caractéristiques des matériaux tels que le module tangent et la contrainte ce qui est en accord avec la littérature [GAW 04] [DEN 07].
- Il y a également apparition de déplacements axiaux et latéraux et aussi des rotations au niveau des éléments des poteaux. Les déplacements axiaux sont comparés à ceux trouvés par l'étude expérimentale réalisée par l'Auteur Kodur [KOD 06]. Les résultats ne peuvent pas être identiques car les paramètres de modélisation sont différents (Kodur a utilisé le béton à haute résistance afin d'étudier le phénomène d'écaillage qui se produit essentiellement pour le HSC, ce problème intriguait les chercheurs pendant la dernière décennie. Il a été déduit que la quantité d'additif employée pour augmenter la résistance du béton représente la cause principale de la naissance de ce phénomène néfaste. Car la porosité et la perméabilité du béton jouent un rôle important pendant les hautes températures. Elles facilitent l'évaporation de l'eau, qui en restant emprisonnée provoque des pressions interstitielles, dont le taux dépasse celui de la résistance du béton. Elles entraînent alors l'éclatement de celui-ci. Concernant les déplacements latéraux et les températures, par comparaison à ceux de l'étude numérique de Bratina [BRA 05] avec le logiciel « MATLAB », on déduit qu'ils se ressemblent.
- l'augmentation de la hauteur influe sur le temps de ruine. une colonne en béton ordinaire de 3m de hauteur peut résister plus de deux heures.
- La charge a un effet important en cas d'incendie, plus la charge augmente et plus la résistance au feu diminue, du fait de la dégradation des caractéristiques mécaniques des matériaux.
- L'excentricité provoque une diminution de la résistance au feu des colonnes à cause du moment résultant, entraînant une déstabilisation.
- Ces résultats devraient être validés dans le futur par des résultats expérimentaux qui restent liés aux moyens (coûts élevés).

8. Bibliographie

[DEN 07] Denoël. J. F, « Sécurité incendie et construction en béton», *FEBELCEM*, 2007

[ENV 94] ENV 1994 1-2, EUROCODE 4. *Calcul des structures mixtes acier-béton :Règles générales, Calcul du comportement au feu*, Partie 1-2. 2005

- [GAW 04] GAWĘSKA HAGER, Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004
- [PHA 00] Phan. L. T, Carino N.J., «Fire performance of high strength concrete», research needs, *congress Philadelphia*, 2000
- [KÜT 99] Kützing Lars, «Fire Resistance of High Performance Concrete with Fibre Cocktails», *LACER* No. 4, 1999
- [KOD 06] KODUR V.K.R. , MCGRATH. R., «Effect of silica fume and lateral confinement on fire endurance of high strength concrete columns», *Canadian journal of civil engineering*, 2006; 33
- [FRA 05] Franssen J-M. «SAFIR, A Thermal/Structural Program Modeling Structures under Fire», *Engineering Journal*, A.I.S.C., Vol 42, No. 3, 143-158, 2005
- [FRA 87] Franssen J-M, Contributions à la modélisation des incendies et de leurs effets sur les bâtiments, thèse de doctorat, Université de Liège. 1987
- [ZHA 06] ZHANG G., LEE A-H., LEE H-C, CLINTON M., «Fire safety among the elderly in Western Australia», *Fire safety journal*, *ELSEVIER*, N°41, 2006 p 57-61
- [BRA 05] Bratina. S., Čas. B., M. Saje *, I. Planinc, « Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2», *International Journal of Solids and Structures* 42 (2005), University of Ljubljana www.elsevier.com
- [BAR 78] Barthélémy. B.& Kruppa. J., *Résistance au feu des structures béton - acier-bois*, Paris, 1978
- [ENV 92] ENV 1992 1-2, EUROCODE-2, *Actions sur les structures : Actions générales - Actions sur les structures en béton exposées au feu*, Partie 1-2. 2005
- [ENV 91] ENV 1991 1-2, EUROCODE 1. *Actions sur les structures: Actions générales- Actions sur les structures exposées au feu*, Partie 1-2. 2002
- [FRA 03] Franssen J.-M. and Dotreppe J.-C., «Fire Tests and Calculation Methods for Circular Concrete Columns», University of Liege, Belgium, *Fire Technology*, 39, 89–97, 2003
- [ANN 08] Annual report 2008 Efectis, www.efectis.com
- [Kam 07] Kamen Aicha, E. Denarié, and E.Brühwiler, «Thermal Effects on Physico-Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete», *ACI Materials Journal/July-August 2007*