

Résistance au feu des profils creux en acier remplis de béton

F. FELLAH^a, J.C. DOTREPPE^b, A. SERIDI^c, J.M. FRANSSSEN^b

a. Université badji Mokhtar, Département de génie civil, 23000 ANNABA (Algérie)

b. Université de Liège, Département Argenco, chemin des Chevreuils 1, 4000 LIEGE 1 (Belgique)

c. Université M'Hamed BOUGARA, Département de génie mécanique, 35000 BOUMERDES (Algérie)

Résumé :

Les colonnes en profil creux en acier rempli de béton sont largement utilisées dans le domaine du génie civil et en particulier dans la construction d'immeuble de grande hauteur. De nombreux travaux de recherche consacrés à la résistance au feu de ces profilés ont été réalisés en Europe et en Amérique du Nord. Bien que des méthodes de calcul soient désormais proposées par des codes et règlements, des outils plus pratiques sont nécessaires pour les ingénieurs de conception. Il n'est pas facile de développer de telles méthodes et cela en raison de la grande dispersion des résultats expérimentaux. Dans cet article, trois méthodes basées sur des procédures très différentes sont utilisées tout en examinant leurs potentialités mais aussi leurs domaines de validité et les résultats obtenus ont été comparés avec les résultats expérimentaux.

Abstract :

Hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete are used extensively in the construction of high-rise buildings. Many research works devoted to the fire resistance of these profiles have been performed in Europe and in North America. Though calculation methods are now proposed in codes, more practical tools are needed by the design engineers. It is not easy to develop such methods due to the large scatter of experimental results. In this article three methods based on quite different procedures are examined. Comparisons have been made between the results obtained by the three methods and test results. The potentialities of each method are examined, but also the domains in which they should be used with care, or even they should not be used.

Mots clefs : colonnes, constructions mixtes acier-béton, résistance au feu, profils creux en acier

1 Introduction

L'utilisation des colonnes en profil creux en acier rempli de béton (CFSHS) dans le domaine du bâtiment et plus particulièrement dans les immeubles de grande hauteur est très répandue ces dernières années. Ils sont très appréciés par les ingénieurs et les architectes, car ils ont beaucoup d'avantages.

Plusieurs recherches et travaux relatifs au comportement au feu de ce type de profil ont été réalisés en Europe dans les années 70 et les années 80 [1] [2] [3] [4]. En Amérique du Nord, les études dans ce domaine ont commencé dans les années 90 et ont été réalisées principalement au Canada [5] [6] [7]. Le calcul et la conception de ce type d'éléments sont désormais inclus dans des codes et normes, comme par exemple dans les Eurocodes aussi bien pour le comportement à froid [8] que pour des conditions d'incendie [9] [10].

Bien que des méthodes de calcul soient proposées dans l'Eurocode 4, l'utilisation de certains d'entre eux peut être très fastidieuse pour les ingénieurs de conception, et il peut être intéressant d'avoir des outils plus pratiques à leur disposition. D'autre part, dans toutes les études mentionnées ci-dessus, il est clairement démontré que les résultats expérimentaux affichent une grande dispersion, et il est donc difficile de proposer des formules théoriques ou des méthodes qui sont en même temps sûres et économiques.

Dans cet article, trois méthodes basées sur des procédures très différentes seront examinées: la formule de Kodur, établie sur la base des résultats des tests [5] [6] [7] et des études paramétriques réalisées par des programmes développés à cet objectif [11] [12]; le programme POTFIRE, un outil de conception développé par le CTICM [13] et le programme SAFIR, un code informatique développé à l'Université de Liège pour la simulation du comportement structural dans des conditions d'incendie [14]. SAFIR a été validé par comparaison avec de nombreux résultats expérimentaux, en particulier pour les sections mixtes [15] [16].

2 Description des modèles utilisés

2.1 Méthode développée par KODUR

Dans les années 90, le laboratoire national d'incendie (NFL, National Fire Laboratory), et le conseil national de recherches du Canada (NRCC, National Research Council Canada) ont élaboré des directives pour la conception simplifiée des colonnes en profil creux en acier (HSS) remplis de béton. Des études expérimentales et théoriques, à l'aide de modèles informatiques, ont été menées pour étudier l'influence du béton de remplissage sur la résistance au feu et sur la capacité de charge des poteaux tubulaires (HSS). Cinquante-huit colonnes (HSS) remplies de béton exposées au feu ont été testées jusqu'à la rupture [5] [6] [7]. A partir de cela, l'évaluation de la résistance au feu d'une colonne HSS rempli de béton soumis à une charge axiale a été établie de façon empirique. Deux relations ont été donc réarrangées (équations 1 et 2), très pratiques pour les concepteurs, permettant respectivement de calculer la durée de résistance au feu R en minutes et l'effort de compression axiale C en KN. Cependant l'application de ces formules est conditionnée à des restrictions sur certains paramètres. Certains d'entre eux seront discutés dans l'analyse des résultats obtenus dans la section 3. Des détails supplémentaires sur les relations (1) et (2) peuvent être consultés dans [11] [12].

$$R = f_1 \frac{(f'_c + 20)}{(KL - 1000)} D^2 \sqrt{\frac{D}{C}} \quad (1)$$

$$C \leq C_{\max} = \left[\frac{f_1^2 (f'_c + 20)^2}{R^2 (KL - 1000)^2} D^5 \right] \quad (2)$$

2.2 Programme informatique POTFIRE

POTFIRE est un outil informatique de conception développé par le CTICM en France à partir d'un modèle initialement développé en 1992 par COMETUBE. Il a été amélioré avec la collaboration du TNO aux Pays-Bas. POTFIRE permet soit, d'évaluer la durée de résistance au feu des colonnes en profil creux en aciers remplis de béton non protégés sous une charge de conception connue soit, d'évaluer leur charge de ruine après une durée d'échauffement selon le feu conventionnel ISO. Il traite les sections carrées, rectangulaires et circulaires sollicitées à la compression axiale et dans certains cas à une flexion composée uni-axiale. Trois versions de POTFIRE, à savoir V1.2, V2.0 et V3.0, ont été utilisés dans cette étude. Les versions V1.2 et V2.0 sont fondées respectivement sur les règles de l'annexe G de l'ENV 1994-1-2 [9] et l'annexe H de l'EN 1994-1-2 [10] basées toutes les deux sur la méthode Guiaux-Janss [1], elles ne diffèrent que dans les modèles utilisés pour les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux. Par contre, la version V3.0 est basée sur le principe des courbes de flambement comme décrit dans l'EN 1994-1-2. Pour ce qui est des hypothèses de calculs des méthodes POTFIRE, il nous est impossible de les exposer dans cet article, on peut les consulter dans [9] [10] [13].

2.3 Code informatique SAFIR

SAFIR est un logiciel de calculs numériques non linéaires, basé sur la méthode des éléments finis (MEF), développé à l'Université de Liège pour la simulation du comportement des structures du bâtiment soumis au feu [14] mais il peut être utilisé pour un calcul à température ambiante. L'analyse des structures exposées au feu par le logiciel SAFIR comprend deux étapes. La première consiste à prédire la répartition de la température à l'intérieur des éléments de la structure, dite "analyse thermique" et la seconde, appelée "analyse structurale", est réalisée en vue de déterminer la réponse mécanique de la structure due aux effets thermiques, car la charge est généralement supposée rester constante lors de l'incendie. Dans ces deux analyses, la colonne est discrétisée en éléments barres et la section transversale en maillages triangulaires. L'analyse structurale est basée sur le modèle de fibres. Chaque élément fini de l'analyse thermique, dont le type de matériau et la température sont connus, est considéré comme une fibre. De même, la non-linéarité des matériaux et la non-linéarité géométrique sont prises en compte dans SAFIR. Les hypothèses de calcul de la méthode SAFIR peuvent être consultées dans [17]. Dans cet article deux applications de SAFIR ont été faites, elles diffèrent principalement par les modèles adoptés pour les propriétés des matériaux. La première repose sur les lois de l'ENV 1994-1-2 [9], tandis que la seconde, elle est basée sur les lois contenues dans l'EN 1994-1-2 [10].

3 Comparaisons des résultats

Différentes comparaisons ont été faites entre les trois méthodes et les résultats expérimentaux. On a essayé de donner autant que possible des arguments raisonnables pour expliquer les différences observées, mais parfois, il n'est pas facile de justifier les écarts entre les résultats. Dans les comparaisons présentées ici deux procédures sont utilisées: comparaison de la charge admissible pour une résistance au feu prescrite et comparaison de la durée de résistance au feu pour une charge prévue.

3.1 Comparaison entre les trois méthodes

Dans cette étude, deux colonnes de sections circulaires sollicitées à un chargement axial ont été choisies : 219,1mm avec 8Ø12 et 406,3 mm avec 8Ø20 et deux longueurs de flambement ont été choisies 2m et 4m afin de prendre en compte l'effet de l'élancement. Quatre types de résistance au feu ont été choisis R30, R60, R90 et R120, respectivement résistances à 30, 60, 90 et 120 minutes.

Dans cette comparaison, trois versions de POTFIRE et deux modèles de SAFIR ont été utilisés. Pour SAFIR, la valeur de l'imperfection géométrique adoptée est L/300, valeur prescrite dans l'Eurocode 4. L'ensemble des résultats de ces deux types de sections ainsi que les propriétés à froid des matériaux sont regroupés au niveau du tableau 1.

L _b (m)	Temps (min)	Section Circulaire 219.1x3.6 avec 8Ø12 CHARGE AXIALE (KN)						Section Circulaire 406.3x12.5 avec 8Ø20 CHARGE AXIALE (KN)					
		POTFIRE			SAFIR ENV94	SAFIR EN94	KODUR	POTFIRE			SAFIR ENV94	SAFIR EN94	KODUR
		V1.2 ENV94	V2.0 EN94	V3.0 EN94 FNA	Imperfection Géométrique L/300	V1.2 ENV94		V2.0 EN94	V3.0 EN94 FNA	Imperfection Géométrique L/300			
2	30'	928	884	937	866	785.3	N/A	4408	4378	4497	5281.5	4564.5	N/A
	60'	593	521	608	475.1	436.1	N/A	3035	2959	3372	3216.5	3130.7	N/A
	90'	197	266	369	255.2	234.1	N/A	2134	2257	2825	2458.3	2539.7	N/A
	120'	99	114	218	134.16	117.9	454	1270	1712	2338	1888.7	2010	N/A
4	30'	586	457	296	320.3	289.7	N/A	3989	4013	3767	4105.5	3524.5	N/A
	60'	316	214	191	179.5	165.93	202	2783	2710	2604	2180	2071.5	N/A
	90'	97	112	122	99.2	96.35	90	1963	2035	1962	1422.1	1408.9	1968
	120'	49	50	70	49.13	48.52	50	1158	1505	1557	910	911.1	1107

Propriétés à froid des matériaux: Béton ($f_{c28} = 25 \text{ N/mm}^2$); Tube d'acier HSS ($f_y = 235/\text{mm}^2$); Armatures ($f_y = 500 \text{ N/mm}^2$);
N/A : KODUR Non Applicable.

TAB. 1 – Comparaisons charges axiales.

Les résultats montrent que la formule de Kodur n'est pas applicable dans de nombreux cas. Cette formule présente en effet plusieurs limitations [11] [12] : certaines sont dues au fait qu'elle ne peut pas être appliquée au-delà des résultats expérimentaux sur lesquels elle est fondée et d'autres proviennent des restrictions des règles des normes canadiennes. La limitation en cause ici est liée à la charge appliquée sur la colonne au cours de l'essai au feu. Il est intéressant de se pencher plus en détail sur les implications de cette non-applicabilité pour les deux cas de sections extrêmes retenues: $\phi = 406,3$ - $L_b = 2$ m et $\phi = 219,1$ - $L_b = 4$ m.

Pour la première section qui présente un faible élancement, ayant une résistance plastique à froid (20°C) égale à 7683 KN, la formule de KODUR n'est pas applicable pour les quatre cas de résistance au feu R30, R60, R90 et R120. Si les résultats obtenus par SAFIR sont pris comme références, les taux de chargement pour les quatre types de résistance sont 0.594, 0.407, 0.330 et 0.261. La première valeur est très élevée et n'est jamais atteinte en pratique, par contre les trois autres sont moyennes voire même faibles. Aussi, si on force l'application de la formule de KODUR (équation 2), pour une résistance R120, la charge obtenue est 9965 KN, valeur totalement irréaliste. Pour la deuxième section présentant un fort élancement, pour une charge plastique à froid de 1884 KN, toujours par rapport à SAFIR, les taux de chargements sont 0.154, 0.088, 0.051 et 0.026 respectivement pour des résistances au feu R30, R60, R90 et R120. En effet, une telle colonne ne peut jamais résister à un feu dépassant les 30 minutes, même pour un taux de chargement plus faible, mais une résistance au feu jusqu'à 30 min est tout à fait acceptable. Malheureusement, la formule KODUR n'est pas applicable pour une résistance au feu de 30 minutes.

A partir des constatations qu'on vient de voir, pour les types de résistances étudiées, la méthode de KODUR n'est pas applicable pour des taux de chargement élevés et même dans certains cas pour des taux moyens et faibles. Comme en général, les charges sur les colonnes sont assez élevées (les charges permanentes sont généralement plus importantes que les charges variables), la méthode KODUR présente donc des limitations très sérieuses qui méritent d'être étudiées.

Pour les trois versions de POTFIRE, au vu des résultats obtenus, il est difficile de donner des conclusions claires. Ceci est dû au fait que, les versions V1.2 et V2.0, quoiqu'elles sont basées toute les deux sur le même principe de détermination de la charge de flambement, elles utilisent des propriétés mécaniques différentes des matériaux. Aussi, la version V3.0, elle utilise les propriétés mécaniques des matériaux présentées dans l'EN 1994-1-2 [10] mais, elle est basée sur la méthode des courbes de flambements et devrait donc donner des valeurs plus petites puisque les imperfections géométriques sont intégrées dans l'approche théorique. C'est de cas d'ailleurs de la plupart des résultats.

Les deux applications de SAFIR donnent des résultats assez proches, mais celle basée sur l'EN94 conduit généralement à des valeurs plus petites. Pour les deux versions les plus récentes de POTFIRE et SAFIR, on remarque que les résultats donnés par SAFIR sont inférieurs à ceux donnés par POTFIRE.

3.2 Comparaison entre les trois méthodes et les résultats expérimentaux

Afin de mieux analyser les résultats de ces trois méthodes, celles-ci ont été comparés avec les résultats d'essais obtenus dans des laboratoires différents et décrites en détail dans [2] [3]. Toutes les colonnes utilisées dans cette comparaison sont toutes de section carrée 260x260x6.3 mm, de longueur réelle de 3.6 m, sollicitées à un chargement centré, avec des ratios d'armature de 0 (béton non armé). La charge appliquée est de 800 KN pour la colonne remplie de béton non armé et de 1500 KN pour celles qui sont remplies de béton armé. La figure 1 représente schématiquement le type de dispositif adopté pour les essais. Les colonnes testées ne sont pas articulées mais le dispositif adopté aux deux extrémités empêche partiellement la rotation ce qui rend difficile l'évaluation de la longueur de flambement. Certaines considérations [2] ont conduites l'auteur d'adopter une longueur de flambement égale à 0,7L, valeur qui a été adoptée dans cette étude. A partir des résultats regroupés dans la figure 2, nous remarquons que tous sont du côté sécuritaire sauf deux de KODUR. En ce qui concerne les résultats de SAFIR, seule la version, la plus récente des propriétés des matériaux a été utilisée, avec la prise en compte de trois valeurs d'imperfections géométriques 0, L/300 et L/1000, imperfections qui sont inévitables pour ce type de section. D'après les observations faites au cours des tests effectués à l'Université de Liège sur les types de profils assez similaires, il a été conclu que les imperfections réelles sont très faibles [15]. Seulement, l'EN 1994-1-2 [10] recommande une imperfection de L/300, imperfection qui est peut-être trop sécuritaire. Par conséquent une imperfection de L/1000 a été également adoptée, ce qui devrait être considéré comme l'hypothèse la plus appropriée pour la simulation.

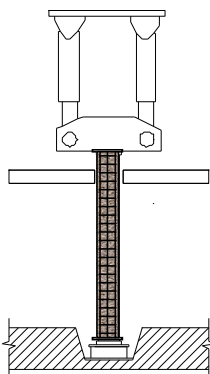


FIG. 1 – Système de chargement expérimental.

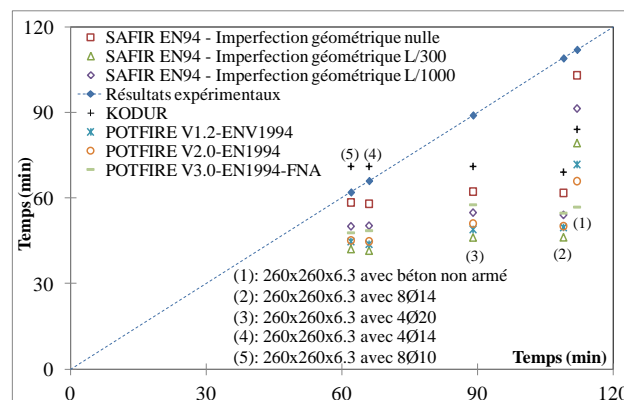


FIG. 2 – Comparaisons entre les résultats expérimentaux et les trois méthodes KODUR, POTFIRE et SAFIR.

En ce qui concerne la méthode de KODUR, les valeurs obtenues sont proches des résultats expérimentaux, seules deux valeurs sont plus élevées et la différence étant significative dans un cas (près de 15%). La formule de KODUR a été obtenue à partir d'un étalonnage de 58 résultats d'essais expérimentaux dont la majorité (54 sur 58) a été réalisé avec des conditions d'appuis extrêmes fixes ce qui explique bien que les valeurs de la résistance au feu sont élevées. D'autre part, ceci peut être dangereux s'il s'agit de colonnes articulées ou avec des restrictions partielles aux deux extrémités, où les imperfections géométriques peuvent avoir un effet significatif. On peut voir que les valeurs les plus importantes de SAFIR et POTFIRE (SAFIR - EN94 - L/1000 et V3.0 POTFIRE) sont proches les uns des autres. Les modèles ne semblent pas compte de l'augmentation de la résistance au feu que l'on observe dans les tests par une augmentation des barres d'armatures.

3.3 Cas de chargements excentriques

Il est intéressant de comparer les méthodes dans le cas de chargements excentriques. Pour cela, on a choisi une section circulaire 323.9x4 avec 8Ø16 comme armatures et trois valeurs d'excentricités 10, 20 et 50 mm pour les charges. Les calculs ont été effectués pour deux longueurs de flambement 1m et 4.5m afin de prendre en compte l'effet de l'élancement de la colonne. La comparaison a été faite entre POTFIRE (version V1.2 et V2.0) et SAFIR avec les modèles récents de l'EN94 pour les caractéristiques des matériaux. Les méthodes KODUR et POTFIRE (version V3.0) ne sont pas concernées dans cette comparaison car elles ne sont pas applicables pour des charges excentriques. Pour SAFIR, aucune imperfection géométrique n'a été prise en compte, on suppose qu'elle est incluse dans l'excentricité du chargement. La figure 3 montre les résultats respectivement pour la colonne à faible élancement ($L=1$ m) et celle à élancement élevé ($L=4.5$ m). Pour la colonne de faible élancement (figure 3a à 3c), les diagrammes montrent que les deux versions de POTFIRE donnent des résultats proches les uns des autres, tandis que les valeurs données par SAFIR sont sensiblement plus élevées. Cela est vrai pour toutes les valeurs de la résistance au feu, et pour les trois valeurs de l'excentricité. Pour le cas de la colonne avec un élancement plus élevé (figure 3d à 3f), les résultats obtenus par les trois approches sont assez similaires, sauf pour de très petites valeurs de résistance au feu ($R_f < 30$ minutes) correspondant à des charges élevées ceci est valable pour les trois valeurs de l'excentricité. Pour expliquer les différences observées dans le cas de chargements excentriques, les considérations suivantes pourraient donner quelques indications. SAFIR et POTFIRE ne fonctionnent pas de la même manière. SAFIR est un code numérique qui simule le comportement de l'élément structural jusqu'à la rupture. POTFIRE a été préalablement établie pour les colonnes chargées centralement sur la base de la charge de flambement. Pour les charges excentriques la procédure proposée est quelque peu artificielle. Elle consiste à remplacer la charge excentrique par une charge centrée affectée de deux coefficients de correction, dans lesquels seuls trois paramètres sont pris en compte: l'excentricité, l'élancement et le pourcentage des armatures. Cependant, d'autres facteurs, non pris en compte, peuvent influencer l'effet de l'excentricité, comme par exemple la résistance du béton, l'enrobage du béton, et donc la précision des coefficients de correction ne peut pas être la même pour tous les cas.

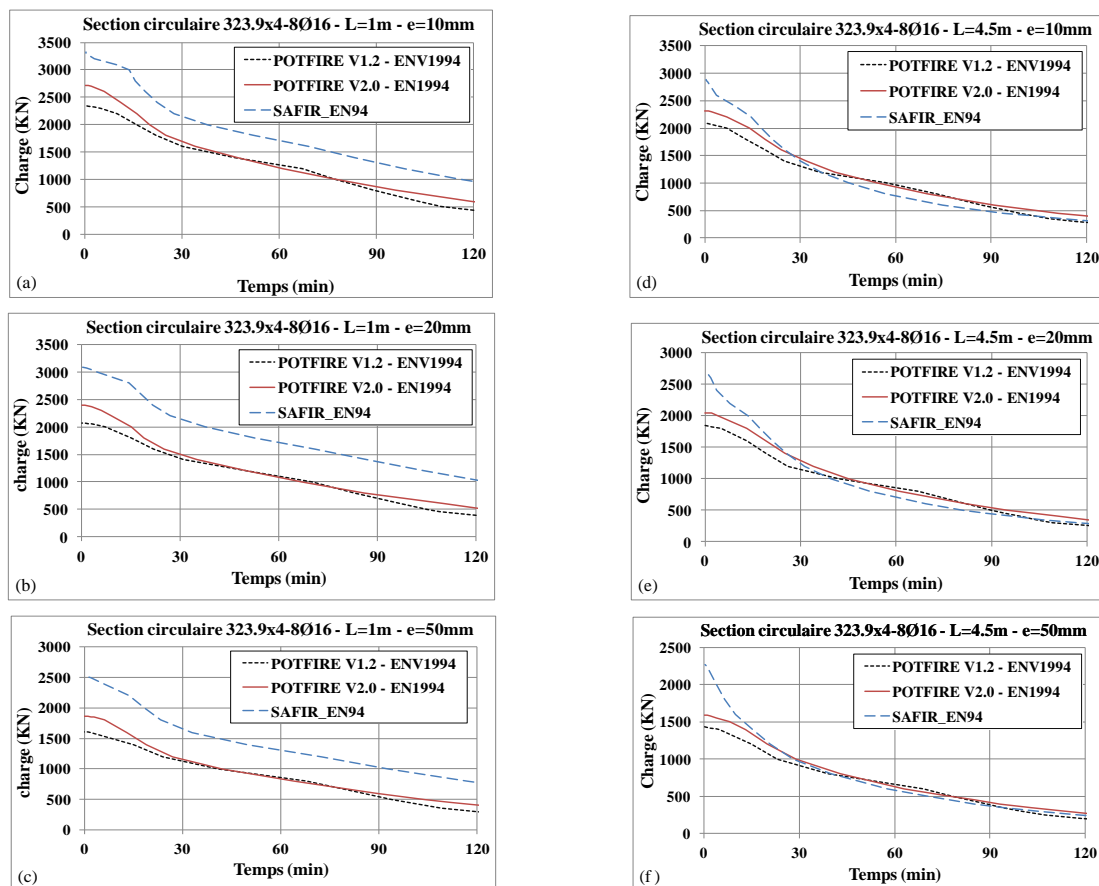


FIG. 3 – Comparaison de la résistance au feu R_f entre SAFIR et POTFIRE pour $0 < R_f < 120$ min. Cas des charges excentriques avec longueurs de flambement $L=1$ m et $L=4.5$ m.

4 Conclusions

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- la méthode proposée par KODUR est empirique, elle est basée sur des résultats d'essais expérimentaux et études paramétriques. Malheureusement, elle n'est applicable que pour des charges axiales et possède plusieurs restrictions d'applicabilité. De même, la méthode donne les mêmes résultats pour un éventail assez large de pourcentage d'armatures.

- POTFIRE est applicable uniquement pour des colonnes isolées, indépendamment de toute la structure complète. La méthode est basée sur l'évaluation de la charge de flambement et ne tient pas compte de l'effet de l'excentricité accidentelle. Pour des charges excentriques, la méthode adoptée est quelque peu artificielle et les coefficients correcteurs proposés pourraient être améliorés.

- SAFIR est un code de calcul non linéaire qui permet de simuler le comportement des structures en situations d'incendie. Il peut traiter non seulement les colonnes isolées mais aussi des structures plus complexes telles que les cadres et portiques. De même, il est possible de prendre en compte des excentricités accidentelles et la valeur de $L/1000$ apparaît la plus réaliste pour le type de profil examiné dans cette étude.

Références

- [1] GUIAUX P., JANSS J., Comportement au flambement de colonnes constituées de tubes en acier remplis de béton, Rapport de recherche, CRIF - Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Industrie des Fabrications Métalliques, MT65, Bruxelles, 1970.
- [2] GRANDJEAN G., Etude de la tenue au feu de profils creux carrés remplis de béton, Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1975.
- [3] GRIMAULT J.P., MOUTY J., Préviation de la stabilité au feu des poteaux en profils creux remplis de béton, Construction Métallique, 3, 45-57, 1984.
- [4] ECCS, Calculation of the fire resistance of centrally loaded composite steel-concrete columns exposed to the standard fire, Technical Note, ECCS Technical Committee 3, 55, Brussels, 1988.
- [5] LIE T.T., CHABOT M., Experimental Studies on the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Plain Concrete, IRC Internal Report N° 611, National Research Council of Canada, Ottawa, 1992.
- [6] CHABOT M., LIE T.T., Experimental Studies on the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Bar-Reinforced Concrete, IRC Internal Report N° 628, National Research Council of Canada, Ottawa, 1992.
- [7] KODUR V.K.R., LIE T.T., Experimental Studies on the Fire Resistance of Circular Hollow Steel Columns Filled with Steel-Fiber-Reinforced Concrete, IRC Internal Report N° 691, National Research Council of Canada, Ottawa, 1995.
- [8] EN 1994-1-1, Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [9] ENV 1994-1-2, Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 1994.
- [10] EN 1994-1-2, Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [11] LIE T.T., KODUR V.K.R., Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122(1), 30-36, 1996.
- [12] KODUR V.K.R., MACKINNON D.H., Design of concrete filled hollow structural steel columns for fire endurance, Engineering Journal, 37(1), 13-24, 2000.
- [13] POTFIRE, User's Manual, Versions 1.2, 2.0 and 3.0, CTICM, Paris, 2009.
- [14] FRANSSSEN J.M., SAFIR. A thermal/structural program modeling structures under fire, Engineering Journal, AISC, 42(3), 2005.
- [15] CHU T.B., Hollow steel section columns filled with self compacting concrete under ordinary and fire conditions, Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2009.
- [16] CHU T.B., DOTREPPE J.C., FRANSSSEN J.M., Numerical modeling of building structures in fire conditions, Proceedings of the Workshop on Construction under Exceptional Condition, CEC 2010, Hanoi Architectural University, 41-52, 2010.
- [17] User's manual for Safir 2011. A computer program for analysis of structures subjected to fire. J.M. Franssen.