
Modèle mécanique pour les poutres à larges ouvertures d'âmes de section variable

Sébastien Durif^{1*}, Olivier Vassart², Abdelhamid Bouchaïr¹, Jean Pierre Muzeau¹

¹ Clermont Université, Université Blaise Pascal, LaMI, Polytech, BP 206, F-63000 Clermont-Ferrand, France

² ArcelorMittal Belval&Differdange S.A., Research Centre, Esch/Alzette, G.-D. of Luxemburg

Correspondant : sebastien.durif@polytech.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. Les demandes architecturales, et parfois techniques, ont mené vers la création de nouvelles formes géométriques de poutres cellulaires, avec des ouvertures sinusoidales. Des essais à la ruine sont réalisés au LaMI (Université Blaise Pascal) en coopération avec ArcelorMittal sur des poutres de dimensions réelles. Les résultats expérimentaux permettent de comprendre le fonctionnement mécanique de ces poutres et de calibrer les modèles numériques. Le modèle éléments finis développé sur SAFIR permet d'évaluer les potentiels de développement de la ruine par plastification ou voilement local des parois autour des ouvertures de formes sinusoidale par flexion Vierendeel. Le modèle numérique validé servira de base à une étude paramétrique qui permettra de développer une nouvelle méthode de calcul analytique généralisable à des formes d'ouvertures variables.

ABSTRACT. Architectural or sometimes technical demands lead to the conception of innovative cellular beams with sinusoidal openings. Experiments at ultimate state have been conducted at the laboratory LaMI (Université Blaise Pascal), in cooperation with ArcelorMittal on beams of scale 1. Experimental data permit the finite element software validation and helps the understanding of those beams complex behavior. The finite element model developed on the software SAFIR allows us to foresee the failure modes as local plastic hinges or local buckling around the sinusoidal openings by Vierendeel mechanism. This model will be used as a reference for a future parametrical study in order to develop a new analytical approach of those beams design which should be suitable for other openings geometries.

MOTS-CLEFS: Poutres cellulaires, ouvertures sinusoidales, essais, MEF, plastification ou voilement local, effet Vierendeel.

KEYWORDS: Cellular beams, sinusoidal openings, experimental tests, FEM, local hinges, local buckling, Vierendeel effect.

Introduction :

Dans le but de pourvoir un maximum de flexibilité et d'ergonomie d'un bâtiment, les constructeurs utilisent de plus en plus des poutres avec d'importantes portées. En contrepartie cela requiert généralement des profilés de grande hauteur, ajoutée à l'épaisseur de plancher nécessaire au passage de services, on se retrouve souvent avec une importante hauteur d'étage. La solution a donc été de concevoir des poutres avec des trous isolés ou uniformément répartis, permettant le passage des conduits à travers l'âme sans trop réduire la résistance à la flexion de la poutre.

De nombreuses études ont déjà pu être menées afin de comprendre et d'analyser l'impact de ces ouvertures sur la résistance de la poutre. Notamment, Redwood a été un des premiers auteurs à proposer un modèle de calcul de ces poutres à l'état limite ultime [RED 78]. Ses travaux ont mis en avant le phénomène de flexion Vierendeel, propre aux poutres échelles, modèle de calcul analytique, que l'on a adapté aux poutres munies de larges ouvertures. En effet, ces poutres présentent deux modes de ruines particuliers en plus de ceux inhérent à toutes poutres standards : la formation de 4 rotules plastiques autour de l'ouverture par flexion Vierendeel et le flambement du montant intermédiaire (dans le cas d'une poutre alvéolaire).

Aujourd'hui, le développement de la conception de ces poutres avec les poutres cellulaires a permis de leur donner un aspect esthétique. La dernière forme aujourd'hui développée en tant que poutre cellulaire à partir de profilés laminés à chaud est celle de la poutre AngelinaTM, poutre cellulaire à ouverture sinusoïdale. Cette forme innovante, outre son avantage esthétique certain, permet d'obtenir avec un seul trait de découpe du profilé initial, des gammes de taille d'ouverture plus grandes que pour les ouvertures circulaires.



Figure 1. Poutres AngelinaTM

En vue de maîtriser le comportement de ces poutres, des études expérimentales et numériques sont menées. Des essais à la ruine sont réalisés au LaMI (Université Blaise Pascal) en coopération avec ArcelorMittal sur des poutres de dimensions réelles. Les résultats expérimentaux permettent de comprendre le fonctionnement mécanique de ces poutres et de calibrer le modèle numérique. Le modèle numérique

validé servira de base à une étude paramétrique qui permettra de développer une nouvelle méthode de calcul analytique généralisable à des formes d'ouvertures variables.

1. Approche analytique

Dans le cadre de l'étude menée, on se concentre uniquement sur la flexion locale autour d'une ouverture car le flambement du montant intermédiaire, de part la géométrie de la poutre testée, ne concerne pas notre cas.

La meilleure idée trouvée pour étudier le comportement d'une poutre avec une grande ouverture est d'appliquer la théorie utilisée pour les poutres Vierendeel. Une section transversale située au niveau de l'ouverture est composée de deux sections en T. Le principe de résolution consiste à considérer un point d'inflexion au droit des ouvertures. Ainsi, les sections en T au droit des ouvertures supportent le moment fléchissant global sous forme d'efforts axiaux et le cisaillement provoquent des moments fléchissant locaux supplémentaires: moments Vierendeel (figure 2).

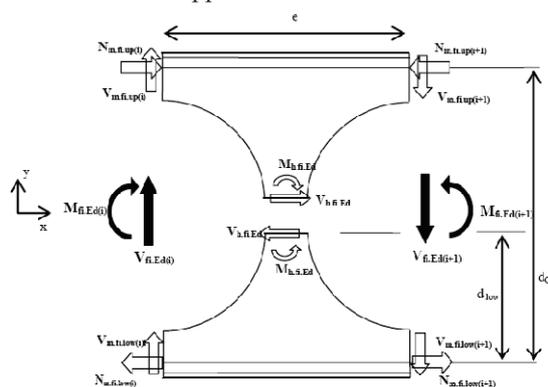


Figure 2. Séparation des efforts globaux en efforts locaux.

Si on pose d_G , la distance séparant les centres de gravité des membrures supérieures et inférieures de la poutre au droit d'une ouverture. En supposant la poutre symétrique, on peut écrire :

$$N_{\text{sup}} = \frac{M_G}{d_G} \quad \left| \quad V_{\text{sup}} = \frac{V_G}{2}$$

Avec :

$M_{G,i}$: Moment global au droit de l'ouverture i .

$V_{G,i}$: Effort tranchant global au droit de l'ouverture i .

$N_{sup,i}$: Effort normal dans la membrure supérieure au droit de l'ouverture i .

$V_{sup,i}$: Effort tranchant dans la membrure supérieure au droit de l'ouverture i ¹.

Dans le cas d'ouvertures rectangulaires, on vérifiait la résistance de l'ouverture en comparant la résistance des 4 coins de l'ouverture à la sollicitation $V \cdot l_0$, avec l_0 la longueur de l'ouverture et V , effort tranchant global au niveau de l'ouverture.

Cependant, le problème se complexifie lorsque l'on est en présence d'ouvertures à sections variables, comme les ouvertures circulaires ou sinusoïdales. En effet, la ruine ne se peut plus se produire aux coins de l'ouverture, car la résistance varie en fonction de la position du té étudié autour de l'ouverture. Ainsi, il s'agit de discrétiser la poutre au niveau de son ouverture étudiée en quarts d'ouverture et d'effectuer la vérification de chaque section aux sollicitations locales (figure 3) [LAW 06] et [BITA 98].

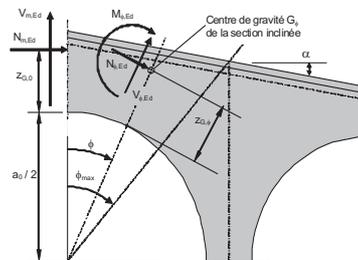


Figure 3. Exemple de discrétisation autour d'une ouverture d'une poutre cellulaire à inertie variable [MAN, 09].

Redwood propose alors un modèle d'ouverture rectangulaire équivalente dans le cas d'ouvertures circulaires, car il a été constaté que la ruine survenait pour une position souvent similaire, un angle $\theta=26^\circ$ d'après la figure 4. Cependant, la variation de section le long de l'ouverture est beaucoup plus importante dans le cas d'ouvertures sinusoïdales.

¹ Dans le cas d'une poutre non symétrique, de précédentes études ont montré que la répartition ne se fait pas exactement au prorata des aires de cisaillement mais suivant une règle définie dans la référence [BITA 06] établie à partir d'une centaine de simulations numériques.

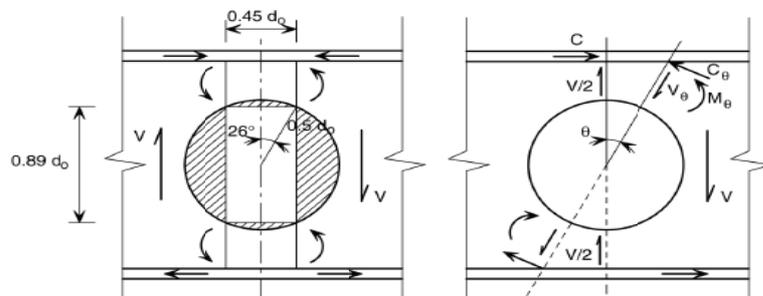


Figure 4. Représentation de l'ouverture rectangulaire équivalente (à gauche) calcul pour des incréments d'angle (à droite).

Ainsi, pour les poutres à ouvertures sinusoïdales, on doit conserver une approche par calcul incrémental le long du quart d'ouverture étudié.

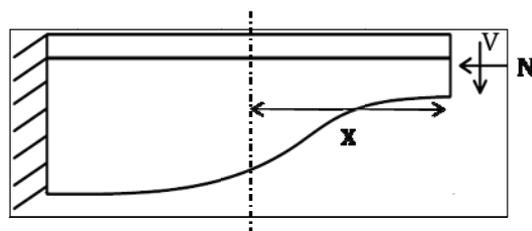


Figure 5. Exemple de modèle de sollicitation pour un quart d'ouverture sinusoïdale.

Ainsi, pour une section située à une abscisse donnée x , on définit le moment Vierendeel local $M_v(x)$ tel que :

$$M_v(x) = V \times x - N \times e(x)$$

Avec, $e(x)$: excentrement des centres de gravité entre le petit té où est appliqué l'effort N et le té à l'abscisse x considérée.

Bien évidemment, les sollicitations changent de sens suivant le quart d'ouverture étudié. La problématique qui se pose est d'avoir une bonne estimation d'une part des sollicitations au sein du quart d'ouverture et d'autre part, de la résistance réelle de chaque section étudiée. Pour répondre à ce second problème, la démarche eurocode donne tout d'abord une classification des sections pour connaître le mode de ruine de chaque paroi étudiée. Cependant, l'eurocode ne fournit qu'un type de paroi à bord libre, celui correspondant aux semelles des poutres en I et H. Ainsi, si on adapte directement ce critère, cela revient à classer l'âme de la même façon qu'une semelle en considérant une longueur « c » définie dans l'eurocode 3 entre la semelle et le bord libre. On effectue donc cette classification pour chaque incrément

de vérification de section sur la longueur du quart, en partant du té du milieu de l'ouverture jusqu'au montant (symbolisé par des hachures sur les figures 5 et 6). Cependant, dans le cas d'une flexion positive (les fibres du bord libre comprimées), on arrive rapidement à des sections de classe 4 (figure 6).

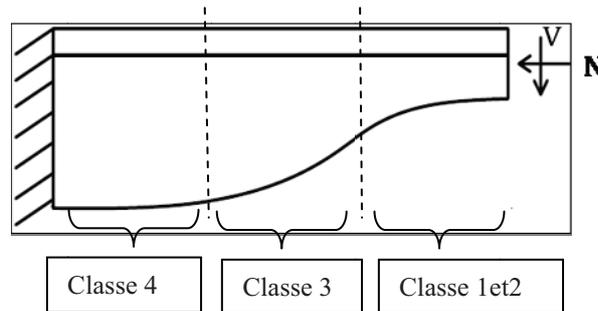


Figure 6. Classification de l'âme du quart d'ouverture.

Cette lacune dans les codes de calcul entraîne, si on considère les modèles analytiques standards, une forte sous-estimation de la résistance réelle du quart d'ouverture. Car si les hachures représentent le montant adjacent, on pourrait imaginer que celui-ci puisse apporter une certaine rigidité hors plan aux sections qui lui sont proches. Le calcul éléments finis met en évidence que le voilement ne se produit jamais au niveau de la section de hauteur maximale mais pour des sections plus éloignées du montant. Il est donc intéressant de s'intéresser à la rigidité réelle de ces parois afin de déterminer d'une manière la plus rigoureuse possible la résistance au voilement de celles-ci.

Cette étude ne pourra commencer qu'en se basant principalement sur les résultats obtenus par éléments finis. Afin de valider le modèle numérique utilisé et de se conforter dans la compréhension du comportement complexe de ces poutres, il est important de passer par une phase expérimentale.

2. Essais

ArcelorMittal Belval et Differdange S.A. a confié au CTICM et à L'Université Blaise Pascal la préparation et la mise en œuvre d'essais sur trois configurations de poutre AngelinaTM en acier seul. Afin de mieux appréhender le comportement mécanique de ce nouveau type de poutre, la réalisation d'essais apparaît indispensable. Les informations issues de ces essais permettent de valider le modèle numérique et de justifier certaines approches analytiques. Les trois poutres étudiées sont à échelle 1, conçue à partir d'un IPE450 pour les deux premières et d'un IPE400 pour la troisième.

2.1. Description générale des essais

Les essais sont sur des poutres en flexion quatre points, sur deux appuis et sollicitées par deux charges ponctuelles. Afin d'assurer un chargement symétrique, elles ont été appliquées par un seul vérin et distribuées sur la poutre en deux par l'intermédiaire d'un chevêtre. Les essais se sont effectués en trois phases, une phase élastique, un renforcement d'un côté de la poutre puis se termine avec un chargement menant à la ruine de la poutre. Des maintient anti-déversement ont été disposés aux appuis et aux points de chargement afin d'être sûr d'observer les modes de ruine recherchés, plastification ou voilement local par effet Vierendeel autour de la seconde ouverture.



Figure 7. Photographie illustrant le montage d'une poutre, le chevêtre, les anti-déversements avec le vérin.

Afin de pouvoir mesurer les déplacements verticaux et horizontaux, les essais comprennent deux systèmes de mesure en parallèle, un système de capteurs de déplacements et une mesure par vidéo à l'aide de cibles et d'une caméra². Enfin, les mesures de déformation ont été effectuées au niveau des zones déterminées comme critiques avec le modèle éléments finis, qui du fait de sa précision, a permis de bien anticiper ces emplacements.

Nous pouvons visualiser sur la figure 8 le capteur mesurant les déplacements au niveau de la zone de déplacement hors plan maximum.

² Les cibles peuvent être repérées par des carrés blancs sur la figure 07.

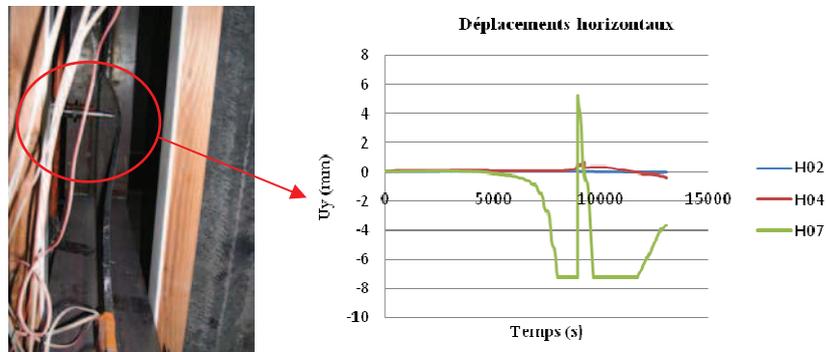


Figure 8. Photographie du déplacement hors plan maximum (à gauche). Mesure du capteur de déplacement H07 située sur la zone observée (à droite).

3. Modèle numérique

3.1. Description du modèle choisi

Le logiciel éléments finis SAFIR a été choisi pour représenter le comportement complexe de ces poutres. Le modèle utilise des éléments coques à quatre nœuds et quatre points d'intégration et permet de considérer à la fois la non-linéarité géométrique et matérielle. Ce modèle a été déjà validé à partir de résultats d'essais en condition normale et d'incendie pour des poutres cellulaires droites [Nadjai, 07]. Il a été adapté aux poutres à ouvertures sinusoïdales et sera confronté aux résultats expérimentaux afin d'assurer sa validité pour prolonger l'approche analytique.

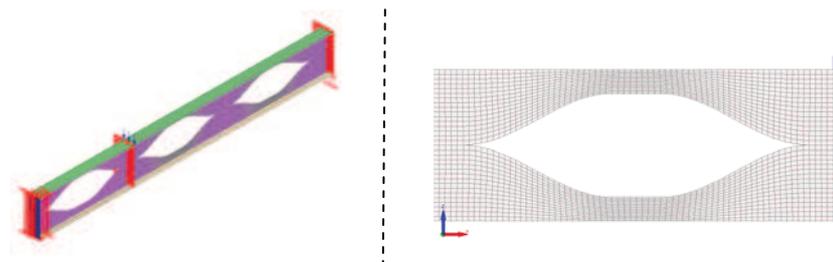


Figure 9. Modèle de poutre globale avec conditions de symétrie (gauche). Maillage d'une ouverture (droite).

3.2. Comparaison numérique/expérimental

La poutre est entièrement modélisée en éléments coques. Ainsi, les éléments au niveau de l'intersection âme-semelle subissent une double épaisseur. Cette double

épaisseur est inférieure à la surface d'un congé de raccordement, ce qui implique que le modèle est légèrement moins rigide que la poutre réelle (figure 10).

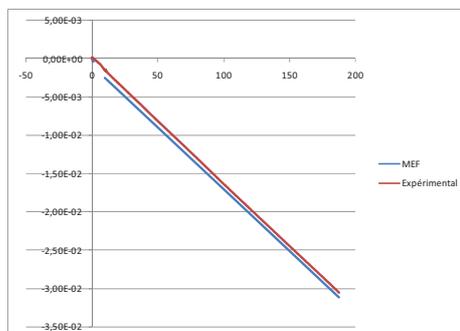


Figure 10. *Diagramme comparatif du déplacement à mi-travée.*

Le choix d'une imperfection initiale en S a été pris d'après les premières études de poutres cellulaires. La mesure d'imperfections géométriques sur les poutres testées a montré que cette imperfection était parfaitement réaliste. De plus, pour ce qui est du mode de ruine, on a pu constater que le modèle élément fini donne une forme de ruine semblable à celle obtenue expérimentalement. La comparaison de flèche ou effort ultime obtenu numériquement correspond de manière relativement proche aux essais. On peut observer une bonne représentation du voilement du quart d'ouverture par le logiciel par rapport à celui obtenu expérimentalement figure 11.

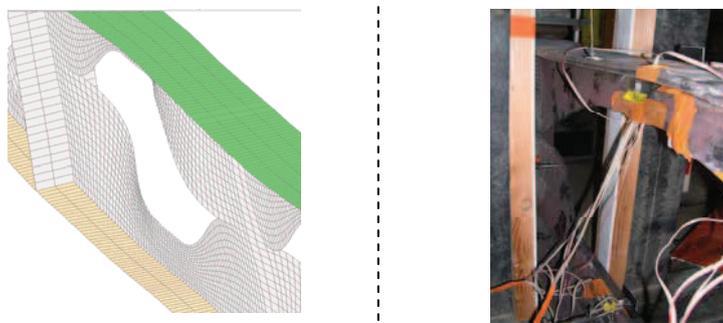


Figure 11. *Modélisation de la ruine sur SAFIR (à gauche). Photographie de la ruine de la poutre (à droite).*

4. Perspectives et Conclusion

Nous avons pu constater grâce à ces essais, que le comportement de ces poutres a pu être relativement bien anticipé grâce au modèle numérique utilisé. Ces bonnes concordances confortent sa validation et permettent donc de baser les études paramétriques ultérieures sur le modèle éléments finis.

Pour le moment, il n'existe aucun code de calcul permettant d'estimer correctement la résistance au voilement local des parois autour de larges ouvertures à section variable type sinusoïdale car la résistance théorique devrait se baser sur la classification de paroi à bord libre de l'eurocode 3. Ce critère est largement défavorable dans notre cas, car il ne considère pas l'apport de rigidité du montant adjacent, ni-même celui de la forme de l'ouverture.

Dans ce but, il est intéressant de se baser sur l'étude du voilement d'une plaque sur laquelle serait considéré des conditions aux limites représentant le plus possible celles inhérentes aux sections le long du quart d'ouverture. Cette approche permettrait d'en déduire une forme de contrainte critique de voilement, fonction des paramètres géométriques de l'ouverture et du chargement. Cette étude est basée sur les travaux de Timoshenko et les séries de Navier. Enfin, le meilleur moyen pour définir les coefficients de maintien en rotation représentant la semelle (k_x), le montant adjacent et la pente de la sinusoïde (k_y) serait d'effectuer une calibration basée sur des résultats éléments finis à partir du modèle validé sur SAFIR.

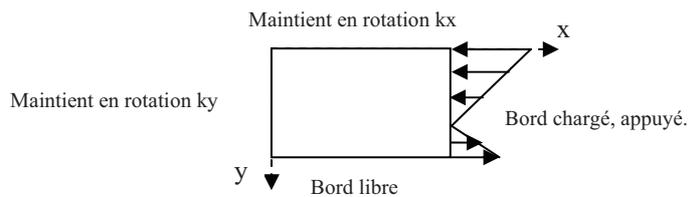


Figure 12. Modèle de plaque avec C.L. similaire à celles d'une section de quart d'ouverture.

Enfin, dans le cadre du projet de recherche, pour se permettre de mieux comprendre et analyser ce phénomène de voilement local, une nouvelle campagne d'essai est prévue pour étudier le comportement local, basé sur des échantillons de poutre prélevés sur les poutres testées.

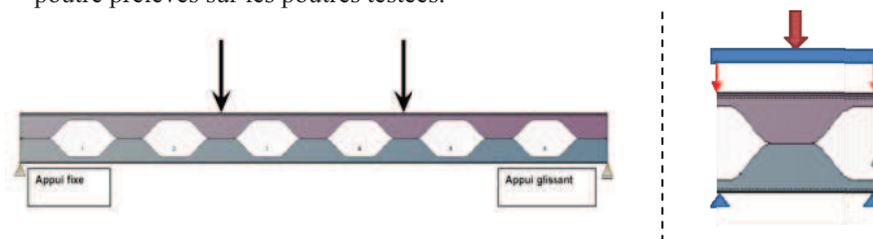


Figure 13. Poutre originelle (a) Echantillon de poutre découpé (b).

5. Bibliographie :

- [BITA 98] BITAR D., *Vérification à l'ELU des poutres métalliques avec ouvertures d'âme, exemple de calcul et recommandations*, Revue Construction Métallique, n°1, CTICM, p.80-98, 1998.
- [BITA 06] BITAR D., MARTIN P.-O., GALEA Y., DEMARCO T., *Poutres cellulaires acier et mixtes : Partie 1, proposition d'un modèle pour la résistance des montants*, Revue Construction Métallique, CTICM, n°1, pp. 15-39, 2006.
- [DAR 03] DARWIN D. *Design of Steel and Composite Beams with Web Openings*, Design Guide 2, AISC, 3ème édition, 2003, 65 pages.
- [CHUN 00] CHUNG K.F., LIU T.C.H., KO A.C.H., *Investigation on Vierendeel Mechanism in steel beams with circular web openings*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, Issue 5, pp. 467-490, 2000.
- [CHUN 01] CHUNG K. F., LAWSON R. M., «*Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, Issue 2, pp. 135-164, 2001.
- [LAW 06] LAWSON R.M., LIM J., HICKS S.J., SIMMS W.I., *Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, Issue 6, pp. 614-629, 2006.
- [RED 78] REDWOOD R.G., *Analyse et dimensionnement des poutres ayant des ouvertures dans les âmes*, Revue Construction métallique, n°3, CTICM, p.15-27, 1978.
- [MAN, 09] P. Mangin, A. Bureau, *ArcelorMittal Cellular Beams Logiciel ACB+ : Descriptif technique*, Rapport technique n°7.072-01, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique CTICM, 2009.
- [Nadjai, 07] A. Nadjai, O. Vassart, *Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures*, Fire safety journal n°42 pp 489-497, 2007