

Essais au feu hybrides à plusieurs degrés de liberté dans un environnement non linéaire



© AdobeStock

Q Comment déterminer le comportement mécanique d'un élément de structure se trouvant dans un bâtiment incendié?

Un essai standardisé est de nos jours la réponse la plus fréquente à cette question. Cependant, les conditions d'appuis des éléments testés dans les fours conventionnels laissent souvent les rotations et la dilatation libres ou au contraire consistent parfois à bloquer les extrémités. La conséquence est que le comportement que l'on va obtenir n'est pas celui d'un élément dans un bâtiment incendié, car ses appuis n'y sont jamais totalement libres ou

totalement encastrés. Pour surmonter cette limitation, il est éventuellement possible recourir à des essais en vraie grandeur. Néanmoins, ceux-ci sont en général très coûteux et nécessitent des infrastructures gigantesques dont ne disposent pas la plupart des laboratoires. Leur usage est donc limité. Les modèles numériques auraient pu être une alternative, étant donné les grands progrès réalisés dans ce domaine au cours des dernières décennies. Cependant, ces modèles présentent encore aujourd'hui des limitations. Par exemple, certains phénomènes comme le « spalling » ne peuvent être pris en compte. De plus, l'industrie de la construction est devenue un

processus d'innovation rapide. De nouvelles solutions structurelles sont régulièrement proposées ainsi que de nouveaux matériaux tels que les bétons à hautes performances. Ces dernières doivent d'abord être testées expérimentalement et les essais au feu sont donc loin d'être devenus inutiles. Ainsi, depuis déjà de nombreuses années, la recherche dans le domaine du feu se penche sur les essais au feu dit « hybride ».

Un essai au feu hybride est un essai au feu particulier où deux parties sont exécutées en parallèle. D'une part, on teste au feu une « structure physique » qui est un élément de structure comme une poutre ou une

colonne et d'autre part, on simule une « structure numérique » qui est un modèle numérique du bâtiment où la structure physique est censée se trouver (Figure 1). Durant l'essai, les déplacements aux extrémités de la structure physique sont adaptés en temps réel à l'aide de vérins en fonction de la réponse de la structure numérique.

Les essais hybrides ont déjà une longue histoire dans le domaine des structures en général. Ils sont utilisés dans le sismique depuis les années 70 et constituent aujourd'hui pour cette branche une méthode de test à part entière. Cette réussite a motivé le développement de tels essais dans le domaine du feu. Cependant, le transfert des résultats du sismique au feu n'est pas directe, en raison de phénomènes propres à l'augmentation de la température. On peut citer trois raisons principales. Tout d'abord, l'essai au feu hybride doit être réalisé en temps réel car l'évolution des gradients thermiques sur la section des éléments rend impossible la mise à l'échelle du temps. Ensuite, il faut considérer les efforts et raideurs axiales alors qu'ils sont souvent négligés en sismique, car dans ce cas l'accent est mis essentiellement sur les degrés de liberté relativement peu rigides tels que les rotations et les déplacements horizontaux. De nombreuses méthodes reposent en effet sur l'hypothèse d'éléments axialement indéformables. Enfin, appliquer une température élevée complique le processus expérimental car les instruments doivent être protégés. L'étude des essais au feu hybrides est donc un domaine à part.

Les premiers essais au feu hybrides ont été réalisés au début des années 90 en Allemagne au Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) [1]. D'autres ont suivis au sein de diverses institutions, notamment le National Research Council (NRC) à Ottawa [2], l'École Polytechnique Fédérale de Zurich (ETH) [3] et le Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

[4]. Cependant, ces essais ont toujours été limités à seul degré de liberté et avec une structure numérique se comportant de façon élastique, ce qui simplifie beaucoup le processus et limitent les essais hybrides à l'étude de colonnes bi-rotulées. Les recherches menées au sein de l'Université de Liège visaient par conséquent à réaliser des essais au feu hybrides à plusieurs degrés de liberté en considérant que la structure numérique était également soumise au feu et se comportait donc de façon non-linéaire. Cet article se concentra sur les résultats de la thèse « Multi-Degree-of-Freedom Hybrid Fire Testing in a Non-Linear Environment » [5] qui a permis l'exécution d'un tel essai. Les sections suivantes aborderont la méthodologie, la structure testée, le dispositif expérimental et les résultats de l'essai.

Méthodologie

Le succès d'un essai hybride dépend de l'interaction entre la structure physique et la structure numérique. Cette interaction implique que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements à l'interface de ces « sous-structures » soient continuellement atteints pendant l'essai. Cela entraîne trois difficultés majeures. Il s'agit d'abord de résoudre un problème théorique de décomposition de domaine dans le cas des structures soumises au feu. Ce problème mathématique est complexe car il implique des matrices de rigidité qui ont des degrés de liberté très différents les uns des autres et des propriétés qui se dégradent à cause de la chaleur. Deuxièmement, cette interaction doit s'effectuer en temps réel. Or le temps de calcul de la structure numérique et le temps de réponse des vérins peuvent entraîner des retards dans l'application des nouveaux déplacements. Enfin, pour faire communiquer tous les composants de l'essai entre eux (cellules de force, capteurs de déplacement, vérins, modèle éléments



BUILDING TRUST

**DES SOLUTIONS QUI
PEUVENT SAUVER DES VIES
ET PROTÉGER DES BIENS**

Chaque année,
on dénombre quelque

20.000

incendies d'habitations en
Belgique, dont beaucoup
sont mortels

Au bout d'à peine 3 minutes
et demie, la chaleur d'un
incendie de maison peut
atteindre plus de

590°C

Les produits ignifuges
de Sika permettent aux
résidents de fuir dans un
délai de

2-4 heures

**Découvrez notre gamme de
protection passive d'incendie
de haute qualité, une valeur
ajoutée essentielle pour les
résidents et les propriétaires**



**PROFESSIONAL
FIRE PROTECTION**

www.sika.be



Filip Bourgeois (Sales Manager Siemens) remet le prix à Elke Mergny. A gauche, le capitaine Luc Faes, commandant de la zone d'assistance de Taxandria.

finis), le développement de logiciels spécifiques est nécessaire et constitue une part importante de la recherche.

Un nouvel algorithme

La difficulté théorique du problème a été surmontée par l'utilisation de la théorie du contrôle appliquée à des systèmes linéaires en temps invariant. L'algorithme développé consiste à corriger à intervalles réguliers les déplacements à l'interface des sous-structures afin d'équilibrer les forces également à l'interface. Cette correction comporte deux termes: un terme proportionnel à l'erreur entre les forces d'interface et un terme proportionnel à la somme des erreurs précédentes. L'équation qui en résulte est appelée « équation de contrôle ». Les facteurs proportionnels des deux termes sont déterminés avant l'essai par l'étude des valeurs propres de la matrice d'état du système.

Structure étudiée

Trois types d'essais ont été réalisés dans le cadre de cette recherche. Le premier consistait à ajuster l'allongement d'une colonne, le second ajoutait une rotation et le troisième intégrait une deuxième

rotation. Le présent article se concentrera sur le dernier essai, à trois degrés de liberté. Les résultats des autres essais sont disponibles dans la thèse [5].

Dans l'essai à trois degrés de liberté, la structure de référence est un bâtiment rez+1 avec quatre travées longitudinales, comme illustré sur la Figure 2. Il est composé de poutres (HS160x80x5) et de colonnes en acier de 1,3 m (HS80x5). Il s'agit par conséquent d'une structure à demi-échelle. Cette échelle a été choisie car les dimensions des éléments sont suffisamment importantes pour impliquer toutes les difficultés liées aux essais en vraie grandeur mais permettent de tester à un coût raisonnable différentes solutions dans le cadre de la recherche. La structure physique est une colonne en acier HS80x5 située en bordure du bâtiment dans un compartiment chauffé. Elle est chauffée à une vitesse de 6°C/min, ce qui est cohérent avec le chauffage d'un élément en acier protégé. La structure numérique est la structure restante et est modélisée dans le logiciel SAFIR®[6]. Les températures de cette dernière sous-structure sont précalculées.

La division de la structure de référence en deux sous-structures est une étape importante du processus. Après extraction de la colonne, il y a

Figure 1

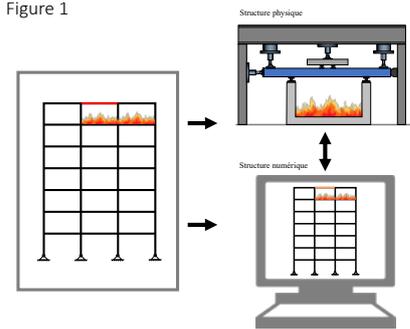
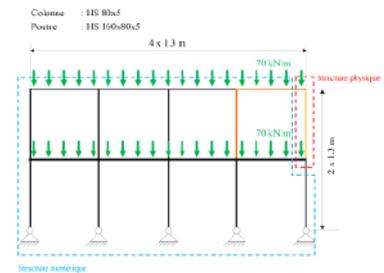


Figure 2

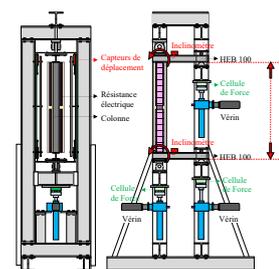


six degrés de liberté à l'interface: trois translations et trois rotations. Cependant, il serait pratiquement impossible de contrôler les six déplacements. Il convient donc de supprimer les mouvements de corps rigide et de contrôler uniquement les déplacements relatifs de l'élément testé, c'est-à-dire, l'allongement et les deux rotations d'extrémités dont on a retranché les rotations de corps rigide. Des transformations corotationnelles doivent donc être prises en compte dans la procédure.

Dispositif expérimental

Pour réaliser des essais au feu hybrides, un dispositif expérimental a été construit au Laboratoire d'Essais au Feu de l'Université de Liège

Figure 3





(Figure 3). L'installation est constituée de deux cadres en acier parallèles l'un à l'autre, boulonnés sur deux poutres horizontales et contreventés par des éléments diagonaux. Trois vérins électriques sont montés sur des supports et appliquent des déplacements à travers des traverses où sont boulonnées des rotules. Les vérins sont des vérins à vis trapézoïdale d'une capacité de 100 kN. Ce dispositif permet de tester des colonnes en acier de 1,3 à 1,5 m.

La colonne de l'essai à trois degrés de liberté est montrée sur la Figure 4. Les deux extrémités sont soudées à deux poutres HEB100 qui servent de bras de levier afin d'appliquer les rotations. Deux plaques d'acier sont soudées à ces poutres, dans le prolongement du poteau afin de recevoir les rotules. L'allongement est mesuré avec quatre capteurs de déplacement potentiométriques et les rotations sont mesurées par deux inclinomètres. Trois cellules de forces permettent la mesure de l'effort normal et des moments.

Afin de pouvoir réaliser plusieurs essais à moindre coût, les colonnes ont été chauffées électriquement à l'aide de résistances. L'ensemble a été enveloppé dans de la fibre céramique pour limiter les pertes de chaleur dans l'environnement.

Procédure de test

En pratique, l'objectif du processus expérimental est de corriger la commande des vérins de façon à rétablir l'équilibre des forces d'interfaces des structures physique et numérique. La procédure de test est exécutée comme suit:

1. Au début du pas de temps, les forces et déplacements de la colonne sont mesurés et envoyés à un programme qui fait l'intermédiaire entre tous les composants du test.
2. Les déplacements mesurés sont imposés à la structure numérique pour assurer la compatibilité des déplacements à l'interface. Les transformations corotationnelles sont utilisées pour convertir les trois degrés de liberté locaux en six degrés de liberté globaux. Les forces d'interface sont calculées.
3. Les forces d'interfaces des deux structures étant connues, l'erreur instantanée et la somme des erreurs précédentes est calculée.
4. La nouvelle commande est déterminée par l'équation de contrôle et envoyée aux vérins

Le chauffage des structures ne démarre pas immédiatement. La charge est d'abord appliquée linéairement à 20°C en 20 min. Ensuite, elle est maintenue pendant 5 minutes à température ambiante. L'augmentation de température commence juste après.

Résultats

Les Figures 5 et 6 montrent la colonne durant l'essai et après flambement. Les Figures 7-9 affichent les forces et déplacements en fonction du temps. Les résultats sont comparés avec une simulation numérique de la structure complète. Cette simulation a été réalisée dans SAFIR après l'essai avec les températures mesurées dans la colonne en acier et une imperfection initiale. L'effort normal et les déplacements axiaux de la simulation numérique sont très proches de ceux mesurés durant l'essai.

Les rotations et les moments suivent des tendances similaires mais des différences sont observées, notamment dans les rotations. Une cause possible pourrait être l'emplacement des inclinomètres qui ne sont pas exactement à la base de la colonne mais à une distance de 12 cm afin de protéger l'instrument de la chaleur. Les écarts observés avec les

Figure 7

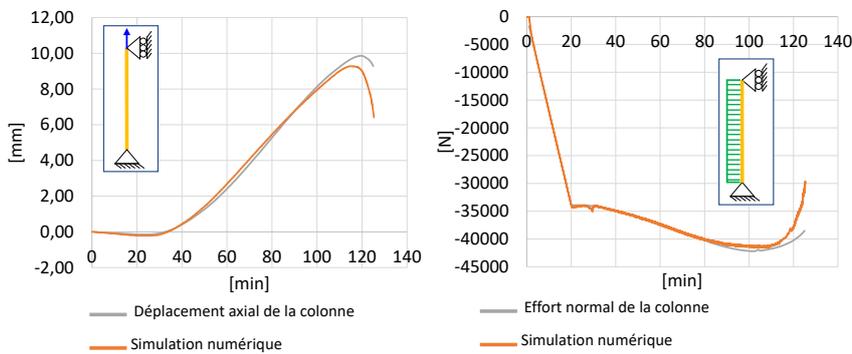


Figure 8

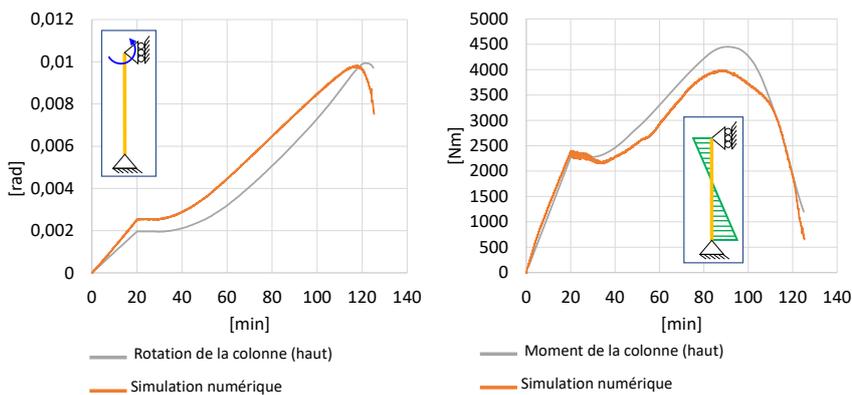
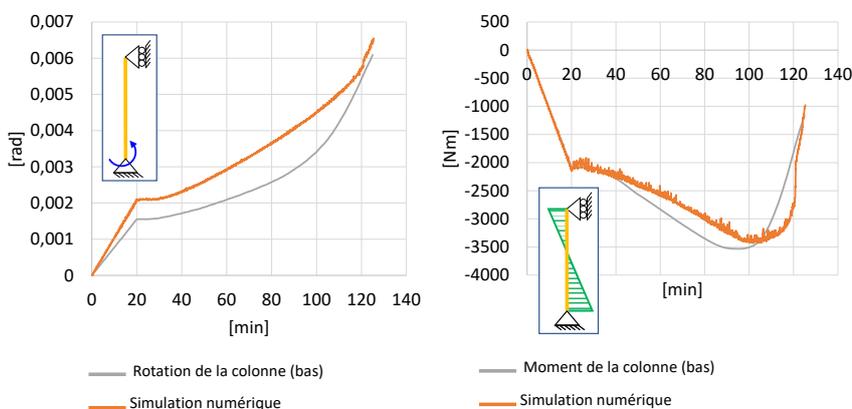


Figure 9



courbes de référence doivent cependant être relativisées car ces courbes sont déterminées en faisant de nombreuses hypothèses sur le comportement de l'acier et les imperfections géométriques.

Conclusion

Les essais hybrides sont une méthode d'essai de plus en plus prisée car ils combinent les avantages des simulations numériques et des tests expérimentaux. Ces essais présentent un grand intérêt pour la recherche car ils permettent d'étudier des phénomènes sans recourir à des essais pleine échelle. Les essais hybrides sont également une opportunité pour le milieu industriel car contrairement aux essais conventionnels, ils tiennent compte de la redistribution des efforts dans la totalité de la structure. La résistance au feu de l'élément aura donc plutôt tendance à augmenter, en particulier pour les poutres.

La recherche menée à l'Université de Liège a réalisé le premier essai hybride à plusieurs degrés de liberté entièrement automatisé, avec des résultats qui suivent les tendances des simulations numériques. Il est à prévoir que d'autres essais suivront, permettant ainsi aux essais hybrides de s'implanter à l'avenir dans les laboratoires comme une méthode d'essai au feu à part entière.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le Fonds National de la Recherche Scientifique (FNRS) par la bourse n° 31297790. Les auteurs remercient les membres du Laboratoire d'Essai au Feu de l'Université de Liège qui ont construit le dispositif expérimental et fourni le système d'acquisition de données. Ils remercient également les membres du Laboratoire de Mécanique des Matériaux & Structures qui ont aidé à préparer les éléments en acier.

ELKE MERQNY, JEAN-MARC FRANSSSEN¹²

Bibliographie

- [1] Korzen, M., G. Magonette, and P. Buchet. "Mechanical loading of columns in fire tests by means of the substructuring method." *Proceedings of the Eighth Interflam Conference*, Edinburgh (United Kingdom), 1998: 911–914.
- [2] Mostafaei, H. "Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire –Application", *Fire Safety Journal*, 2013: 30–38.
- [3] Whyte, C. A., K. R. Mackie, and B. Stojadinovic. "Hybrid Simulation of Thermomechanical Structural Response." *Journal of Structural Engineering*, 2016: 04015107-1 – 04015107-11.
- [4] Wang, X., R. E. Kim, O.-S. Kwon, and I. Yeo. "Hybrid Simulation Method for a Structure Subjected to Fire and Its Application to a Steel
- [5] Mergny, E. "Multi-Degree-of-Freedom Hybrid Fire Testing in a Non-Linear Environment." *Liege University, Dissertation*, 2021.
- [6] Franssen, J.-M., and Gernay, T. "Modeling structures in fire with SAFIR: Theoretical background and capabilities." *Journal of Structural Fire Engineering*, 2017: 300–323.

ELKE MERGNY, JEAN-MARC FRANSSSEN



dr. ir. Elke Mergny
Urban and Environmental Engineering (UEE),
Université de Liège, Belgique,
email : elke.mergny@uliege.be



prof. Jean-Marc Franssen
Urban and Environmental Engineering (UEE),
Université de Liège, Belgique, email:
jm.franssen@uliege.be

SOTRAFEU S P R L 

Entreprise générale de protection incendie et de menuiserie

COMPARTIMENTAGE COUPE-FEU

-  **Portes**
-  **Plafonds**
-  **Cloisons**
-  **Resserrages**
-  **Etude de
compartimentage**
-  **Protection de
structures acier**
-  **Détection incendie**
-  **Exutoires de fumée**



ISIB
Placeur certifié



TÉL : 081 30 52 51
INFO@SOTRAFEU.BE
WWW.SOTRAFEU.BE