



MAGAZINE

Trimestriel
janvier - février - mars 2025 | n° 38



PB-PP|B-02111
BELGIE(N) - BELGIQUE

Bureau de dépôt
3000 Leuven Masspost

PREVENTION IN MOTION

FIRE &
SECURITY



ANPI DTD 189 - Guide d'application
de la norme NBN S 21-100-1 en ce
qui concerne la démonstration de
compatibilité selon la norme EN 54-13



Éditeur

ANPI Magazine est la revue trimestrielle de ANPI asbl, l'association nationale pour la protection contre l'incendie et le vol
ISSN 2466-6467

Rédaction

ANPI Information, Marketing & Communication
Parc Scientifique Fleming
Granbonpré 1
1348 Louvain-la-Neuve
Belgique
E-mail : imc@anpi.be

Rédacteur en chef

Alain Verhoyen

Rédaction finale

Delphine Rasseneur, Christopher Boon

Ont collaboré à ce numéro

Nicolas Adami, Christopher Boon, Michel Delruelle, Jean-Marc Franssen, Seppe Lampe, Marie Majerus, Ilse Mestdagh, Delphine Rasseneur, Tim Renders, Nicolas Schömig, Frédéric Sireuil, Jort Stassen, Menno Stein

Abonnements, publicité et administration

ANPI Information, Marketing & Communication
Parc Scientifique Fleming
Granbonpré 1
1348 Louvain-la-Neuve
Belgique
E-mail : publications@anpi.be
Website : www.anpi.be
Abonnement annuel à ANPI Magazine (4 numéros) :
165 € HTVA

Éditeur responsable

Alain Verhoyen

Aucun élément de ce magazine ne peut être repris sans l'accord explicite et obtenu au préalable de l'éditeur responsable. Les textes figurant dans ANPI Magazine sont publiés sous la responsabilité de leur auteur. Ceci vaut également pour les insertions publicitaires pour lesquelles l'annonceur est entièrement responsable.

ANPI Magazine verschijnt ook in het Nederlands.

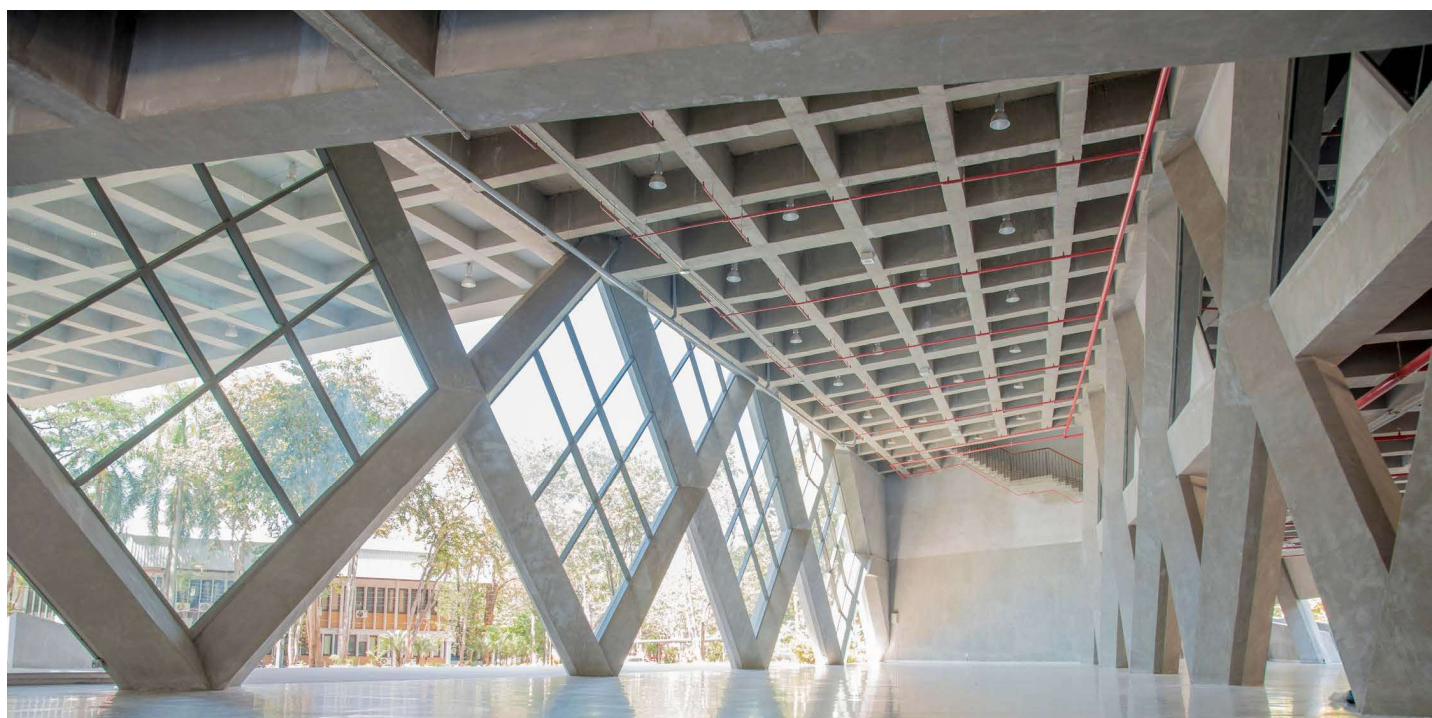
En couverture

Le grill est visible depuis la salle à manger du restaurant Wagyu, ce qui permet aux clients d'observer l'activité en cuisine.

© Wagyu / Facebook, 27 septembre 2022

SOMMAIRE

Éditorial	5
ANPI Y ÉTAIT POUR VOUS	6
FAITS MARQUANTS CHEZ NOS MEMBRES	8
FEU INSTRUCTIF	
Le « Sanglier » s'est fait griller	9
Incendie au « Sanglier des Ardennes » : comment ANPI aurait pu aider à l'éviter	12
ENQUÊTE PRODUIT	
Euralarm : une base de données européenne pour les systèmes sensibles au feu	17
PRÉVENTION INCENDIE	
Analyse des incendies domestiques mortels en 2024	18
DOSSIER TECHNIQUE	
ANPI DTD 189 :	
Guide d'application de la norme NBN S 21-100-1 en ce qui concerne la démonstration de compatibilité selon la norme EN 54-13	
PRÉVENTION INCENDIE	
Les essais de résistance au feu hybrides	25
Des incendies naturels de grande ampleur en Belgique également ? L'avis d'un expert...	29
CYBERSÉCURITÉ	
Cyberattaques & risque d'accidents majeurs	32
BON À SAVOIR	
Certification des centrales d'alarme vocale et de leurs composants selon les normes NBN EN 54-16 et NBN EN 54-4	33
Statistiques belges des appels d'urgence 2023	37
Le permis de feu en 2 mots	45
ANPI À VOTRE SERVICE	
Stockage de feux d'artifice : la présence du savoir-faire de ANPI aux Pays-Bas	39
Dans notre magazine... il y a 50 ans !	42
LU POUR VOUS	43
AGENDA	46



© bannafarsai / Adobe Stock

Les essais de résistance au feu hybrides

On parle d'essai hybride lorsqu'une composante d'un système est testée physiquement alors que le comportement du reste du système est modélisé sur ordinateur.

Ce concept est utilisé dans de nombreux domaines. Par exemple, un nouveau type d'amortisseur pour automobile peut être testé en laboratoire, avec des sollicitations appliquées à ses extrémités qui viennent du reste du véhicule, celui-ci – et peut-être même les irrégularités de la route – étant pris en compte par un modèle numérique.

Dans le domaine du bâtiment, c'est d'abord pour le comportement en cas de sollicitations sismiques que cette technique a été développée. La transposition dans le domaine de l'incendie est venue plus tard, à cause de la difficulté d'ajouter des températures élevées aux sollicitations mécaniques, ce qui entraîne, entre autres, l'impossibilité de travailler en dilatant l'échelle du temps.

Pour illustrer le principe appliqué à un essai de résistance au feu, imaginons le cas d'un poteau faisant partie d'une ossature à nœuds rigides, par exemple le poteau central de la Fig. 1-a. On peut calculer l'effort normal dans le poteau sous la combinaison d'actions correspondant à la situation d'incendie, $N_{i,d,0}$, et appliquer cette charge lors d'un essai de laboratoire. De manière classique, la charge est maintenue constante pendant toute la durée de l'essai et la dilatation du poteau peut se développer librement. Mais, en réalité, la dilatation thermique du poteau est partiellement gênée par la raideur du reste du bâtiment et l'effort varie constamment durant l'incendie ; il augmente lorsque le poteau tend à s'allonger mais, à l'inverse, il diminue lorsque la ruine approche et que la tête du poteau s'enfonce, transmettant alors une partie de l'effort vers les poteaux voisins.

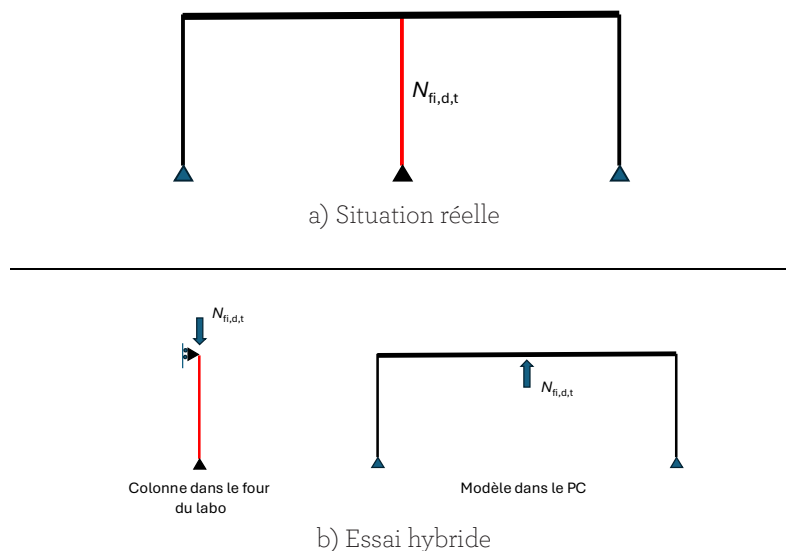


Fig. 1 : Principe d'un essai de résistance au feu hybride.

Pour un essai hybride, on place le poteau (la structure physique, ou SP), en vraie grandeur, dans un four et on lui applique la charge calculée $N_{fi,d,t}$. On met ensuite le four en marche et on adapte continuellement la charge suivant la réponse que donne la simulation numérique du reste de la structure (la structure numérique, ou SN), elle-même soumise à son interface aux informations venant de l'essai réel. Le jeu de ping-pong se poursuit ainsi pendant l'essai entre la SP et la SN à l'interface desquelles on adapte continuellement l'effort et le déplacement.

L'idée paraît assez simple, mais la mise en œuvre est beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît. Les difficultés sont d'abord d'ordre théorique. Pour n'en citer qu'une : faut-il, à chaque pas de temps, travailler à déplacement imposé ou à force imposée ? En d'autres termes, faut-il transmettre la dilatation mesurée sur la SP vers le calcul numérique pour calculer l'augmentation d'effort dans la SN, que l'on renverra ensuite vers le vérin du four ? Ou faut-il, au contraire, transmettre vers la SN l'effort mesuré sur la SP en bloquant son déplacement pendant le pas de temps, et calculer dans la SN la variation de déplacement qui sera ensuite imposée à la SP ?

Lors de la première thèse de doctorat menée sur le sujet à l'Université de Liège [Sauca 2017, Sauca & al. 2018]¹, Sauca avait montré que le processus peut devenir instable, avec des efforts calculés qui explosent, si on ne choisit pas la bonne procédure parmi les deux procédures ci-dessus, et que le choix de la bonne procédure dépend du rapport entre la rigidité de la SN et celle de la SP, avec la difficulté supplémentaire que la rigidité de la SP diminue lors de l'essai.

Un autre problème est que l'interface peut comporter plusieurs degrés de liberté (DDL). Ainsi, même dans une modélisation 2D, une poutre possède à chaque extrémité deux translations (avec l'effort normal et l'effort tranchant liés) et une rotation (avec le moment correspondant). Même en éliminant les trois mouvements de corps rigide, ce qui n'est déjà pas si simple, il reste trois DDL à l'interface et ceux-ci s'influencent les uns les autres.

Il existe aussi des difficultés numériques. En effet, si le calcul de la SN est assez rapide tant que sa taille est limitée et si on accepte un comportement linéaire, les temps de calcul augmentent rapidement avec la taille de la SN et, surtout, si on veut prendre en compte un comportement non linéaire, à cause des grands déplacements ou à cause du comportement des matériaux (par exemple, la fissuration dans le béton). C'est encore pire si on veut prendre en compte le fait que d'autres éléments de la SN sont aussi soumis à l'incendie. Il faut dans ce cas avoir recours à un logiciel aux éléments finis non linéaire tel que SAFIR® développé à l'Université de Liège et à la Johns Hopkins University [Franssen & Gernay 2017]. Se pose alors le problème de temps de calcul qui pourraient devenir trop longs avec une actualisation de la situation de la SN qui est en retard sur le développement des phénomènes physiques dans la SP. C'est particulièrement critique lorsque la SP approche de la ruine et que les phénomènes, le flambement par exemple, s'accélèrent.

Il faut rajouter à tout cela les difficultés matérielles. Comment faire communiquer un four de 3 mètres de haut, des capteurs de force, des capteurs de déplacement, des vérins puissants et rapides et un logiciel aux éléments finis ? Comment gérer les incertitudes de mesures des capteurs et des vérins et les erreurs d'arrondi des calculs numériques ?

Une étape essentielle, afin de tester toutes les hypothèses et les solutions développées avant de passer à la réalisation d'un essai pratique, est de mettre au point un système d'essai hybride virtuel. Dans celui-ci, la SP est aussi simulée numériquement. On fait tourner en parallèle deux calculs numériques, dont l'un représente la SP et on peut ainsi y introduire, virtuellement, toutes les difficultés que l'on imagine : erreurs d'arrondi, temps de réponse des vérins, etc.

Après les progrès théoriques réalisés par Sauca, l'ambition était de réaliser un essai sur une poutre en béton armé de 5,6 m de portée dont on contrôlerait à la fois l'effort axial H et les moments aux deux extrémités (grâce aux efforts appliqués sur deux porte-à-faux, voir P_{left} et P_{right} sur la Fig. 2).

¹ Les références entre crochets [] renvoient à la liste bibliographique en fin d'article.

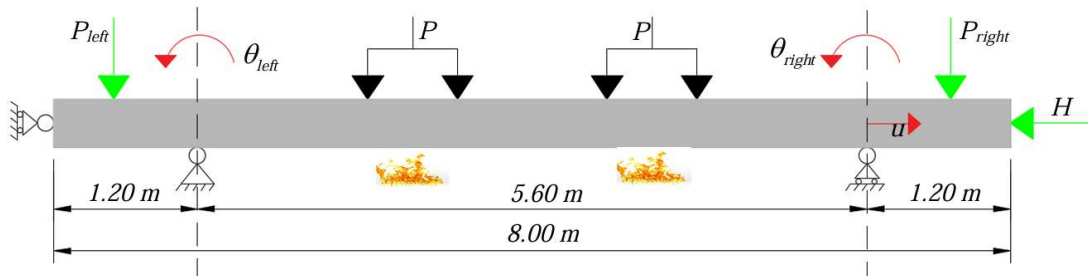


Fig. 2 : Essai sur poutre avec 3 degrés de liberté contrôlés - Source : Sauca 2017.

Cet essai devait avoir lieu au Centre d'Essais au Feu du CERIB (Centre d'Étude et de Recherche de l'Industrie du Béton) en France, qui finançait et co-dirigeait la thèse. Hélas, lors de l'essai, la poutre a été détruite lors du chargement initial, avant même l'allumage des brûleurs, par suite d'une mauvaise manipulation de la part d'une société d'informatique locale auprès de laquelle avait été sous-traité le pilotage des vérins hydrauliques. Les deux vérins de porte-à-faux P_{left} et P_{right} se sont emballés, appliquant une force vers le bas de plus en plus grande, entraînant un moment de flexion positif dans toute la porte, celle-ci se rompant dans une explosion bruyante qui a fait monter la travée vers le haut, sans blessures humaines autre que la fierté du sous-traitant et la frustration de la docteurante et de ses encadrants.

Pour la deuxième thèse, menée à Liège par Mergny [Mergny 2021, Mergny et Franssen 2022] sous notre direction, nous avons décidé :

- 1) de travailler avec des vérins électriques, plus faciles à piloter en déplacement, acquis grâce au soutien du FNRS,
- 2) de faire les essais sur un élément métallique, à savoir une colonne, aussi avec trois DDL à l'interface : l'effort normal plus un moment à chaque extrémité,
- 3) de travailler pour la SP à une échelle de $\frac{1}{2}$,
- 4) de chauffer cette colonne par des résistances électriques plutôt que dans un four à gaz et
- 5) de garder la maîtrise complète des programmes informatiques de communication entre les divers composants du système.

Mergny a aussi introduit la théorie du contrôle pour le pilotage du système. C'est ainsi qu'à pu avoir lieu avec succès un essai de résistance au feu hybride sur une SP à l'échelle

$\frac{1}{2}$, avec trois DDL couplés à l'interface, avec prise en compte du comportement non linéaire de la SN, et se déroulant de manière entièrement automatique : on pousse sur le bouton « Start » et tout le processus se déroule automatiquement, sans aucune intervention des opérateurs, jusqu'à la ruine de la SP (voir Fig. 3). C'était en fait une première mondiale !

Par la suite, Renard a poursuivi les travaux sur le sujet lors de sa thèse menée au CERIB [Renard 2021, Renard *et al* 2024] que nous avons aussi co-encadrée avec le Dr Fabienne Robert du CERIB. Il a notamment introduit la théorie du contrôle adaptatif pour le pilotage du système et résolu de nombreux problèmes pratiques et informatiques. Ses efforts lui ont permis de reprendre une des poutres en béton qui avaient été prévues pour la thèse de Sauca, mais qui n'avait pu être testée suite aux déboires expliqués plus haut, et de réussir cette fois, autre première mondiale, un essai au feu hybride automatique sur une SP en béton armé de vraie grandeur, aussi avec trois DDL couplés à l'interface et comportement non linéaire de la SN.

La Fig. 4 montre la complexité du dispositif de chargement installé sur le four Prométhée du CERIB pour les essais de Sauca et de Renard.

La Fig. 5 montre la poutre après l'essai. On y distingue clairement les trois rotules plastiques qui ont dû se développer pour atteindre la ruine, alors que le moment négatif sur les appuis a constamment été ajusté au cours de l'essai en fonction de la réponse de la SN à laquelle cette poutre était virtuellement reliée.

Pour ces trois thèses, c'est le logiciel SAFIR® qui a été utilisé pour la simulation de la SN, pour ses hautes performances

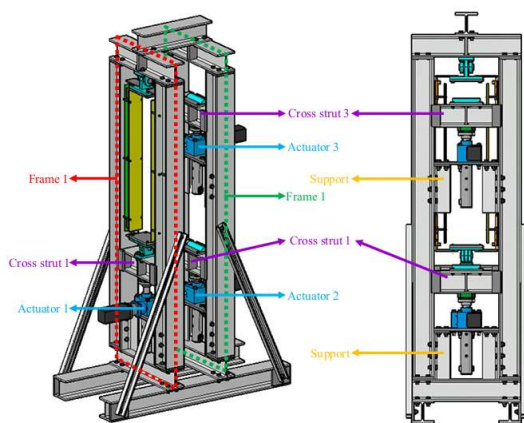


Schéma de principe



En cours d'essai



Après la ruine

Fig. 3 : Essai sur colonne métallique avec 3 degrés de liberté contrôlés - Source : Mergny 2021).

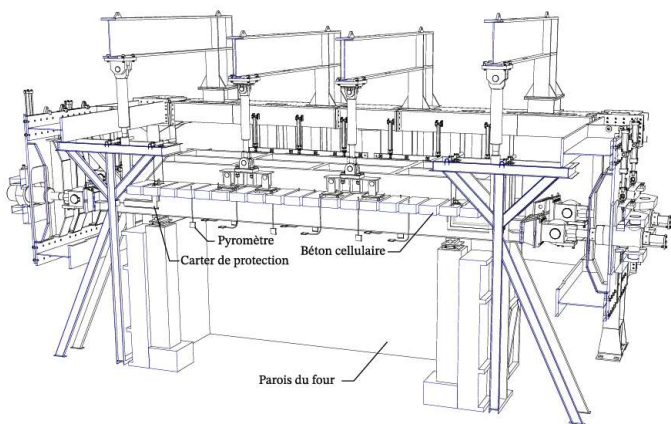


Fig. 4 : Schéma du dispositif installé sur Prométhée - Source : Renard 2021.

et sa parfaite adéquation avec la simulation de structures soumises au feu.

L'avantage essentiel d'un essai hybride par rapport à un essai classique est de pouvoir représenter et prendre en compte l'évolution des conditions cinématiques et mécaniques qui existent aux extrémités de l'élément. Reprenant le cas de la poutre qui fait partie d'une ossature à nœuds rigides, en la testant sur deux appuis simples d'extrémités, la ruine surviendra dès qu'une rotule plastique se développera en travée, sans aucune possibilité d'adaptation. Dans un essai hybride, la ruine ne se produit qu'après formation de trois rotules plastiques, une en travée et une sur chaque appui, et avec une variation continue au cours du temps du diagramme des moments qui prend en compte l'interaction avec le reste de la structure, et l'apparition de ces rotules est influencée (retardée dans le cas du béton armé) par l'effort normal de compression engendré par le bridage axial, lui aussi variant dans le temps. On a ainsi pu chiffrer le bénéfice obtenu entre une poutre testée sur deux appuis simples par Sauca, qui a résisté pendant 99 minutes, et la même poutre testée en essai hybride par Renard qui a résisté pendant 164 minutes.

Comme le montre la Fig. 5, c'est non seulement le temps de résistance qui est mieux appréhendé, mais aussi le mode de ruine. Au-delà de l'aspect quantitatif (mieux évaluer la durée de résistance au feu), il y a donc aussi l'aspect qualitatif. Sur un système de construction nouveau, on en apprendra plus sur le comportement qu'il risque de développer en situation réelle par un essai hybride que par un essai standard.

Les inconvénients sont évidemment liés à la complexité de l'essai, qui demande un équipement lourd, avec les coûts associés, dès qu'on veut contrôler plus d'un DDL (voir Fig. 4 et 5) ainsi que des compétences beaucoup plus pointues que celles requises pour un essai standard. Il y a aussi le fait que le résultat d'un essai hybride sur un élément de construction dépend du reste de la structure dans laquelle il est inséré, tandis qu'un essai standard permet de caractériser l'élément indépendamment de tout contexte, ce qui peut être confortable, malgré tous les inconvénients qu'on peut trouver à cet essai.

Alors, quel est l'avenir des essais au feu hybrides ? Les recherches se poursuivent dans le domaine et certains imaginent même de réaliser des essais distribués dans

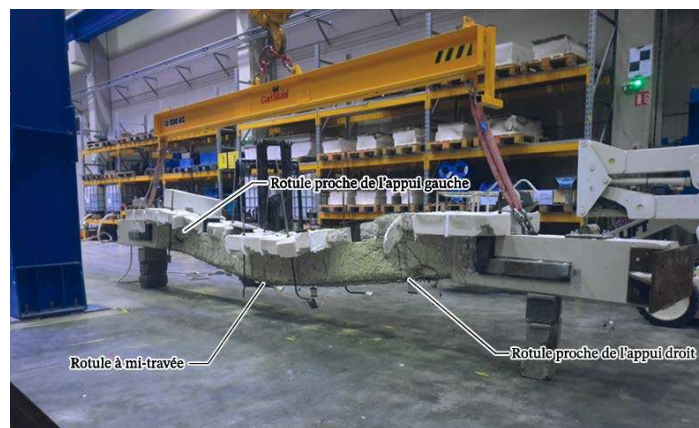


Fig. 5 : Poutre testée par Renard après la ruine - Source : Renard 2021.

lesquels un élément d'une structure serait testé dans un four au Japon, un autre de la même structure aux États-Unis et un troisième en Allemagne, tout cela simultanément alors que le comportement du reste de la structure et les interactions entre toutes ces composantes serait calculé, en temps réel, par exemple en Belgique avec SAFIR®.

En réalité, ce n'est pas encore pour demain que les essais hybrides vont remplacer les essais standard. Mais n'est-ce pas le rôle des universités de mener des recherches à la pointe du progrès, même si l'application pratique de ces travaux n'apparaît pas immédiatement ? Ces technologies de pointe seront d'abord mises en œuvre uniquement pour des problèmes particuliers (par exemple, le dimensionnement ou la vérification du comportement d'une structure totalement atypique) avant, peut-être, de passer dans la pratique courante. On se rappellera ainsi que, dans les années 70, les essais de résistance au feu qui nous paraissent aujourd'hui très classiques, étaient l'apanage des universités et des centres de recherche très spécialisés, avant de percoler et de trouver leur place dans le tissu économique courant.

Prof. Jean-Marc FRANSSSEN
SAFIR support s.r.l.
info@safirsupport.be
https://safirsupport.be

Références

- ▶ Franssen, J-M, & Gernay, T (2017), Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *J. Struct. Fire Engng*, 8 (3), 300-323, <https://hdl.handle.net/2268/202859>
- ▶ Mergny, E (2021), Multi-Degree-of-Freedom Hybrid Fire Testing in a Non-Linear Environment, *Ph. D. thesis, ULiège*, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/256378>
- ▶ Mergny, E & Franssen, J-M (2022), Essais au feu hybrides à plusieurs degrés de liberté dans un environnement non linéaire, *FireForum Magazine*, 80, 48-53, <https://hdl.handle.net/2268/290135>
- ▶ Renard, S (2021), Développement et implémentation d'un protocole automatique de conduite d'essais hybrides de résistance au feu, Thèse de doctorat, *Univ. de Bordeaux*, <https://theses.fr/260926108>
- ▶ Renard, S, Mindeguia, J-C, Robert, F, Morel, S & Franssen, J-M (2024a), Full-scale hybrid fire test in real-time with multiple degree of freedom, *Fire Safety J*, 149, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/321359>
- ▶ Sauca, A (2017), Development and implementation of a methodology for hybrid fire testing applied to concrete structures with elastic boundary conditions, *Ph. D. thesis, ULiège*, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/207527>
- ▶ Sauca, A, Gernay, T, Robert, F, Tondini, N & Franssen, J-M (2018), Hybrid Fire Testing: Discussion on stability and implementation of a new method in a virtual environment, *J. Struct. Engng*, <https://doi.org/10.1108/JSFE-01-2017-0017>