

## Résumé

Le projet de recherche porte sur l'étude numérique et expérimentale de systèmes réactifs pour la protection au feu, appliqués sur des éléments de traction en acier. Le projet est financé par l'Institut Allemand des Techniques de Construction (DIBt) et réalisé par l'Institut Fédéral de Recherche et d'Essais en Matériaux (BAM).

L'utilisation de systèmes réactifs ignifuges est régulée par des certifications aussi bien au niveau national qu'au niveau européen. Dans ces certifications, l'emploi de revêtements ignifuges sur des éléments de construction soumis à traction n'est régulé actuellement que pour les profilés à double T. L'utilisation de revêtements ignifuges intumescents sur des profilés pleins n'est pas à l'heure actuelle régulée par des certifications.

Le comportement structural des éléments de traction soumis au feu a rarement été étudié. De plus quasiment aucune données expérimentales n'ont été publiées à ce sujet. Le but de ce projet est donc de clarifier au moyen d'études expérimentales et numériques, la mesure dans laquelle les systèmes réactifs de retardateurs au feu peuvent être utilisés, pour une utilisation sur des éléments de traction ayant une section transversale circulaire, en particulier les profilés pleins. Les profilés pleins circulaires sont généralement utilisés dans la construction pour des systèmes préfabriqués de traction (tirants). Les mécanismes de rupture d'éléments de traction en acier avec des systèmes réactifs de protection au feu doivent être déterminés. Au vu des résultats du projet, des recommandations pour la mise en place des tests et l'évaluation des systèmes de retardateurs au feu seront proposées.

Le projet de recherche d'une durée de trois ans a été traité en trois phases thématiques. Premièrement, une étude bibliographique a été menée. La principale attention a été portée sur les informations concernant les propriétés mécaniques et thermiques de l'acier à haute température, ainsi que sur la vitesse de chauffe des sections de poutre avec des systèmes réactifs de retardateurs au feu. En outre, un modèle numérique est développé sur la base de la méthode des éléments finis pour un élément de traction soumis à une traction mécanique et à une haute température. Dans la seconde phase, de nombreuses expériences ont été menées en laboratoire, à petite échelle. Le but de ces tests ont été de déterminer les caractéristiques essentielles de l'acier étiré à froid. Des tests au feu à taille réelle sur des éléments de structure avec un revêtement intumescent ont été réalisés dans la troisième phase. Basés sur ces résultats, des recommandations pour les essais et l'évaluation des systèmes réactifs ignifuges appliqués sur des éléments de traction en acier ont été développées. De plus, les résultats expérimentaux ont été utilisés comme base pour la comparaison et la validation du modèle numérique proposé. Pour les tests en traction, un acier de la classe de résistance S355 est utilisé. Le revêtement des éléments est constitué d'un système ignifuge réactif classique actuellement approuvé. Pour des

raisons de comparabilité, tous les tests ont été effectués avec ce produit. La détermination des mécanismes basiques de défaillance sont le principal but de cette recherche. Dans les études expérimentales, différents paramètres ont été variés. En particulier, le diamètre des tiges, l'épaisseur de film sec du revêtement, et le niveau d'utilisation en charge de l'élément de traction ont été étudiés. Le comportement du système réactif ignifuge exposé au feu a été étudié pour des éprouvettes chargées mécaniquement et aussi celles non chargées. En outre, l'influence de la direction de montage, c'est-à-dire horizontale ou verticale, a été analysée pour les éprouvettes non chargées mécaniquement.

Les essais au feu montrent que l'application de systèmes réactifs ignifuges sur les éléments en acier avec un profilé plein circulaire soumis à une traction est en principe possible. Cependant, à cause de la surface incurvée, le comportement du revêtement intumescent montre des particularités, qui doivent être considérées aussi bien lors des essais que de l'utilisation ultérieure de ces systèmes. Parmi elles, la fissuration prononcée du revêtement intumescent doit être considérée. En conséquence, l'effet de barrière thermique du système peut se détériorer de façon significative à cause de la présence des fissures, et conduire à un chauffage rapide de l'acier. En outre, à cause de l'élargissement de fissures longitudinales, un glissement partiel du revêtement ignifuge peut se produire, ce qui conduit à une réduction significative de la protection thermique du système. En choisissant une épaisseur de film sec suffisante, des effets « d'auto-réparation » des fissures peuvent être déclenchés. Des fissures dans la mousse du revêtement peuvent être partiellement refermées grâce au post-moussage du matériau. L'effet de barrière thermique peut ainsi être maintenu.

Les tests au feu effectués au BAM ont montré que la charge mécanique appliquée favorise la formation de cracks dans le revêtement intumescent. La rupture des éprouvettes chargées se produit proche de la position où a été mesurée la température maximum de l'acier. Normalement, la défaillance est annoncée par une augmentation en nombre et en taille des fissures transversales. En général, l'augmentation de l'épaisseur de film sec ou la diminution de la charge mécanique augmente la résistance au feu de l'élément de traction. Une différence entre la température maximale de l'acier des éprouvettes chargées et non-chargées a été observée, spécialement dans le cas de film sec de faibles épaisseurs. Un coefficient de conversion entre les tests avec des éprouvettes chargées et non-chargées n'a pas encore été déterminé. L'étude des éprouvettes testées verticalement et horizontalement a montré que la direction de montage a un effet significatif sur les résultats, comme la durée de résistance au feu. C'est pourquoi le produit testé doit être utilisé ultérieurement dans la même configuration que la celle testée. Une possible influence de la longueur des éprouvettes testées horizontalement n'a pas pu être mise en évidence. Pour ne pas influencer les résultats du test, les effets d'écrans ou d'ombres sur l'élément de construction, aussi bien que la mesure de la température, qui a une influence sur l'expansion du système intumescent, doivent être évités. Des recommandations sont proposées dans le rapport à propos de la longueur minimale de l'éprouvette, et aussi à propos de l'utilisation de thermo-éléments pour la mesure de la température.

Le rapport contient également des informations sur les propriétés mécaniques à haute température de l'acier étiré à froid. Cet acier est le plus couramment utilisé pour des profilés pleins circulaires. Les caractéristiques uniques par rapport à l'acier étiré à chaud sont présentées dans le rapport. Les propriétés du matériau de l'acier étiré à froid et les températures de l'acier mesurées lors des tests en grandeur réelle sont utilisées en tant que valeurs d'entrée pour les simulations numériques.

Le modèle numérique développé dans ce projet est capable de calculer le comportement structural des éléments de traction pendant les tests au feu. Les déformations longitudinales d'une tige d'acier calculées numériquement sur un élément de traction analysé pris comme exemple, concordent bien avec les déformations mesurées lors de tests au feu. La part de déformations dues à la déformation du châssis appliquant la charge doit aussi être prise en compte dans les corrections des déformations mesurées. De plus, les points de mesure de la température sur l'élément de traction doivent être disposés sur toute la longueur de la tige, y compris en dehors de la zone d'incendie. Seulement dans ce cas une comparaison entre les résultats calculés et les résultats expérimentaux est possible. L'application du modèle numérique nécessite la connaissance de la variation des champs de température en fonction du temps du composant. Ceux-ci sont fortement influencés par le comportement du système réactif de protection au feu. La formation de fissures dans le système de protection contre le feu, et la détérioration consécutive des propriétés thermiques du revêtement intumescent s'ajoute à la complexité du problème. Pendant les tests au feu menés au BAM, il a été observé que le profil de température des éprouvettes non chargées est souvent très différent de celui d'un élément de traction chargé. Par conséquent, les résultats des éprouvettes non chargées ne peuvent pas être utilisés comme données d'entrée des simulations numériques.