
Acier S500M et Grade 70 – Propriétés mécaniques à hautes températures via essais en grandeur réelle

François Hanus¹, Olivier Vassart², Nicolas Caillet³, Jean-Marc Franssen⁴

¹ ArcelorMittal Global R&D Structural Long Products, 66, rue de Luxembourg, 4009, Esch-sur-Alzette, Grand-duché de Luxembourg, Francois.Hanus@arcelormittal.com

² ArcelorMittal Global R&D Structural Long Products, 66, rue de Luxembourg, 4009, Esch-sur-Alzette, Grand-duché de Luxembourg, Olivier.Vassart@arcelormittal.com

³ ArcelorMittal Global R&D Structural Long Products, 66, rue de Luxembourg, 4009, Esch-sur-Alzette, Grand-duché de Luxembourg, Nicolas.Caillet@arcelormittal.com

⁴ Université de Liège Département ArGENCo, Quartier Polytech 1, Allée de la découverte, 9, B52/3, 4000, Liège, Belgique, jm.franssen@ulg.ac.be

RÉSUMÉ. Cet article décrit deux tests expérimentaux réalisés à l'Université de Liège dans le cadre d'un projet interne d'ArcelorMittal Global R&D et portant sur l'évolution de la résistance des aciers S460M et S500M à hautes températures. Deux poutres métalliques similaires ont respectivement été soumises à des élévations de température rapide (courbe de feu ISO-834) et lente (vitesse d'échauffement constante de 5°C par minute) sous chargement mécanique constant. La réalisation de ces 2 tests avait pour objectif de fournir des données expérimentales sur l'évolution de la résistance des aciers S460M et S500M dans le domaine critique de température [550°C ; 650°C]. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulations numériques faites en utilisant les facteurs de réduction des normes européenne [CEN 05-2] et américaine [AIS 15] a permis de démontrer que l'utilisation de ces facteurs de réduction s'applique aussi aux aciers S500M et Grade 70.

....
....
....
....
....
....
....

ABSTRACT. This paper presents two experimental fire tests performed at the University of Liège in the scope of an internal project supported by ArcelorMittal Global R&D and focused on the resistance of S460M and S500M steel grades at high temperatures. Two similar beams have respectively been subjected to fast (standard ISO-834 curve) and slow (fixed 5°C/min heating rate) elevations of temperature under a mechanical loading kept constant. The objective of these fire tests is to provide data on the resistance of S460M and S500M steel grades in the critical temperature range [550°C ; 650°C] through full scale tests. A comparison between the reduction factors obtained from experimental tests and those defined in European and American standards [CEN 05-2 & AIS 15] will allow confirming that reduction factors defined in these standards also apply to S500M and Grade 70 steel grades.

....
....
....
....
....
....
....

MOTS-CLÉS : acier haute résistance, propriétés mécaniques, feu, haute température.

KEY WORDS: high-strength steel, mechanical properties, fire, high temperature.

1. Introduction

Les aciers à haute résistance est de plus en plus utilisés dans le monde des structures acier et mixtes acier-béton. Dans de nombreux pays comme le Royaume-Uni, les Etats-Unis, le Canada et en Scandinavie, l'utilisation de l'acier S355 (ou Grade 50) représente plus de 90% de la consommation d'acier dans les applications structurelles alors que les nuances S235 et S275 étaient au préalable les plus utilisées. Le surcoût d'un acier à haute résistance par rapport à un acier normal est largement contrebalancé par l'optimisation du dimensionnement (sections plus légères), la réduction du temps et des travaux de soudage sur site (nombre réduit de passes) et réduction de l'encombrement des poteaux.

La nuance d'acier S500M sera incluse dans les prochaines versions des normes EN 10025-4 [CEN 11] et EN 1993-1-1 [CEN 05-1] alors que le Grade 70 (limite d'élasticité supérieure ou égale à 485 MPa) a déjà été incluse dans la norme américaine A193/A193M – 15 [AST 15]. Cependant, l'utilisation des facteurs de réduction pour la limite d'élasticité efficace $k_{y,0}$ et pour la pente du domaine élastique linéaire $k_{E,0}$ définis actuellement dans l'EN 1993-1-2 [CEN 05-2] sont limitées aux nuances d'acier S235 à S460. De manière similaire, les normes AISC définissent les propriétés mécaniques des aciers à haute température seulement jusqu'au Grade 65 [AIS 15]. Ces lois AISC sont identiques à celles de l'Eurocode.

Les facteurs de réduction de l'EN 1993-1-2 (Tableau 1) sont issus de résultats de tests expérimentaux réalisés principalement sur des aciers doux (nuance S235) à température élevée gardée constante durant les années '80 et compilés dans [ARB 93]. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs auteurs ont publié des résultats d'essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes suivant une procédure d'essai anisotherme (chargement mécanique constant et augmentation progressive de la température). Schneider et Lange ont observé que de tels essais anisothermes réalisés sur des éprouvettes en traction menaient à des diminutions de la résistance plus importantes pour les aciers normalisés S460N que pour les aciers thermomécaniques S460M [SCH 09] et que cette réduction de la résistance pouvait, dans certains cas, être plus importante que celle mentionnée dans l'EN 1993-1-2. Qiang et al. ont étudié les propriétés mécaniques des aciers S460N à haute température et ont également conclu que les facteurs de réduction pour la limite d'élasticité efficace de l'EN 1993-1-2 ne pouvaient être utilisés pour ces aciers S460N [QIA 13]. Sur base de ces constatations, de nouvelles valeurs ont été proposées. D'autres études récentes de Knobloch ont souligné l'influence significative de la vitesse de chargement sur les diagrammes contrainte-déformation des aciers au carbone à hautes températures [KNO 13].

Tableau 1. Facteurs de réduction pour les relations contrainte-déformation de l'acier au carbone aux températures élevées.

T°	k_y	k_p	k_E
20°C	1.000	1.000	1.000
100°C	1.000	1.000	1.000
200°C	1.000	0.807	0.900
300°C	1.000	0.613	0.800
400°C	1.000	0.420	0.700
500°C	0.780	0.360	0.600
600°C	0.470	0.180	0.310
700°C	0.230	0.075	0.130
800°C	0.110	0.050	0.090
900°C	0.060	0.0375	0.0675
1000°C	0.040	0.0250	0.0450
1100°C	0.020	0.0125	0.0225
1200°C	0.000	0.0000	0.0000

L'objectif des deux essais présentés dans cet article est de vérifier si les lois contrainte-déformation de l'EN 1993-1-2 peuvent être utilisées pour représenter le comportement structural des éléments en acier à haute résistance.

2. Essais expérimentaux

Deux essais expérimentaux ont été réalisés: le premier sur une poutre non-protégée soumise à la courbe de feu ISO-834 [NBN 00] dans un four au gaz et le deuxième sur un profilé acier chauffé par des résistances électriques et recouvert de couvertures isolante de manière à suivre un échauffement constant au court du temps de 5°C/min. Cette vitesse d'échauffement relative basse est représentative de poutres protégées et destinées à satisfaire au critère R120 (échauffement de l'ordre de 600°C après 2 heures). Le premier essai est conforme aux essais standardisés réalisés sur des poutres chargées par un laboratoire accrédité ISO17025 et le second est plutôt un essai scientifique réalisé sous des conditions bien contrôlées. Il a été choisi de travailler sous un échauffement contrôlé dans le second test afin d'obtenir une distribution de température la plus uniforme possible dans les sections critiques de la poutre. En particulier, cela a permis de réduire les différences de température importantes observées entre les semelles supérieure et inférieure de la poutre testée dans le four au gaz. A chaque instant, le comportement de la poutre dépend uniquement des propriétés de l'acier à une température.

La longueur des deux poutrelles HEB300 testées est 4.4m. Comme les deux spécimens ne proviennent pas de la même coulée, les propriétés chimiques et mécaniques sont différentes et ont dû être déterminées par des essais sur éprouvettes indépendamment. Pendant les essais, les poutrelles sont isostatiques (distance entre l'appui fixe et l'appui à roulement de 4.2m) et chauffées sur les 4 côtés.

2.1. Essai n°1

Le chargement mécanique est resté constant pendant toute la durée de l'essai et appliqué dans les 2 sections situées à une distance L/3 des appuis, de manière telle que la zone centrale est soumise à un moment de flexion uniforme. La charge totale appliquée est de $2 \times 307 \text{ kN} = 614 \text{ kN}$. Un taux de chargement, défini comme le rapport entre le moment de flexion à mi-travée et le moment de flexion plastique de la section, égal à 0.5 était visé en considérant que la limite élastique de l'acier était de 460 N/mm^2 . Toutefois, les essais sur éprouvettes réalisés à température ambiante ont démontré que la limite élastique était bien supérieure (Tableau 2) et que le taux de chargement était en fait de $0.5 \times 460/528 = 0.435$.

REFERENCE	R_m [MPa]	R_{eH} [MPa]	A% ($5.65 \sqrt{S_0}$)
NC 1327-4A	603	528	27.5

Tableau 2. Résultats de l'essai de caractérisation réalisé à température ambiante sur la poutre de l'essai n°1

L'évolution de la température dans le profilé acier au cours du temps a été mesurée dans trois sections (Figure 1). La Figure 2 montre respectivement les températures mesurées dans l'âme et la semelle inférieure.

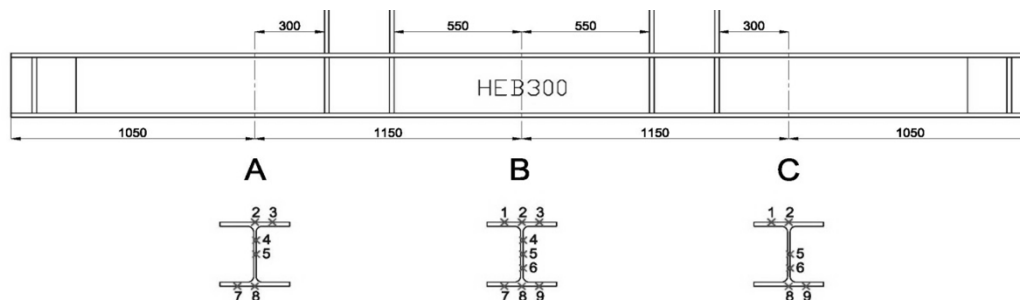


Figure 1. Position des thermocouples lors de l'essai n°1

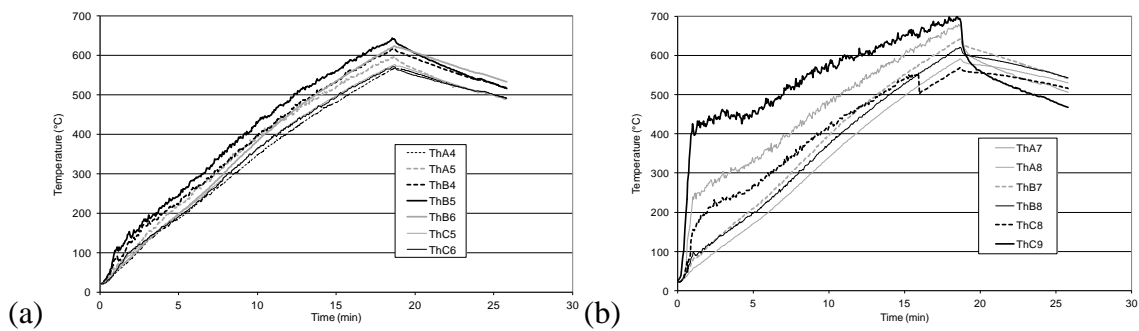


Figure 2. Evolution de la température mesurée dans l'âme (a) et la semelle inférieure (b) lors de l'essai n°1

La flèche (déplacement vertical à mi-travée) de la poutre de l'essai n°1 est représentée sur la Figure 3. A température ambiante et après application du chargement mécanique, une flèche de 22.5 mm est mesurée. La norme d'essai NBN EN 1365-3 [NBN 00] définit deux critères pour que la stabilité de la poutre soumise au feu soit assurée, en fonction de la hauteur d et de la travée L du profilé :

- La flèche de la poutre (à mi-travée) reste inférieure à $L^2/400 = 147$ mm, ce qui correspond à une flèche totale de 169.5 mm.
- La vitesse de variation de la flèche est égale à $L^2/4000d = 6.53$ mm/min

Durant le test n°1, ces deux critères ont été respectivement respectés pendant 19 et 14 minutes.

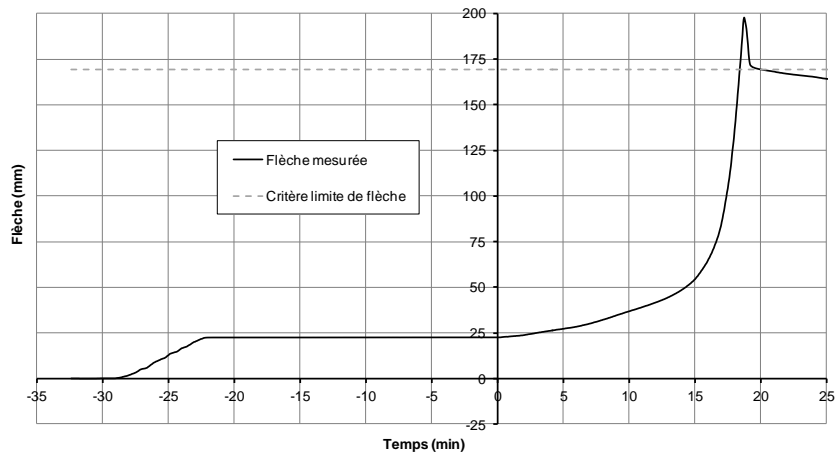


Figure 3. Evolution de la flèche de la poutre lors de l'essai n°1

2.2. Essai n°2

La limite d'élasticité du profil acier en traction a été mesurée par 5 essais spécifiques sur éprouvettes (2 sur chacune des semelles et 1 sur l'âme). Les résultats d'un essai sont présentés au Tableau 3.

REFERENCE		R_m [MPa]	R_{eH} [MPa]	A% ($5.65 \sqrt{S_0}$)
NC 1501-4A	UF-1	639	556	24.0

Tableau 3. Résultats de l'essai de caractérisation réalisé à température ambiante sur la poutre de l'essai n°2

Le chargement mécanique reste inchangé durant toute la durée de l'essai et appliqué dans les deux sections situées à une distance $L/4$ de chaque support, de telle manière que la zone centrale est soumise à un moment de flexion uniforme. La charge totale appliquée aux poutres est 2×409 kN = 818 kN. Les essais de caractérisation

ont à nouveau démontré que la limite élastique de l'acier était supérieure à 460 N/mm^2 . Par conséquent, le taux de chargement réel est de 0.42, au lieu de 0.5 si la limite élastique avait été de 460 N/mm^2 .

L'évolution de la température dans le profil acier au cours du temps a été mesurée dans 6 sections (Figure 4). Sur cette figure, la zone des résistances électriques est représentée en gris foncé alors que la couverture isolante est appliquée sur l'ensemble de la zone en gris clair.

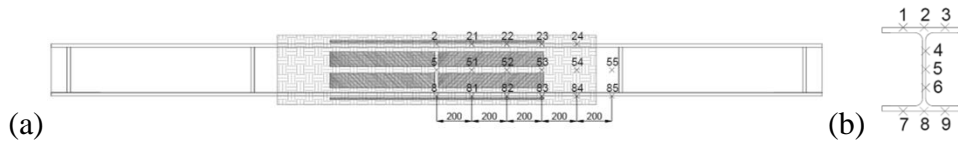


Figure 4. Position des thermocouples lors de l'essai n°2. Vues longitudinale (a) et transversale (b).

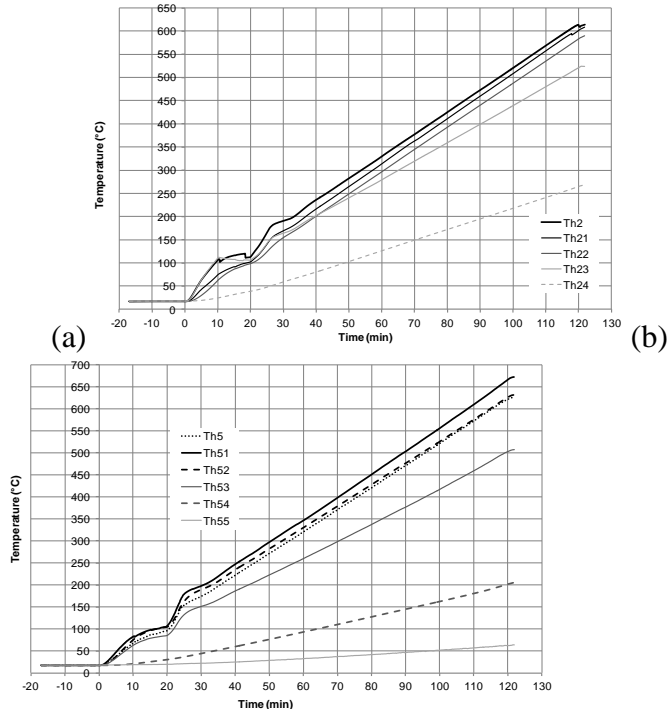


Figure 5. Evolution de la température mesurée dans la semelle inférieure (a) et l'âme (b) lors de l'essai n°1

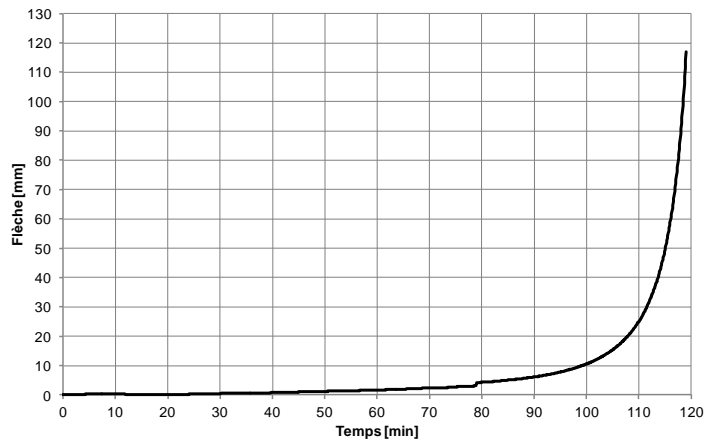


Figure 6. Evolution de la flèche de la poutre lors de l'essai n°2

3. Modélisation numérique des essais

Les flèches mesurées lors des essais ont été comparées aux flèches obtenues par un modèle éléments finis en utilisant les facteurs de réduction donnés par l'EN 1993-1-2 [CEN 05-2]. Le logiciel SAFIR[®], développé à l'Université de Liège spécialement pour l'analyse thermomécanique des structures soumises au feu [FRE 05].

Dans SAFIR[®], les calculs thermiques et mécaniques sont réalisés séparément. Dans ce travail, les évolutions de température dans les différentes parts des profilés ont été directement imposées sur base des mesures expérimentales.

Le premier essai a été reproduit par un modèle coques (Figure 7) et en utilisant trois valeurs différentes de la limite élastique de l'acier: les valeurs nominales (460 MPa et 500 MPa) et la valeur mesurée lors des essais sur éprouvettes (528 MPa). Les évolutions de température appliquées à la semelle supérieure, l'âme et la semelle inférieure sont les valeurs moyennes entre les mesures faites sur les parties en question. Le modèle constitutif de l'acier est un modèle plastique (surface de plasticité Von Mises suivant la limite de proportionnalité de l'EN 1993-1-2 avec écrouissage selon la loi contrainte-déformation jusque la limite élastique) avec état plan de contraintes. Les évolutions du module de Young et de l'allongement thermique suivent aussi les recommandations de l'Eurocode 3. La Figure 7 montre le modèle E.F. de la poutre, y compris les deux morceaux courts de colonnes pour laisser le vérin hors du four ainsi que les raidisseurs d'âme et de semelles positionnés au droit des sections de chargement et des sections d'appui et empêchant la distorsion ou l'instabilité locale du profilé.

La corrélation entre la courbe flèche-temps obtenue avec le modèle E.F. en utilisant la limite élastique mesurée et la courbe expérimentale est très bonne (Figure 8). A la fin de l'essai, les brûleurs ont été éteints et la flèche diminua. La rupture de la poutre est observée lors de l'analyse E.F. car aucun écrouissage n'est considéré dans la loi contrainte-déformation au-delà de la limite élastique. Le mode de rupture observé lors de l'essai et par la simulation est, comme prévu, la flexion de la poutre dans sa partie centrale sans phénomènes d'instabilité locale.

Le second essai a également été reproduit numériquement en utilisant les résistances nominales (460 MPa et 500 MPa) et la limite élastique mesurée expérimentalement. Trois différentes valeurs ont été considérées pour la semelle supérieure, l'âme et la semelle inférieure (Figure 10). Pour les semelles, la limite élastique est la moyenne entre les deux valeurs de R_{cH} mesurées sur deux éprouvettes de cette semelle. La distribution de température est considérée comme symétrique par rapport à la section centrale de la poutre (mesures de température concentrées sur un côté uniquement) et appliquée par zones, sur base des mesures disponibles.

A nouveau, les flèches prédites par le modèle E.F. collent bien avec les flèches mesurées, avec de légères différences en fin d'essai où le modèle est sécuritaire (Figure 11 et 12). A la rupture, la température des semelles supérieure et inférieure est de l'ordre de 590°C.

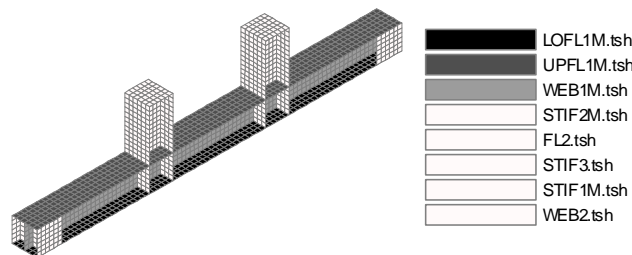


Figure 7. Modèle numérique de l'essai n°1

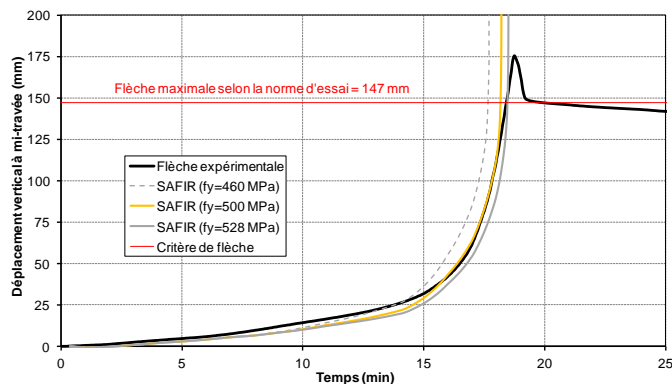


Figure 8. Comparaison entre les flèches expérimentale et numérique de la poutre (essai n°1)

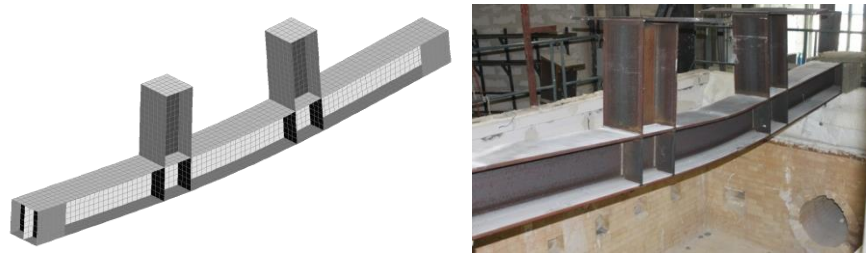


Figure 9. Comparaison entre les déformations expérimentales et numériques de la poutre (essai n°1)

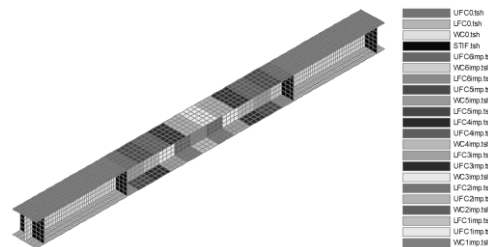


Figure 10. Modèle numérique de l'essai n°2

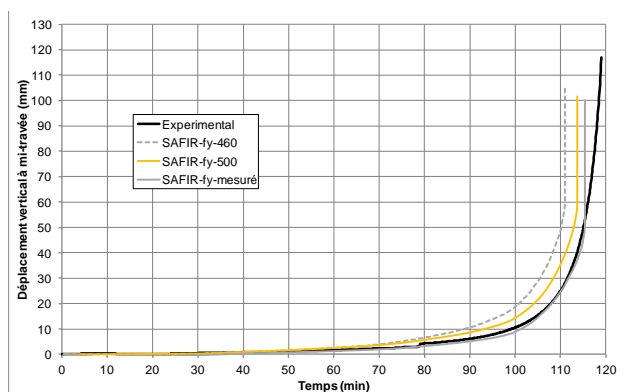


Figure 11. Comparaison entre les flèches expérimentale et numérique de la poutre (essai n°2)

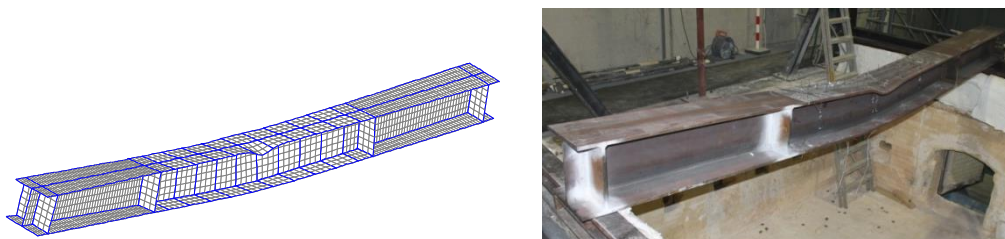


Figure 12. Comparaison entre les déformations expérimentales et numériques de la poutre (essai n°2)

4. Conclusions

Les facteurs de réduction pour la limite d'élasticité efficace de l'acier au carbone définis dans l'EN 1993-1-2 sont le résultat d'essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes ou spécimens à échelle réduite soumises à des conditions isothermes ou anisothermes, mais aussi d'essais grandeur réelle réalisés sur poutres et colonnes sous feu ISO. Plusieurs auteurs ont remarqué l'influence significative des procédures d'essai sur la réduction de la résistance de l'acier à hautes températures. Le choix de cette procédure d'essai a par conséquent un effet considérable sur les conclusions tirées à propos des propriétés mécaniques de l'acier à hautes températures.

Dans de récentes publications, les résultats d'essais sur des éprouvettes en acier à haute résistance ont été présentés. Certains de ces essais ont mené à des ratios entre la résistance à chaud et la résistance à froid inférieurs aux facteurs de réduction donnés par l'Eurocode. Ces auteurs ont par conséquent remis en question la validité de ces facteurs pour les aciers haute résistance, sans se référer à aucun essai grandeur réelle.

Cet article décrit 2 essais expérimentaux réalisés sur des poutres en acier haute résistance sous des échauffements rapide et lent menant à des ruptures dans le domaine de température [550°C ; 650°C]. Les propriétés matérielles des profils testés à température ambiante ont permis de classer ces aciers à la fois S460M et S500M. Les comparaisons entre mesures expérimentales et résultats de simulations numériques en faisant usage du logiciel SAFIR[®] et des lois de matériau de l'Eurocode 3 ont mené à de bonnes corrélations. Ceci confirme que les facteurs de réduction existants peuvent être utilisés pour les aciers S460M et ouvre la porte à l'application de ces mêmes coefficients aux aciers S500M.

5. Bibliographie

- [AIS 15] AISC, « Specification for Structural Steel Buildings. Public Review Draft Dated March 2. 2015 », *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL, USA.
- [ARB 93] ARBED RECHERCHES, « Practical design tools for unprotected steel columns submitted to ISO-fire », *REFAO III*, Contract No 7210-SA/505, Final Report.
- [AST 15] ASTM INC., « A913/A913M:2015 – Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Steel Shapes of Structural Quality Produced by Quenching and Self-Tempering Process (QST) », *ASTM Inc.*, West Conshohocken, PA, USA.
- [CEN 05-1] CEN, « EN 1993-1-1 :2005 – Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-1 : General rules for buildings », *CEN*, Brussels.
- [CEN 05-2] CEN, « EN 1993-1-2 :2005 – Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design », *CEN*, Brussels.
- [CEN 11] CEN, « prEN10025-4:2011 – Hot-rolled products of structural steels – Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels », *CEN*, Brussels.
- [FRA 05] FRANSSEN J.-M., « SAFIR : A thermal/structural program for modeling structures under fire », *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, vol. 43, n°2, 2005, p. 143-158.
- [KNO 13] KNOBLOCH M., PAULI J., FONTANA M., « Influence of the strain-rate on the mechanical properties of mild carbon steel at elevated temperature », *Materials and Design*, vol. 49, 2013, p. 533-565.
- [NBN 00] NBN, « NBN EN 1365-3:2000 – Essais de résistance au feu des éléments porteurs – Partie 3: Poutres », *NBN*, Brussels.
- [QIA 13] QIANG X., BIJLAARD F., KOLSTEIN K., « Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N : Experimental study and recommendations for fire-resistance design », *Fire Safety Journal*, vol. 55, 2013, p. 15-21.
- [SCH 09] SCHNEIDER R., LANGE J., « Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures », *Nordic Steel Construction Conference*, Suède, 2009, p. 204-211.