

Etude du comportement thermique de pièces en acier protégées par peinture intumescente.

Véronique Saulnier¹, Sébastien Durif², Abdelhamid Bouchaïr³, Philippe Audebert⁴

¹ IUT d'Allier, Département Génie Thermique et Energie, mail : veronique.saulnier@moniut.univ-bpclermont.fr

² Université Blaise Pascal, Département Génie Civil, mail : sebastien.durif@univ-bpclermont.fr

³ Université Blaise Pascal, Département Génie Civil, mail : Abdelhamid.bouchair@univ-bpclermont.fr

⁴ IUT d'Allier, Département Génie Thermique et Energie, mail : philippe.audebert@moniut.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. L'étude présente porte sur la protection thermique de l'acier. De premiers essais au feu ont été réalisés sur des plaques d'acier protégées par peinture intumescente. Le but était d'évaluer l'influence de différents paramètres géométriques sur le développement de la protection (forme, taille). Un test a également été effectué sur une cornière afin d'observer l'expansion de la peinture sur une surface verticale et la jonction de deux plaques. Les essais suivants ont porté sur une seule taille de plaque avec différentes épaisseurs de peinture. Les résultats de ces essais ont ensuite servi de base afin de proposer une approche analytique simple susceptible de prédire l'échauffement de l'acier protégé par peinture intumescente.

ABSTRACT. Fire tests have been carried out on steel plates protected with intumescent coating as preliminary study. The tests are performed to measure the heating of steel plates with various geometrical configurations (shape, size). In addition, a test is done on an equal leg angle to compare the expansion of its intumescent paint with that of isolated plates. A second test campaign is done using only one size of plates with different thicknesses of intumescent paint. The aim is to set up an experimental protocol for future tests and to observe the main parameters to be investigated. The results are used to evaluate analytically the evolution of temperature in steel plates with and without fire protection.

....

MOTS-CLÉS : Peinture intumescente, protection au feu, structure acier, comportement au feu.

KEY WORDS : intumescent painting, fire protection, steel structures, fire behavior, plasterboard.

1. Introduction

La peinture intumescente retarde le processus d'échauffement de l'acier. Elle est utilisée pour la protection incendie des structures en acier et en béton. Le principal avantage de ce type de protection est qu'il ne modifie pas l'aspect architectural et les propriétés mécaniques de la structure. Cependant, les documents réglementaires disponibles (NF-EN 1993-1-2 [EN 05]) ne donnent pas de règles pour prédire l'efficacité de la protection alors qu'ils proposent une formule pour les protections d'épaisseur constante, type plâtre ou flocage. En effet, le comportement de ce matériau est complexe car il se dilate au cours de l'élévation de température. Ainsi, plusieurs recherches ont été menées pour étudier le comportement complexe de cette protection sous des températures élevées. Ces études mettent en avant notamment l'influence de plusieurs paramètres géométriques sur le développement de la protection. Des essais ont été effectués sur des poutres cellulaires protégées par peinture intumescente par C. Bailey (Bailey 2004). Ces essais sur la peinture intumescente montrent des irrégularités du développement de la meringue sur la surface avec un certain détachement de la surface sur quelques parties du support. La peinture intumescente a également fait l'objet de la thèse de M. Gillet [GIL 09]. De la même façon, il a pu être observé que le développement de la peinture peut être impacté par la forme géométrique des parois protégées, avec notamment une variation du développement de la protection aux abords des intersections de parois. D'autres tests ont été effectués récemment sur des poteaux [KOL 15]. L'article propose de fixer une valeur de la conductivité au fil de l'évolution de la température afin de donner une méthode numérique de calcul de la protection avec la formule de l'eurocode. L'un des derniers articles de G.Q. Li et ses collaborateurs [LI 16] proposent d'estimer la protection de la peinture en comparant la courbe expérimentale à celle obtenue avec la formule de l'eurocode pour une valeur constante de la conductivité thermique. Le but de la présente étude est de prédire l'évolution de la température de l'acier protégé avec une peinture intumescente et d'estimer la conductivité thermique de la peinture. De plus, les essais ont permis de tester une plaque protégée avec du plâtre dans le but d'évaluer la précision des méthodes de calcul de température pour des matériaux connus. Les essais ont été menés en suivant deux campagnes expérimentales. La première s'est concentrée sur l'étude de plaques de différentes dimensions munies ou non de protection intumescente. La seconde campagne d'essais a permis de tester d'autres plaques protégées par différentes épaisseurs de peinture ou de plâtre. Les résultats de température sont ensuite comparés à des résultats théoriques afin d'évaluer la pertinence de l'application des règles de l'eurocode pour les différents cas étudiés, plaques non protégées, protégées avec du plâtre et protégées par peinture intumescente.

2. Détermination de la température de l'acier suivant l'Eurocode 3

2.1 Les hypothèses

Les équations données dans l'Eurocode sont établies en partant de l'hypothèse que la température de l'acier est uniforme dans toute la pièce. Le transfert de chaleur est également considéré comme monodimensionnel.

2.2 Pièce d'acier non protégée

Pour un élément d'acier non protégé l'eurocode 3 [EN 05] donne l'équation suivante :

$$\Delta\theta = \frac{\dot{h}_{net,d}(t)}{Ca \cdot \rho a} \cdot A/V \cdot \Delta t \quad [1]$$

V/A est l'épaisseur fictive de la pièce en m ; A/V est appelé le coefficient de massivité de la pièce en m^{-1} ; Ca est la chaleur spécifique de l'acier [$J/kg.K$] ; Δt est l'intervalle de temps [s] ; $\Delta\theta_{g,t}$ est l'augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps Δt ; ρa est la masse volumique de l'acier [kg/m^3].

Cette équation permet d'obtenir le profil des températures en fonction du temps pour une pièce en acier sans protection exposée à un flux de chaleur. [FRA 86]

2.3 Pièce d'acier protégée

Pour les pièces d'acier protégées par un isolant d'épaisseur constante d_p , une chaleur massique C_p et une conductivité λ_p la formule de l'Eurocode est la suivante [EC3 05]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V \cdot (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p \cdot C_a \cdot \rho_a \cdot (1 + \Phi/3)} \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad [2]$$

Avec $\Delta\theta_{a,t} > 0$

$$\Phi = \frac{C_p \rho_p}{C_a \rho_a} \cdot d_p \cdot A_p \quad [3]$$

A_p/V est le facteur de massiveté pour l'élément en acier isolé par un matériau de protection contre le feu ; A_p est la surface concernée de la protection contre le feu par unité de longueur d'élément ; V est le volume de l'élément par unité de longueur ; C_a est la chaleur spécifique de l'acier [J/kg.K] ; C_p est la chaleur spécifique du matériau de protection contre le feu [J/kg.K] ; d_p est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu [m] ; Δt est l'intervalle de temps [s] ; $\theta_{a,t}$ est la température de l'acier au temps t ; $\theta_{g,t}$ est la température ambiante des gaz au temps t ; $\Delta\theta_{g,t}$ est l'augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps Δt ; λ_p est la conductivité thermique du matériau de protection contre le feu [W/m.K] ; ρ_a est la masse volumique de l'acier, suivant 3.2.2 [kg/m³] ; ρ_p est la masse volumique du matériau de protection contre l'incendie [kg/m³].

Δt le pas de temps ne doit pas excéder cinq secondes.

Cette formule découle des travaux d'Ulf Wickstrom. [WIC 85]

3. Comportement au feu de la peinture intumescente

Les peintures intumescentes sont des peintures qui présentent la particularité de gonfler sous l'effet de la chaleur. Elles forment ce que l'on appelle une meringue qui va retarder l'échauffement de la structure.

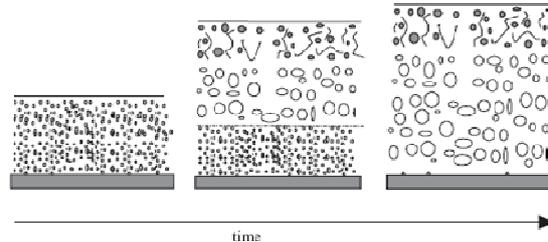


Figure 1. *Modèle schématique de mécanisme d'expansion de la peinture [DUQ 05]*

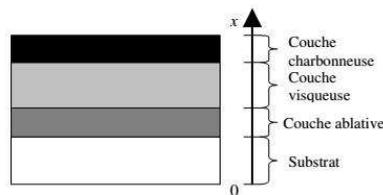
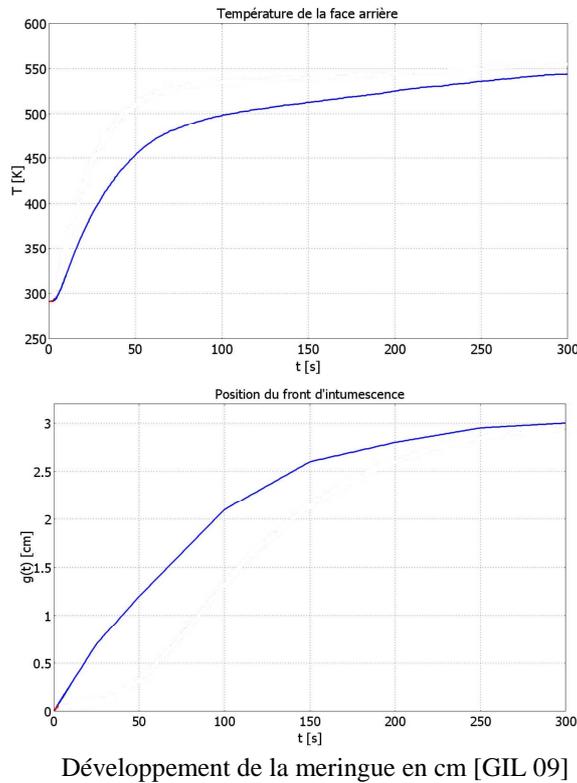
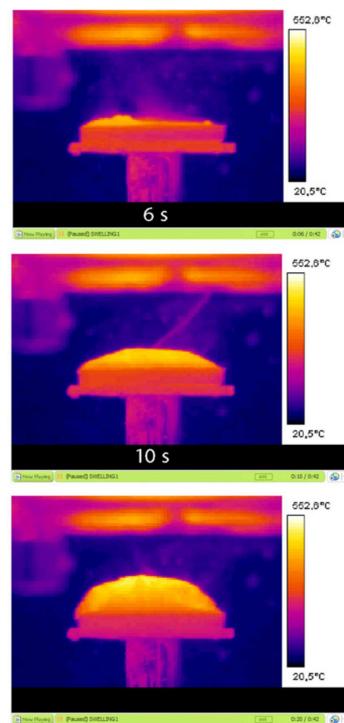


Figure 2. *Description des différentes couches de développement de la peinture [GIL 09]*

Le développement de la meringue est un processus chimique complexe. La peinture commence par absorber le flux de chaleur. Il va y avoir une réaction endothermique de pyrolyse qui va produire la vaporisation de l'eau et des bulles de gaz qui en montant vers la surface vont provoquer le gonflement. Cette phase est dite phase visqueuse. Si la température continue à augmenter il va se former la couche carbonneuse qui correspond à la carbonisation de la peinture. [DUQ 05] [ZHA 12] [YEW 12] (Figures 1&2). [GIL 09] Le principal avantage de cette protection est qu'elle permet de conserver l'aspect architectural des structures protégées, ce qui s'avère intéressant dans le cas de structures apparentes telles que les poutres cellulaires. Cependant l'épaisseur et la conductivité thermique de ces peintures sont difficiles à déterminer. Le développement de la peinture est surtout lié à la température de l'acier. Il semble toutefois que le développement de la meringue soit assez rapide (de l'ordre de 5 minutes) sous un feu normalisé et atteigne sa hauteur maximale. (Figure.3).



Développement de la meringue en cm [GIL 09]



Formation de la meringue [STA 10]

Figure 3. Evolution de la peinture au cours de la montée en température

4. Mode opératoire

4.1. Matériels et mesures

Les différentes campagnes de mesures ont été faites dans un four en béton cellulaire avec deux brûleurs fioul. La température des plaques d'acier est mesurée avec des thermocouples K soudés en différents points sous la plaque. Certains essais ont été menés avec des thermocouples sur et sous la plaque afin de vérifier l'homogénéité de la température du fait de leur faible épaisseur. La température du four est mesurée au moyen de pyromètres de four conformément à la norme d'essais au feu. [AFN] (Fig. 7).

4.2. Première campagne d'essais

La première série de tests a été menée sur différentes plaques planes de taille variable avec et sans peinture. Il a été choisi de procéder à un test sur trois tailles de plaques : 20 cm ; 10 cm et 5 cm afin d'observer l'impact de la taille des plaques sur l'échauffement de l'acier et d'observer le développement de la meringue. D'autres tests ont été menés sur une cornière et des plaques avec des découpes de différentes formes afin d'observer l'influence d'effets de bords, de jonction de parois et de l'orientation des parois (horizontale ou verticale). De plus, certains défauts ont été introduits sur la cornière ; un trou de 10 cm de diamètre ainsi que deux rayures de largeurs différentes ont été réalisés. L'épaisseur de peinture appliquée aux différents échantillons de cette première campagne d'essai est de 0,4 mm. La figure 4 présente la disposition des plaques dans le four.

4.3. Seconde campagne d'essais

La première campagne d'essais a permis de vérifier le comportement de l'acier et de valider l'impact du facteur de massiveté A/V sur l'échauffement des plaques. La deuxième campagne d'essais a été menée sur une série de plaques de 10 cm de côté avec des couches de peinture de 0,375 et 0,525 mm sur les deux plaques peintes et une plaque d'acier non peinte pour servir de repère au regard de l'échauffement de l'acier.



Première campagne d'essai sur différentes formes de plaques



Deuxième campagne d'essai avec peinture et plâtre

Figure 4. Disposition des plaques dans le four

5. Observations et résultats

5.1. Résultats de la première campagne d'essai

Les mesures de la température sur les plaques (Figure 5) montrent que l'échauffement des plaques peintes augmente moins vite aux alentours de 250°C, avec un net infléchissement de la courbe par rapport à celle de l'acier non protégé. M. Gillet [GIL 09] obtient des valeurs de température de l'acier protégé par peinture intumescente dans les mêmes ordres de grandeur. Cependant, la courbe des températures de la plaque d'acier non protégée présente une différence de 100°C avec la courbe théorique. Cette différence peut éventuellement s'expliquer par un transfert de chaleur entre la plaque et le support en silico-calcaire sur lequel est posée la plaque alors que le modèle considère un flux de chaleur nul sur cette face. A moins que les hypothèses du rayonnement et de la convection données par l'eurocode ne soient pas adaptées pour notre four.

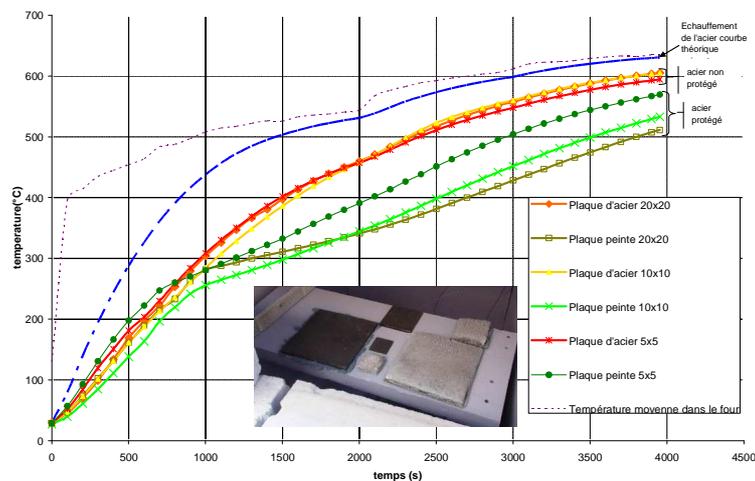


Figure 5. Courbes d'évolution de la température dans les différentes plaques

Les plus petites plaques s'échauffent plus que les grandes. Cependant, les températures des plaques 10 par 10 et 20 par 20 en acier non protégé sont assez proches. La courbe de la température des plaques peintes s'infléchit au dessus de 250°C puis présente à nouveau une évolution régulière sans autre perturbation. La peinture reste blanche. On n'observe pas de carbonisation de la protection. L'épaisseur finale de la peinture est proche du ratio de 25 fois l'épaisseur initiale donnée par le fabricant.

5.2. Observations sur la cornière à ailes égales

Le développement de la peinture sur la cornière présente des irrégularités intéressantes. La peinture s'est moins développée sur les faces verticales. De plus, les rayures sont restées intactes après le développement de la protection. La peinture, en gonflant, n'a pas réparé les anomalies sur la surface. De même le perçage n'a pas été obstrué par le développement de la peinture. (Figure 6)



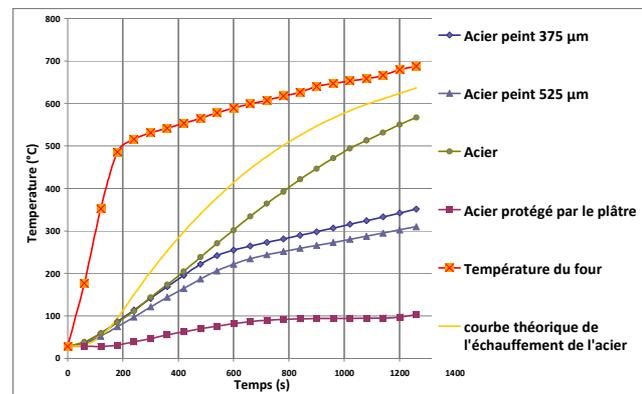
Figure 6. Cornière après l'essai

5.3. Résultats de la seconde campagne d'essais

Les plaques ont été placées au centre du four et le plus loin possible des parois afin que le rayonnement des parois trop proches n'augmente pas le flux de chaleur reçu par les échantillons. On observe la même inflexion des courbes de température que sur les essais précédents. Jusqu'à une température d'acier de 250°C, les courbes des différentes plaques, acier brut et acier peint, suivent la même évolution, tandis que les plaques peintes s'échauffent moins vite après 250°C. (Figure 7) On peut voir toutefois que la plaque avec 525 µm de peinture a une température moins élevée dès le départ. Le fait d'avoir une couche de peinture plus épaisse offre une meilleure isolation thermique.



Plaques après l'essai



Courbes théoriques et expérimentales de l'évolution de la température

Figure 7. Résultats des essais de la deuxième campagne

On a mesuré aussi l'évolution de la température d'une plaque protégée par du Placoplatre type BA13. Le but est de pouvoir comparer les résultats théoriques obtenus avec les équations de l'eurocode aux résultats expérimentaux. Les caractéristiques thermiques du plâtre en fonction de la température sont connues et ont fait l'objet de plusieurs études [WAK 07]. Les valeurs utilisées dans cet article sont données par les études de Harmathy (1988) et reprises par Thomas [THO 02].

La courbe expérimentale du plâtre et la courbe théorique sont de même allure (Figure 8).

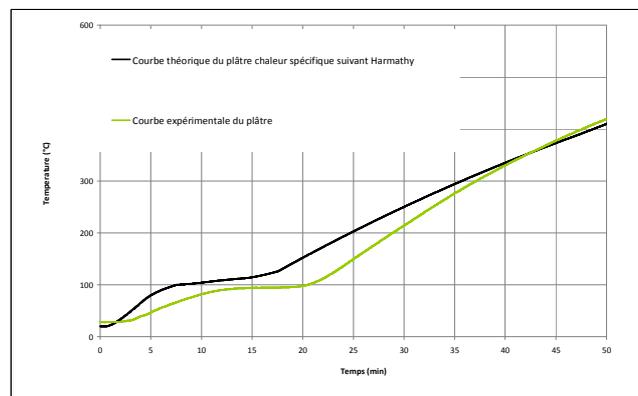
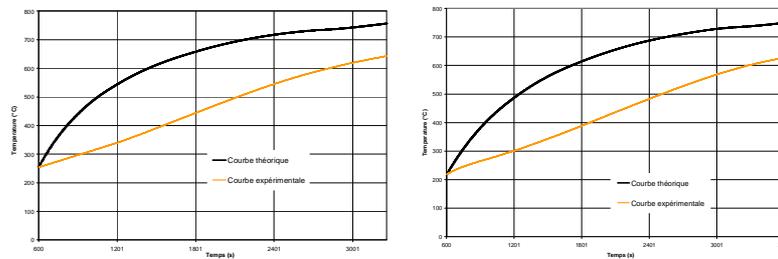


Figure 8. Courbe de température de l'acier protégé par le plâtre

Suite aux résultats de nos essais, on se propose de comparer les courbes expérimentales de la peinture intumescente à des courbes théoriques obtenues avec les formules de l'eurocode et les hypothèses suivantes: dans les gammes de températures de l'essai, le développement de la meringue se produit rapidement après 250°C, n'évolue plus après 300°C et conserve une épaisseur constante jusqu'à la fin de l'essai. [GIL 09], le développement final de notre peinture est de 25 fois l'épaisseur initiale, comme indiqué par le fabricant dans sa documentation sur le produit en 2013. On recherche la courbe théorique la plus proche de la courbe expérimentale en faisant varier les valeurs de la conductivité du produit après 250°C. Cette méthode nous donne des courbes théoriques proches des courbes expérimentales et avec une marge similaire pour les deux épaisseurs. La première courbe théorique a été obtenue avec une conductivité de 0,7 W/m.K. Cette valeur est celle utilisée par M. Gillet dans sa thèse pour simuler la protection due à la peinture. Avec une valeur de 0,23 W/m.K et un ratio de 25 on obtient des courbes théoriques plus proches de nos courbes expérimentales. (Figure 9). Pour une valeur plus petite de la conductivité thermique, les courbes théorique et expérimentale se croisent vers la fin de l'essai. Par mesure de sécurité, il vaut mieux sous estimer la valeur de la protection. Cette méthode simplifiée est moins précise que celle proposée par Kolsek et Cesarek, [KOL 15] qui font une simulation avec modification de la valeur de la conductivité thermique suivant l'épaisseur. Cette méthode est similaire à l'approche proposée par Li et ses collaborateurs. [LI 16], hormis que la conductivité de la peinture est estimée à partir du début de l'essai et non au moment où la meringue se développe. Les résultats obtenus sur ces deux plaques devront être confirmés ou infirmés par de nouveaux essais.

Épaisseur initiale de la peinture 0,375 mm

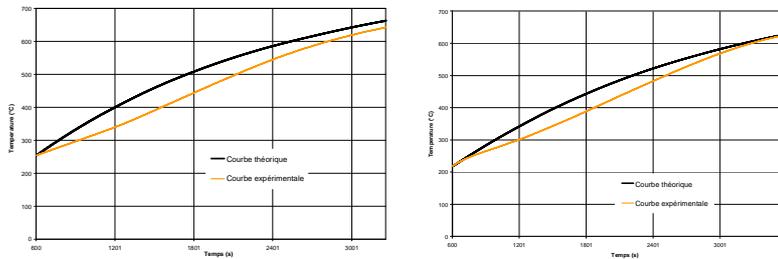
Épaisseur initiale de la peinture 0,525 mm



Conductivité thermique 0,7 W/m.K épaisseur 25 fois l'épaisseur initiale

Épaisseur initiale de la peinture 0,375 mm

Épaisseur initiale de la peinture 0,525 mm



Conductivité thermique 0,23 W/m.K épaisseur 25 fois l'épaisseur initiale

Figure 9. Evolution de la température après 200°C

6. Conclusion

Les divers tests réalisés ont permis d'observer la réaction de la peinture intumescente et de voir la différence d'échauffement d'un acier protégé par la peinture et un acier sans protection. Cet article propose une méthode simple permettant d'estimer la valeur de la conductivité thermique de la peinture intumescente par comparaison avec les formules de l'eurocode pour les protections d'épaisseur constante. C'est d'autant plus intéressant, qu'il est quasiment impossible de mesurer cette valeur au vu de la volatilité de la meringue.

Cependant, les écarts observés entre les valeurs expérimentales et théoriques de l'acier non protégé amènent d'autres questions. Les équations de l'eurocode ont-elles une marge de sécurité trop grande, ou certaines hypothèses de calculs ou les méthodes de réalisation des essais sont-elles à revoir ? Il est nécessaire d'éclaircir ce point afin de pouvoir valider les valeurs de la conductivité thermique de la protection. C'est la raison pour

laquelle une troisième campagne d'essais expérimentaux va avoir pour objectif d'étudier l'évolution de l'épaisseur de la peinture pour différents paliers de température au sein d'un four électrique. Toutes les mesures et les exploitations portent sur des plaques planes posées sur un support. Les observations d'écart d'épaisseur sur les faces verticales et horizontales de la cornière n'ont pas fait l'objet de nouvelles investigations. Les prochains essais devraient explorer plus avant ces pistes, ainsi que l'impact sur le développement de la meringue de la jonction de deux plaques.

7. Bibliographie

- [AFN] AFNOR, NF EN 1363-1. *Fire resistance test-Part 1*.
- [ANG 09] Ang, C. N., & Wang, Y. C. (2009). Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 23(2), 675-686.
- [AXE 96] Axenenko, O., & Thorpe, G. (1996). The modelling of dehydration and stress analysis of gypsum plasterboards exposed to fire. *Computational materials science*, 6(3), 281-294.
- [BAI 04] Bailey, C. (2004). Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings. *Fire Safety Journal*, 39(8), 689-709.
- [BUC 86] Buckmaster, J., Anderson, C., & Nachman, A. (1986). A model for intumescent paints. *International journal of engineering science*, 24(3), 263-276.
- [DUQ 05] Duquesne, S., Magnet, S., Jama, C., & Delobel, R. (2005). Thermoplastic resins for thin film intumescent coatings—towards a better understanding of their effect on intumescence efficiency. *Polymer Degradation and Stability*, 88(1), 63-69.
- [EN 05] EN1993-1-2 (2005). *Eurocode 3: Design of Steel Structures. General rules—Structural fire design*. Brussels: European Committee for Standardization. DD ENV, 1-2.
- [FRA 05] Franssen, J. M., & Zaharia, R. (2005). *Design of Steel Structures subjected to Fire. Background and Design Guide to Eurocode 3*. Les Editions de l'Université de Liège.
- [GER 04] Gerlich, H. (2004). *Calcination of Gypsum Plasterboard under Fire Exposure* (Doctoral dissertation, University of Canterbury).
- [GIL 09] Gillet, M. (2009). Analyse de systèmes intumescents sous haut flux: modélisation et identification paramétrique (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
- [LI 16] Li, G., Han, J., Lou, G., Wang, C., Y. (2016). Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-walled structure*, 98, 177-184.
- [KOL 15] Kolšek, J., & Češarek, P. (2015). Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 91-103.
- [MEH 94] Mehaffey, J. R., Cuerrier, P., & Carisse, G. (1994). A model for predicting heat transfer through gypsum board/wood stud walls exposed to fire. *Fire and Materials*, 18(5), 297-305.
- [RAH 11] Rahmanian, I. (2011). Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and Their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems.(Doctoral dissertation, University of Manchester)
- [STA 10] Staggs, J. E. J. (2010). Thermal conductivity estimates of intumescent chars by direct numerical simulation. *Fire Safety Journal*, 45(4), 228-237.
- [THO 02] Thomas, G. (2002). Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire and Materials*, 26(1), 37-45.
- [YEW 12] Yew, M. C., & Sulong, N. R. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials & Design*, 34, 719-724.
- [WAK 07] Wakili, K. G., Hugi, E., Wullschlegel, L., & Frank, T. H. (2007). Gypsum board in fire—modeling and experimental validation. *Journal of Fire Sciences*, 25(3), 267-282.
- [ZHA 12] Zhang, Y., Wang, Y. C., Bailey, C., & Taylor, A. P. (2012). Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions. *Fire Safety Journal*, 50, 51-62.