

Etude du comportement thermique d'une paroi soumise à un incendie et de sa protection thermique par film d'eau

Y. Pizzo^{a,c}, N. Giraud^{a,c}, C. Lallemand^b, A. Kaiss^{a,c}, B. Porterie^{a,c}

^aAix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

^bDGA Techniques Navales, avenue de la Tour Royale, BP 40195, 83050 Toulon cedex, France

^cETiC (IRSN/AMU/CNRS), 13453 Marseille, France

yannick.pizzo@polytech.univ-mrs.fr, nathalie.giraud@polytech.univ-mrs.fr,
christine.lallemand@dga.defense.gouv.fr, ahmed.kaiss@polytech.univ-mrs.fr, bernard.porterie@polytech.univ-mrs.fr

Résumé :

Cette étude concerne l'utilisation d'un film d'eau ruisselant pour la protection thermique d'une paroi exposée à une source radiative représentative d'un incendie. L'efficacité de cette protection vient du fait qu'elle combine le refroidissement convectif et le refroidissement par évaporation d'une partie de l'eau composant le film. L'étude s'est déroulée en deux phases. La première phase a été consacrée aux expérimentations. Pour cela, nous avons développé et mis en place un banc d'essais permettant de mieux comprendre l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu et d'acquérir des données dans des configurations spécifiques : paroi en acier nu, isolé ou non, avec ou sans protection thermique par film d'eau ruisselant. L'étude a montré la grande efficacité de ce mode de protection thermique, même pour de faibles débits de ruissellement, et a permis d'estimer le débit critique de ruissellement, en-deçà duquel le refroidissement n'est plus garanti en raison de la présence de lacunarités d'assèchement sur la plaque. La seconde phase a consisté à valider, sur la base des données expérimentales acquises, le code REPARE développé par DGA Tn.

Mots clés : protection thermique, paroi acier, incendie, refroidissement, film d'eau.

1. Introduction et contexte

Dans le domaine de la sécurité incendie à bord des plates-formes navales (navire, sous-marin, etc.), la conduction à travers les parois, généralement en tôle d'acier nu ou isolé, est un mode de propagation prépondérant du feu. Face à ce risque, les équipements de sécurité à bord de ces plates-formes doivent être dimensionnés conformément aux normes en vigueur. Pour cela, la convention SOLAS définit la durée de tenue au feu (*dtf*) comme le temps au bout duquel la température de surface de la paroi opposée à celle exposée au feu atteint 140°C (Figure 1), température pour laquelle les matériaux cellulotiques directement en contact avec la paroi peuvent s'enflammer. Jusqu'à ce jour, la *dtf* était évaluée « au quart d'heure près » à partir d'essais normatifs. Cependant, les nouvelles générations de plates-formes navales ont entraîné un renforcement des exigences en matière de sécurité incendie et, par conséquent, des normes. C'est dans ce contexte que la présente étude, dédiée à l'amélioration de la norme portant sur la *dtf*, a été menée.

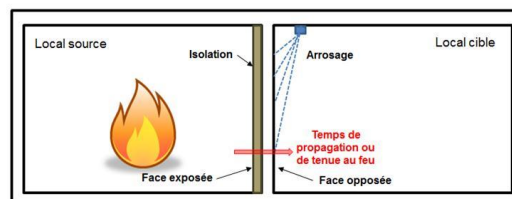


Figure 1 : Problème physique.

L'étude comporte deux volets : un volet expérimental et un volet numérique. Au plan expérimental, des campagnes d'essais ont déjà été conduites en 2000 et 2003 [1] sur des parois de grandes dimensions (3040 x 2500 mm²), ce qui a entraîné des déformations importantes de la paroi et n'a pas permis l'établissement d'un film d'eau homogène, des lacunarités d'assèchement apparaissant sur la paroi chauffée. De plus, si la mise en place d'une instrumentation à cette échelle a permis des mesures de températures et de flux, les mesures relatives à l'épaisseur du film d'eau, à la vitesse de l'écoulement le long de la plaque refroidie et à l'évolution temporelle du débit d'évaporation n'ont pu être réalisées, ces mesures nécessitant la mise en place d'une instrumentation plus fine, peu compatible avec l'échelle envisagée. L'expérimentation que nous avons mis en

place ici est une expérimentation à moyenne échelle, permettant d'effectuer l'ensemble des mesures nécessaires à la validation du code REPARE et ce, pour des configurations de référence : paroi monocouche ou multicouche, en présence ou non d'un film d'eau ruisselant.

2. Dispositif expérimental, instrumentation et mesures

Un dispositif expérimental original permettant d'étudier le comportement thermique d'une plaque d'acier soumise à un flux de chaleur calibré a été développé. La plaque peut recevoir un matériau isolant ou être refroidie sous l'action d'un film d'eau ruisselant.

Plusieurs campagnes d'essais ont été conduites dans le but de fournir des données expérimentales permettant la validation du code de calcul REPARE dans les configurations de référence précitées.

2.1 Dispositif expérimental et instrumentation mise en place

Le dispositif expérimental, comme le montre la Figure 2, est constitué des éléments suivants :

- un bâti possédant une partie mobile sur laquelle est placé le panneau radiant permettant de régler précisément la distance entre le panneau radiant et l'élément de paroi.

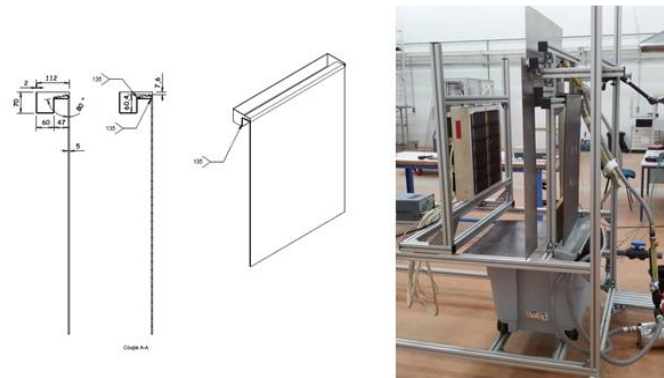


Figure 2 : Dispositif expérimental.

- Un élément de paroi de dimensions utiles 80 cm × 60 cm × 0.5 cm.

La plaque possède un réservoir, permettant d'y loger un tube poreux en silicate d'arrivée de l'eau, ainsi qu'un système de débordement permettant le ruissèlement d'un film d'eau calibré à la surface de la plaque. Elle est maintenue verticalement par un axe réglable à vis micrométrique, garantissant une assiette parfaitement horizontale (de façon à ce que le débordement se fasse de façon homogène sur l'ensemble de la largeur de la plaque combustible). Le système de positionnement permet par ailleurs de n'exercer aucune contrainte de positionnement en partie basse, ce qui permet à la plaque de subir sans dommage les phases successives de dilatation et de contraction thermiques.

- Un panneau radiant de 50 cm × 50 cm composé de 12 céramiques résistives. La consigne de régulation se fait soit en puissance, soit en température. Ce panneau radiant produit un flux radiatif homogène de 80 kW/m² à 10 cm de la source.
- Un circuit hydraulique ouvert de distribution comprenant un tube poreux en verre-alumino-silicate, un réservoir d'admission d'eau et un réservoir de collecte d'eau. Il assure l'approvisionnement en eau en partie haute de la plaque et garantit l'homogénéité du film d'eau sur la plaque.
- Une pompe centrifuge horizontale calibrée couplée à un détendeur.

L'instrumentation mise en place comprend :

- Des fluxmètres de type Captec radiatif et total (sensibilité : 0.5 kW/m²). Ces fluxmètres sont utilisés pour calibrer le flux radiatif reçu à la surface exposée de l'élément de paroi et vérifier son homogénéité.

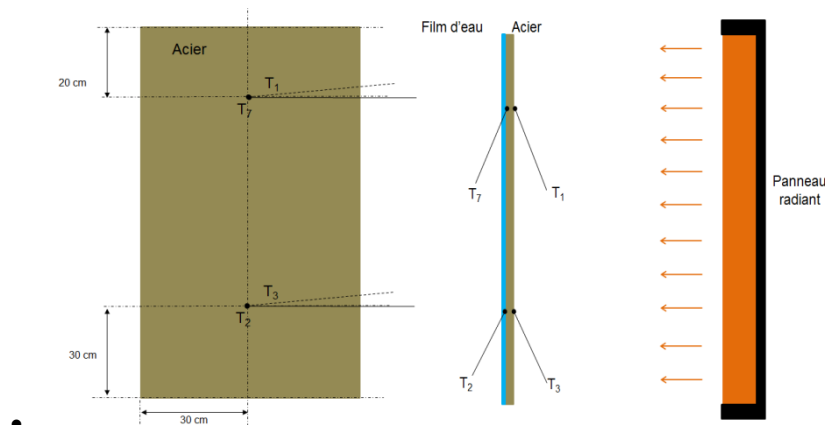


Figure 3 : Emplacement des thermocouples pour les essais avec arrosage.

- Des thermocouples de type K de 0.5 mm de diamètre, placés au contact de la paroi en acier sur les faces exposée et opposée au rayonnement incident, à l'intérieur de l'isolant, et immergés dans les réservoirs d'admission et de collecte d'eau (Figure 3). En ce qui concerne les thermocouples en contact avec la paroi, le contact entre la partie non gainée du thermocouple et la paroi est assuré par de l'adhésif ultra-conductif. Cet adhésif est également réfléchissant afin de protéger le capteur du rayonnement incident
- Une centrale d'acquisition autonome de type Graphtec 820 GL dont la fréquence d'acquisition est de 1 Hz.
- Une balance de précision SARTORIUS (charge max : 34 kg, précision : 0.1 g), permettant la mesure de la masse en d'eau en entrée et sortie (temps de réponse de la balance : 0.1 s).
- Une caméra CCD, à 1392 x1040 pixels, positionnée côté opposé au panneau radiant dans le but de caractériser le film d'eau ruisselant.

Un traitement d'image spécifique a été développé dans le but de suivre l'évolution d'un traceur (la fluorescéine) au sein de l'écoulement et ainsi de connaître avec précision la vitesse du film ruisselant et d'en déduire son épaisseur.

- Un débitmètre à bille pour le contrôle du débit d'eau en sortie de pompe.

2.2 Expérimentation et résultats

Après une phase préliminaire de calibration du flux radiatif reçu par la cible en fonction de sa distance au panneau radiant, deux campagnes de mesures spécifiques ont été menées :

- La première dédiée à la validation du code REPARE pour une plaque d'acier, avec ou sans isolant, exposée à des flux incidents de 7.5, 15 et 34 kW/m².
- La deuxième dédiée à la validation du module d'arrosage du code REPARE, portant sur le ruissellement d'un film d'eau le long d'une plaque en acier nue. On s'est intéressé aux phases transitoire et stationnaire de ruissellement du film d'eau sur la plaque chaude, pour des flux incidents de 15 à 40 kW/m² et des débits de 2.5 à 10 L/min.

Chaque essai a été reproduit au minimum 3 fois afin de garantir la reproductibilité du test.

3. Le code REPARE et sa validation

Le code REPARE (acronyme pour REfroidissement d'une Paroi par ARrosage d'Eau) est un outil numérique développé par C. Lallemand qui permet de simuler l'échauffement d'une paroi, monocouche ou multicouche, exposée à une source de chaleur et son refroidissement sous l'action d'un film d'eau ruisselant sur sa surface. Les fonctionnalités du code et les modèles physiques sur lesquels il repose sont décrits dans les références [2,3]. Ce code de calcul résout, par une méthode aux différences finies, la conduction thermique instationnaire unidimensionnelle et fournit ainsi l'évolution spatio-temporelle de la température en tout point d'une paroi monocouche ou multicouche, et en particulier la température de la face opposée à celle où est imposé le profil de feu, à partir de laquelle est définie la durée de tenue au feu de la paroi. Il prend en compte les pertes thermiques par convection et rayonnement sur les faces exposée et opposée au feu, avec ou sans refroidissement de la paroi par le film d'eau.

En présence d'un film d'eau, les conditions aux limites nécessitent de connaître les propriétés du film d'eau. Pour se faire, une approche globale (OD) est proposée. Elle repose sur les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie pour la phase liquide et permet d'accéder aux évolutions temporelles de l'épaisseur du film d'eau, de la température et de la vitesse moyenne du film d'eau. Le code permet ainsi d'évaluer l'efficacité

d'un système d'arrosage et, par conséquent d'optimiser son fonctionnement. Dans le code REPARE, en raison de son couplage avec des modèles à zones, les échanges pariétaux sont traités par une condition sur la température du gaz en proche paroi, la paroi étant supposée en contact avec un gaz chaud qui échange par rayonnement et convection.

3.1 Essais sans arrosage

La validation du code REPARE sans arrosage a été réalisée sur la base de 6 configurations d'essais. Nous ne présentons ici que quelques exemples de validation. Il s'agit des essais 1 (acier nu - flux incident de 7.5 kW/m^2) et 4 (acier + isolant 1 - flux incident de 34 kW/m^2) dont les résultats sont très représentatifs.

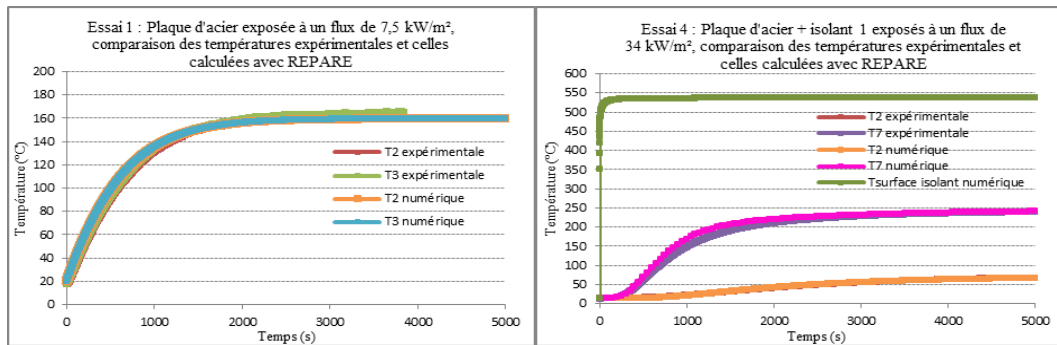


Figure 4: Evolutions des températures mesurées et prédites par le code REPARE.

Dans les deux configurations présentées et de façon générale concernant l'ensemble des essais sans arrosage, la réponse thermique de la plaque est très bien reproduite par le code REPARE.

Dans les configurations où la plaque est isolée, on observe de légers écarts qui peuvent être dus à une erreur sur le positionnement du capteur de température. Cela n'affecte en rien la capacité du code à reproduire le comportement thermique de la plaque isolée.

3.1 Essais avec arrosage

La validation du code REPARE avec arrosage a été réalisée sur la base de 18 configurations d'essais. Nous présentons les essais 8 (débit de 5 L/min - flux incident de 15 kW/m^2) et 15 (débit de 10 L/min - flux incident de 30 kW/m^2). Le calcul étant unidimensionnel, la température est considérée comme homogène sur l'ensemble de la plaque. C'est la raison pour laquelle nous avons comparé les valeurs prédites par le modèle aux mesures réalisées au niveau du thermocouple T3 qui se trouve au milieu de la plaque.

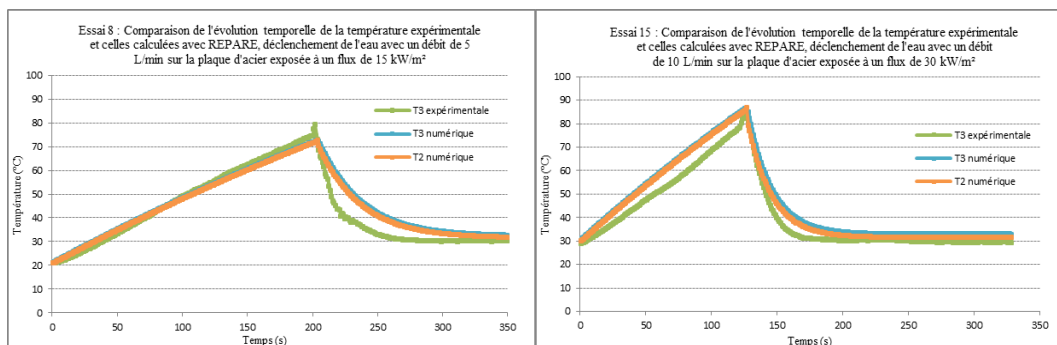


Figure 5 : Evolutions des températures mesurées et prédites par le code REPARE pour les essais 8 et 15.

Pour l'essai 8 correspondant à un flux d'exposition et un débit de ruissellement relativement faibles, le code REPARE reproduit de façon très satisfaisante la phase de montée en température, mais sous-estime le refroidissement de la plaque. Pour les autres essais, on observe une différence de comportement avant arrosage. Le code surestime en effet la température de la plaque, mais reproduit bien la vitesse de montée en température avant arrosage. L'écart entre les températures prédites et mesurées avant arrosage s'explique par la présence d'un film d'eau protecteur rendu nécessaire par les fortes contraintes thermiques imposées sur la plaque d'acier. La température stationnaire de la plaque prédite par le code est en bon accord avec celle mesurée, mais la

dynamique de refroidissement est sous-estimée. L'hypothèse d'homogénéité en température de la plaque semble à l'origine des écarts observés.

3.1 Débit critique de ruissellement

Le débit critique de ruissellement permet de caractériser l'efficacité du système d'arrosage. Pour l'évaluer, le débit de ruissellement est réduit progressivement par palier en prenant soin, pour chaque palier, d'attendre l'établissement de l'état stationnaire. Le débit critique correspond à l'apparition de lacunarités d'assèchement. La Figure 6 montre l'évolution du débit critique par unité de surface en fonction du flux incident. Une évolution quasi-linéaire du débit critique en fonction du flux radiatif imposé est observée.

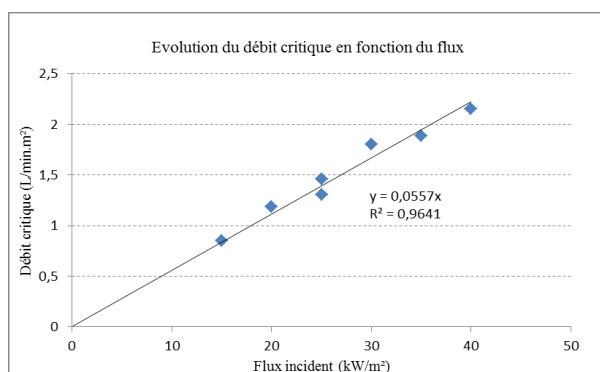


Figure 6: Evolution du débit critique par unité de surface en fonction du flux.

4. Conclusion

Les campagnes de mesures effectuées au sein de l'équipe dynamique des feux de l'IUSTI ont permis d'étudier la réponse thermique d'un élément de paroi en acier soumis à un flux incident représentatif d'un incendie.

La protection thermique par l'action d'un film d'eau ruisselant du côté opposé au feu s'avère particulièrement efficace et ce, même pour un débit d'eau relativement faible.

Les configurations suivantes ont été étudiées:

- Élément de paroi en acier nu pour des flux de 7.5, 15 et 34 kW/m²;
- Élément de paroi en acier isolé pour des flux de 15 et 34 kW/m²;
- Élément de paroi en acier nu refroidi par un film d'eau ruisselant pour des flux de 15 à 40 kW/m² et des débits d'eau de 2.5, 5 et 10 L/min.

Cette étude nous a permis d'acquérir un grand nombre de données expérimentales qui nous ont permis de valider le code REPARE de DGA Tn. Celui-ci se montre particulièrement performant à reproduire la réponse thermique d'une plaque refroidie par un film d'eau ruisselant.

Le débit critique de ruissellement, en-deçà duquel le refroidissement n'est plus garanti (présence de lacunarités d'assèchement sur la plaque), a été évalué en fonction du flux d'exposition. Une dépendance linéaire a été observée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour son soutien financier dans le cadre du projet ANR-12-ASRT-0002-01.

5. Références

- [1] Rapports d'essai GERBAM 608/03/A/DR/U-114, 598/03/A/DR/U-114, 172/00/A/DR/U-114, 172/00/A/DR/U-114.
- [2] C. Lallemand, Etude relative à l'amélioration des codes de calcul incendie, présentation du code de calcul REPARE, Repère : N°2010-225561 DGA/TN/SDT/PFN/NP.
- [3] O. Quinquilla, Rapport de stage DGA Tn, « Modélisation du comportement thermique d'une paroi multi-matériaux soumise à un incendie avec prise en compte d'un refroidissement par arrosage », 2010.