



**HAL**  
open science

## Simulation numérique d'essais normalisés au feu

Jean-Charles Craveur, Philippe Jetteur

► **To cite this version:**

Jean-Charles Craveur, Philippe Jetteur. Simulation numérique d'essais normalisés au feu. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01408398

**HAL Id: hal-01408398**

**<https://hal.science/hal-01408398>**

Submitted on 4 Dec 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Simulation numérique d'essais normalisés au feu

JC. Craveur<sup>1</sup>, P. Jetteur<sup>2</sup>

<sup>1</sup>  
ISMANS  
44 avenue Bartholdi, 72000 Le Mans, France  
jccraveur@ismans.fr

<sup>2</sup>  
SAMTECH  
Parc scientifique du Sart Tilman, 8 rue des chasseurs ardennais, B-4031 Angleur-Liège,  
Belgique  
philippe.jetteur@samcef.com

---

**Résumé** – Dans le cadre du projet EMC2-MP08, des modèles numériques ont été développés pour étudier la résistance au feu de structures navales soumises à des essais au feu normalisés. Le comportement calculé pour des ponts et cloisons métalliques raidis, mécaniquement chargés ou non, protégés ou non par un revêtement de laine de roche, soumis au feu d'un coté ou de l'autre, sont en accord avec les essais, y compris dans le cas de l'effondrement de la structure.

**Mots clés** – Résistance au feu, dynamique non linéaire, flambage.

---

## 1 Introduction

Le projet MP08 « Tenue et comportement au feu des composites » est un projet collaboratif porté par DCNS. Il est réalisé dans le cadre du pôle de compétitivité de la Région des Pays de la Loire EMC2 « Ensembles métalliques et composites complexes ». Son objectif est de développer une démarche innovante quant à l'utilisation des matériaux composites, en travaillant tout particulièrement sur une règle de la Convention SOLAS (Safety Of Life At Sea) de l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

L'ingénierie incendie est un sujet transdisciplinaire complexe qui pose des difficultés en termes d'analyse numérique. Des méthodes de calcul ont été développées pour la simulation de la résistance au feu dans le domaine du génie civil, les structures sont principalement des poutres métalliques et des planchers mixtes (béton et acier), le tout constituant l'ossature des immeubles ([1], [2], [3]). La problématique du projet MP08 s'en rapproche car on cherche à déterminer la résistance de la structure mais la conception d'une structure navale est différente de part les matériaux, la géométrie, les épaisseurs de cloisons. Dans le cas général des études de stabilité, la structure est soumise à un chargement ou à un déplacement imposé dont l'amplitude croît graduellement : on vérifie que la structure n'a pas flambé pour un niveau donné de charge ou qu'elle a flambé mais qu'elle a un comportement post-critique stable pour ce niveau. Bien que ces problèmes de stabilité soient complexes, ils sont désormais relativement classiques et les méthodes de calcul sont maîtrisées par les spécialistes en charge de ce type de simulation numérique. Ici, la charge mécanique est constante, nulle ou non selon les configurations. En cinq minutes, les gaz chauds baignant la paroi exposée passent de 20 à 560°C (courbe de feu normalisée ISO 834, code FTP de l'OMI) : seules les charges dues à la température évoluent

dans le temps. La partie du projet présentée ici aborde la simulation du comportement thermomécanique de cloisons métalliques, chargées ou non, protégées ou non, soumises en laboratoire à des essais normalisés au feu. On dispose pour certains des essais réalisés de relevés de températures et du déplacement transversal de points caractéristiques des structures.

## 2 Modélisation et données :

Les cloisons métalliques sont des panneaux en acier, raidis selon leur longueur et leur largeur, dont les dimensions sont de l'ordre de  $2 \times 3 \text{ m}^2$ . L'épaisseur des tôles et des raidisseurs est comprise entre 3 et 5 mm. Quand les structures sont protégées, elles le sont par une couche de laine de roche dont l'épaisseur est de l'ordre de 50 mm. Pour ces structures et les essais auxquels elles sont soumises, les analyses thermiques et mécaniques peuvent être découplées. Les coefficients de conduction de l'acier et les épaisseurs sont tels que des éléments de membrane thermique sont adéquats, ce qui élimine de surcroît le problème de branchement des coques thermiques. Quand la structure est protégée, la laine de roche est maillée en éléments hexaédriques. Le nombre d'éléments dans l'épaisseur de la laine de roche a été déterminé par une étude locale préalable. Tous les modèles sont entièrement paramétrés de manière à pouvoir modifier si besoin est la densité d'éléments, la position et le nombre de raidisseurs, et à prendre en compte ou non la protection thermique. Pour la partie mécanique, que la structure soit protégée ou non, seule la partie métallique est maillée car la laine de roche ne participe pas à la raideur structurale. Au vu des épaisseurs et du coefficient de conduction thermique de l'acier, les éléments de coque avec évolution linéaire de la température entre les deux peaux sont adéquats.

En ce qui concerne les données matérielles, l'évolution de la conductibilité et de la chaleur massique sur la gamme 20-1200 °C sont données pour l'acier S355 et la laine de roche. Elles sont soit extraites de l'EUROCODE 3, soit ont été mesurées par le LNE, partenaire du projet MP08. Les évolutions du module d'Young, de la limite élastique, des courbes d'écrouissage sont également données pour l'acier sur cet intervalle de température. En ce qui concerne les gaz, la loi d'évolution des gaz chauds est donnée par la courbe standard ISO 834 pour les essais normalisés réalisés. La température des gaz est supposée uniforme sur les parois exposées ou non. Cette approximation est plus légitime pour les ponts (horizontaux) que pour les cloisons (verticales). L'EUROCODE fournit la valeur des coefficients d'échange radiatifs et convectifs pour les parois exposées et les parois non exposées. La cloison est soumise à une charge qui est maintenue constante pendant toute la durée de l'essai. Le feu démarre au bout de 1000 secondes et dure une heure, à moins que la structure ne se soit effondrée avant. Plusieurs niveaux de charge sont appliqués, 0, 20, 40, 60 et 80% de la charge critique d'Euler à température ambiante. Le schéma de l'essai est représenté sur la Figure 1 : les raidisseurs peuvent être du côté exposé ou non, la laine de roche peut être du côté raidi ou non mais elle est généralement placée du côté non raidi. La charge de compression est appliquée dans le plan yz.



Figure 1 : Schéma de l'essai pour la cloison

### 3 Analyse thermique :

L'analyse thermique est transitoire et non linéaire, les propriétés des matériaux dépendent de la température et le rayonnement doit être pris en compte. Elle ne pose pas de problème, le pas de temps optimal pour l'incrément  $n+1$  est calculé par le programme sur base de la convergence pour l'incrément  $n$  et de l'erreur d'intégration temporelle. Quand le feu agit du côté raidi, que la structure soit ou non protégée, il y a une bonne corrélation entre les températures mesurées et les températures calculées avec les coefficients d'échange de l'EUROCODE. Quand le feu agit du côté non raidi, la présence des raidisseurs influe fortement sur les échanges convectifs, le rayonnement mutuel entre la tôle et les raidisseurs n'est pas négligeable. En modifiant le flux net auquel est soumise la structure du côté non exposé, on retrouve une bonne corrélation entre les températures mesurées et les températures calculées. Pour une cloison non protégée, toute la structure est à environ 900 °C au bout d'une heure quand la sollicitation est appliquée du côté raidi, alors qu'il existe un gradient de 250 °C entre le raidisseur et la tôle quand la sollicitation est appliquée du côté non raidi. Quand la laine de roche est du côté non exposé, la structure chauffe plus vite et plus puisque la protection empêche la chaleur de s'évacuer. Quand la laine de roche est du côté exposé, la structure reste relativement froide (400 °C pour la tôle et 150 °C pour les raidisseurs), la laine de roche étant le siège d'un gradient de plus de 500 degrés.

### 4 Analyse mécanique :

La première structure calculée est une cloison non protégée, non chargée si ce n'est par son poids, sollicitée par le feu du côté non raidi. Une analyse de stabilité initiale permet de déterminer la charge critique d'Euler à température ambiante qui est de l'ordre de 75000 N, et plusieurs modes critiques. Pour le calcul non linéaire, le défaut modal utilisé est une combinaison de plusieurs de ces modes, dont on maîtrise la forme et dont l'amplitude est compatible avec la tolérance de réalisation des panneaux. La taille du pas de temps pour l'analyse mécanique est calculée par le programme, il n'y a pas correspondance entre les pas de temps pour la thermique et la mécanique. Le programme réalise donc une interpolation pour déterminer à chaque instant de calcul la température de chaque nœud du maillage, et de là les propriétés mécaniques de chaque élément. Tant que la cloison ne s'effondre pas, son comportement est quasi-statique. Plusieurs stratégies incrémentales classiques en analyse statique non linéaire ont été comparées. La première consiste à incrémenter le temps, ce qui correspond à une évolution temporelle des températures. Malgré la prise en compte des imperfections géométriques, le passage de divers flambages pose un problème et le programme ne converge pas. Le problème n'est pas réglé par l'utilisation de la méthode de Riks. Aucun déplacement n'étant piloté au cours du temps lors de l'essai de résistance au feu, il ne reste donc que l'approche dynamique non linéaire pour traiter ce problème, ce qui est artificiel car il est quasi-statique.

Le schéma d'intégration temporelle le plus utilisé en dynamique non linéaire est le schéma HHT (ou méthode  $\alpha$ ) qui est un schéma dérivé du schéma de Newmark. C'est un schéma implicite à un paramètre, inconditionnellement stable. Il introduit un amortissement numérique dans la réponse qui filtre les composantes hautes fréquences souvent parasites. Dans notre cas, qui comporte du contact, de la plasticité..., l'utilisation de ce schéma d'intégration ne permet pas de simuler le comportement de la cloison, le programme ne converge pas.

Le schéma de Newmark est un schéma implicite à deux paramètres  $\beta$  et  $\gamma$ . Sa stabilité est conditionnelle ou inconditionnelle selon la valeur de ses deux paramètres. Dans notre cas,  $\beta$  et  $\gamma$  sont choisis de manière à ce que le schéma d'intégration temporelle soit inconditionnellement stable, avec un amortissement numérique important agissant sur toutes les fréquences et pas

seulement sur les hautes fréquences. Cela a un effet stabilisant quand la géométrie change brutalement lors du passage des instabilités, ce qui permet de passer toutes les petites instabilités locales des raidisseurs ou des panneaux inter-raideurs. Après le calcul, on contrôle que l'énergie cinétique de la structure est nulle (réponse quasi-statique), sauf au voisinage immédiat des instants pour lesquels il y a instabilité et donc modification soudaine d'une partie de géométrie (Figure 2).



Figure 2 : Energie cinétique, évolution temporelle du déplacement orthogonal au plan de la tôle de points caractéristiques

Pour cette configuration, la cloison résiste à une heure d'exposition au feu normalisé ISO 834. Le déplacement de points caractéristiques dans la direction orthogonale au plan de la tôle fait apparaître ce qui ressemble à un comportement de type « point limite ». La structure se déplace vers les  $x$  négatifs : elle est attirée du côté chaud, ce qui est observé expérimentalement. Sur toutes les figures, les déplacements sont exprimés en mètres. La variation de géométrie lors du flambage se produisant à 1450 secondes environ est représentée sur la Figure 3, ainsi que le déplacement orthogonal au bout d'une heure d'exposition au feu normalisé ISO 834. La plasticité s'est développée dans environ 70% des éléments finis du maillage.

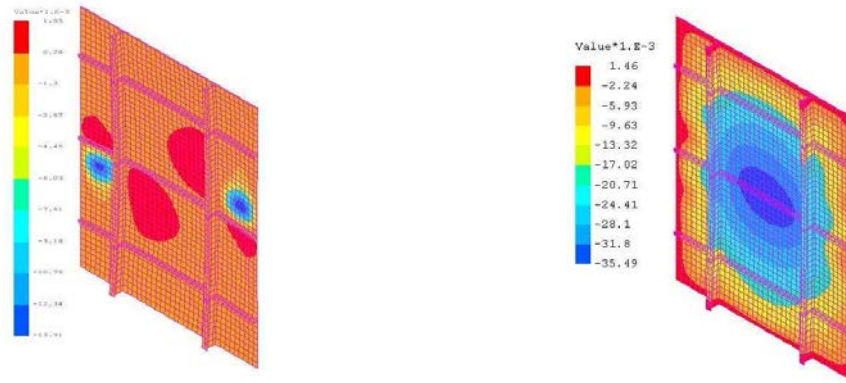


Figure 3 : Variation du déplacement orthogonal au plan de la tôle à 1347 secondes, déplacements orthogonaux au bout d'une heure d'exposition au feu.

La tôle, exposée au feu, chauffe plus vite que le raidisseur qui ne l'est pas (gauche de la Figure 4). Quand on extrait l'évolution de l'écart entre ces deux températures (droite de la Figure 4), on constate qu'il augmente pendant environ 1800 secondes, puis qu'il diminue. Or cet écart est directement lié au moment de flexion induit par les gradients thermiques, moment qui diminue donc lui aussi. Bien que la température continue de croître et que la plasticité continue à se développer, les déplacements transversaux diminuent à partir d'environ 15 minutes d'exposition au feu et les déplacements axiaux augmentent : la cloison se redresse. Il y a un lien direct entre la Figure 2 et la Figure 4, et une excellente corrélation avec les mesures enregistrées.



Figure 4 : Températures et gradient entre la tôle et la semelle d'un gros raidisseur

## 5 Cloison chargée non protégée :

On applique différents niveaux de compression, dont la valeur reste constante pendant l'exposition au feu normalisé. Le pourcentage indiqué dans le texte est le pourcentage de la première charge critique d'Euler à température ambiante. La compression engendre un déplacement transversal négligeable par rapport à ce qui est induit par le chargement thermique. Pour 20 et 40% de compression, la cloison résiste une heure ; pour 60%, elle ne résiste que 40 minutes et 31 minutes pour 80%. La cloison subit des modifications brutales de géométrie (flambages) à des instants qui dépendent du niveau de compression initiale de la cloison). Par exemple pour 60% de compression, la différence de géométrie entre deux instants de calcul espacés de 4 millisecondes montre bien ce qui se passe (Figure 5). On retrouve par la simulation numérique l'allure des courbes enregistrées, les ordres de grandeur pour les déplacements transversaux et le temps d'effondrement lorsque celui-ci se produit.

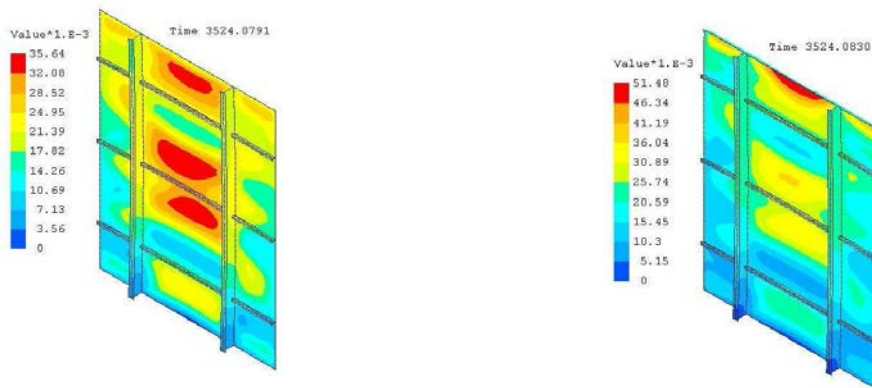


Figure 5 : Variation de géométrie lors de l'effondrement pour 60% de compression

## 6 Cloison chargée protégée :

Quand la protection est placée du côté exposé au feu, quel que soit le niveau de compression, les calculs convergent mieux car la structure métallique est moins chaude : il y a moins de plasticité et de flambages. On peut mesurer l'effet bénéfique de la protection sur la résistance au feu et l'influence de son épaisseur. Quand la protection est placée du côté non exposé au feu, la température de la cloison est plus uniforme que sans protection : la charge thermique due aux gradients est plus faible. Mais comme la cloison est plus chaude, sa résistance diminue : la protection a donc un effet néfaste sur le comportement de la cloison (Figure 6). Dans le grand panneau de la cloison situé juste en dessous du raidisseur médian, on passe subitement de deux ondes de voilement à une lorsque la cloison commence à s'effondrer, ce que la méthode de Riks ne permet pas de représenter.

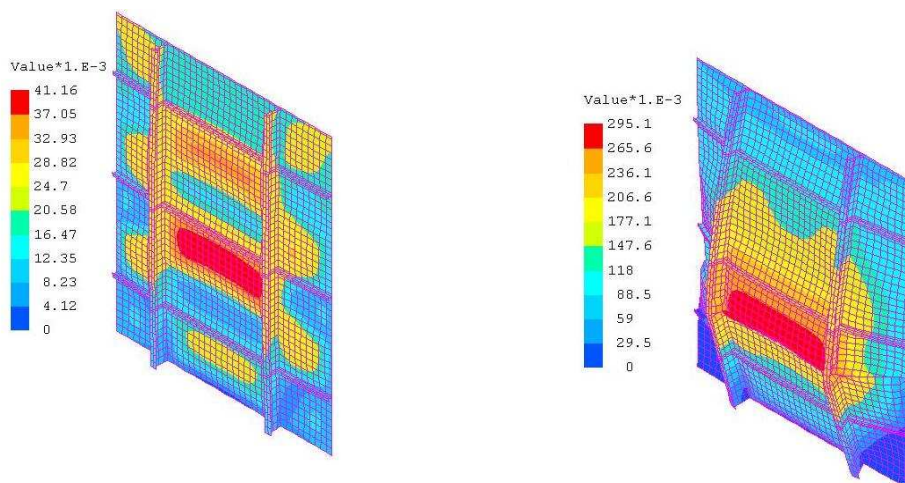


Figure 6 : Géométries à 2722,8 et 2723,0 secondes

## 7 Conclusion :

Nous disposons donc maintenant pour le projet MP08 d'une méthodologie et de modèles numériques entièrement paramétrés pour les études de résistance au feu en laboratoire, selon les protocoles utilisés. Les structures métalliques de type pont ou cloison, protégées ou non, chargées ou non, sont sollicitées par l'incendie d'un côté ou de l'autre, pour des feux normalisés ISO 834. Les résultats obtenus sont en accord avec les observations expérimentales, et rendent compte, selon la configuration, de l'effondrement de la cloison ou du pont. Les modèles permettent de réaliser des études de sensibilité pour mesurer l'influence des paramètres géométriques, des conditions aux limites, des chargements, des coefficients d'échange sur le comportement de la structure, sans recourir systématiquement à des essais tellement onéreux que seul un petit nombre peut être mené.

Les données thermiques et mécaniques évoluent fortement en fonction de la température, le comportement des structures met en jeu des non linéarités géométriques du type « grands déplacements », du contact, de l'écroutissage, des flambages locaux de raidisseurs et de panneaux inter-raidisseurs, la ruine complète de la structure selon la configuration. Les prochaines étapes du projet consisteront à modéliser des ponts ou cloisons composites soumis aux essais de feu décrits précédemment, puis des structures navales soumises à des scénarios d'incendie issus d'une analyse de risque.

## Références

- [1] SJ. Foster, M. Chladna, IW. Burgess, RJ. Plank. "Thermal and Structural Behaviour of a Full-Scale Composite Building Subject to a Severe Compartment Fire". *Fire Safety Journal*, 42 (3), April 2007, pp 183-199.
- [2] SK. Choi, IW. Burgess, RJ. Plank. "Performance in Fire of Long-Span Composite Truss Systems". *Engineering Structures*, 30 (3), March 2008, pp 683-694.
- [3] D. Talamona, J. Kruppa, JM. Franssen, N. Recho. "Factors Influencing the Behaviour of Steel Columns Exposed to Fire", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.8(1), 1996, pp 31-44.