

# FLACOMARE, Résistance au feu des matériaux composites : application à un panneau sandwich

G. AUGUIN<sup>a</sup>, D. MARQUIS<sup>b</sup>, P. BARABINOT<sup>c</sup>, V. DREAN<sup>a</sup>, P. LATRUBESSE<sup>c</sup>

a. Efectis France, Espace Technologique, Route de l'Orme des Merisiers, 91193 SAINT-AUBIN, France

b. Laboratoire national de métrologie et d'essais, 1 Rue Gaston Boissier 75724 PARIS Cedex, France

c. LMS Samtech - France office, 15 avenue Emile Baudot, 91300 MASSY, France

## Résumé :

*Le projet de recherche collaboratif FLACOMARE “FLAmes COMposite MAterials RESistance” propose de développer une méthodologie afin d'évaluer le comportement thermomécanique au feu des matériaux composites utilisés dans le domaine des transports. Cette méthode basée sur une approche multi-échelle combinant essais et simulations numériques, a été appliquée sur un panneau sandwich composite rigide, constitué de parements stratifiés polyester fibre de verre (GRP) et d'une âme en mousse polyisocyanurate rigide (PIR). Des essais de caractérisation thermomécaniques et chimiques sur des échantillons et des essais à pleine échelle dans un four de résistance au feu ont alors été réalisés pour fournir des données fiables ainsi que des cas de validation. Sur la base de ces essais, un couplage simple entre des outils numériques avancés (FDS/SAMCEF) a été développé et utilisé. La méthodologie et les premiers résultats obtenus sont discutés dans ce document.*

## Abstract :

*The FLACOMARE “FLAmes COMposite MAterials RESistance” project proposes to develop a specific methodology in order to evaluate the thermo-mechanical compartment of composite products used in transportation. This method, based on a multi-scale approach combining tests and numerical modelling, has been applied on a sandwich composite panel composed of glass reinforced polyester laminate (GRP) and a polyisocyanurate rigid foam (PIR). The experimental characterisations of thermo-mechanical and chemical properties, and full-scale fire tests in a fire resistance furnace were performed in order to provide reliable data and validation cases. Through to these tests, a simple coupling between two advanced codes has been developed and employed. The methodology and the first results are discussed in the present document.*

**Mots clés :** Matériau Composite, Modélisation, Incendie, Résistance au Feu, Réaction au feu,

## 1 Contexte

Les matériaux composites offrent de nombreux avantages (légèreté, résistance, vieillissement, etc.) pour des applications structurelles en construction navale, ferroviaire ou aéronautique.

Malgré leurs qualités, le comportement face aux incendies (résistance et réaction au feu) de ces matériaux est un des principaux facteurs limitant leur utilisation structurelle.

Le comportement thermomécanique des matériaux composites soumis au feu est lié à des phénomènes physiques nombreux et complexes : pyrolyse du matériau, combustion des gaz, ablation, délaminage, interaction fluide/structure, transferts thermiques,...

Concevoir des produits composites en prenant en considération leur comportement au feu dans des simulations numériques est un challenge qui permettrait de lever un grand nombre de verrous technologiques.

Dans ce contexte, le projet de recherche collaboratif FLACOMARE “FLAmes COMposite MAterials RESistance” soutenu par le conseil régional d'Île-de-France et associant un laboratoire de résistance au feu (Efectis France), un développeur de logiciels de calcul (LMS Samtech) et un laboratoire de réaction au feu (LNE) propose de développer une méthodologie afin d'évaluer le comportement thermomécanique au feu des matériaux composites utilisés dans le domaine des transports.

## 2 Méthodologie et mise en application

La méthode est basée sur une approche combinant essais et simulations, avec des échelles et une complexité croissantes. L'analyse expérimentale de la réaction au feu et de la résistance au feu de ce produit menée à différents niveaux, depuis l'échelle microscopique du matériau jusqu'à l'échelle produit fini permettra ainsi de valider le comportement du modèle numérique et sa représentativité par rapport à la réalité supposée.

La méthode est appliquée à un panneau sandwich composite rigide, constitué de parements stratifiés polyester fibres de verre (GRP) et d'une âme en mousse polyisocyanurate rigide (PIR).

Les essais de caractérisation des propriétés thermiques, thermomécaniques et chimiques du panneau composite ont été réalisés à partir de dispositifs métrologiques de référence et d'après les normes d'essais dédiées en réaction au feu. L'étude thermogravimétrique du parement et de l'âme du sandwich a permis de définir les modèles de dégradation thermique de ces matériaux. Les constantes cinétiques associées ont été optimisées grâce à un algorithme génétique performant. Les différentes propriétés physiques, thermiques, thermomécaniques, le schéma réactionnel et les paramètres cinétiques associés servent alors de données d'entrée nécessaires aux modèles numériques.

Des essais ont été ensuite réalisés sur le panneau sandwich à échelle 1. Le matériau a été soumis à différents échauffements et chargements mécaniques dans un four d'essai normalisé en résistance au feu. Ces essais ont permis de caractériser le transfert thermique, le comportement thermomécanique et les performances mécaniques du composite sous actions thermiques réelles et de fournir des cas de validation aux modèles numériques.

Des outils numériques avancés ont été développés et utilisés pour simuler le comportement thermomécanique au feu du composite. Un code CFD (FDS, développé par le NIST [1]) et un code thermostructural par éléments finis (SAMCEF [2], développé par LMS Samtech) ont été couplés par le biais d'une interface développée dans le cadre du projet. De plus, un modèle de pyrolyse des matériaux a été implémenté spécifiquement dans le code thermostructural.

## 3 Essais multi-échelles

L'analyse expérimentale est menée à différents niveaux, depuis l'échelle de la matière jusqu'à l'échelle du produit fini.

L'analyse à l'échelle de la matière correspond à des essais physico-chimiques (analyse thermogravimétrique ATG, mesure enthalpique, analyse élémentaire) sur des échantillons dont la masse est inférieure à 10 g et de dimension millimétrique.

À l'échelle du matériau, les investigations opérées sur des échantillons de 10 x 10 cm<sup>2</sup>, permettent de déterminer la réaction au feu des éléments constituant le sandwich et les interactions entre ces éléments. En réalisant les essais notamment sous cône calorimètre avec ou sans atmosphère contrôlée, et dans différentes configurations, ou sous différents flux, il est possible de caractériser le processus de dégradation thermique et la combustion du matériau.



FIG. 1 – Moyens d'essai en réaction au feu employés : cône calorimètre standard, Medium Burning Item et Single Burning Item (LNE)

Puis, à l'échelle du produit semi-fini, la géométrie et l'orientation du produit ont un rôle important sur le développement du feu. Les mesures effectuées à cette échelle permettent d'étudier les phénomènes de

propagation et le transfert thermique sur un produit sans tenir compte des effets de bord. Ces mesures expérimentales doivent servir à valider les prédictions numériques de propagation sur des produits seuls.

Enfin à l'échelle du produit fini, les conditions de montage et les effets d'échelle sont à prendre en considération. Des essais de propagation en coin sont donc mis en œuvre ainsi que des essais de transfert thermique sous différentes charges thermiques et mécaniques en four de résistance au feu.

Les résultats expérimentaux ainsi obtenus ont pour objectifs de connaître le comportement de ces éléments sous sollicitations thermiques conventionnelles, et serviront de référence aux fins de vérification du modèle numérique.



FIG. 2 –Panneaux sandwich : four F, mise en place et essai en cours (Efectis France)

## 4 Modèles numériques

Les simulations numériques sont réalisées par l'utilisation combinée de deux logiciels : Fire Dynamic Simulator du NIST, logiciel de dynamique des fluides permettant de simuler les agressions thermiques, et SAMCEF, logiciel de calcul thermomécanique par éléments finis simulant le comportement mécanique des matériaux. Les résultats de FDS sont transmis à SAMCEF via une interface dédiée.

### 4.1 Modèles de développement de feu

Le code FDS a été utilisé afin de reproduire les agressions thermiques reçues par les solides. Il s'agit d'un code de calcul en dynamique des fluides qui intègre un modèle de combustion par suivi de la fraction de mélange et un modèle à grandes échelles (LES) pour la description des écoulements turbulents. Cet outil permet la modélisation des conditions d'échanges thermiques au niveau des parois en résolvant une équation de la chaleur monodimensionnelle dans les solides, mais également la dégradation thermique des matériaux (pyrolyse). L'approche par pyrolyse permet une reproduction plus fidèle du développement d'un incendie parce qu'elle tient compte dynamiquement de la décomposition des matériaux en présence [3].

Un premier modèle a été construit sur la base de l'expérience du cône calorimètre ISO 5660-2 (FIG. 3a) Il s'agissait de reproduire le comportement au feu des différents éléments pris séparément, puis du sandwich composite.

Ensuite, un modèle virtuel 3D du four de résistance au feu (FIG. 3b) permettant de reproduire les sollicitations thermiques reçues par un élément de construction soumis à un essai de résistance au feu en prenant en compte l'interaction thermique entre le produit testé et le comportement du four d'essai a été mis en œuvre [5][6]. Le modèle de pyrolyse validé avec le précédent modèle a été implémenté.

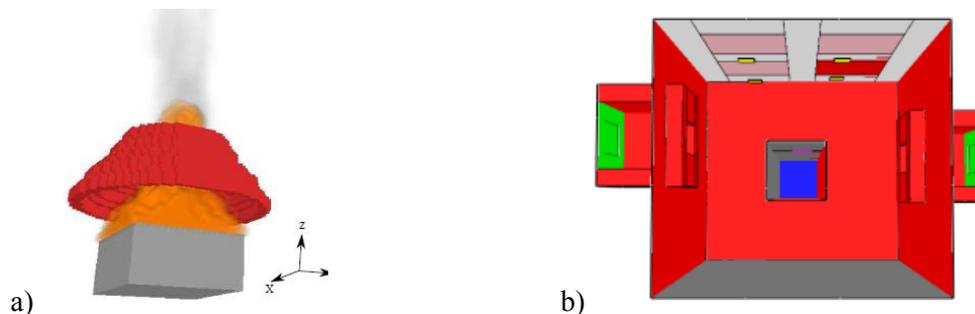


FIG. 3 – Modélisations numériques a) du cône calorimètre ISO 5660 (LNE) et b) du four de résistance F (Efectis France)

## 4.2 Modèle thermomécanique

Le code SAMCEF développé et commercialisé par SAMTECH SA, a été employé. Il s'agit d'un code de calcul de structures par éléments finis généraliste qui permet de modéliser le comportement thermique et mécanique des matériaux. Ce logiciel permet d'intégrer des lois de comportement spécifiques en fonction de la température pour des matériaux non usuels.

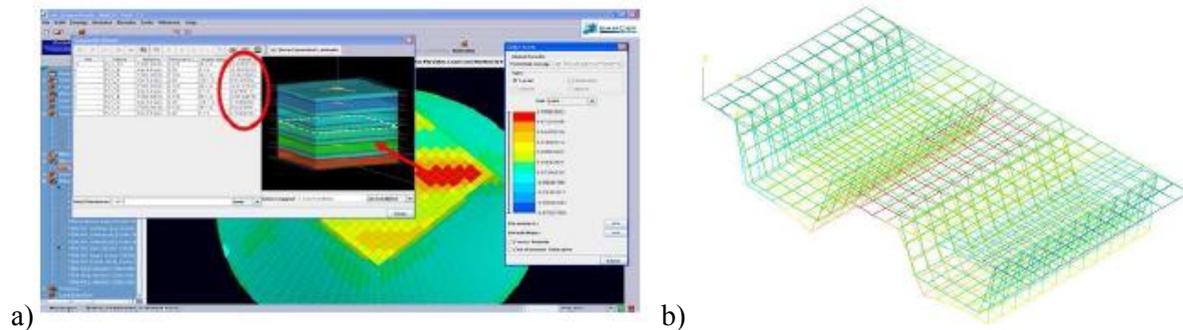


FIG. 4 – code de calcul SAMCEF (LMS SAMTECH) a) analyse de résultats dans un matériau composite b) déformée d'un stratifié

Sur la base des propriétés thermiques (conductivité, émissivité, ..) du panneau soumis au feu, FDS est capable de calculer le transfert thermique à l'intérieur de celui-ci. Cependant, ce code étant basé sur une méthode de différences finies, un calcul du transfert thermique par éléments finis 3D (SAMCEF) peut s'avérer plus approprié. Les propriétés thermiques des matériaux associés au modèle de pyrolyse ont donc été implémentées dans le modèle thermostructurel.

## 5 Résultats et discussions

### 5.1 Modélisation à petite échelle

La première étape expérimentale a porté sur la définition des mécanismes multi-réactionnels des deux éléments composant le sandwich à partir d'analyse à l'échelle de la matière, permettant d'établir un modèle phénoménologique complet de décomposition thermique. La caractérisation des paramètres cinétiques associés à chacune des réactions identifiées a ensuite été réalisée au moyen d'un algorithme génétique en résolvant le système d'équation modélisation la décomposition thermique de chaque élément [4]. La validation des modèles phénoménologiques et des jeux de données optimisés, est effectuée par comparaison des mesures expérimentales et des prédictions numériques. On présente FIG. 5 les résultats obtenus sur la mousse PIR à différentes vitesses de chauffage (5, 10 et 20 K.min<sup>-1</sup>) sous atmosphère inerte.

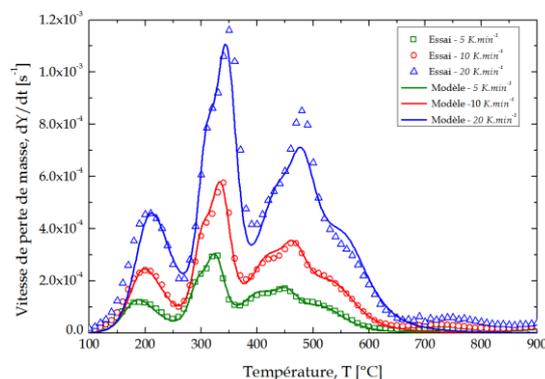


FIG. 5 – Comparaison entre la solution calculée par l'AG et les valeurs expérimentales de la vitesse de perte de masse de la mousse polyisocyanurate avec un jeu de paramètres unique (LNE)

Ensuite, ces données ainsi que les propriétés thermo-physiques à échelle du matériau sont exploitées comme paramètres d'entrée du code FDS en vue de prédire le comportement au feu du sandwich à l'aide d'un modèle de pyrolyse. L'expérience virtuelle du cône calorimètre ISO 5660-2 (FIG. 3a) permet bien de reproduire la pyrolyse des différents éléments pris séparément, puis du sandwich composite (FIG. 6).

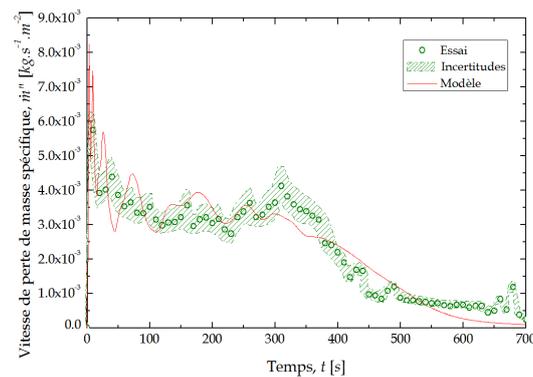


FIG. 6 – Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux de la mousse polyisocyanurate (LNE)

Enfin, l'ensemble des données validées à l'échelle du matériau est utilisé pour prédire la propagation du feu puis l'intégrité structurelle de structure composite à grandes échelles.

## 5.2 Modélisation à grande échelle

La modélisation du four virtuel et la prise en compte de la pyrolyse dans le matériau permet d'une part de bien retranscrire les agressions et leur répartition non homogène au sein même du moyen d'essai (FIG. 7), et d'autre part le transfert thermique dans les panneaux (FIG. 8).

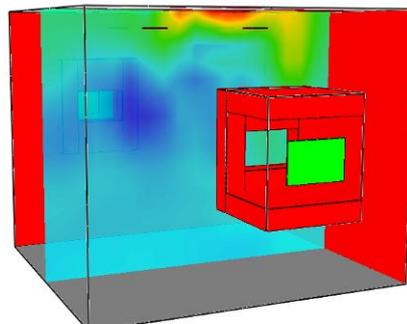


FIG. 7 – champs de température dans le four virtuel F (Efectis France)

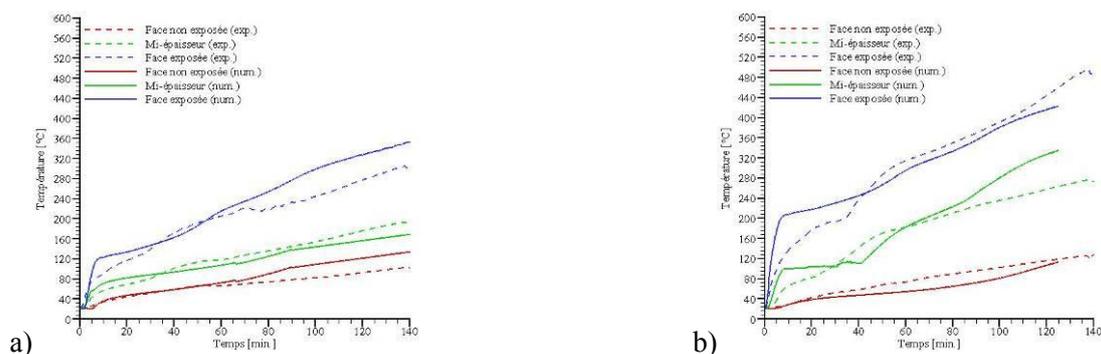


FIG. 8 - Comparaison des températures du panneau sandwich obtenues lors de l'essai [8] avec le modèle de four virtuel FDS du four F a) panneau n°4 b) panneau n°3 (Efectis France)

Les températures de surface sur le panneau obtenues avec FDS sont transmises à SAMCEF via une interface dédiée. Cette combinaison permet de prédire le comportement avec un chargement thermique au plus près des essais réels, mais également de recalculer le transfert thermique qui prend en compte la pyrolyse dans les matériaux au moyen d'un code par éléments finis plus approprié (FIG. 9).

La vérification de la modélisation du comportement a été effectuée sur la base d'un chargement conventionnel où en plus de la simulation du transfert thermique, un calcul mécanique est réalisé. La comparaison sur la mesure de la flèche maximale durant les dix premières minutes d'échauffement indique une relative fiabilité du modèle. Une analyse complémentaire est nécessaire pour une durée plus importante.

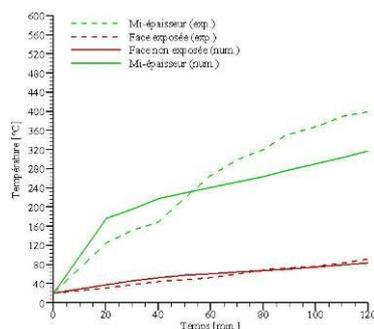


FIG. 9 - Comparaison des températures du panneau sandwich obtenues lors de l'essai [7] avec le modèle thermostructural SAMCEF (LMS SAMTECH)

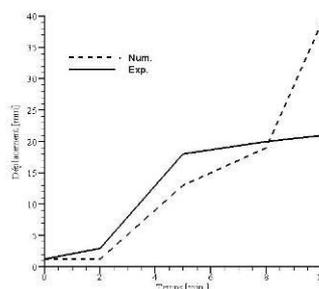
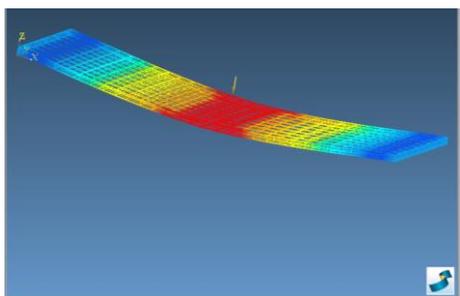


FIG. 10 – Comparaison de la flèche maximale du panneau sandwich obtenue lors de l'essai [7] avec le modèle thermostructural SAMCEF (LMS SAMTECH)

## 6 Conclusions

La méthodologie de validation progressive proposée par le projet FLACOMARE, basée sur une approche multi-échelle combinée expérience-simulation, a été mise en œuvre pour l'évaluation du comportement au feu d'un panneau sandwich employé pour le transport terrestre. L'outil de modélisation thermomécanique SAMCEF, couplé à un four virtuel d'essai modélisé avec le code FDS a pu ainsi être mis au point. La confrontation des résultats numériques et expérimentaux permettent de valider dans une certaine mesure l'approche, ainsi que la compréhension des phénomènes. Des analyses complémentaires sur le comportement mécanique sont encore nécessaires. Un couplage à chaque pas de temps entre les deux codes permettrait d'améliorer les résultats. Enfin la détermination d'un cahier des charges d'essais minimum à réaliser permettrait également d'optimiser la méthodologie pour l'étude de nouveaux matériaux composites.

## Références

- [1] NIST Special Publication 1019-5 et 1018-5, Fire Dynamic Simulator Version 5, 2010
- [2] LMS SAMTECH, SAMCEF code Version 12.1, 2012
- [3] D Marquis, M. Pavageau, E. Guillaume, Multiscale simulation of fire growth of a sandwich composite structure, *Journal of Fire Sciences*, 2013, 31: 3-34, doi:10.1177/0734904112453010
- [4] D Marquis, E. Guillaume, A Camillo, T. Rogaume, F. Richard, Existence and uniqueness of solution of differential equation system modelling the thermal decomposition of polymer material. *Combustion and Flames*, 2013, DOI:10.1016/j.combustflame.2012.12.008.
- [5] F Cayla, H. Leborgne, D. Joyeux, Application of a virtual resistance furnace : fire resistance test simulation on a plasterboard membrane, *International Conference on applications of fire structural fire engineering*, Prague, Avril 2011
- [6] V. Drean, Modélisation d'un four d'essai (Four F) : configurations d'essais selon les normes EN 1363 -1 et -2, pour des éléments horizontaux et verticaux, *Rapport Efectis France E-R&D-12/080*, Décembre 2012
- [7] V. Drean, G. Auguin, Essais de transferts thermiques sur panneaux sandwich composites (essais 11-F751/752/753), *Rapport Efectis France E-R&D-12/007*, Février 2012
- [8] V. Drean, Essais de transferts thermiques sur panneaux sandwich composites (essai 13-F082), *Rapport Efectis France E-R&D-13/012*, Février 2013