

Etude à petite échelle du comportement au feu du balsa.

Damien MARQUIS^{1,2*}, Michel PAVAGEAU², Eric GUILLAUME¹, Carine CHIVAS-JOLY¹, Lucas BUSTAMANTE-VALENCIA¹.

¹Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE),
29 Avenue Roger Hennequin – 78197 Trappes Cedex.

²École des Mines de Nantes (EMN),

Département Systèmes Énergétiques et Environnement,

UMR CNRS 6144 (GEPEA), 4 Rue Alfred Kastler, BP20722 – 44307 Nantes.

*(auteur correspondant : damien.marquis@lne.fr)

Résumé - Après avoir très rapidement replacé la démarche dans son contexte, ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale du comportement au feu du balsa, sur des bancs d'essai à petit échelle, puis la simulation de ces essais à l'aide du code LES FDS5 avec calcul de pyrolyse, pour validation. L'intérêt de ce préalable à une simulation incendie complète est brièvement présenté.

Nomenclature

A	facteur pré-exponentiel, s^{-1}
E	énergie d'activation, $J.kg^{-1}$
n	ordre de la réaction, sans dimension
m	masse, kg
\dot{m}	vitesse de perte de masse totale, s^{-1}
\dot{q}	flux, W
\dot{Q}''	taux de dégagement de chaleur, $W.m^{-2}$
R	$8,314472 m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
T	temps, s
T	température, $^{\circ}C$
Y	fraction massique, sans dimension

Symboles grecs

$\dot{\omega}$	vitesse de réaction, s^{-1}
----------------	-------------------------------

Indices et exposants

i	i ^{ème} réactions
o	initial
O ₂	dioxygène
.	par unité de temps
*	normalisé

Abréviations

ATG	analyse thermogravimétrique
CFD	computational fluid dynamics
FDS	fire dynamics simulator
HR	vitesse d'échauffement
IRTF	infrarouge à transformée de Fourier.
LPA	lumped approach parameter
NMLR	vitesse de perte de masse normalisée (Normalized Mass loss rate), $kg.s^{-1}$

1. Introduction

Le travail présenté dans ce papier s'inscrit dans le cadre du projet multi partenaires MP08 intitulé « Comportement au feu des matériaux composites », labellisé par le pôle de compétitivité EMC2 (Ensembles Métalliques, Composites et Complexes) de la Région Pays de la Loire. Ce projet a pour but de rassembler des chantiers navals civils et militaire voisins géographiquement autour d'une problématique commune, la tenue au feu des composites, afin de développer une démarche innovante quant à l'utilisation de ces matériaux dans des domaines nouveaux ou difficilement accessibles du fait des règles incendie en vigueur [1]. Les matériaux composites considérés dans le projet MP08 sont des matériaux sandwich dont l'âme est en balsa et la peau un stratifié constitué de résine polyester et de fibres de verre.

Le travail d'analyse préalable, qui relève de l'ingénierie de la sécurité incendie [2], ne peut reposer sur des essais grandeur réelle que de manière très limitée. La démarche s'appuie donc sur l'emploi d'outils de calcul numérique dont on attend qu'ils soient capables de prédire

"correctement" l'enchaînement des événements pouvant survenir en cas d'incendie sur un navire.

Pour garantir la qualité des simulations numériques à réaliser, une méthode de validation progressive des modèles utilisés a été suivie [3]. Cette méthode est basée sur une approche combinée expérience-simulation à échelle croissante au cours de laquelle nous avons été amenés à analyser séparément le comportement au feu des différents constituants du matériau sandwich étudié [2-4].

2. MODELE DE PYROLYSE

L'âme est d'un assemblage d'éléments de balsa de masses volumiques différentes collés les uns aux autres. Le fournisseur indique ainsi une variabilité de $\pm 30\%$ par rapport à la masse volumique nominale de 150 kg.m^{-3} .

2.1. Les bases d'un modèle de pyrolyse

L'objectif est ici de déterminer des lois cinétiques "simples" utilisables pour modéliser la pyrolyse du balsa, qui à notre connaissance n'a fait l'objet d'aucune étude. En revanche, il est possible de trouver de nombreuses références sur la pyrolyse de bois de variétés différentes. Il semble, toutefois, très difficile de synthétiser l'ensemble des travaux menés sur les mécanismes correspondants pour établir un modèle global du fait de la très grande dispersion des résultats (liée aux conditions opératoires employées et à la nature des composés étudiés).

La caractérisation du processus de décomposition thermique a été réalisée à partir d'une analyse thermogravimétrique (ATG) de la phase solide couplée à une analyse en phase gazeuse par un analyseur infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). Lors des essais, trois vitesses d'échauffement (HR) et deux gaz vecteurs ont été utilisées. Les résultats ont permis de définir pour ce matériau, le schéma réactionnel en cinq étapes du tableau 1. L'objectif n'étant pas de définir un modèle de dégradation thermique complet par constituant, il a été décidé d'opter pour un mécanisme multi-réactionnel décrivant la décomposition thermique du balsa dans son ensemble (Approche LPA « Lumped approach parameter »).

Réactions	Réactifs		Produits
1 Pyrolyse	Holocellulose	→	$v_1. \beta\text{Holocellulose} + (1-v_1). [Y_k + Y_j + \text{CH}_3\text{COOH}]$
2 Pyrolyse	$\beta\text{Holocellulose}$	→	$v_2. \text{goudron} + v_3. \text{charbon} + (1-v_3). [Y_k + Y_j + \text{CH}_4]$
3 Oxydation	Holocellulose + O_2	→	$v_4. \beta\text{Holocellulose} + (1-v_4). [Y_k + Y_j + \text{CH}_3\text{COOH}]$
4 Oxydation	$\beta\text{Holocellulose} + \text{O}_2$	→	$v_5. \text{goudron} + v_6. \text{charbon} + (1-v_5). [Y_k + Y_j + \text{CH}_3\text{COOH}]$
5 Oxydation	goudron + O_2	→	$v_7. \text{résidu} + (1-v_7). Y_k$

$Y_k = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{HCOH}$; $Y_j = \text{CH}_3\text{OH} + \text{HCOOH}$; CH_3COOH : Acide Acétylique; CH_3OH : Méthanol; HCOH : Formaldéhyde; HCOOH : Acide formique

Tableau 1 : Schéma réactionnel du balsa

Les vitesses de réaction $\dot{\omega}_i$ sont décrites par une loi de type Arrhenius où i renvoie au numéro de la réaction :

$$\dot{\omega}_i(t) = A_i e^{\frac{-E_i}{RT}} \left(\frac{m_i(t)}{m_o} \right)^{n_i} Y_{\text{O}_2}^\delta \quad (1)$$

où m_i est la masse du réactif de la réaction i , m_0 est la masse initiale du matériau et $Y_{O_2} = 0.23$ est la fraction massique d'oxygène. Pour une réaction de pyrolyse $\delta = 0$ et pour une réaction oxydative $\delta = 1$. Les paramètres cinétiques de l'équation (1) sont estimés à partir d'une méthode d'optimisation itérative conduite par un algorithme génétique (AG) [5]. La technique est similaire à celle présentée en référence [3].

Les résultats présentés sur les figures 1 et 2 montrent la bonne capacité du schéma réactionnel avec ses paramètres cinétiques optimisés, à reproduire la vitesse de perte de masse normalisée (NMLR) du matériau pour deux gaz vecteurs.

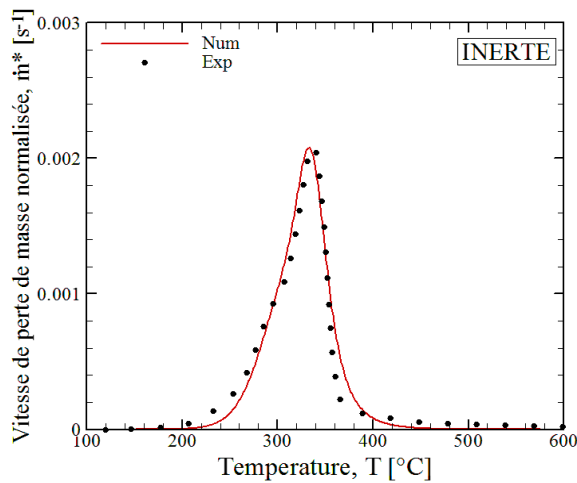


Figure 1 : Comparaison entre la solution calculée par l'AG et les valeurs expérimentales pour une vitesse de chauffe de 10 K min^{-1} en milieu inerte

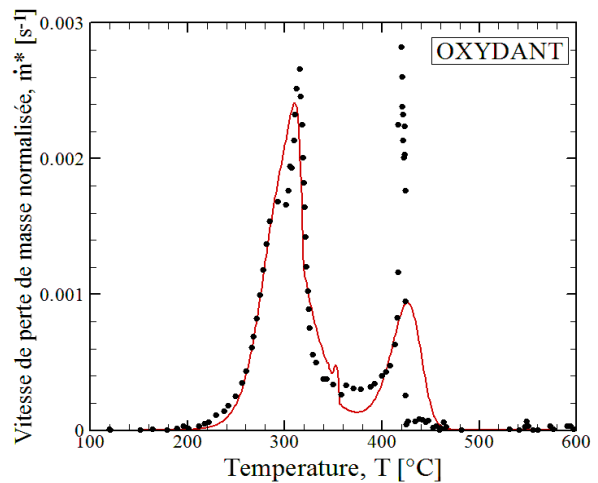


Figure 2 : Comparaison entre la solution calculée par l'AG et les valeurs expérimentales pour une vitesse de chauffe de 10 K min^{-1} en milieu oxydant

Les NMLR numériques reproduisent de manière satisfaisante les principales tendances observées expérimentalement pour $HR=10 \text{ K.min}^{-1}$. En milieu inerte, le modèle prédit correctement l'intensité de NMLR. En milieu oxydant, le modèle a plus de mal à reproduire les différentes réactions : l'intensité de la réaction d'oxydation du charbon (420°C) est fortement sous évaluée. Toutefois, compte tenu des fortes interactions entre les composants polymériques (cellulose, hémicellulose et lignine) et la difficulté à dissocier les mécanismes, les résultats obtenus par l'approche LPA sont satisfaisants.

Ces paramètres cinétiques optimisés ont été utilisés comme jeu de données d'entrée pour simuler le comportement au feu du balsa.

2.2. L'expérience : le cône calorimètre

2.2.1. Présentation du banc de mesure

Le cône calorimètre est un dispositif de mesure permettant d'estimer la chaleur \dot{Q}'' dégagée par d'un matériau lors de sa combustion. Le principe de la mesure repose sur la calorimétrie par déplétion d'oxygène (la quantité d'énergie libérée est associée à consommation d'oxygène). L'éprouvette, parallélépipédique ($100 \times 100 \times 50 \text{ mm}$) est placée dans un porte-éprouvette normalisé (face arrière de l'échantillon isolée). Celui-ci est positionné sur une balance qui permet de suivre en continu l'évolution de la perte de masse. L'échantillon est exposé à l'éclairement énergétique ($5\text{-}75 \text{ kW.m}^{-2}$) d'un cône tronqué radiant conformément aux exigences de la norme ISO 5660 – 1 [6].

2.2.2. Observations et résultats expérimentaux

L'hétérogénéité du balsa et son caractère anisotrope rendent sa décomposition thermique relativement complexe. La vitesse d'échauffement du matériau dépend de son caractère anisotrope de ses propriétés physico-chimiques et du niveau d'irradiance. L'exposition de la surface à un éclairage énergétique conduit à une contraction du matériau. Les forces résultantes favorisent le craquage (fissuration) et modifient le transfert de chaleur au sein du matériau.

Au fur et à mesure de l'échauffement, la colle utilisée pour assembler les blocs commence à migrer en surface. Les gaz de pyrolyse liés à la décomposition de cette colle peuvent dans certains cas être à l'origine de l'ignition du balsa. A partir de 190°C, l'énergie thermique transférée aux macromolécules est suffisante pour amorcer la décomposition. La transformation tend à devenir fortement endothermique et le balsa commence à carboniser en dégageant de nombreuses espèces chimiques. Les gaz produits par la décomposition du solide sont refoulés vers la surface au niveau des fissures, en raison des gradients de pression générés au cours de la carbonisation du solide. Ces gaz qui diffusent, sont convectés, créant ainsi un mélange inflammable au voisinage de la surface du solide. Si la température du mélange augmente, la combustion entre les vapeurs combustibles et l'air ambiant peut avoir lieu. Il en résulte une flamme de diffusion qui se développe au-dessus de la surface. En surface, l'épaisseur du résidu augmente régulièrement et exerce un effet protecteur qui provoque une diminution de la vitesse du front de décomposition. Lorsque l'émission de gaz est terminée, l'oxygène ambiant diffuse dans le résidu charbonneux hautement poreux au travers des fissures conduisant à son oxydation. Cette réaction est exothermique.

Les essais réalisés à de faibles niveaux d'irradiance proches du flux minimum d'ignition ont révélé que le matériau est sujet à un mode combustion de type solide. La combustion solide est une combustion lente de la phase solide (l'oxygène attaque directement la surface solide) sans flamme ni émission visible de lumière. Des séries de mesures réalisées, nous avons obtenus les caractéristiques d'ignition de la table 2.

Paramètres		Valeurs
Température d'ignition pilotée, T_{ig}	[°C]	320,7
Flux minimum d'ignition piloté \dot{q}_{min}''	[kW.m ⁻²]	9,5 ± 0,76
Enthalpie de gazéification, ΔH_g	[kJ.kg ⁻¹]	541
Paramètre de réponse thermique TRP	[kW.s ^{0.5} m ⁻²]	128,1±10,3

Tableau 2 : Propriétés d'ignitions intrinsèque du balsa.

Ces paramètres dépendent dans une large mesure de certaines propriétés du matériau et des conditions d'essai, notamment de la masse volumique, du degré d'hygrométrie, de la géométrie de l'échantillon, de la source d'ignition, de la durée d'exposition et de l'atmosphère ambiante. Il n'est donc pas inenvisageable d'obtenir des caractéristiques différentes compte tenu de l'hétérogénéité du matériau d'âme.

2.3. La simulation numérique : le code FDS 5

2.3.1. Généralités

Fire Dynamics Simulator version 5.3 est un code CFD couplé à des modèles de combustion et de pyrolyse. FDS utilise comme modèle hydrodynamique une approximation

des équations de Navier-Stokes appropriée à la simulation des écoulements à bas nombre de Mach. La turbulence est traitée par une approche LES à constante de Smagorinsky dans tout le domaine de calcul. Pour le matériau, l'équation du bilan d'énergie est écrite à l'aide d'un modèle de transfert conductif monodimensionnel. La pyrolyse est modélisée par une équation de type Arrhenius du 1^{er} ordre. La modélisation des transferts en phase solide avec FDS reste à l'heure actuelle encore très limitée pour modéliser la dégradation d'un matériau aussi complexe que le balsa [2]. En effet la porosité, la diffusion moléculaire et la déformation ne peuvent pas être traitées. Par ailleurs l'utilisation d'un modèle de combustion à fraction de mélange ne permet pas de modéliser les processus d'oxydation au niveau de la phase solide.

2.3.2. Résultats numériques

Une simulation du cône calorimètre a été réalisée en respectant les dimensions réelles du banc d'essai expérimental. Le modèle de décomposition du balsa défini précédemment a été intégré au code de calcul.

Il s'agit maintenant de vérifier que l'expérience virtuelle du cône calorimètre permette bien de reproduire le comportement au feu du balsa. Les propriétés physico-chimiques et thermiques à différentes températures ont été évaluées au LNE sur les différents bancs métrologiques de référence. L'échantillon est composé d'un seul bloc homogène, isotrope et de masse volumique apparente 169 kg.m^{-3} .

Les figures 3 et 4 comparent les comportements numériques et expérimentaux du balsa via les bilans massique et énergétique obtenus pour un éclairement incident de 50 kW.m^{-2} .

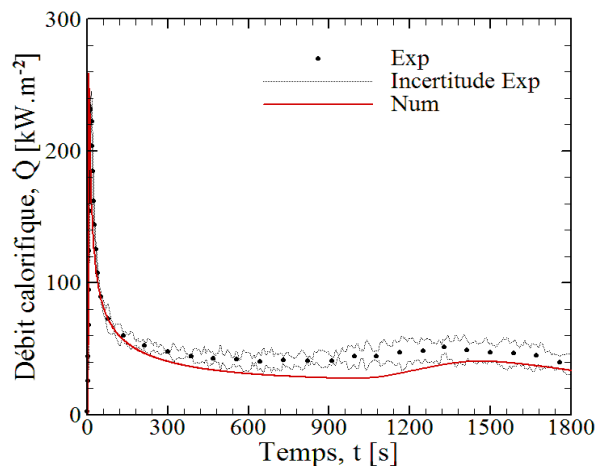


Figure 3 : Bilan d'énergie du balsa pour un niveau d'irradiance de 50 kW.m^{-2} .

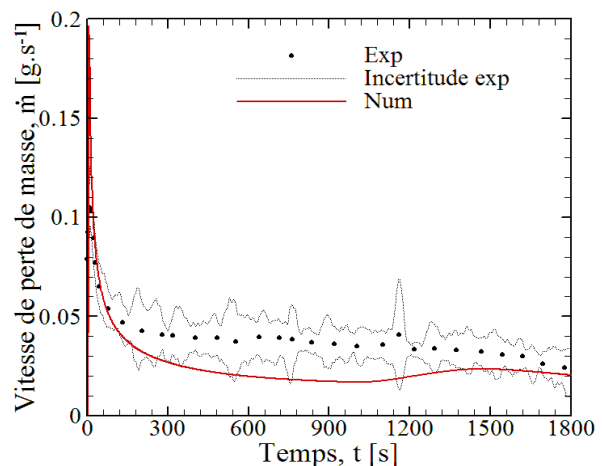


Figure 4 : Bilan de masse du balsa pour un niveau d'irradiance de 50 kW.m^{-2} .

Les résultats montrent que le modèle reproduit de façon satisfaisante les principales tendances qualitatives observées expérimentalement. Après l'apparition de la couche de charbon, le taux de réaction augmente brusquement jusqu'à atteindre un maximum. L'épaisseur du résidu augmente régulièrement. Cette couche carbonée modifie le bilan d'énergie et réduit le taux de perte de masse. Après stabilisation, on perçoit notamment une légère élévation du dégagement de chaleur en fin de combustion. Cette élévation est, cette fois, beaucoup moins marquée que la première et résulte de l'oxydation du résidu.

Il faut tout d'abord noter les différences de niveaux d'intensité atteintes par les valeurs numériques. Au niveau du premier pic, les résultats sont tout à fait en accord avec les mesures expérimentales. Le code a ensuite tendance à sous-évaluer la vitesse de perte de masse. Plusieurs facteurs expliquent ces écarts. Ceux-ci sont liés au modèle de pyrolyse utilisé et aux

hypothèses du code FDS, en particulier à l'impossibilité de simuler numériquement des réactions thermo-oxydatives au niveau de la phase solide. Les résultats peuvent laisser penser en sus que les propriétés thermiques et les paramètres cinétiques utilisés ne sont pas adaptés pour cet échantillon. En effet l'ensemble des mesures physico-chimiques et thermiques n'a pas été réalisé pour des échantillons de masse volumique de 169 kg.m^{-3} , ce qui peut induire un biais. Malheureusement, il paraît difficile de pousser plus loin l'analyse physique de l'ensemble de l'échantillonnage. Enfin, le caractère fortement hétérogène du matériau peut contribuer à expliquer cette différence entre les courbes, les résultats pouvant varier fortement d'une expérience à l'autre.

3. Conclusion

Ce papier présente d'une part, les résultats expérimentaux du comportement au feu d'un balsa sur un banc d'essai à petite échelle (cône calorimètre) et d'autre part, les simulations numériques de ces essais à l'aide du code LES FDS 5. Les simulations numériques ont permis de démontrer que le modèle de décomposition issu de l'analyse ATG-IRTF et le jeu de données expérimentales permettaient une reproduction correcte du comportement au feu du balsa. Les premiers résultats montrent qu'à l'échelle du cône calorimètre, le modèle de pyrolyse utilisé reproduit de manière satisfaisante les principales tendances observées expérimentalement en ce qui concerne la décomposition du matériau testé.

La prochaine étape de notre travail consistera à étudier expérimentalement et numériquement, selon la procédure décrite ici, le comportement au feu de ce matériau à plus grande échelle.

Références

- [1] J. Gutierrez, A. Breuillard, M. Pavageau, A. Aubert, C. Sollicc & J.C. Craveur, Use of fire safety engineering for the design of composites for shipbuilding, *Fire & Materials 2009*, (San Francisco, 26 – 28 January 2009), 547-560.
- [2] D. Marquis, Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement au feu d'un composite pour son utilisation en construction navale. *Thèse de doctorat. Université de Nantes*, (Mars 2010).
- [3] D. Marquis, M. Pavageau, E. Guillaume, C. Chivas-Joly & L. Bustamante Valencia, Modélisation du comportement au feu d'un composite par calcul de pyrolyse : approche combinée expérience-simulation à petite échelle, *J. Mécanique & Industrie*, 10 (2009) 245-253.
- [4] D. Marquis, M. Pavageau, E. Guillaume & C. Chivas, Multiscale validation of pyrolysis model based CFD Simulation of Fire growth on composite, *11th international conference Fire & Materials 2009*, (San Francisco, 26 – 28 January 2009), 413-424.
- [5] L. Bustamante Valencia, T. Rogaume & E. Guillaume, New method for simulating the kinetic of toxic gases productions of upholstered furniture fire, *11th international conference Fire & Materials 2009*, (San Francisco, 26 – 28 January 2009), 685-695.
- [6] ISO 5660-1, Essais de réaction au feu, Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse ; Partie 1: Débit calorifique. www.afnor.fr (2002).

Références

Les auteurs remercient le pôle de compétitivité EMC2, la région Pays de la Loire ainsi que la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services et la Délégation Générale de l'Armement pour leur soutien financier à la réalisation du projet MP08 cadre de ce travail.