



Feu à grande échelle

Combustion Végétaux

Sous-Prod. Agricole & Feu

Approche Modèle

Contacts

L'une des problématiques majeures de la lutte contre l'incendie concerne la difficulté à prédire le comportement d'un matériau lorsque l'on passe d'une échelle d'étude à l'autre. Les mesures réalisées sur quelques milligrammes de matière permettent-elles de prévoir le comportement lors de tests à échelle intermédiaire (quelques dizaines de grammes) ? Et, à partir de ces tests, peut-on évaluer le risque « incendie » à plus large échelle (chemin de câbles, produit manufacturé), voire à l'échelle d'un bâtiment entier ?

Les deux articles qui suivent entrent dans le cadre de cette problématique générale. Le premier vise à caractériser les gaz de combustion issus d'un feu impliquant de grandes quantités de câbles en milieu bien ventilé, mais l'objectif final de cette étude concernera les feux de câbles en milieu confiné.

Le second article décrit une partie des travaux de thèse d'Elodie Romagnoli à l'Université de Corte portant sur la caractérisation de la combustion de végétaux (litières d'aiguilles de pin) à différentes échelles par trois techniques calorimétriques différentes.

Bonne lecture.

## *Caractérisation des gaz produits lors de feux à grande échelle de câbles électriques halogénés (PVC) ou avec retardateur de flamme sans halogène (ATH)*

Pascal ZAVALETA et Laurent AUDOUIN

*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP.3 - 13115 – St Paul Lez Durance - France*

### 1. Introduction

Dans le cadre du programme OCDE PRISME 2 [1], [2], des essais de caractérisation du comportement au feu de foyers mettant en jeu plusieurs centaines de mètres de câbles électriques répartis sur cinq chemins de câbles horizontaux et superposés (cf. Figure 1) ont été réalisés en milieu ouvert (i.e. bien ventilé) sous un calorimètre à grande échelle (cf. Figure 2).



Figure 1 : Dispositif d'essai composé de cinq chemins de câble horizontaux.

Un des objectifs de ces essais était de déterminer les gaz majoritaires produits lors de ces feux\*. Trois câbles électriques (A, B et C) ont été utilisés. Le câble A est un câble avec retardateur de flamme sans halogène (hydroxyde d'aluminium, ATH) tandis que les câbles B et C sont des câbles halogénés (polychlorure de vinyle, PVC).

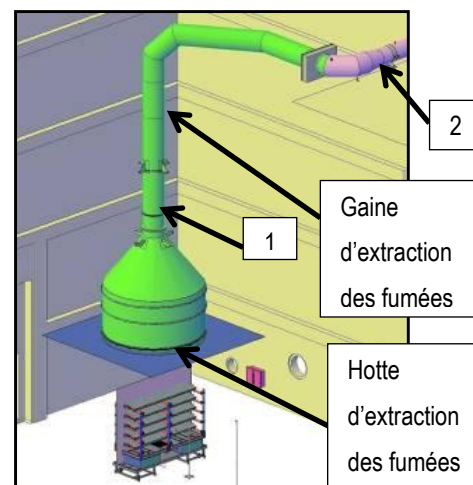


Figure 2 : Calorimètre à grande échelle (hotte de 4 m de côté).

\* La caractérisation des gaz produits par les feux de câbles permet notamment d'évaluer la puissance du feu (à l'aide des mesures de CO<sub>2</sub>), mais aussi d'estimer la corrosivité des fumées (HCl) ou encore d'identifier les gaz imbrûlés qui peuvent, notamment en milieu confiné, provoquer des ré-inflammations engendrant des pics de surpression.

## 2. Moyens de mesure

L'analyse multi-gaz a été réalisée à l'aide d'un spectromètre InfraRouge à Transformée de Fourier (FTIR) de marque GASMET (modèle DX-4000). Le prélèvement des gaz est effectué en amont de la partie verticale de la gaine d'extraction, juste au-dessus de la hotte collectant les fumées de combustion (cf. point de prélèvement "1" sur la Figure 2). Puis, il est transféré jusqu'à l'analyseur FTIR via une ligne de prélèvement chauffée à 180 °C. Les caractéristiques techniques de l'appareil équipé d'un détecteur MCT refroidi par effet Peltier sont : résolution de 8 cm<sup>-1</sup>, plage de nombre d'onde de 900 – 4250 cm<sup>-1</sup> et longueur de chemin optique de 5 m.

## 3. Résultats et discussion

Dans un premier temps, on vérifie pour les trois câbles A, B et C que les mesures FTIR de concentrations des espèces CO<sub>2</sub> et CO sont cohérentes (cf. Figure 3 et Figure 4) avec celles obtenues par deux analyseurs de référence NDIR (InfraRouge Non Dispersif). L'un est dédié à la mesure de la concentration de CO<sub>2</sub> et l'autre à celle du CO. Ces deux analyseurs sont installés sur la partie horizontale de la gaine d'extraction des fumées (cf. point de prélèvement "2" sur la Figure 2).

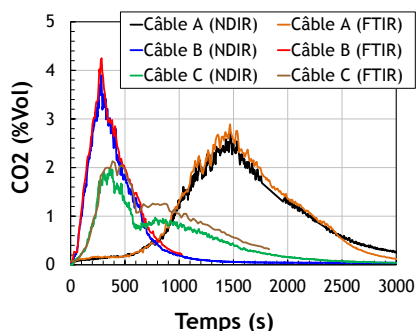


Figure 3: Concentration molaire de CO<sub>2</sub> dans la gaine d'extraction.

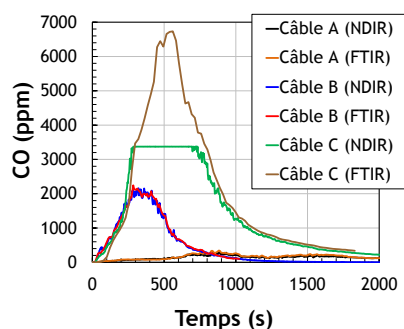


Figure 4 : Concentration molaire de CO dans la gaine d'extraction.

La Figure 5 montre que la concentration de chlorure d'hydrogène (HCl) dans le panache de fumée est plus

\* La Figure 4 montre la cohérence des mesures de CO pour l'essai de feu de câble C en dehors de la période de saturation de l'analyseur de CO (tracé vert). La saturation de cet analyseur s'est produite lorsque les valeurs de concentration de CO ont dépassé la valeur haute de la gamme de mesure de cet analyseur.

importante pour le câble C. Aucune présence de HCl n'a détectée pour le câble A conformément à la nature de ce câble. Cette figure indique également une production plus importante de CO pour le câble C. En effet, la présence plus importante de HCl dans la phase gaz dans le cas du feu de câble C pourrait diminuer de manière plus conséquente la présence des radicaux OH<sup>\*</sup> et H<sup>\*</sup> (par piégeage avec le HCl) et ainsi favoriser une production plus importante du CO pour ce feu de câble. Enfin, on constate, pour les deux feux de câbles B et C, un décalage entre les pics de concentration de HCl et ceux du CO, ces derniers se produisant ultérieurement.

Les Figure 6 et 7 montrent les principaux hydrocarbures gazeux quantifiés par l'analyseur FTIR lors de ces essais : le méthane (CH<sub>4</sub>), l'éthylène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), l'acétylène (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) et le benzène (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>).

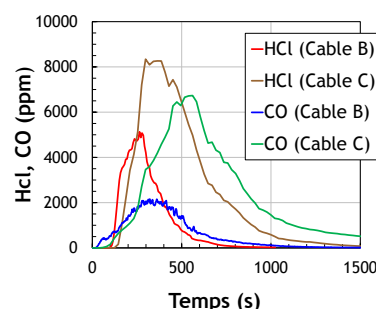


Figure 5: Concentrations de chlorure d'hydrogène (HCl) et de CO dans la gaine d'extraction.

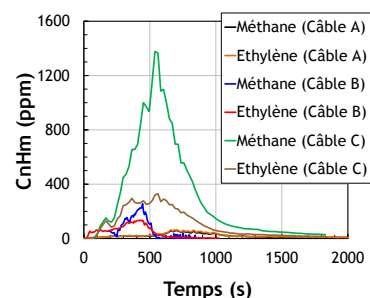


Figure 6: Concentrations de méthane (CH<sub>4</sub>) et d'éthylène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) dans la gaine d'extraction.

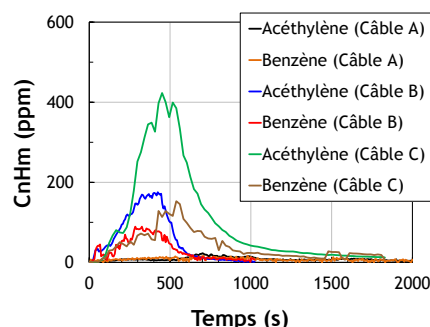


Figure 7: Concentrations d'acétylène (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) et de benzène (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) dans la gaine d'extraction.

Par ailleurs, ces figures indiquent aussi que la production des hydrocarbures gazeux est nettement plus importante lors des feux de câbles B et C (PVC) que lors du feu de câble A (ATH).

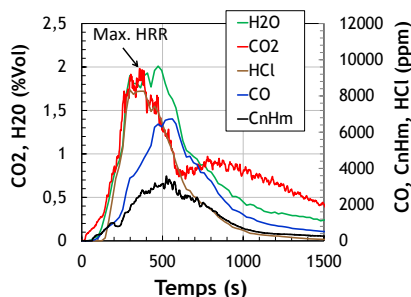


Figure 8: Concentrations de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{C}_n\text{H}_m$  pour le feu de câble C.

Enfin, la Figure 8 montre les évolutions des concentrations de  $\text{CO}_2$  (indicatives des évolutions de la puissance du foyer) avec celles de  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  et de  $\text{C}_n\text{H}_m$  pour le feu de câble C. On observe que le pic de concentration de  $\text{HCl}$  coïncide avec celui de la puissance du feu (pic de production de  $\text{CO}_2$ ), alors que ceux relatifs à la vapeur d'eau, aux hydrocarbures gazeux ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) et au  $\text{CO}$  se produisent ultérieurement. En particulier, le maintien d'une production importante de vapeur d'eau au-delà du pic de puissance, pourrait résulter de la poursuite de la production de cette espèce lors de la combustion du câble C à laquelle se rajouterait la production de  $\text{H}_2\text{O}$  issue de la réaction

de piégeage du radical  $\text{OH}^*$  par  $\text{HCl}$  selon la réaction suivante :  
 $\text{HCl} + \text{OH}^* \rightarrow \text{Cl}^* + \text{H}_2\text{O}$ .

### 3. Conclusion

L'utilisation d'un analyseur multi-gaz FTIR a permis de quantifier les principaux gaz produits lors de la combustion de plusieurs types de câbles électriques (répartis sur cinq chemins de câble horizontaux) en milieu ouvert. L'objectif final étant d'étudier les feux de câbles en milieu confiné/ventilé représentatif des installations nucléaires, cette étude se poursuivra par la caractérisation du comportement au feu de ces mêmes foyers lors d'essais réalisés dans une installation expérimentale comportant plusieurs locaux connectés à un système de ventilation. En particulier, les résultats attendus permettront d'estimer et de comprendre les effets de la sous-oxygénation du foyer sur les produits de combustion issus de ces foyers de câbles.

### 4. Références

- [1] Audouin, L., Prétrel, H., Zavaleta, P., OECD PRISME 2 Fire Research Project (2011-2016) – Current Status and Perspectives, 13<sup>th</sup> International Post-Conference Seminar on "Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations".
- [2] Zavaleta, P., Charbaut, S., Basso, G., Audouin, L., "Multiple Horizontal Cable Tray Fire in Open Atmosphere", Thirteenth international conference of the Fire and Materials (San Francisco, USA), pp. 57-68, 2013.

## Dynamique de combustion des végétaux et analyse des fumées émises : effets de l'échelle et du système

Elodie ROMAGNOLI

*Soutenance de thèse de doctorat le 11 décembre 2014 à 14h30 – Université de Corse  
 Université de Corse - Campus Grimaldi- Amphi Jean Nicoli*

Les incendies de végétation sont caractérisés par de nombreuses échelles de temps et d'espace. Une approche multi-physique et multi-échelle est donc nécessaire pour aborder la complexité de ces phénomènes. Ce travail de thèse est une contribution expérimentale à l'étude des effets d'échelle et du système sur la dynamique de combustion des végétaux et les fumées émises. Notre objectif principal a été de déterminer quels protocoles expérimentaux et plus particulièrement quelles échelles permettent de caractériser aux mieux la combustion des végétaux en laboratoire. Nous avons ainsi étudié le comportement au feu des aiguilles de deux espèces de pin représentatives de l'écosystème méditerranéen, *Pinus pinaster* et *Pinus laricio*. Les litières d'aiguilles de pin représentent un

enjeu important car elles entretiennent la propagation des incendies et elles participent à la transition d'un feu de surface à un feu total. Trois configurations expérimentales ont été étudiées au cours de cette thèse, l'échelle du cône calorimètre, l'échelle du grand calorimètre ou LSHR (permettant la combustion statique de masses plus importantes que le cône) et enfin, la propagation dans le LSHR permettant d'étudier l'effet du système sur la dynamique de la combustion et sur la production des fumées. Pour comparer ces trois configurations les protocoles expérimentaux ont été adaptés tout en maintenant la charge de combustible. Différents paramètres ont été étudiés pour analyser la dynamique de combustion tels que l'efficacité de la combustion, l'énergie dégagée ou encore la

vitesse de perte de masse. La production des fumées a été étudiée par la mesure du coefficient d'extinction qui caractérise leur opacité et permet d'obtenir le facteur d'émission des suies. Les facteurs d'émission des principaux composés émis lors de la combustion de ces deux types d'aiguilles de pin ont été mesurés en continu à partir d'un analyseur Infrarouge à Transformée de Fourier et d'un analyseur Infrarouge Non dispersif (IRND). Des analyses par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme et un spectromètre de masse nous ont permis de compléter ces mesures. Un bilan massique de carbone a également été réalisé afin de quantifier le carbone total mesuré dans nos analyses.

Les principales contributions de notre travail sont les suivantes: L'étude du comportement au feu des aiguilles de *P. pinaster* a révélé des différences importantes pour la puissance dégagée aux échelles du cône calorimètre et du LSHR. En revanche, le système de combustion (propagation) n'influence pas cette grandeur. L'efficacité de la combustion est apparue indépendante de l'échelle et du système de combustion.

Nous avons observé une influence de l'échelle de combustion

sur la production totale des fumées (RSR) et sur le facteur d'émission des suies. Nous avons également montré que le système de combustion (la propagation) influence la dynamique et la valeur des facteurs d'émission de dioxyde et de monoxyde de carbone, composés majoritairement émis par ces combustions.

Une influence est également à noter sur les facteurs d'émission des composés azotés et des COV émis pour les trois configurations expérimentales. Nous avons attribué les différences observées aux valeurs de températures des fumées. Enfin, une influence de la géométrie des particules a été mise en évidence par comparaison des combustions réalisées avec le cône calorimètre et le LSHR pour les deux types d'aiguilles de pin. La dynamique de combustion des aiguilles de *Pinus laricio* est moins affectée par le changement d'échelle que celle des aiguilles de *Pinus pinaster* (plus faible variation de la puissance de combustion). Nous avons également observé que les aiguilles de *Pinus laricio*, qui sont thermiquement plus fines que les aiguilles de *Pinus pinaster*, présentent un facteur d'émission des suies plus faible.

## Des sous-produits agricoles pour ignifuger les matières plastiques

Fouad LAOUTID et Philippe DUBOIS

*Service des Matériaux Polymères et Composites (SMPC), Université de Mons- Materia Nova, Mons, Belgique*

Depuis plusieurs années, les préoccupations croissantes liées à l'impact des activités pétrolières sur l'environnement et la raréfaction de ces ressources ont favorisé l'émergence et le développement des matériaux biosourcés. Le service des matériaux polymères et composites (SMPC), associé au centre de recherche *Materia Nova* et à l'Université de Mons est très actif dans ce domaine et mène depuis plusieurs années des travaux visant la production de nouveaux matériaux plastiques dont les constituants principaux sont issus de ressources annuellement renouvelables et localement disponibles. Tandis que les bio-raffineries de première génération ne valorisaient que quelques constituants végétaux, tels que le sucre, l'amidon ou l'huile, les nouvelles bio-raffineries ont pour objectif de valoriser la « plante » entière. Il s'agit de la fractionner en ses constituants majeurs et ensuite de transformer ceux-ci en (macro)molécules utiles sur le marché.

Dans ce cadre, le SMPC s'est associé au service de génie des procédés chimiques de la faculté polytechnique de l'Université de Mons pour valoriser des déchets agricoles non alimentaires comme additifs retardateurs de flamme pour le poly(acide lactique) (PLA). Parmi les produits d'intérêt, nous avons évalué le potentiel retardateur de flamme de l'acide phytique ( $C_6H_{18}O_{24}P_6$ ) que l'on retrouve dans les graines des céréales et certains légumineux sous forme de phytate de calcium ou de magnésium. En effet, l'acide phytique, qui se présente sous forme liquide, forme des sels insolubles au contact de différents cations. C'est d'ailleurs cette capacité à complexer les cations qui, d'une part, lui vaut une grande controverse puisqu'il est accusé de diminuer l'absorption de plusieurs minéraux, tels que le fer, par le tube digestif, et que nous avons exploité pour le doper avec différents cations métalliques d'autre part.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence le fort potentiel retardateur de flamme des sels de phytates métalliques, et plus particulièrement le phytate d'aluminium qui a permis de réduire de plus de 40 % le pHRR lors des tests au cône calorimètre. Pour donner un point de comparaison avec les autres sels de phytate, l'utilisation de 20% de phytate d'aluminium a permis de réduire le pHRR plus qu'avec 30% de phytate de sodium. Un article regroupant l'ensemble de ces résultats est en cours de finalisation et sera soumis à publication très prochainement.

En parallèle à ces travaux, d'autres alternatives biosourcées (lignine, tanins, cellulose, ...) ont été explorées. Les nanocristaux de cellulose sont particulièrement intéressants. En effet, ces additifs suscitent un véritable engouement en raison de leur caractère renouvelable et biodégradable, de leur faible densité, de leurs propriétés mécaniques remarquables ainsi que de leurs grandes surfaces spécifiques. Ils contiennent également des fonctions hydroxyles à leur surface, qui permettent leur fonctionnalisation, par des molécules phosphorées notamment. La cellulose (Figure 1), qui est le polymère renouvelable le plus abondant dans la nature, est constituée de fibres composées à leur tour de microfibrilles réunies entre elles et maintenues grâce à des liaisons hydrogène latérales. Ces microfibrilles sont composées de régions hautement cristallines, reliées entre elles par des composantes amorphes.

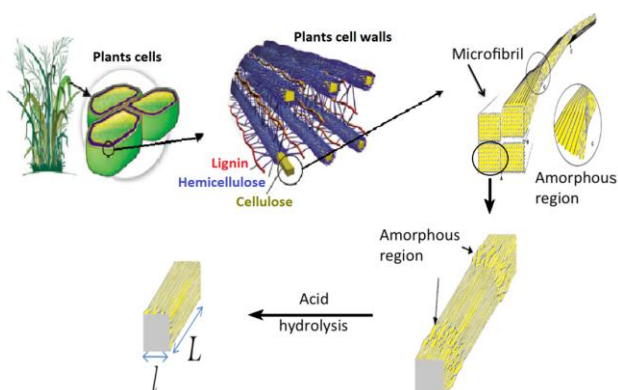


Figure 1 : Structures cristalline et amorphe de la cellulose présentes dans les parois cellulaires des plantes.

La fabrication de nanocristaux de cellulose (CNC) consiste à détruire les zones amorphes au moyen d'une hydrolyse acide et à ne garder que les zones cristallines. Cette hydrolyse sélective est possible grâce à la cinétique d'hydrolyse plus rapide des domaines amorphes par rapport aux domaines cristallins. Les nanocristaux constitutifs se présentent sous la

forme de particules en bâtonnets allongés de quelques centaines de nanomètres de longueur et de quelques nanomètres de largeur. La taille de ces cristaux dépend de plusieurs facteurs comme la source de cellulose et les conditions d'hydrolyse. Dans notre étude, nous avons préparé des nanocristaux de cellulose à partir des fibres de ramie, par hydrolyse acide (acide sulfurique 65%) pendant 35 minutes. La suspension obtenue a été ensuite lavée par centrifugation et le pH ajusté par dialyse. Les nanocristaux obtenus font quelques centaines de nanomètres de longueur et quelques nanomètres d'épaisseur (Figure 2).

Afin de conférer aux CNC un pouvoir retardateur de flamme, nous avons greffé des fonctions phosphatées à leur surface. La phosphorylation a été opérée dans l'urée en présence de l'acide phosphoreux à 150 °C. Egalement et dans le but de vérifier l'intérêt d'utiliser la forme nanométrique de la cellulose, nous avons effectué la même modification chimique sur de la cellulose microcristalline (MCC). La phosphorylation de ces deux celluloses a permis de modifier leur comportement thermique comme le montre la figure 3.

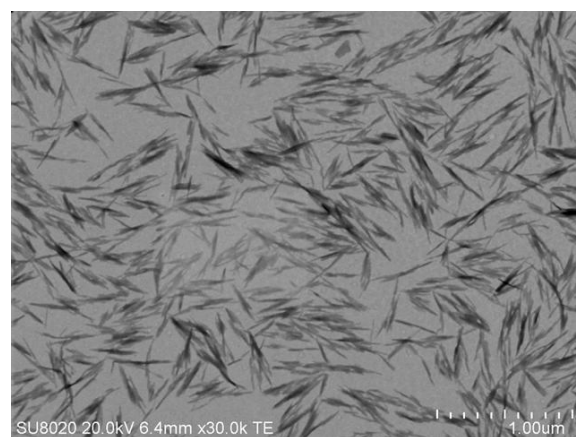


Figure 2 : Photo TEM des nanocristaux de cellulose (CNC) obtenus à partir de fibres de ramie.

En effet et comme espéré, le greffage des fonctions phosphatées a permis d'augmenter le taux de carbonnement (« char ») formé lors de la dégradation thermo-oxydative des deux celluloses. Les nanocristaux phosphorés (CNC-P) conduisent à une plus grande quantité de résidus pour deux raisons. La première tient au fait que les nanocristaux non modifiés produisent déjà un carbonnement contrairement à la cellulose microcristalline qui se dégrade complètement et la deuxième raison est due à la quantité de phosphore greffé, qui est plus élevé dans le cas des CNC-P (12 %) en

comparaison avec les MCC-P (8 %) comme il a été mesuré par spectrométrie photoélectronique par rayons X (XPS). Cependant, la phosphorylation entraîne également une dégradation précoce des deux celluloses.

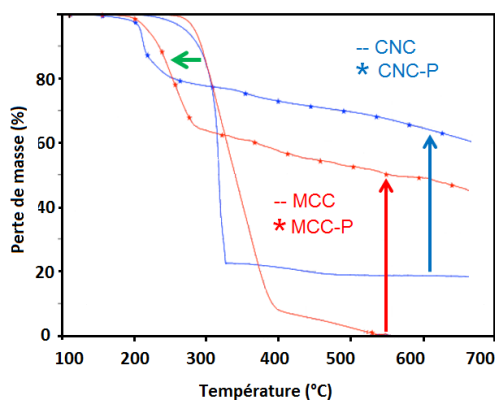


Figure 3 : Effet de la phosphorylation des nanocristaux de cellulose (CNC) et de la cellulose microcristalline (MCC) sur leur comportement thermique en TGA sous air (20°C/min).

Nous avons ensuite incorporé les quatre celluloses dans le PLA à hauteur de 20% et les mélanges obtenus ont été testés avec un cône calorimètre à 35 kW/m<sup>2</sup>. L'utilisation de la cellulose non modifiée seule ne permet aucune amélioration significative

du comportement au feu du PLA. Par contre, l'utilisation des CNC phosphorylés, contrairement aux MCC-P, permet d'obtenir un meilleur comportement au feu. En effet, l'incorporation des MCC-P ne produit aucune amélioration significative, exceptée une réduction plus rapide du HRR au-delà du pHRR alors que les nanocristaux de cellulose phosphorés entraînent une réduction importante du pHRR ainsi que de la quantité de chaleur totale dégagée. La dimension nanométrique des nanocristaux de cellulose constitue donc un élément déterminant dans l'influence que peut avoir la cellulose sur le comportement au feu du PLA. Cet effet supérieur de la forme nanométrique est également observé quand la cellulose (CNC ou MCC) est associée au phytate d'aluminium dans le PLA. En effet, le dégagement de chaleur obtenu avec le mélange 10% MCC / 10% de phytate d'aluminium reste élevé et similaire à celui obtenu avec 20% de MCC-P alors que l'association des CNC et phytate d'aluminium permet une meilleure réduction du pHRR qui est même un peu plus faible qu'avec 20% de CNC-P.

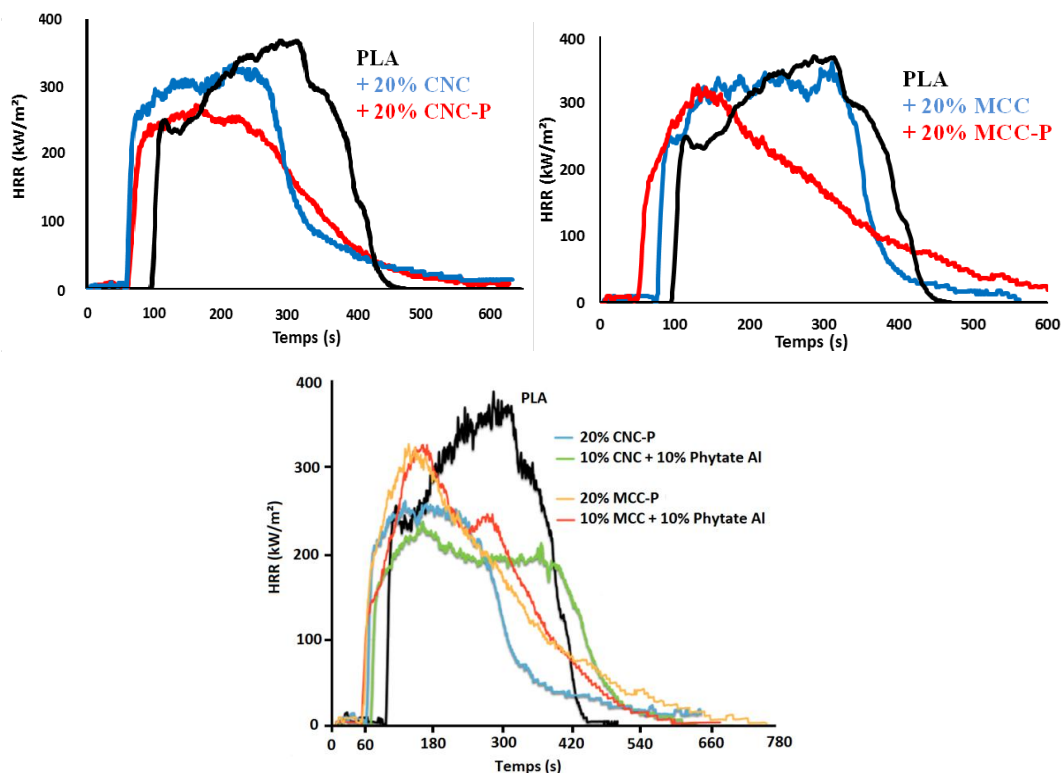


Figure 4 : Courbes de dégagement de chaleur, lors du test au cône calorimètre (35 kW/m<sup>2</sup>).

En conclusion, nous avons présenté quelques exemples démontrant qu'il est possible d'améliorer la tenue au feu du PLA en n'utilisant que des sous-produits agricoles. Ainsi, nous avons vu que les sels de phytate, à condition de bien choisir le cation métallique, peuvent entraîner une amélioration de la tenue au feu du PLA lors des tests au cône calorimètre.

Par ailleurs, la cellulose, bien qu'elle soit un excellent combustible, peut être valorisée dans ce type d'application sous réserve de n'en utiliser que sa partie hautement cristalline, sous forme nanométrique et de l'associer au du phosphore. Ces travaux sont toujours en cours et font partie de la thèse de doctorat de Lucie COSTES à l'Université de Mons.

## *Influence de la définition du mécanisme réactionnel sur la prédiction de la décomposition chimique de matériaux polymères en cas d'incendie, par une approche modélistique*

Damien MARQUIS<sup>1</sup>, Benjamin BATIOT<sup>2</sup>, Eric GUILLAUME<sup>1</sup> et Thomas ROGAUME<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire national de métrologie et d'essais, 1 Rue Gaston Boissier 75724 PARIS Cedex*

<sup>2</sup> *Institut Pprime, UPR 3346 CNRS, Département Fluides, Thermique, Combustion, ENSMA, BP 40109, 86961 Futuroscope*

Dans les situations d'incendie, les matériaux polymères présents sont soumis à des conditions très sévères de température et à une atmosphère appauvrie en oxygène. En réaction, les matériaux se décomposent et produisent des espèces gazeuses combustibles qui contribuent à alimenter les flammes.

D'un point de vue fondamental, la dévolatilisation d'un matériau polymère ou plus généralement la décomposition thermique d'un matériau est un phénomène hétérogène complexe, constitué de nombreuses réactions chimiques simultanées et consécutives. Ce processus engendre des modifications irréversibles physiques et chimiques du matériau, qui dépendent fortement de la température. Les réactions sont souvent très nombreuses, parfois plusieurs centaines, et la composition locale du solide est méconnue dans les détails. Pour ces raisons, il paraît actuellement illusoire d'espérer un mécanisme réactionnel de décomposition thermique représentant avec exactitude l'ensemble des phénomènes en jeu [1].

Le problème doit alors être réduit, afin d'établir une chimie approchée rendant suffisamment compte des phénomènes des phases solide et gazeuse. Un schéma composé de moins d'une dizaine de pseudo-réactions simultanées ou consécutives permet en général de rendre compte de la majeure partie du phénomène, ces pseudo-réactions étant elles-mêmes composées de dizaines voire de centaines de mécanismes non résolus en détail. Ce processus a été appréhendé depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle par les chimistes étudiant les réactions hétérogènes en dehors du secteur de l'incendie. Aujourd'hui, afin de modéliser l'incendie, il devient nécessaire de comprendre le processus de transformation d'un solide en gaz.

Historiquement, plusieurs techniques ont été développées pour prédire la décomposition thermique et la production de gaz d'un matériau polymère soumis aux effets d'une sollicitation thermique.

L'une de ces approches, dite modélistique (model free en anglais), implique la définition d'un schéma réactionnel de décomposition thermique de la matière et l'utilisation de lois cinétiques chimiques. La résolution mathématique de ce type de problème, particulièrement « raide », peut être effectuée par des méthodes stochastiques et l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires [2]. Cette famille d'algorithmes s'inspire de la théorie Darwinienne de l'évolution pour résoudre des problèmes divers en faisant évoluer de façon aléatoire, un ensemble de solutions à un problème donné, dans l'optique de trouver les meilleurs résultats. Dans le cas présent, il s'agit d'optimiser les paramètres cinétiques associés à chacune des réactions identifiées, de sorte à reproduire fidèlement l'évolution de la perte de masse en température.

Avec l'utilisation d'une approche stochastique, l'exactitude de la modélisation par une approche modélistique ne dépend plus de la technique de résolution utilisée, mais plutôt de la précision dans la description du mécanisme de décomposition thermique. L'utilisation de ce type d'approche implique, par conséquent, de définir avec précision le mécanisme réactionnel et de le valider chimiquement.

L'objectif de cette étude [3] est de montrer comment la précision apportée à la définition du mécanisme réactionnel influe sur l'exactitude de la prévision des modèles. L'analyse a été réalisée sur un produit complexe dont la décomposition s'effectue en plusieurs étapes : une mousse polyisocyanurate. Des analyses thermogravimétriques couplées à un analyseur de gaz ont été réalisées pour étudier la réactivité chimique de la matière dans plusieurs conditions de vitesse de chauffage. Un mécanisme réactionnel de décomposition a été identifié (cf mécanisme 7R Figure 2) puis retranscrit mathématiquement pour prédire la vitesse de perte de masse. Les paramètres

cinétiques sont ensuite optimisés de sorte à prédire fidèlement l'ensemble des réactions identifiées sur les thermogrammes.

Dans un premier temps, l'influence de la méthode d'identification a été étudiée. En effet il existe deux approches : la première approche vise à optimiser les paramètres pour

chacune des conditions d'essais (dans le cas présent 84 paramètres) ; la seconde approche identifie un jeu de données unique (28 paramètres), indépendant des conditions expérimentales.

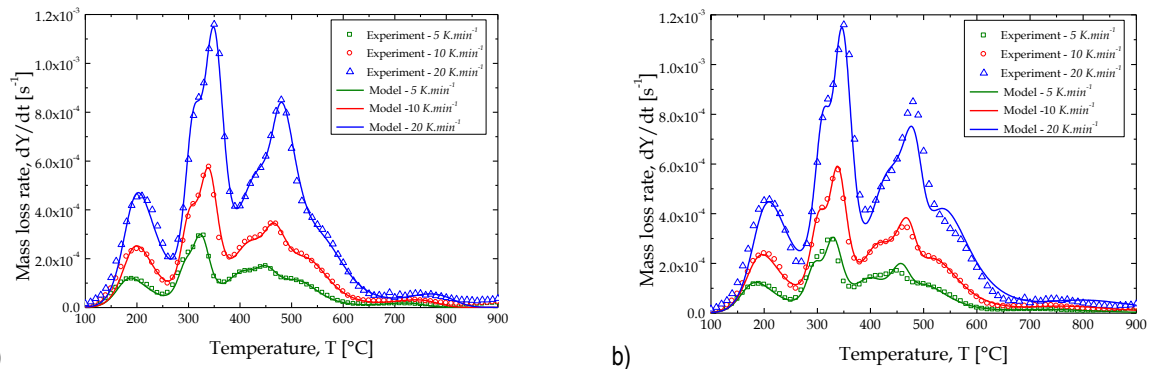


Figure 1 : Influence de la méthode d'identification. L'analyse est réalisée sous azote a) Identification séparée (84 paramètres optimisés). b) Identification globale (28 paramètres)

Les résultats démontrent que le mécanisme réactionnel identifié est capable de prédire avec précision la cinétique de perte de masse. Ils démontrent également que la fidélité d'une prédiction est fortement dépendante de la méthode d'identification. L'utilisation d'une approche globale permet toutefois de réduire le nombre de paramètres, de s'affranchir

des conditions d'essais, tout en conservant une erreur faible.

Dans un second temps, des mécanismes réactionnels à plusieurs niveaux de complexité ont été étudiés. Les mécanismes ont été simplifiés en conservant une démarche physique.

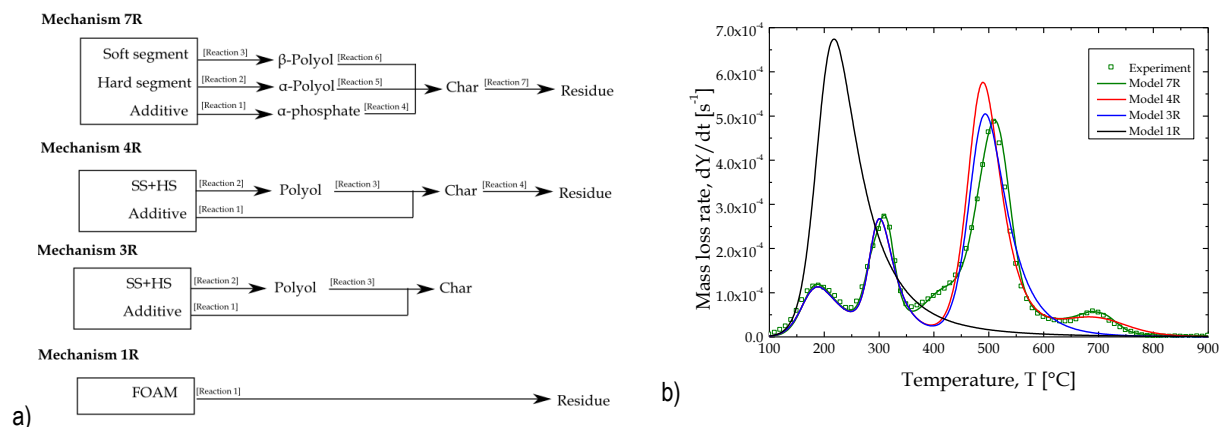


Figure 2 : Influence du mécanisme réactionnel sur la cinétique de décomposition d'une mousse. L'analyse est réalisée sous air. a) Mécanisme réactionnel étudié. b) Prédiction numérique de la vitesse de perte de masse en fonction de la température.

Un mécanisme détaillé réduit significativement l'erreur tandis qu'un modèle trop simplifié reste insuffisant pour traiter une décomposition complexe. Ce type d'approche peut propager les incertitudes numériques à plus grande échelle. Les résultats montrent, dans certains cas, la possibilité d'optimiser le schéma réactionnel sans pour autant influencer sur la prévision de la modélisation.

Ces travaux font l'objet d'un article et seront prochainement publiés dans une revue scientifique.

## Références :

1. E. Guillaume, Modélisation de la décomposition thermique des matériaux en cas d'incendie, Technique de l'ingénieur, SE 2 066 (2013).
2. D.M. Marquis, et al. Existence and uniqueness of solution of differential equation system modelling the thermal decomposition of polymer material, Combustion and Flame, 2013, 160(4):818-829, <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.008>.
3. D. Marquis, et al., Influence de la définition du mécanisme réactionnel sur la prédiction de la réactivité chimique de matériaux polymères, par une approche modélistique, GDR N°2864 (Feux), 19e séminaire, LEMTA Juin 2014, Corté, France.



**P**olyFlame est une newsletter à destination des chercheurs et des industriels du domaine du « comportement au feu des matériaux organiques ». Cette newsletter périodique est publiée via la Société Chimique de France (SCF).

A travers cette newsletter, vous découvrirez les nouveautés et les dernières avancées dans le domaine du comportement au

feu en matière de recherche et développement, la synthèse et la production de nouveaux systèmes de retardateurs de flamme, les besoins industriels. Pour faire avancer la connaissance et l'expertise, une partie de cette newsletter est consacrée à l'écoute des chercheurs et des industriels reconnus dans ce domaine.

### *Conférences à venir*

2nd International FR Conference on Fire-safe Textiles and Plastics, 16-17 octobre 2014- Gent, Belgique

<http://www.centexbel.be/agenda/fr-conference-fire-safe-textiles-and-plastics>

Fire Resistance in Plastics 2014 (AMI), 9-11 décembre 2014- Cologne, Allemagne

<http://www.amiplastics-na.com/events/Event.aspx?code=C606&sec=4182>

Fire and Materials 2015, 2-4 février 2015- San Francisco, USA

<http://www.intersciencecomms.co.uk/html/conferences/fm/fm15/fm15cfp.htm>

Meeting Flammability Requirements for Commercial Buildings & Construction, 15-16 Avril 2015- Tampa, Florida

[http://www.pinfa-na.org/Downloads/Florida\\_April15-16\\_2015/BC\\_9-21a.pdf](http://www.pinfa-na.org/Downloads/Florida_April15-16_2015/BC_9-21a.pdf)

### *Contacts de l'équipe rédactionnelle de la Newsletter n°6*

Henri Vahabi  
Université de Lorraine-  
Laboratoire MOPS

Rodolphe Sonnier  
Ecole des Mines d'Alès- C2MA  
rsonnier@mines-ales.fr

Laurent Ferry  
Ecole des Mines d'Alès- C2MA  
lferry@mines-ales.fr

Claire Longuet  
Ecole des Mines d'Alès- C2MA  
clonguet@mines-ales.fr

**Si vous souhaitez participer ou apparaître dans le prochain numéro prenez contact avec**

**Henri VAHABI par email : [henri.vahabi@univ-lorraine.fr](mailto:henri.vahabi@univ-lorraine.fr)**

*Liens utiles :*

[www.polymer-fire.com](http://www.polymer-fire.com)