

Détermination des Propriétés d'inflammabilité de combustibles végétaux à partir d'expériences en allumage piloté.

Pierrick Mindykowski*, Andres Fuentes, Jean Louis Consalvi, Bernard Porterie

Université de Provence, IUSTI/ UMR CNRS 6595, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France

* (auteur correspondant : pierrick.mindykowski@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé

Ce papier examine, expérimentalement et théoriquement, l'allumage piloté d'un lit de combustible forestier. Trois lits de végétation composée d'aiguilles de Pin Maritime de différentes porosités sont considérés. Un modèle thermique simple est développé. Une approximation à haut flux incident, qui relie linéairement l'inverse du temps d'allumage au rayonnement incident, est déduite d'une procédure d'optimisation. Cette solution est utilisée comme méthode de type ingénieur pour déterminer les propriétés du matériau.

1. Introduction

Les dispositifs expérimentaux de type cône calorimètre, où l'échantillon est exposé à des flux de chaleur dans la gamme 20 à 100 kW/m², ont été largement utilisés durant les trente dernières années. Des méthodologies ont été développées pour déduire les propriétés d'inflammabilité (telles que l'inertie thermique, le flux minimum pour l'allumage, la température d'allumage) nécessaires pour prédire la croissance d'un feu. Des matériaux thermiquement épais [1] et fins [2, 3] ont été considérés. Ces méthodologies ont été développées premièrement pour des polymères [1], et ont été étendues par la suite à des matériaux générant des résidus charbonneux [4, 5] et pour évaluer l'efficacité des retardants [6]. Elles sont basées sur l'utilisation de modèles décrivant la montée en température du matériau sous l'effet d'un flux incident [1-4], l'allumage étant relié à une température critique qui peut être déduite du flux minimum nécessaire pour produire l'allumage. Des solutions analytiques à haut flux de chaleur ont été développées pour rendre la détermination des propriétés des matériaux à partir des données expérimentales plus directe. Ces approximations prévoient une dépendance linéaire entre t_{ig}^{-1} (inverse du temps d'allumage) et \dot{q}_{inc}'' (flux incident) [2, 3] pour des matériaux thermiquement fins et entre $t_{ig}^{-1/2}$ et \dot{q}_{inc}'' pour des matériaux thermiquement épais [1]. La méthodologie consiste à tracer t_{ig}^{-1} (matériaux thermiquement fins) [2, 3] ou $t_{ig}^{-1/2}$ (matériaux thermiquement épais) [1] en fonction de \dot{q}_{inc}'' , montrant ainsi la dépendance linéaire prédites par les approximations à haut flux. Le flux de chaleur critique est ainsi relié à l'interception de la ligne droite avec l'axe des abscisses. La capacité calorifique (matériaux thermiquement fin) [2, 3] ou l'effusivité (matériaux thermiquement épais) sont reliés à la pente de la ligne droite [1, 4]. Les approximations analytiques à 'haut' flux peuvent être obtenues à l'aide de développements analytiques [1, 2]. Cependant ces solutions élégantes nécessitent de négliger les pertes radiatives ou convectives.

Les propriétés ainsi obtenus à partir des expériences ne pas les propriétés exactes du matériau, mais peuvent être considérés comme des propriétés apparentes dans le sens qu'elles sont suffisantes pour reproduire l'allumage piloté des matériaux.

Les expériences nécessaires ont été publiées dans un précédent article [7]. Ces expériences ont été menées à l'aide du FPA (Fire Propagation Apparatus). Trois lits composés d'aiguilles de pin de différentes porosités ont été considérés soumis à des flux incidents entre le flux minimum nécessaire pour l'allumage et 30kW/m^2 .

Le papier est organisé de la manière suivante : dans le second paragraphe le modèle est présenté et les propriétés à déterminer à partir des expériences sont identifiées. Dans le cadre des lits de combustibles végétaux, l'établissement d'une approximation à haut flux est difficile dans la mesure où les pertes radiatives et convectives doivent être prises en compte. En conséquence, les propriétés des matériaux sont déterminées à partir d'une procédure d'optimisation (Algorithme génétique) entre le modèle et les données expérimentales en considérant le coefficient d'échange convectif comme une propriété du matériau. Les résultats sont analysés dans une deuxième section et montrent qu'une approximation générale à haut flux peut être obtenue. Cette solution sert de guide pour simplifier la procédure pour déterminer les propriétés à partir des données d'allumage. Cette procédure est décrite dans le troisième paragraphe.

2. Modèle

2.1 Description du modèle.

Le modèle développé est basé sur le critère de température d'allumage. Le problème physique est schématisé sur la Fig. 1.

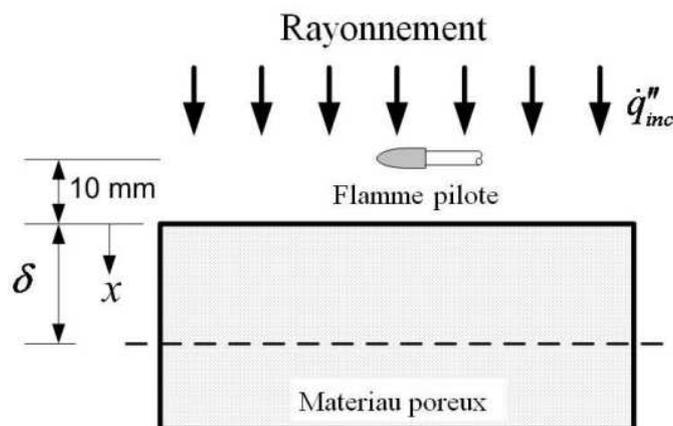


Figure 1. Modèle thermique du problème d'allumage piloté.

La formulation du modèle est basé sur les hypothèses suivantes: i) Modèle a une dimension; ii) La litière est traitée comme un matériau continu équivalent, les phases solide et gazeuse sont en équilibre thermique; iii) Les éléments en phase solide sont thermiquement fins et secs; iv) Les particules restent inertes durant l'ensemble du processus de chauffe; v) (produit de la porosité, de la masse volumique et de la capacité thermique du gaz) $\alpha_g \rho_g C_{pg}$ est négligeable devant le même produit du matériau $\alpha_k \rho_k C_{pk}$; vi) la profondeur du lit de combustible concernés par le processus de chauffage est le libre parcours moyen du

rayonnement, $\delta = 4 / \alpha_k \sigma_k \alpha_{radk}$; vii) Les flux de chaleur convectifs et diffusifs à la limite supérieure et inférieure de la couche de combustible mise en jeu ($x=0$ and $x=\delta$ in Fig. 1) sont représentés par un coefficient global d'échange, h_{conv} ; viii) La divergence du flux radiatif net est exprimée en utilisant l'approximation de Schuster-Schwarzschild, considérant les particules végétales comme des corps noirs; ix) L'allumage piloté intervient quand la température atteint la température d'allumage ; x) La transmittivité des gaz de pyrolyse est totale.

En prenant compte des hypothèses précédentes et que $a_b = 1 - \exp(-2 \frac{\alpha_k \sigma_k \alpha_{k,rad}}{4} \delta)$ peut être vu come l'absorptivité de la couche de combustible, il vient que :

$$\alpha_k \rho_k C_{pk} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{a_b}{\delta} \dot{q}_{inc}'' - \frac{2a_b}{\delta} \sigma \bar{T}^4 + \frac{h_{conv}}{\delta} (T_\infty - \bar{T}) \quad (1)$$

Nous pouvons voir que l'équation précédente possède une forme similaire à l'équation de transfert de chaleur pour un solide thermiquement fin avec son épaisseur remplacé par δ . Le flux critique d'allumage est le plus petit flux de chaleur où la température atteint T_{ig} , la température d'allumage (hypothèse ix). L'équation pour le flux critique d'allumage est donnée par :

$$\dot{q}_{inc,cr}'' = 2\sigma(T_{ig}^4 - T_\infty^4) + \frac{h_{conv}}{a_b} (T_{ig} - T_\infty) \quad (2)$$

2.2 Propriétés 'apparentes'

Le modèle précédent requiert un nombre de propriétés qui peuvent être soit facilement mesurées, soit obtenues dans la littérature et d'autres sont inconnues. C'est le cas pour C_{pk} , qui est la chaleur spécifique de la végétation. En accord avec des méthodes antérieures pour déterminer cette propriété, cette dernière est considérée comme une propriété "apparente" et est obtenue des résultats expérimentaux. Il en est de même pour $\dot{q}_{inc,vr}''$ qui est le flux critique d'allumage vrai et pour T_{ig} qui est la température d'allumage, facilement déductible de l'Eq. 2.

2.3 Solutions approchées

Si les pertes radiatives sont négligées, la solution asymptotique du problème dans le cas de fort flux de chaleur émis, peut être écrite:

$$\frac{1}{t_{ig}} = \frac{a_b}{\delta \alpha_k \rho_k C_{pk} (T_{ig} - T_\infty)} [\dot{q}_{inc}'' - 0.5 \dot{q}_{inc,cr}''] \quad (3)$$

$$\text{avec: } \dot{q}_{int}'' = 0.5 \dot{q}_{inc,cr}'' \quad (4)$$

Au contraire, si les pertes convectives sont négligées, Delichatsios [2] fournit une solution asymptotique pour un matériau thermiquement fin à haut flux:

$$\frac{1}{t_{ig}} = \frac{a_b}{\delta \alpha_k \rho_k C_{pk} (T_{ig} - T_\infty)} [\dot{q}_{inc}'' - 0.3 \dot{q}_{inc,cr}''] \quad (5)$$

Des solutions précédentes, une procédure peut être utilisée pour déterminer la chaleur spécifique et le flux critique d'allumage. Pour des hauts flux de chaleur, l'inverse du temps d'allumage expérimental est tracé en fonction du flux incident appliqué, ce qui donne une ligne droite. De l'Eq. 4 (ou 6), le flux de chaleur critique d'allumage peut être déterminé de l'intersection de la ligne droite avec l'axe des x tandis que la chaleur spécifique est obtenue par la pente de la droite (Eq.3 ou 5).

Pour l'allumage d'un lit de végétation, le coefficient d'échange h_{conv} est difficile à estimer et les pertes convectives et radiatives peuvent être de même magnitude. Les propriétés inconnues, C_{pk} et $\dot{q}_{inc,cr}''$, et le coefficient d'échange global h_{conv} , peuvent être obtenus d'une procédure d'optimisation entre les prédictions du modèle et les données expérimentales. L'optimisation est faite en utilisant l'algorithme génétique (AG). Cette méthode d'optimisation est décrite dans [8].

3. Analyse

Le Tableau 1 montre les propriétés des matériaux et le coefficient d'échange obtenus par AG.

| | h_{conv} (W/m ²) | C_{pk} (kJ/kg K) | $\dot{q}_{inc,cr}''$ (kW/m ²) | $T_{ig,GA}$ (K) | $\dot{q}_{inc,cr}''$ (kW/m ²) Exp. |
|-----|--------------------------------|-----------------------|--|-----------------|--|
| MP1 | 8 | 2.56 | 21.99 | 643 | 15.00 |
| MP2 | 10 | 2.39 | 22.52 | 640 | 13.75 |
| MP3 | 8 | 2.56 | 18.08 | 610 | 12.50 |

Table 1. Propriétés de litières végétales déterminées par le GA.

La chaleur spécifique apparente du pin maritime déduites des tests des trois configurations testées sont proches les unes des autres avec une différence de moins de 7%, ce qui montre la fiabilité de la méthode. Les solutions obtenues sont comparées aux résultats expérimentaux dans la Fig 2.

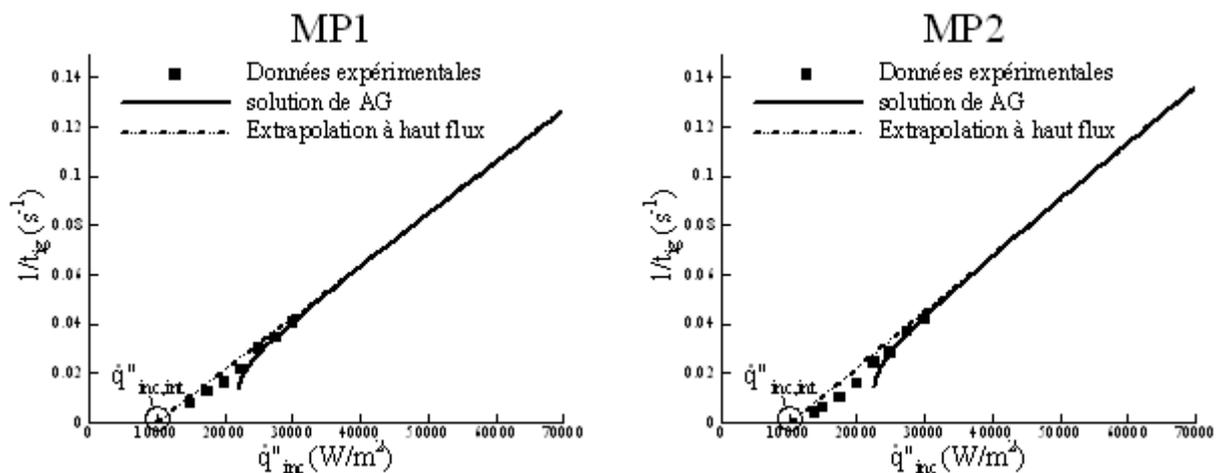
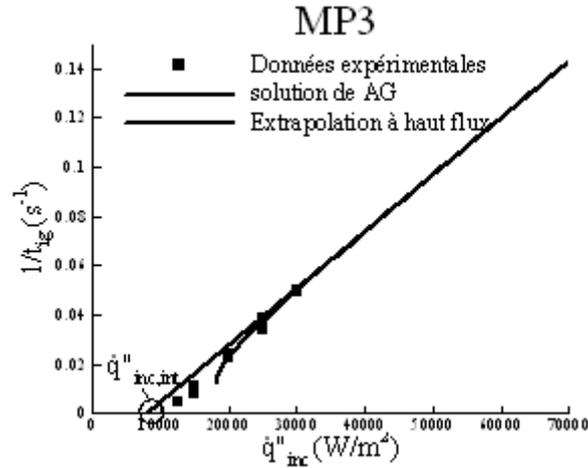


Figure 2. Comparaison entre AG et l'expérience.



Pour de haut flux, le modèle est en bonne adéquation avec l'expérience. Par contre, pour des plus petits, un second type d'allumage est observé. Ce changement est attribué à l'oxydation du résidu charbonneux précédant l'apparition de la flamme. A partir des résultats issus de AG, nous pouvons en déduire une solution de l'Eq.1:

$$\frac{1}{t_{ig}} = \frac{a_b}{\delta\alpha_k \rho_k C_{pk} (T_{ig} - T_{\infty})} [\dot{q}''_{inc} - \beta \dot{q}''_{inc,cr}] \quad (7)$$

La moyenne des valeurs est $\beta=0.44$. Le temps d'allumage versus flux de chaleur incident peut être tracé sous forme adimensionnelle avec $\tau = \frac{\delta\alpha_k \rho_k C_{pk} (T_{ig} - T_{\infty})}{a_b \dot{q}''_{inc,cr}}$ et $\varphi = \frac{\dot{q}''_{inc}}{\dot{q}''_{inc,cr}}$. D'où :

$$\frac{\tau}{t_{ig}} = \varphi - 0.44 \quad (8)$$

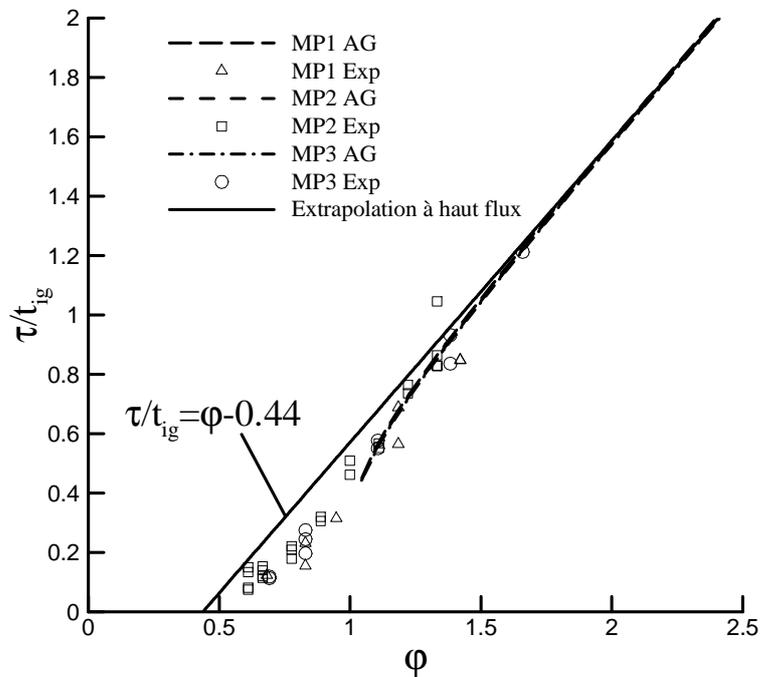


Figure 3. Comparaison entre le GA et l'expérience en valeurs adimensionnées.

4. Méthodologie pour déterminer les propriétés d'un matériau

A partir de l'Eq.7. Il faut suivre la méthodologie suivante : i) Tracer l'inverse du temps d'allumage en fonction du flux incident. ii) Tracer une régression linéaire pour les hauts flux. iii) De l'intersection de l'asymptote avec l'axe des x , en déduire le flux critique d'allumage avec $\dot{q}_{inc,cr}'' = \frac{\dot{q}_{int}''}{0.44} = 2.27\dot{q}_{int}''$. La température d'allumage est facilement obtenue via Eq. 2. iv) Déterminer la valeur de la chaleur spécifique de la pente de l'asymptote.

5. Conclusion

L'apport majeur de cet article est de proposer une méthode pour obtenir les propriétés clés d'inflammation d'un lit végétal. La méthodologie est basée sur l'utilisation d'un modèle thermique simple décrivant le chauffage d'un lit par un flux de chaleur. Trois lits d'aiguilles de Pin Maritime à différentes porosités sont considérés. Une approximation à hauts flux, reliant linéairement l'inverse du temps d'allumage au rayonnement incident, est obtenue par une procédure d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques entre le modèle et les données expérimentales, ceci évitant de faire des hypothèses sur la magnitude des pertes convectives et radiatives. Cette solution approchée sert de guide pour déterminer la chaleur spécifique "apparente" et le flux critique d'allumage à partir des données expérimentales. Cette procédure consiste à tracer l'inverse des temps d'allumage mesuré en fonction du flux de chaleur incident et d'en déduire une régression linéaire. Cette solution donne le flux critique d'allumage et la chaleur spécifique apparente, à partir de l'intersection de la régression linéaire avec l'axe des x et de la pente de cette dernière, respectivement. Le modèle, avec la chaleur spécifique apparente et le flux critique comme données d'entrées, fournit un bon accord avec les données expérimentales pour un flux supérieur à 20 kW/m². Le mécanisme d'allumage pour des flux plus petits apparaît être différent. Cette différence est attribuée à l'oxydation du résidu carbonneux qui précède l'apparition de la flamme proche du flux critique et fournit un apport supplémentaire d'énergie pour le combustible solide.

References

- [1] Delichatsios MA, Panagiotou T, Kiley F. The Use of Time to Ignition Data for Characterizing the Thermal Inertia and the Minimum (Critical) Heat Flux for Ignition or Pyrolysis, Combustion and Flame 1991; 84:323-332.
- [2] Delichatsios MA. Ignition Times for Thermally Thick and Intermediate Conditions in Flat and Cylindrical Geometries. Fire Safety Science-Proceedings of the 6th International Symposium, 2000. p. 233-44.
- [3] Quintiere JG. Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons, 2006.
- [4] Spearpoint MJ, Quintiere JG, Predicting the Piloted Ignition of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model-Effect of Species, Grain Orientation and Heat Flux. Fire Safety J. 2001; 36: 391-415.
- [5] Delichatsios M, Paroz B, Bhargava A. Flammability Properties for Charring Materials. Fire Safety J. 2003; 38: 219-228.
- [6] Hagen M, Hereid J, Delichatsios MA, Zhang J, Bakirtzis D. Flammability assessment of fire-retarded Nordic Spruce wood using thermogravimetric analyses and cone calorimetry. Fire Safety J. 2009; 44; 1053-1066.
- [7] Mindykowski P, Fuentes A, Billaud Y, Consalvi JL, Porterie B. Piloted Ignition of Wildland fuel Materials. 6th Mediterranean Combustion Symposium, Porticcio, France, 2009.
- [8] Lautenberger C, Rein, G, Fernandez-Pello C, The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. Fire Safety J. 2006;41;204-214