



**HAL**  
open science

## Etude expérimentale de trois flammes laminaires de combustibles végétaux

Virginie Tihay, Albert Simeoni, Paul-Antoine Santoni, Jean-Pierre Garo

► **To cite this version:**

Virginie Tihay, Albert Simeoni, Paul-Antoine Santoni, Jean-Pierre Garo. Etude expérimentale de trois flammes laminaires de combustibles végétaux. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00161607

**HAL Id: hal-00161607**

**<https://hal.science/hal-00161607>**

Submitted on 29 Aug 2007

**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.

# ETUDE EXPERIMENTALE DE TROIS FLAMMES LAMINAIRES DE COMBUSTIBLES VEGETAUX

Virginie TIHAY<sup>a</sup>, Albert SIMEONI<sup>a</sup>, Paul-Antoine SANTONI<sup>a</sup> et Jean-Pierre GARO<sup>b</sup>

<sup>a</sup>SPE – UMR 6134 CNRS, Università di Corsica, Campus Grossetti,  
BP 52, 20250 Corte, France.

bLCD – UPR 9028 CNRS, ENSMA, Université de Poitiers, 1 avenue Clément Ader, Téléport  
2 – BP 40109, 86961 Futuroscope Chasseneuil Cédex, France.

tihay@univ-corse.fr, simeoni@univ-corse.fr, santoni@univ-corse.fr, garo@lcd.ensma.fr

**Résumé :** Ce travail a pour but d'améliorer la compréhension du couplage entre la flamme et la phase solide. L'étude s'est portée sur la caractérisation de flammes de diffusion laminaires instationnaires et axisymétriques de trois combustibles d'espèces différentes représentatives de la flore méditerranéenne, à savoir *Pinus laricio*, *Erica arborea* et *Cistus monspeliensis*. L'analyse a montré le rôle prédominant de la phase solide dans le comportement des flammes. L'étude des gaz de dégradation a permis une compréhension plus fine des phénomènes intervenant dans la phase gazeuse.

**Mots clés :** Flamme de diffusion laminaire, gaz de dégradation, couplage flamme phase solide, feux de forêt

Chaque année, des millions d'hectares de forêts partent en fumée à travers le monde. Au cours des dernières années, la communauté scientifique s'est de plus en plus intéressée à l'étude des feux de forêt. Ainsi, durant les cinquante dernières années, trois types d'approche ont vu le jour : la première se base sur des modèles statistiques [1], la seconde prend en compte des modèles empiriques [2], enfin les modèles physiques [3-5] sont basés sur la description détaillée des mécanismes de transfert de chaleur gouvernant la propagation des feux. Dans les modèles multiphasiques actuels, certains aspects encore mal connus doivent être instrumentés de manière fine afin de mieux les comprendre. Cette étude a pour but d'améliorer la compréhension du couplage entre la flamme et la phase solide. Elle s'est principalement focalisée sur l'influence de la perte de masse du végétal et de la composition des gaz de dégradation sur les flammes. Pour ce faire, nous avons caractérisé des flammes de diffusion laminaires instationnaires et axisymétriques de trois combustibles : *Pinus laricio*, *Erica arborea* et *Cistus monspeliensis*. Les distributions de température le long de l'axe vertical de la flamme et dans le broyat, la perte de masse et la géométrie visible des flammes ont été mesurées expérimentalement pour ces trois espèces. Un système de four couplé à un chromatographe en phase gazeuse a permis de déterminer les gaz dégagés par la dégradation thermique de ces végétaux.

## 1. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

### 1.1. Description des combustibles

Avant chaque expérience, les trois végétaux sont séchés 24 h dans une étuve à 60°C, ce qui permet de les déshydrater sans en dénaturer la composition. Afin de limiter l'influence de la géométrie des combustibles sur leur combustion, les échantillons sont broyés et tamisés. Seules les particules de taille comprise entre 0,6 et 0,8 mm ont été sélectionnées. Les rapports surface-volume des broyats sont présentés dans le tableau 1.

	<i>Pinus laricio</i>	<i>Erica arborea</i>	<i>Cistus monspeliensis</i>
Rapport surface-volume ( $m^{-1}$ )	6411	6755	7198

Tableau 1 : Rapports surface-volume des particules des broyats.

## 1.2 Caractérisation des flammes de diffusion axisymétriques

L'étude des flammes a été réalisée à l'aide du dispositif expérimental présenté par la figure 1. Une cellule de pesée permet d'obtenir la perte de masse du combustible en fonction du temps. Un arbre de 11 thermocouples est positionné au-dessus du broyat le long de l'axe vertical de la flamme tous les centimètres. Six thermocouples espacés de 5 mm sont disposés radialement au niveau du broyat. La flamme est visualisée à l'aide d'une caméra numérique installée à l'intérieur de l'enceinte. La caméra est placée sur le côté. Elle permet d'observer le comportement des flammes, leurs hauteurs et les effets hydrodynamiques. Le combustible se présente sous la forme d'un cylindre de 3,5 cm de diamètre et de 5 mm de haut, correspondant à une masse de 1,5 g. La porosité des broyats est d'environ 0,76. L'allumage est réalisé avec 0,7 ml d'éthanol.

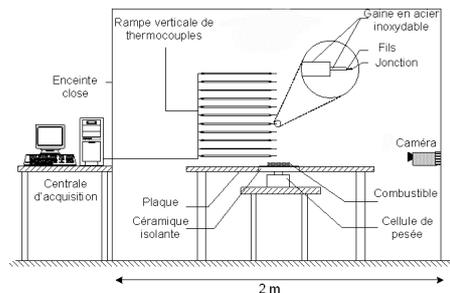


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental pour l'étude des flammes de végétaux

## 1.3. Analyse des gaz de dégradation

L'étude des gaz de dégradation émis par les trois combustibles végétaux a été réalisée grâce à un four couplé à un chromatographe en phase gazeuse. Des études de thermogravimétrie [6] ont montré que la dégradation des végétaux se produit essentiellement entre 280 et 450°C. Nous avons retenu cette plage de température pour analyser les gaz de dégradation émis par les végétaux étudiés.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

### 2.1. Observations globales de la combustion des broyats

Trois étapes sont observées durant la combustion des végétaux : une phase d'allumage, une phase de régression de la flamme et une phase d'extinction. Durant la première période, la flamme est influencée par la présence d'éthanol. La flamme pulse à 7 Hz. Cette étape dure 60 s. Pendant la phase de régression, l'alcool a complètement brûlé. Le combustible est uniquement constitué des gaz de dégradation des broyats. La flamme est laminaire. La hauteur et le rayon de la flamme diminuent doucement jusqu'à son extinction. La phase solide est essentiellement composée de charbon à la surface du broyat et de particules imbrûlées près de la céramique.

## 2.2. Description de la phase solide

### 2.2.1. Températures des broyats

La montée en température du broyat est due à trois modes de transferts thermiques. Le rayonnement de la flamme entraîne une augmentation de la température de surface. La température de surface augmente progressivement avec une vitesse de chauffe constante lors du rapprochement de la flamme vers le broyat. Durant la phase de régression, le rayon de la flamme décroît. Au voisinage de la zone de réaction, la température de surface fluctue ce qui est dû à un phénomène de convection. Sur les profils de température, un palier apparaît ce qui indique qu'un équilibre thermique semble avoir lieu. Après le passage de la flamme, la température diminue. Enfin, la mise en température de la surface permet aux particules en profondeur de chauffer par conduction.

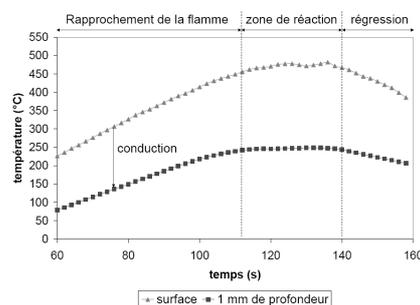


Figure 2 : Températures à la surface et à 1 mm de profondeur dans le broyat de *Pinus laricio* à 5 mm du centre durant la phase de régression.

### 2.2.2. Perte de masse des combustibles

Grâce à la cellule de pesée placée sous le combustible dans le dispositif présenté sur la figure 1, la perte de masse des combustibles peut être observée en fonction du temps. La figure 3 montre les courbes moyennes sur cinq expériences pour les différents combustibles.

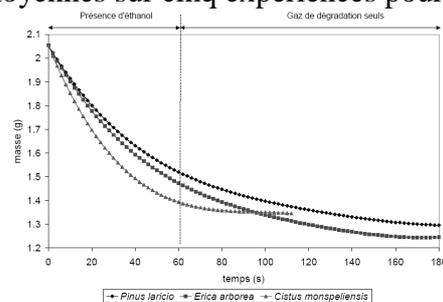


Figure 3 : Perte de masse moyennes des six végétaux au cours du temps

Pendant la phase d'allumage, la perte de masse correspond à la combustion de l'éthanol et du broyat. Durant cette phase, la perte de masse la plus importante est observée pour *Cistus monspeliensis*. On trouve ensuite *Erica arborea* suivi par *Pinus laricio*. Ce comportement est lié aux rapports surface-volume des particules. Les broyats ayant la perte de masse la plus importante sont en effet ceux ayant les plus grands rapports surface-volume [7]. Durant la phase laminaire, la perte de masse diminue. Les taux de combustion dépendent alors des propriétés thermiques des broyats. Plus la diffusivité des broyats est grande, plus la température au sein du broyat est importante et plus le broyat se dégrade et perd de la masse. La perte de masse globale des combustibles est toutefois assez faible (environ 15 % de la masse combustible). Ces valeurs peuvent être expliquées par la faible conductivité thermique

des broyats, par leur compacité et par l'apparition d'un résidu charbonneux à leur surface jouant un rôle d'isolant thermique.

### 2.3. Description de la phase gazeuse

#### 2.3.1. Composition des gaz de dégradation

Le tableau 2 donne les principaux gaz analysés lors de la dégradation des combustibles. Les gaz de dégradation sont principalement composés de CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, d'une faible quantité de H<sub>2</sub> et d'hydrocarbures en C<sub>2</sub> et C<sub>4</sub> (Autres gaz). Ces gaz proviennent de la dégradation des extractibles et des composés ligno-cellulosiques composant les végétaux [8]. La variation de composition apparaît principalement au niveau de CO<sub>2</sub> et des hydrocarbures.

	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Autres gaz
<i>Pinus laricio</i>	0,129	0,567	0,148	0,037	0,119
<i>Erica arborea</i>	0,132	0,674	0,111	0,019	0,064
<i>Cistus monspeliensis</i>	0,124	0,573	0,164	0,034	0,105

Tableau 2 : Fractions massiques des principaux gaz de dégradation.

#### 2.3.2. Hauteur visible des flammes

La figure 4 présente la hauteur de flamme en fonction du débit volumique des gaz de dégradation pendant la phase de régression. Le débit volumique est calculé à partir de la perte de masse des broyats et de la composition des gaz dus à leur dégradation (tableau 2). Durant la phase laminaire, la hauteur de flamme et le débit volumique de gaz sont proportionnels. Le facteur de proportionnalité est homogène à l'inverse d'un coefficient de diffusion [9]. La hauteur visible des flammes est donc liée à la perte de masse mais aussi à la composition des gaz de dégradation des broyats.

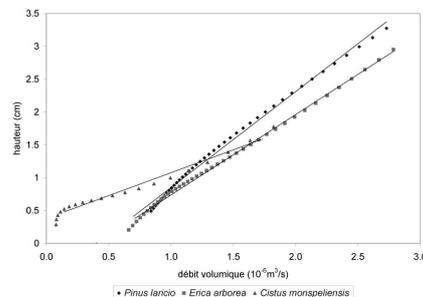


Figure 4 : Hauteur visible des flammes en fonction du débit volumique des gaz de dégradation pendant la phase de régression.

#### 2.3.3. Températures au sein des flammes

Les figures 5 présentent les températures moyennes le long de l'axe vertical des flammes pour des hauteurs de flammes de 3 et 1 cm. Nous pouvons distinguer trois zones : l'injection des gaz, la flamme et le panache. Dans la zone d'injection, la température augmente progressivement jusqu'à l'inflammation des gaz. Lorsque la flamme se rapproche de la surface du broyat, la zone d'injection diminue jusqu'à disparaître (figure 5b). La température maximale est atteinte dans la flamme. Ces maxima diffèrent selon les combustibles et dépendent de la composition des gaz de dégradation. Dans le panache, les températures diminuent (entre 100 et 600°C). Les températures sont plus fluctuantes car le panache devient

légèrement turbulent. Dans cette zone, les gaz brûlés se mélangent avec l'air ambiant ce qui entraîne un refroidissement des températures.

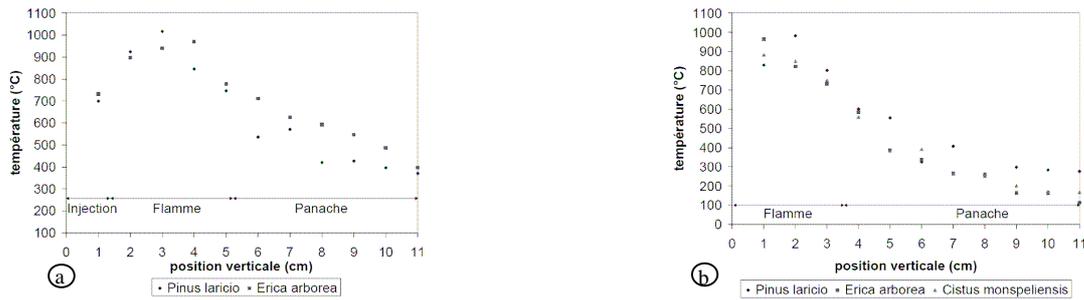


Figure 5 : Températures moyennes le long de l'axe vertical pour des flammes d'une hauteur visible a- de 3 cm b- de 1 cm.

## CONCLUSION

Cette étude met clairement en évidence le couplage existant entre la phase solide et la flamme. Quatre phénomènes pilotent le comportement de la phase solide, à savoir le rapport surface-volume, la conductivité thermique du broyat, sa compacité et la formation du résidu charbonneux en surface du combustible. La perte de masse de la phase solide influence le comportement de la flamme. La hauteur visible est proportionnelle au débit de gaz de dégradation émis par le végétal et dépend de leur composition. Les différences de température apparaissent principalement dans la zone de flamme où les réactions chimiques ont lieu. Dans le panache, les gaz chauds sont refroidis par l'air ambiant ce qui diminue les variations de température dans cette zone.

## Références

- [1] A.G. McArthur, Weather and grassland fire behaviour, *Australian Forest and Timber Bureau*, 1966.
- [2] R.C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, *USDA Forest Service*, INT-115, 1972.
- [3] F.A. Albini, A model for fire spread in wildland fuels by radiation, *Combustion Science and Technologie*, 42, pp229-258, 1985.
- [4] F. Morandini, A Simeoni, P.A Santoni, et J.H. Balbi, A model for the spread of fire across a fuel-bed incorporating the effects of wind and slope, *Combustion Science and Technology*, 177, pp1381-1418, 2005.
- [5] B. Porterie, D. Morvan, J.C. Loraud et M. Larini, Firespread through fuel beds: Modelling of wind aided fires and induced hydrodynamics, *Physics of Fluids*, 12, pp1762-1781, 2000.
- [6] M.J. Safi, I.M. Mishra et B. Prasad, Global degradation kinetics of pine needles in air, *Thermochimica acta*, 412, pp155-162, 2004
- [7] J.L. Dupuy, Slope and fuel load effects on fire behaviour: Laboratory experiments in pine needled fuel beds, *International Journal of Wildland Fire*, 5, pp153-164, 1995.
- [8] J.J.M. Orfão, F.J.A. Antunes et J.L. Figueiredo, Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model, *Fuel*, 78, pp349-358, 1999.
- [9] R. Borghi et M. Destriau, La combustion et les flammes, 1995.