



Influence de l'échelle sur la dynamique de combustion de végétaux

Nathalie CHIARAMONTI, Elodie ROMAGNOLI, Toussaint BARBONI et Paul-Antoine SANTONI
SPE, UMR 6134 CNRS, Université de Corse, Campus Grimaldi, BP 52, 20250 Corte, France,
chiaramo@univ-corse.fr ; romagnoli@univ-corse.fr ; barboni@univ-corse.fr; santoni@univ-corse.fr

Résumé :

Nous avons étudié le comportement au feu des aiguilles de deux espèces de pin, *P. pinaster* et *P. laricio* afin de déterminer quels protocoles expérimentaux et plus particulièrement quelles échelles permettent de caractériser au mieux leur combustion en laboratoire et dont les résultats pourraient être extrapolés à une échelle supérieure. Deux configurations expérimentales ont été utilisées, le cône calorimètre (ISO 5660) et le LSHR (ISO 9705) afin d'observer la dynamique de combustion et les fumées émises. Chaque dispositif correspond à une échelle de combustion. L'étude du comportement au feu de *P. pinaster* a révélé des différences importantes pour la puissance dégagée aux deux échelles. L'efficacité de la combustion est apparue peu dépendante de l'échelle, contrairement à la production totale des fumées et aux facteurs d'émission des suies. La dynamique de combustion des aiguilles de *P. laricio* semble moins affectée par le changement d'échelle, de plus, thermiquement plus fines, elles présentent une valeur plus faible pour le facteur d'émission des suies.

Mots clés : combustion, changement d'échelle, calorimétrie.

1. Introduction

Les incendies de végétation sont toujours très nombreux et les surfaces brûlées demeurent considérablement conséquentes. Avec le réchauffement climatique, le risque incendie pourrait s'accroître et entraîner des conséquences humaines et environnementales encore plus importantes. Ces incendies sont caractérisés par de nombreuses échelles de temps et d'espace. Une approche multi-physique et multi-échelle est nécessaire pour aborder la complexité de ces phénomènes. La communauté scientifique, en étudiant la propagation des feux, s'emploie à fournir des outils d'aide à la décision pour la sécurité incendie. La modélisation permet d'expliquer et de simuler le phénomène des incendies mais nécessite de disposer de données expérimentales. De nombreux dispositifs existent pour caractériser les propriétés thermiques et ont fait l'objet de nombreux travaux, l'analyse thermogravimétrique [1, 2], le cône calorimètre [3, 4], le Large Scale Heat Release LSHR [5, 6], les brûlages dirigés [7-9]. Cependant, certaines données sont peu accessibles (puissance dégagée, facteurs d'émission, opacité des fumées...) car de nombreuses difficultés sont rencontrées comme par exemple la non-reproductibilité des tests de terrain.

De nombreuses molécules sont formées lors de la combustion des végétaux dans des conditions non maîtrisées, [10,11]. Ces substances sont le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils et semi-volatils, les oxydes d'azote et les particules. Les fumées obscurcissent la visibilité, de plus les particules représentent une source de rayonnement thermique. Elles peuvent varier aussi en coloration, elles ont donc des propriétés optiques différentes [12]. Du fait de l'importance des émissions de fumées et de leurs effets sur la santé, il est primordial de pouvoir les quantifier afin d'évaluer le risque potentiel qu'elles représentent pour les personnels intervenants et les populations exposées.

Les études sur le comportement au feu des litières d'aiguilles de pin sont nombreuses pour plusieurs raisons [13, 14]. Les futaies de pin (tels *P. pinaster* et *P. laricio*) représentent un enjeu patrimonial fort et un enjeu économique important. De plus, les incendies dans ces futaies sont dévastateurs en raison de la forte combustibilité de ces espèces végétales.

Afin d'expliquer au mieux le phénomène de combustion, il apparaît nécessaire que les expériences réalisées au laboratoire soient les plus proches des conditions réelles d'incendies tout en étant facilement réalisables. A travers cette étude, nous cherchons ainsi à déterminer l'échelle la plus appropriée. Il s'agit plus particulièrement de déterminer quelle échelle de combustion nous permettra de caractériser au mieux la combustion de ces végétaux mais aussi de vérifier si le combustible influence les paramètres mesurés. Cette étude est réalisée grâce aux outils de la calorimétrie à consommation d'oxygène. Différents paramètres sont mesurés pour analyser la dynamique de combustion et l'opacité des fumées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Les combustibles

Les deux espèces de pins étudiées *Pinus pinaster* (Pp) et *Pinus laricio* (Pl) sont caractéristiques de l'écosystème méditerranéen. Les aiguilles sont récoltées dans le centre Corse.

Le ratio surface volume, les pouvoirs calorifiques inférieurs (ΔH_c) ainsi que les analyses élémentaires sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Analyses des combustibles étudiés.

Paramètres	<i>Pinus pinaster</i> (Pp)	<i>Pinus laricio</i> (Pl)
Ratio surface volume (m^{-1})	3057 ± 40	4360 ± 46
ΔH_c ($kJ.kg^{-1}$) ¹	22684	21214
Analyse élémentaire (% <i>massique végétal sec</i>) ¹		
C	53,05 %	50,39 %
H	6,33 %	6,72 %
N	< 0,30 %	< 0,30 %
O	39,35 %	39,65 %

2.2. Expérimentation

L'étude est réalisée grâce aux outils de la calorimétrie à consommation d'oxygène. Deux configurations expérimentales sont utilisées (Figure 1), le cône calorimètre (ISO 5660) (petite échelle) et le LSHR (ISO 9705) (grande échelle) pour évaluer l'effet de l'échelle sur la dynamique de combustion et la production des fumées. Les flammes ont une forme similaire (quasi cylindrique) pour les deux dispositifs expérimentaux et le changement d'échelle modifie principalement la hauteur et la largeur de la flamme. Les durées des expériences sont sensiblement les mêmes (environ 100 s) et la charge de combustible est conservée alors que la masse de combustibles varie pour les deux échelles. Ces dispositifs expérimentaux permettent de mesurer la perte de masse, les productions de fumées ainsi que celles du monoxyde et du dioxyde de carbone (analyseur Infra Rouge Non Dispersif, IRND) et la consommation de dioxygène lors d'une expérience de combustion. Un analyseur paramagnétique permet de le quantifier. Les mesures réalisées sont ensuite utilisées pour déterminer la puissance calorifique et l'enthalpie effective de combustion.

En ce qui concerne les fumées, l'opacité qui en résulte, ainsi que les suies générées par les combustions des végétaux sont également étudiées à partir des mesures du coefficient d'extinction (laser à hélium-néon de 0,5 mW avec photodétecteurs principaux et de référence).

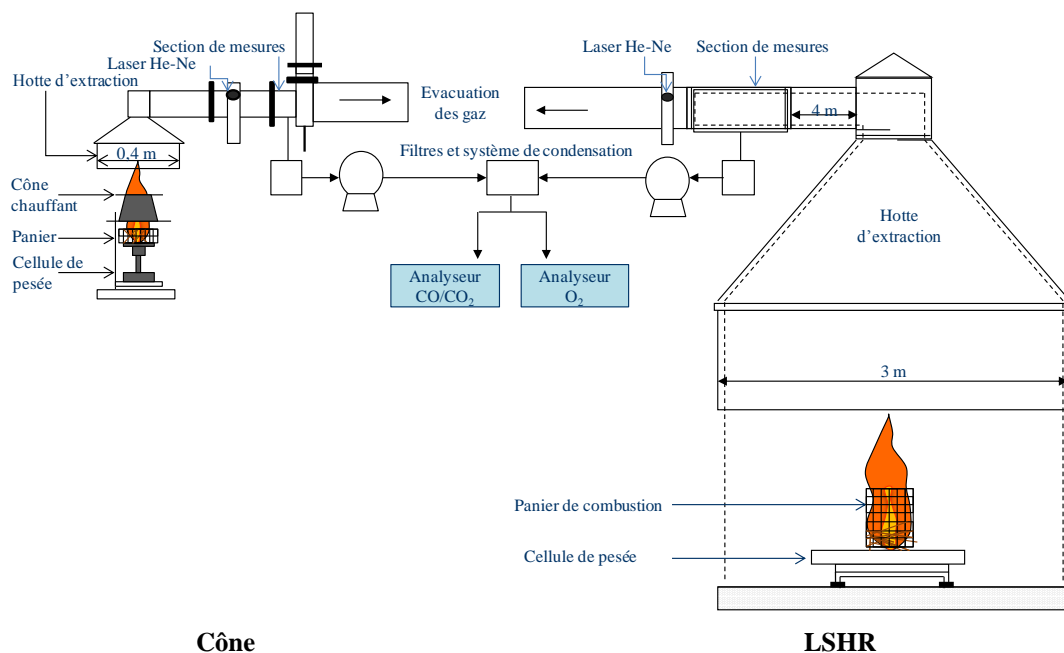


Figure 1. Dispositifs expérimentaux

¹ Moyennes des analyses effectuées par SOCOR, ZAC de Luc, 59187 DECHY et NEOTIM, 54 rue Gustave Eiffel, 81000 ALBI

Afin d'effectuer des comparaisons entre les échelles, les protocoles expérimentaux sont adaptés. En effet, certains paramètres tels que le support de la combustion (panier contenant les aiguilles de pin) et l'allumage sont modifiés par rapport à de précédentes études concernant la combustion des végétaux [14].

La masse de combustible brûlée aux différentes échelles est également ajustée afin de conserver une même charge de 1,20 kg.m² pour *Pp* et 1,04 kg.m² pour *Pl*. Il en est de même pour la perméabilité du lit.

Le même type d'allumage est réalisé aux deux échelles. En effet, si le cône calorimètre dispose d'une résistance chauffante réglable, ce n'est pas le cas du LSHR. De ce fait, nous avons choisi d'allumer le combustible au moyen d'une mèche imbibée d'éthanol. Le tableau 2 présente les adaptations réalisées.

Avant l'expérimentation, les aiguilles de pin sont séchées à 60°C pendant 24 heures. Le pourcentage de réhydratation du végétal se produisant durant la préparation des expériences est identique pour les deux végétaux, il est de 1,5 %.

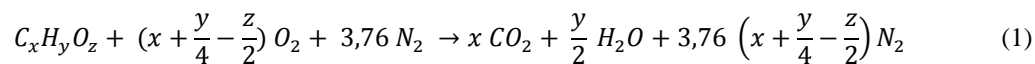
Tableau 2 : Les adaptations réalisées.

Combustible	<i>Pinus pinaster (Pp)</i>		<i>Pinus laricio (Pl)</i>	
	Cône	LSHR	Cône	LSHR
Panier grillagé				
Diamètre (cm)	12,6	35	12,6	35
Charge (kg. m ²)	1,20		1,04	
Masse moyenne utilisée (g)	15,18	116,25	13,52	101,58
Ignition	Ethanol			

2.3. La dynamique de combustion : les paramètres mesurés

Il s'agit de déterminer la puissance calorifique et l'efficacité de la combustion.

Dans le cas d'une combustion complète des aiguilles de pin, la réaction stœchiométrique s'écrit :



L'expression de la puissance calorifique est la suivante [15] :

$$\dot{q} = \left(E_{O_2}\phi - (E_{CO} - E_{O_2}) \frac{1 - \phi \frac{X_{CO}^A}{X_{O_2}^A}}{2}\right) \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^{A_0} \quad (2)$$

Où

- E_{O_2} Constante calorifique déterminée à partir de l'analyse élémentaire et du *PCI* du combustible sec (Tableau 3)
- ϕ Facteur de consommation de dioxygène
- E_{CO} Energie dégagée par unité de masse de dioxygène consommé pour la combustion de CO en CO₂ (17,6 MJ.kg⁻¹)
- $X_{O_2}^A$ Fraction molaire de dioxygène mesurée au niveau des analyseurs, liée au débit de dioxygène
- X_{CO}^A Fraction molaire de monoxyde de carbone mesurée au niveau des analyseurs
- $X_{H_2O}^0$ Fraction molaire d'eau estimée par mesure de l'humidité de l'air
- \dot{m}_e Débit massique
- M_a Masse molaire de l'air entrant
- M_{O_2} Masse molaire de dioxygène
- α Facteur d'expansion égal à 1,105 [16].

Tableau 3 : Constantes calorifiques.

Combustible	<i>Pinus pinaster (Pp)</i>	<i>Pinus laricio (Pl)</i>
Coefficient stœchiométrique pour O ₂	4,75	4,62
Energie dégagée par unité de masse O ₂ consommée (MJ.kg ⁻¹)	13,34	13,76

L'expression de l'efficacité de combustion est :

$$\chi = \frac{\Delta E}{\Delta E_{max}} \quad (3)$$

avec
$$\Delta E = \int_0^{t_f} \dot{q} dt - \Delta E_{ign} \quad (4)$$

et
$$\Delta E_{max} = m_b \Delta H_c \quad (5)$$

Où

ΔE	Energie totale libérée lors de la combustion
ΔE_{max}	Energie maximale dégagée
t_f	Temps final de combustion
ΔE_{ign}	Energie libérée par le papier imbibé d'éthanol.
m_b	Masse exacte de combustible brûlé = (masse initiale - masse de combustibles imbrûlés) avec prise en compte du pourcentage de réhydratation du végétal.
ΔH_c	Enthalpie de combustion

2.4. La production des fumées : les paramètres mesurés

2.4.1. L'opacité

L'opacité des fumées est déterminée dans le conduit d'évacuation des fumées à partir du coefficient d'extinction k (m^{-1}) d'une lumière rouge émise à une longueur d'onde de 632,8 nm par un laser He-Ne de 0,5 mW . Un thermocouple placé à côté du laser permet de déterminer la température des fumées et d'en déduire le débit volumique à l'emplacement exacte du laser connaissant le débit volumique mesuré en un autre point du conduit d'extraction.

Le coefficient d'extinction peut être exprimé comme le produit de la surface d'extinction spécifique par unité de masse de suies σ_s ($m^2 \cdot kg^{-1}$) et la concentration massique des particules de suies C_{suies} ($kg \cdot m^{-3}$).

$$k = \sigma_s C_s \quad (6)$$

La quantité σ_s dépend de la distribution de la taille et des propriétés optiques des particules de suies présentes dans la fumée ($8300 m^2 \cdot kg^{-1}$). La masse de suies est calculée à partir de la relation suivante :

$$m_s = \int_0^t \left[\frac{k}{\sigma_s} \dot{V}_{smoke} \right] dt \quad (7)$$

Où \dot{V}_{smoke} est le débit massique de fumées en $m^3 \cdot s^{-1}$ et t le temps de combustion.

Afin d'étudier les effets du changement d'échelle sur la production des fumées, notre étude s'est portée aussi sur le taux de fumées dégagées, noté *RSR* (Rate of Smoke Release), et les fumées totales dégagées, noté *TSR* (Total Smoke Release), les deux valeurs sont obtenues à partir de l'opacimètre. Le *RSR* et le *TSR* sont des grandeurs exprimées par unité de surface de végétal ce qui permet la comparaison.

Le *RSR* exprimé en $(m^2 \cdot s^{-1}) \cdot m^{-2}$ est donné par l'équation suivante :

$$RSR = \frac{k \dot{V}_{smoke}}{S_e} \quad (8)$$

Où S_e correspond à la surface occupée par l'échantillon de végétal en m^2 .

Le *TSR* représente la production de fumée par unité de surface du combustible brûlé au cours d'une expérience, il est exprimé en $m^2 \cdot m^{-2}$ et est calculé selon l'équation suivante :

$$TSR = \frac{\int_0^t (k \dot{V}_{smoke}) dt}{S_e} \quad (9)$$

2.4.2. Le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂)

Ils sont quantifiés grâce à l'analyseur Infrarouge Non Dispersif (IRND) des calorimètres. Une calibration est effectuée lors de la mise en place des expériences, les gaz de calibration utilisés ont des concentrations de 2500 ppm pour le CO et de 8 % pour le CO₂.

2.4.3. Les facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions (*FE*) peuvent être utilisés dans les modèles incendies et dans les analyses de risques. Ils facilitent l'estimation des émissions des différents produits émis lors de situations réelles d'incendie. Ils sont le rapport entre la masse de produit identifiée lors de la combustion et la masse exacte de végétal brûlé. Ils sont exprimés en gramme par kilogramme (g.kg⁻¹) [8, 9, 17].

Pour un composé *x*, émis avec une masse *m_x*, on a :

$$FE_x = \frac{m_x}{m_{\text{végétal}}} \quad (10)$$

3. Résultats

3.1. Effet du changement d'échelle et du combustible sur la dynamique de combustion

L'effet du changement d'échelle sur la dynamique de combustion est étudié à partir des comparaisons de la perte de masse au cours du temps, de la puissance calorifique par unité de surface au cours de la combustion et de l'efficacité des combustions. Les résultats exposés correspondent à la moyenne de cinq expériences présentées pour chacune des deux échelles et pour chacun des combustibles.

La figure 2 (a et b) représente les pertes de masse au cours de la combustion. Pour *Pinus pinaster* (*Pp*), il se produit une légère inflexion due à la combustion du papier imbibé d'éthanol et à l'allumage des premières aiguilles puis, les masses respectives décroissent quasi-linéairement pendant 45 secondes à l'échelle du cône et 60 secondes pour le LSHR. La pente de la perte de masse correspondant aux expériences conduites avec le cône est plus importante que pour celles réalisées avec le LSHR avec des pics de vitesses de perte de masse respectivement de 43,7 g.s⁻¹.m⁻² et 35,5 g.s⁻¹.m⁻². Nous observons également que, la masse décroît plus lentement sur la fin des expériences conduites avec le cône calorimètre. En effet, à ce stade de la combustion la vitesse moyenne de la perte de masse dans le cas du cône s'élève à 4,7 g.s⁻¹.m⁻² alors que dans le cas de la combustion avec le LSHR panier celle-ci est de 7,3 g.s⁻¹.m⁻². Ceci est dû à la combustion des résidus charbonneux qui est plus longue. Ce palier n'est pas observable lors de la combustion au LSHR où la combustion des charbons est plus importante pendant la phase de flamme. En effet, lors de la combustion, 24 % de la masse de départ de combustible devraient être retrouvés sous forme de résidus charbonneux après l'extinction de la flamme, ce qui représenterait 3,60 g lors des expériences avec le cône calorimètre et 27,70 g avec le LSHR. Cependant, au moment de l'extinction de la flamme, nous retrouvons, 0,70 g de résidus charbonneux pour les expériences avec le cône calorimètre et 2,88 grammes avec le LSHR ce qui correspond à 19,4 % de la masse potentielle de charbon (et environ 5 % de la masse initiale d'aiguilles) dans le cas du cône et 10,4 % (2,5 % de la masse initiale d'aiguilles) dans le cas du LSHR.

Pour le *pin Laricio* (*Pl*), la pente de la perte de masse dans le cas du LSHR est plus marquée que dans le cas du cône indiquant une combustion plus rapide. Les vitesses de perte de masse sont respectivement de 40,0 g.s⁻¹.m⁻² pour le LSHR et 31,6 g.s⁻¹.m⁻² pour le cône dans les zones quasi-linéaires de perte de masse associées aux deux échelles. Nous observons à la fin de l'expérience que la perte de masse pour les expériences menées avec le cône calorimètre est moins importante qu'à l'échelle du LSHR (la combustion des résidus charbonneux étant plus longue à cette échelle). En effet, si nous retrouvons les 24 % de la masse de combustible sous forme de résidus charbonneux au moment de l'extinction de la flamme cela représenterait respectivement des masses de 3,52 g à l'échelle du cône et 23,28 g à l'échelle du LSHR. Or, lors de nos expériences, nous retrouvons respectivement 0,81 g de charbon (23 % de la masse potentielle de charbon et 5 % de la masse initiale d'aiguilles) et de 3,94 g, soit environ 17 % de la masse potentielle de charbon et 4 % de la masse initiale d'aiguilles.

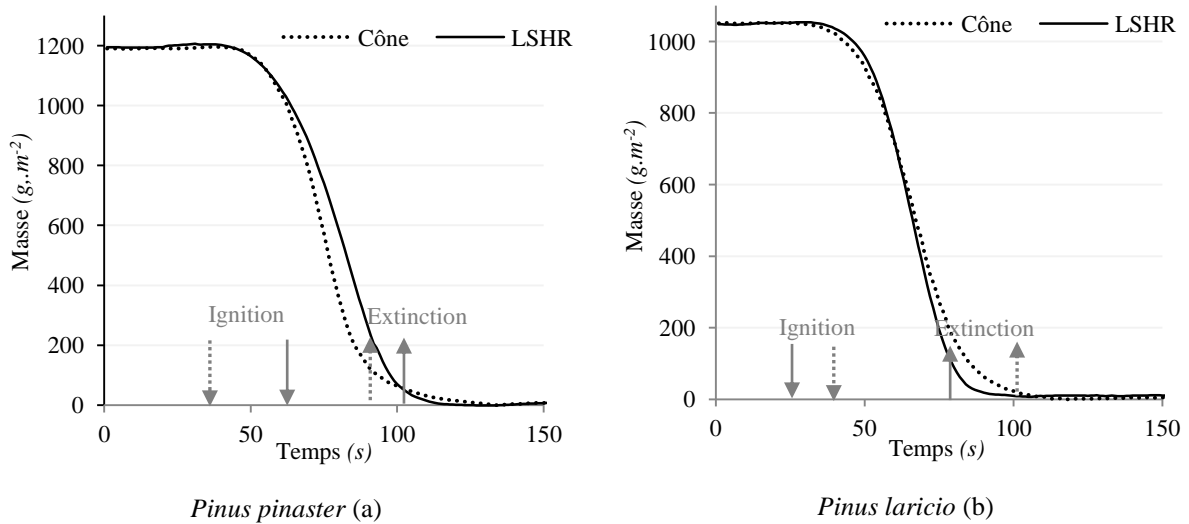


Figure 2 : Pertes de masse

La figure 3 (a et b) représente les puissances calorifiques exprimées en kW.m^{-2} pour les combustions à l'échelle du cône calorimétrique et à celle du LSHR. En exprimant la puissance par unité de surface de végétal, nous pouvons comparer les résultats, mettant en évidence l'effet de l'échelle des dispositifs expérimentaux sur la dynamique de combustion des aiguilles indépendamment des masses considérées. Pour les deux espèces, la charge et la perméabilité sont conservées. Le tableau 4 regroupe les grandeurs énergétiques.

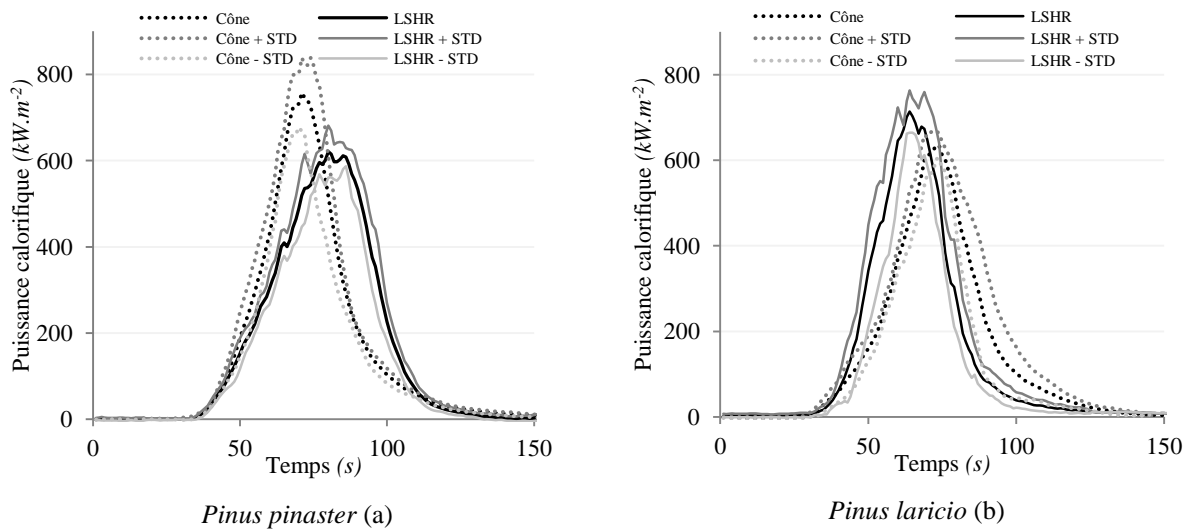


Figure 3 : Puissances calorifiques à l'échelle du cône et du LSHR.
(STD : écart-type)

Tableau 4 : Grandeurs énergétiques

Végétal	<i>Pinus pinaster (Pp)</i>		<i>Pinus laricio (Pl)</i>	
	Cône	LSHR	Cône	LSHR
m_b (g)	$14,65 \pm 0,26$	$111,58 \pm 0,33$	$13,27 \pm 0,16$	$97,77 \pm 0,25$
ΔE (J.m^{-2})	$22865,59 \pm 272,49$	$22797,99 \pm 74,31$	$20\ 993,65 \pm 356,98$	$22414,68 \pm 147,37$
χ (%)	$96,89 \pm 0,49$	$96,61 \pm 0,13$	$93,96 \pm 0,82$	$97,27 \pm 0,18$

Les dynamiques de combustion présentent des différences entre les deux échelles et selon le combustible. Lors de l'inflammation, la puissance calorifique par unité de surface augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale. Cette augmentation est plus rapide dans le cas de la combustion au cône calorimètre pour *P. pinaster*, de plus la mise en régime de combustion et la puissance maximale atteinte au cours des expériences sont plus importantes à l'échelle du cône. Ce résultat est d'autant plus remarquable que l'énergie totale dégagée par unité de surface de combustible est constante pour les deux échelles. Elles s'élèvent respectivement à 22865,59 J.m⁻² pour le cône calorimètre et 22797,99 J.m⁻² pour le LSHR (tableau 4). La différence est de 67,6 J.m⁻² en moyenne soit 0,3% en se référant à l'énergie émise avec le cône. En ce qui concerne l'efficacité de la combustion, il est à noter qu'elles sont quasi-identiques pour les deux échelles.

Nous pouvons ainsi conclure que le changement d'échelle pour une charge identique (1,2 kg.m⁻²) de combustible végétal, influence la dynamique de combustion mais ne modifie pas l'efficacité de la combustion. En effet, dans les deux cas nous sommes en régimes sur-ventilés ce qui favorise aussi bien la combustion en phase gazeuse que la combustion en régime charbonné.

Le comportement pour *P. laricio* est l'inverse de celui observé à la figure 3 (a) lors de la comparaison de la dynamique de combustion des aiguilles de *Pp*. En effet, on note une augmentation plus rapide de la puissance calorifique après l'allumage à l'échelle du LSHR. Il y a également une différence en ce qui concerne l'énergie totale dégagée par unité de surface de combustible. Elle s'élève respectivement à 20994 J.m⁻² pour le cône et 22415 J.m⁻² pour le LSHR (tableau 4), ce qui représente une différence de 6 %. La combustion des aiguilles est donc ici plus énergétiquement à moyenne échelle. Ce résultat se retrouve dans l'efficacité de la combustion qui s'élève à 97,27 % à cette échelle alors qu'elle est seulement de 93,96 % dans le cas du cône calorimètre (Tableau 4). Pour une charge identique, nous pouvons conclure que le changement d'échelle de combustion influence faiblement la dynamique de combustion de *Pl* (pic de puissance calorifique) mais influence de façon plus importante l'efficacité de combustion.

Nous observons également un effet du combustible sur la dynamique de combustion des aiguilles de pin puisque les comportements observés à l'échelle du cône et à l'échelle du LSHR sont opposés dans le cas des deux types d'aiguilles. En effet, la dynamique de combustion est plus forte dans le cas des aiguilles de *Pl* à l'échelle du LSHR qu'à l'échelle du cône alors que nous observons le comportement inverse pour les aiguilles de *Pp*. Toutefois la différence est plus faible dans le cas des aiguilles de *Pinus laricio* puisque le pic de puissance diffère de 9 % aux deux échelles alors que cette différence est de 20 % pour les aiguilles de *P. pinaster*. La différence essentielle entre les aiguilles de *P. laricio* et de *P. pinaster* provient de leur géométrie puisque leurs ratios surface-volume sont respectivement de 3057 m⁻¹ et 4360 m⁻¹ (Tableau 1). Il semble donc au vu de ces résultats que plus les combustibles sont thermiquement fins et moins leur dynamique de combustion est affectée par le changement d'échelle.

3.2. Effet du changement d'échelle et du combustible sur la production des fumées

Nous avons analysé l'effet du changement d'échelle sur la production des fumées en nous intéressant principalement à la comparaison du taux de fumée dégagée (*RSR*), au total de fumées dégagées (*TSR*) obtenu par opacimétrie ainsi qu'aux facteurs d'émissions obtenus pour les gaz grâce aux analyseurs IRND.

La figure 4 (a et b) représente les courbes de *RSR* (moyennes de cinq expériences) à l'échelle du cône et à l'échelle du LSHR. Le tableau 5 regroupe l'opacité et les facteurs d'émissions.

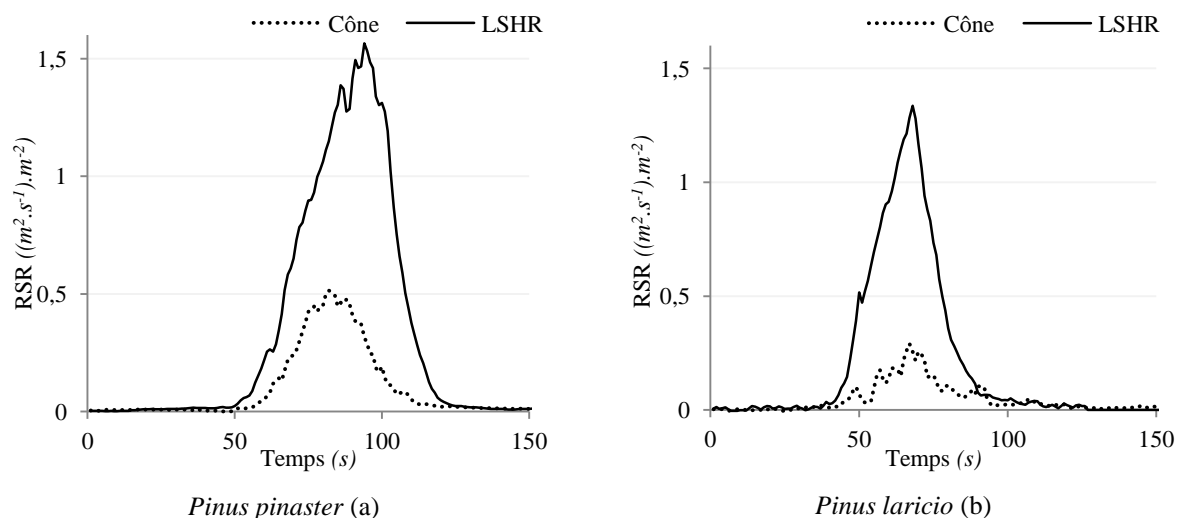


Figure 4: Courbes de RSR (en (m².s⁻¹).m⁻²)

Tableau 5 : Opacité et facteurs d'émissions.

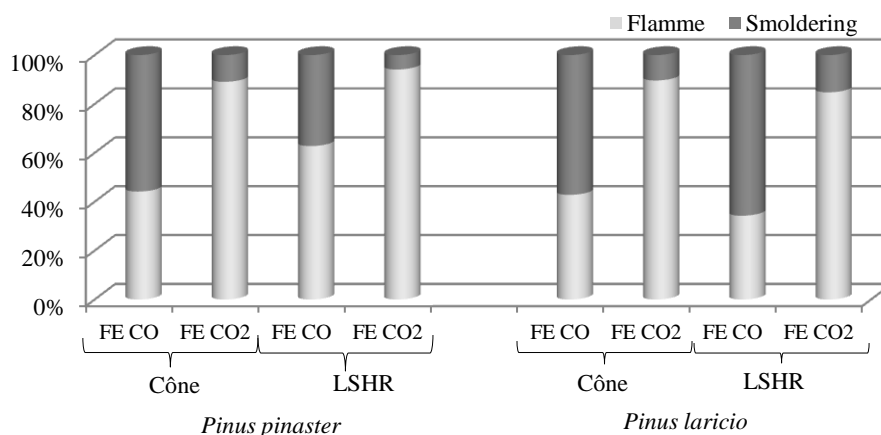
Végétal	<i>Pinus pinaster</i> (<i>Pp</i>)		<i>Pinus laricio</i> (<i>Pl</i>)	
	Cône	LSHR	Cône	LSHR
TSR ($m^2.m^{-2}$)	12,51 ± 1,77	49,23 ± 3,47	7,30 ± 1,19	29,49 ± 1,03
FE_{suies} ($g.kg^{-1}$)	1,32 ± 0,19	5,17 ± 0,43	0,83 ± 0,09	3,49 ± 0,12
FE_{CO} ($g.kg^{-1}$)	50,91 ± 4,10	48,57 ± 3,62	60,15 ± 4,04	87,71 ± 4,05
FE_{CO_2} ($g.kg^{-1}$)	1766,47 ± 51,48	1772,50 ± 7,40	1657,39 ± 14,54	1669,07 ± 32,41

Pour les deux combustibles, les pics de RSR sont nettement plus importants à l'échelle du LSHR. Les fumées mesurées à partir de l'obscurissement au moyen de l'opacimètre (TSR), sont environ quatre fois plus importantes lors des expériences conduites au LSHR que pour celles réalisées avec le cône calorimètre (tableau 5). Ces résultats sont corroborés par les facteurs d'émissions obtenus pour les suies puisque celles-ci sont également près de quatre fois plus élevées. La quantité plus importante de suies explique une telle différence au niveau de la production des fumées. La flamme est beaucoup plus large (0,35 m) pour les expériences conduites avec le LSHR que dans le cas des expériences réalisées avec le cône (inférieure à 0,1 m). La nucléation des suies est donc favorisée à l'échelle du LSHR.

Nous pouvons conclure que le changement d'échelle de combustion influence fortement la production des fumées et les facteurs d'émissions des suies pour ces deux combustibles.

Nous notons une différence pour le monoxyde de carbone selon l'échelle notamment pour *Pl*. En revanche, il n'y a pas de différence en ce qui concerne le dioxyde de carbone dont le taux varie peu pour les deux échelles de combustion. Pour *Pp*, le changement d'échelle ne semble pas influencer les facteurs d'émissions de CO et de CO₂. La quasi-complétude des réactions pour les deux échelles comme indiqué dans le tableau 5 explique la valeur identique de ces facteurs d'émission pour les deux échelles. La différence de production des fumées mis en évidence pour les deux échelles grâce à l'analyse du RSR et du TSR n'est donc pas due aux émissions de CO et de CO₂. Pour *P. laricio*, la différence importante pour le monoxyde de carbone peut être attribuée à une moins bonne combustion des résidus charbonneux dans le cas du LSHR. En effet, nous observons une émission de CO plus importante (figure 5) après extinction de la flamme à l'échelle du LSHR.

La figure 5 regroupe les facteurs d'émissions moyens de CO et CO₂ émis au cours des phases de combustion.

Figure 5 : Pourcentages des FE CO et des FE CO₂ en fonction des phases de combustion

Des quantités importantes de dioxyde de carbone sont émises lors de la combustion des aiguilles de pin. Ces émissions ont principalement lieu durant la phase de flamme, où plus de 80 % du CO₂ est produit (figure 5). La production la plus importante de monoxyde de carbone a lieu après la phase de flamme exceptée pour la combustion de *Pp* sous le LSHR. La production de CO est principalement due à l'oxydation des résidus charbonneux pendant la phase de smoldering. On note que les charbons sont oxydés en quasi-totalité durant la phase de flamme à l'échelle du LSHR ce qui n'est pas le cas à l'échelle du cône. En effet, pour *Pinus pinaster* il

reste 2,5 % de la masse à consommer après extinction des flammes dans le cas du LSHR alors qu'il reste 5 % dans le cas du cône.

On constate que la combustion des aiguilles de *Pl* produit un taux plus important de CO que celle de *Pp*. Au contraire de la production de CO₂ qui est sensiblement plus important pour la combustion de *P. pinaster* que pour celle de *P. laricio* (tableau 5).

La figure 5 montre que les émissions de CO sont plus importantes après l'extinction dans le cas de la combustion de *Pl* sous le LSHR, ce qui traduit une moins bonne combustion des résidus charbonneux à l'échelle du LSHR. Cette tendance qui n'est pas été observée lors de l'analyse du *P. pinaster* est certainement due à la répartition spatiale des résidus charbonneux qui de part la petite taille des aiguilles entraîne un refroidissement plus rapide des résidus dans le panier.

L'utilisation des facteurs d'émission ne doit pas être dissociée de la phase de combustion. Autrement dit, si on peut considérer l'émission du CO₂ globalement associée à la phase de flamme, il n'en est pas de même pour l'émission du CO. Il convient de rappeler à nouveau que les végétaux étudiés font partie des particules thermiques fines prises en compte dans les modèles de propagation. De tels modèles devront donc prendre en considération la modélisation de la combustion des résidus charbonneux dans la phase de smoldering pour prédire avec précision l'émission du CO.

Conclusion

Différents paramètres ont été étudiés pour analyser la dynamique de combustion tels la vitesse de perte de masse, la puissance calorifique ou encore l'efficacité de la combustion. La production des fumées a été étudiée à partir de l'opacité créée par celles-ci par mesure du coefficient d'extinction. Cette dernière a également permis de calculer les facteurs d'émission des suies. Les principaux composés émis lors de la combustion de ces deux types d'aiguilles de pin ont été mesurés à partir d'un analyseur Infrarouge Non-Dispersif. Les protocoles expérimentaux ont été adaptés pour garantir la comparaison des deux configurations expérimentales (cône et LSHR).

L'étude du comportement au feu des aiguilles de *P. pinaster* a révélé des différences importantes pour la puissance dégagée entre les deux échelles. L'efficacité de la combustion est apparue peu dépendante de l'échelle 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. 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 puissance de combustion des aiguilles de *Pinus pinaster* est plus affectée par le changement d'échelle que celle des aiguilles de *Pinus laricio*. L'échelle du cône calorimètre conduit pour *Pp* à un pic de puissance calorifique plus précoce que celui observé à l'échelle du LSHR et inversement pour *Pl*. Nous attribuons ce résultat à la vitesse de propagation au sein des échantillons provenant de l'influence de l'épaisseur thermique des combustibles.

Nomenclature

Symbole		<i>TSR</i>	Total Smoke Release, total des fumées dégagées, $m^2.m^{-2}$
C_{suies}	Concentration massique des particules de suies, $kg.m^{-3}$	\dot{V}_{smoke}	Débit massique de fumées, $m^3.s^{-1}$
E_{O_2}	Constante calorifique	X	Fraction molaire
E_{CO}	Constante calorifique pour la combustion du CO	Symboles grecs	
k	coefficient d'extinction, m^{-1}	ΔE	Energie libérée
\dot{m}	Débit massique	ΔE_{max}	Energie maximale dégagée
m	Masse	ΔH_c	Enthalpie de combustion
M	Masse molaire	σ_s	Surface d'extinction spécifique par unité de masse de suies, $m^2.kg^{-1}$
<i>PCI</i>	Pouvoir Calorifique Inférieur, $kJ.kg^{-1}$	α	Facteur d'expansion
\dot{q}	Puissance calorifique, kW	χ	Efficacité de la combustion, %
<i>RSR</i>	Rate of Smoke Release, taux de fumées dégagées, $(m^2.s^{-1}).m^{-2}$	ϕ	Facteur de consommation de dioxygène
S_e	Surface occupée par le végétal, m^2	Exposants	
t	Temps de combustion, s	A	Analyseurs
t_f	Temps final de combustion	0	Avant combustion

Références

- [1] T.J. Zaïda, Étude expérimentale et numérique de la dégradation thermique des lits combustibles végétaux. Thèse de Doctorat, Université d'Ouagadougou, 2012.
- [2] T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard et F. Jabouille, Kinetic and mechanism of the thermal degradation of a plywood by using thermogravimetry and Fourier transformed infrared spectroscopy analysis in nitrogen and air atmosphere, *Fire Safety Journal*, Volume 58, Pages 25-37, 2013.
- [3] T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard et F. Jabouille, Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter - FTIR apparatus, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 107, Pages 87-100, 2014.
- [4] P.A. Santoni P. Bartoli, A. Simeoni et J.L. Torero, Bulk and particle properties of pine needle fuel beds - Influence on combustion, *International Journal of Wildland Fire*, Volume 23 (8), Pages 1076-1076, 2014.
- [5] P.A. Santoni, F. Morandini et T. Barboni, Steady and Unsteady Fireline Intensity of Spreading Fires at Laboratory Scale, *The Open Thermodynamique Journal*, Volume 4, Pages 212-219, 2010.
- [6] V. Tihay, F. Morandini, P.A., Santoni, Y. Perez-Ramirez et T. Barboni, Combustion of forest litters under slope conditions: Burning rate, heat release rate, convective and radiant fractions for different loads, *Combustion and Flame*, Volume 161 (12), Pages 3237-3248, 2015.
- [7] P.A. Santoni, A. Simeoni, J.L. Rossi, F. Bosseur, F. Morandini, X. Silvani, J.H. Balbi, D. Cancellieri et L. Rossi, Instrumentation of wildland fire: Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub, *Fire Safety Journal*, Volume 41(3), Pages 171-184, 2006.
- [8] C.A. Alves, C. Gonçalves, C.A. Pio, F. Mirante, H. Puxbaum, A. Caseiro, M.C. Freitas et X. Viegas, Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland, *Atmospheric Environment*, Volume 44 (25), Pages 3024–3033, 2010.
- [9] S. Urbanski, Wildland fire emissions, carbon, and climate : Emission factors, *Forest Ecology and Management*, Volume 317, Pages 51-60, 2014.
- [10] G.R. van der Werf, J.T. Randerson, L. Giglio, G.J. Collatz, M. Mu, P.S. Kasibhatla, D.C. Morton, R.S. De Fries, Y. Jin et T.T. van Leeuwen, Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997– 2009), *Atmos. Chem. Phys.*, Volume 10, Pages 11707–11735, 2010.
- [11] C. Wiedinmyer, S.K. Akagi, R.J. Yokelson, L.K. Emmons, J.A. Al-Saadi, J.J. Orlando et A.J. Soja, The Fire INventory from NCAR (FINN) : a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geosci. Model Dev.*, Volume 4, Pages 625-641, 2011.
- [12] V. Babrauskas et G. Mulholland, Smoke and Soot Data Determinations in the Cone Calorimeter. Mathematical Modeling of Fires, ASTM STP 983, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, Pages 83-104, 1987.
- [13] C. Schemel, A. Simeoni, H. Biteau, J. Rivera, et J.L.Torero, A calorimetric study of wildland fuels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 32(7), Pages 1381-1389, 2008.
- [14] P. Bartoli, Feux de forêt : amélioration de la connaissance du couplage combustible-flamme, Thèse de Doctorat, Université de Corse, 2009.
- [15]. E. Romagnoli, Dynamique de combustion des végétaux et analyse des fumées émises : effets de l'échelle et du système, Thèse de Doctorat, Université de Corse, 2014.
- [16] M. L. Janssens et V. Babrauskas; Heat Release in Fires, *Elsevier Applied Science*, Pages 31-59, 1992.
- [17] B. Langmann, B. Duncan, C. Textor, J. Trentmann et G.R. van der Werf, Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Pages 107-116, 2009.