

Analyse du comportement au feu d'essences de bois gabonais au cône calorimètre et au microcalorimètre de combustion.

MOUKETOU BEUMO Charnelle Steve^{1,2,3}, VIRETTO Amandine^{1,2}, SONNIER Rodolphe³, OMOUENDZE Priscilla Linda⁴, THEVENON Marie-France^{1,2}, OTAZAGHINE Belkacem³

¹CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France

²BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

³Polymeres Composites and Hybrides (PCH), IMT Mines Alès, F-30319 Alès, France

⁴Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Cap Estérias, 3960 Libreville, Gabon

charnelle_steve.mouketou_beumo@cirad.fr

Mots clés : Comportement au feu ; Bois tropicaux ; Microcalorimètre de combustion ; Cône calorimètre

Contexte et objectif

Le bois joue un rôle central dans l'économie gabonaise, représentant une ressource stratégique pour le développement industriel et la génération de revenus pour les populations. L'exploitation forestière est la troisième source de revenus du pays, après le pétrole et l'industrie minière, et sa contribution à l'économie nationale est considérable. L'importance de cette ressource est accentuée par la croissance continue de l'extraction de grumes, avec une augmentation des volumes extraits passant de 1,9 million de m³ en 2012 à 3,7 millions de m³ en 2020 (FAO 2020). Cette dynamique est également favorisée par les politiques de transformation locale imposées depuis 2010, visant à maximiser la valeur ajoutée des produits forestiers, cependant en créant une nouvelle source de déchets sur le territoire (Eyi Obame 2017). Dans ce contexte, notre étude vise à valoriser les déchets des essences de bois les plus exploitées au Gabon pour en faire des matériaux biocomposites pour des applications dans le domaine de l'habitat sous la forme de panneaux isolants et d'éléments non porteurs. Ces matériaux devront présenter des propriétés mécaniques satisfaisantes pour leur usage, une bonne durabilité face aux termites et aux champignons ainsi qu'un comportement au feu optimal. Pour atteindre ces objectifs, nous procéderons dans un premier temps à l'évaluation du comportement au feu des essences de bois sélectionnées. Dans un second temps, nous formulerons des matériaux bio-composites à partir des sciures de ces essences de bois que nous caractériserons en termes de propriétés mécaniques (compression et flexion), thermiques, de durabilité biologique et de réaction au feu afin d'évaluer leur utilisation dans le domaine de l'habitat.

Matériels et méthodes

Matériels

Les échantillons proviennent de déchets de bois, comprenant de la sciure (mélange d'aubier et du duramen), des plaquettes d'aubier et de duramen ainsi que des morceaux d'écorce issus de cinq essences sélectionnées : Azobé (*Lophira olata*) avec une densité de 1,06 , Béli (*Julbernardia pellegriniana*) avec une densité de 0,77, Okan (*Cylicodiscus gabonunensis*) avec une densité de 0,91, Okoumé (*Aucoumea klaineana*) avec une densité de 0,44 et Tali (*Erythropheum suaveolens*) avec une densité de 0,91 (Gérard et al 2016). L'échantillonnage a été effectué sur des sites de transformation dans diverses régions du Gabon : l'Okoumé a été

collecté à Libreville auprès de la Société Équatoriale d'Exploitation Forestière (SEEF), le Tali à Makokou auprès de Bonus Harvest, l'Okan et l'Azobé à Essassa auprès de la Société de Mise en Valeur du Bois (SOMIVAB), et le Béli à Lastourville auprès de la Société du Bois de Koulamoutou (S.B.K.). Les cinq essences ont été choisies en raison de leur importance économique au Gabon, avec des volumes de déchets significatifs (Eyi Obame 2017, Seka et Béguin 2020). La Fig. 1 illustre les différents types d'échantillons collectés pour le Béli.

Très peu de travaux scientifiques ont porté sur le comportement au feu des bois tropicaux (Haurie 2019). En ce sens, notre étude est pionnière sur les essences gabonaises et de surcroît, nous allons également étudier le comportement au feu du duramen de l'Okan suivant les différents plans de coupe (tangential, radial et longitudinal).



Fig. 1 : Différents échantillons collectés pour le Béli : (a) sciure, (b) écorce, (c) aubier, (d) duramen

Méthodes

L'étude du comportement au feu de nos échantillons a été réalisée à deux échelles.

À petite échelle, la réaction au feu des cinq essences a été analysée à l'aide d'un microcalorimètre de combustion (*Pyrolysis Combustion Flow Calorimeter*, PCFC), ces essais ont été faits en six répliques suivant la norme ASTM D7309 (2021). L'échantillon (2-3 mg) est introduit dans la chambre de pyrolyse sous atmosphère inerte, avec une montée en température linéaire de 1 K/s de 30 °C à 750 °C. Les produits volatils générés lors de la dégradation thermique sont ensuite transférés dans la chambre de combustion, où ils sont brûlés en présence d'un excès d'oxygène (mélange gazeux de 20 % O₂ et 80 % N₂) à une température de 900 °C. Le débit calorifique est calculé par la méthode dite « de déplétion d'oxygène » (Huggett 1980). Les paramètres mesurés sont le débit calorifique (*Heat Release Rate*, HRR), l'énergie totale libérée par gramme (*Total Heat Release*, THR), la fraction massique résiduelle après pyrolyse, et l'énergie de combustion complète (*Heat of Complete Combustion*, HCC) qui correspond à l'énergie dégagée par gramme de gaz produit lors de la pyrolyse.

À une échelle intermédiaire, le comportement au feu des matériaux a été étudié à l'aide d'un cône calorimètre conformément à la norme NF ISO 5660-1 (2015), qui permet d'évaluer le débit calorifique et la production de fumée d'éprouvettes orientées horizontalement. Comme pour le PCFC, l'énergie libérée est déterminée par la méthode dite « de déplétion d'oxygène ». Des échantillons de duramen (10 cm x 10 cm x 3 cm) de chaque essence ont été exposés à un flux de chaleur radiatif constant de 50 kW/m² avec une ignition pilotée et un débit d'air contrôlé de 24 L/s. Les paramètres évalués sont le temps d'ignition (*Time to Ignition*, TTI), le pic de débit calorifique (*peak of Heat Release Rate*, pHRR), l'énergie totale libérée (*Total Heat Release*, THR), l'énergie effective de combustion (*Effective Heat of Combustion*, EHC) ainsi que la perte de masse.

Résultats

Les essais réalisés au PCFC sur les différentes fractions des cinq essences de bois ont montré peu de différences entre les fractions aubier, duramen et sciure pour les différentes essences ;

les valeurs de pHRR sont comprises entre $\text{pHRR}_{\text{Okan aubier}} = 116 \pm 3 \text{ W/g}$ et $\text{pHRR}_{\text{Tali aubier}} = 158 \pm 7 \text{ W/g}$, celles de HCC sont comprises entre $\text{HCC}_{\text{Okan aubier}} = 10,3 \pm 0,3 \text{ kJ/g}$ et $\text{HCC}_{\text{Okoumé duramen}} = 13,3 \pm 1,0 \text{ kJ/g}$, celles de résidu sont comprises entre $\text{Res}_{\text{Okoumé duramen}} = 0,12$ et $\text{Res}_{\text{Okan aubier}} = 0,22$. Les résultats obtenus sur les fractions aubier, duramen et sciure de l'Okan sont les plus intéressantes avec des valeurs de pHRR et de THR les plus faibles et des taux de résidus les plus importants. Cependant, les différences les plus significatives portent sur les résultats des fractions écorce comme nous pouvons le constater dans le Tab. 1. pour les différentes fractions du Béli. Les valeurs de pHRR et de THR sont divisées de moitié $\text{pHRR}_{\text{Béli écorce}} = 53 \pm 3 \text{ W/g}$ et $\text{THR}_{\text{Béli écorce}} = 5,3 \pm 0,3 \text{ kJ/g}$ et le résidu est augmenté significativement, $\text{Res}_{\text{Béli écorce}} = 0,3$. L'écorce, en tant que couche protectrice de l'arbre, semblerait présenter une inflammabilité plus faible pour les cinq essences. Cette observation est particulièrement vraie pour le Béli ($\text{pHRR}_{\text{Béli écorce}} = 53 \pm 3 \text{ W/g}$) et le Tali ($\text{pHRR}_{\text{Tali écorce}} = 31 \pm 2 \text{ W/g}$), un peu moins marquée pour l'Okan ($\text{pHRR}_{\text{Okan écorce}} = 79 \pm 7 \text{ W/g}$) et l'Okoumé ($\text{pHRR}_{\text{Okoumé écorce}} = 88 \pm 7 \text{ W/g}$) et encore moins pour l'Azobé ($\text{pHRR}_{\text{Azobé écorce}} = 124 \pm 15 \text{ W/g}$). Cette observation entre l'écorce et les autres parties du bois est cohérente avec les résultats antérieurs obtenus sur des essences de bois guyanais (Bossu et al 2023).

Tab 1 : Résultats obtenus au PCFC pour les différentes fractions de Béli

| Béli | pHRR (W/g) | TpHRR (°C) | THR (kJ/g) | HCC (kJ/g) | Fraction résiduelle |
|---------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------------|
| Ecorce | 53 ± 3 | 375 ± 7 | $5,3 \pm 0,3$ | $7,7 \pm 0,4$ | $0,31 \pm 0,03$ |
| Aubier | 125 ± 6 | 370 ± 7 | $9,4 \pm 0,5$ | $11,4 \pm 0,5$ | $0,20 \pm 0,03$ |
| Duramen | 135 ± 13 | 384 ± 8 | $9,8 \pm 0,9$ | $12,2 \pm 0,7$ | $0,15 \pm 0,02$ |
| Sciure | 132 ± 10 | 379 ± 13 | $9,4 \pm 0,9$ | $11,1 \pm 1,3$ | $0,15 \pm 0,03$ |

Les essais réalisés au cône calorimètre sur les duramens d'Azobé, de Béli, d'Okan et d'Okoumé sont présentés dans le Tab. 2 et la Fig. 2, dans laquelle les courbes présentent l'évolution du débit calorifique en fonction du temps. Nous pouvons observer des différences significatives pour les temps d'ignition des quatre essences étudiées, où l'Okoumé a un TTI très court ($\text{TTI}_{\text{Okoumé}} = 14 \pm 3 \text{ s}$) alors que l'Okan a un TTI bien plus long ($\text{TTI}_{\text{Okan}} = 99 \pm 5 \text{ s}$), ce qui peut être imputé aux différences de densité. Dès l'ignition, une augmentation rapide du débit calorifique, due à l'inflammation des gaz volatiles produits lors de la pyrolyse, est observée conduisant rapidement à un premier pic de débit calorifique ($\text{tpHRR}_{\text{Okoumé}} = 27 \pm 3 \text{ s}$ et $\text{tpHRR}_{\text{Okan}} = 113 \pm 6 \text{ s}$). De plus, nous pouvons constater que le pHRR de l'Okan ($\text{pHRR}_{\text{Okan}} = 132 \pm 3 \text{ kW/m}^2$) est bien plus faible que celui des trois autres essences ($\text{pHRR}_{\text{Azobé}} = 166 \pm 2 \text{ kW/m}^2$, $\text{pHRR}_{\text{Béli}} = 166 \pm 8 \text{ kW/m}^2$ et $\text{pHRR}_{\text{Okoumé}} = 157 \pm 11 \text{ kW/m}^2$). Après le pHRR, les courbes montrent une diminution du débit calorifique, atteignant un plateau dans lequel la libération de chaleur devient plus stable en raison de la formation d'une couche de char protectrice. Le débit calorifique reste constant au niveau de ce plateau entre 400-1200 s pour les quatre essences. Néanmoins, le débit calorifique du plateau est plus élevé pour l'Azobé, le Béli et l'Okoumé (entre 55-70 kW/m^2) que pour l'Okan (entre 40-45 kW/m^2). Au-delà de 1200 s, une nouvelle augmentation de débit calorifique est observée pour l'Okoumé avec un second pHRR d'une valeur d'environ 95 kW/m^2 , ainsi que pour le Béli. L'essai ayant été stoppé à 1800 s pour tous les échantillons, les courbes ne montrent pas le second pHRR entièrement dessiné pour le Béli, mais la première partie visible de ce pic laisse présager d'une valeur de pic beaucoup plus élevée que pour l'Okoumé. L'apparition de ces seconds pHRR est due au fait que le front de température atteint le bas de l'échantillon, lequel est thermiquement isolé par la laine de roche. La chaleur ne s'évacue plus, et la température ré-augmente entraînant à son tour une augmentation de la vitesse de pyrolyse. De la même manière, étant donné que l'essai a été interrompu à 1800 s, les seconds pHRR de l'Azobé et de l'Okan ne sont pas visibles, mais si

nous avons poursuivi l'essai plus longtemps, nous aurions alors observé le même phénomène pour ces deux essences que pour le Béli.

Conclusion et perspectives

Au-delà de l'étude de ces cinq essences de bois, l'ambition de cette étude est de pouvoir évaluer la variabilité du comportement au feu du bois, d'une essence à l'autre et suivant la partie du bois étudiée. L'objectif est également de prédire les principales valeurs caractéristiques mesurées au cône calorimètre en fonction de la géométrie de l'échantillon et des grandeurs mesurées au PCFC.

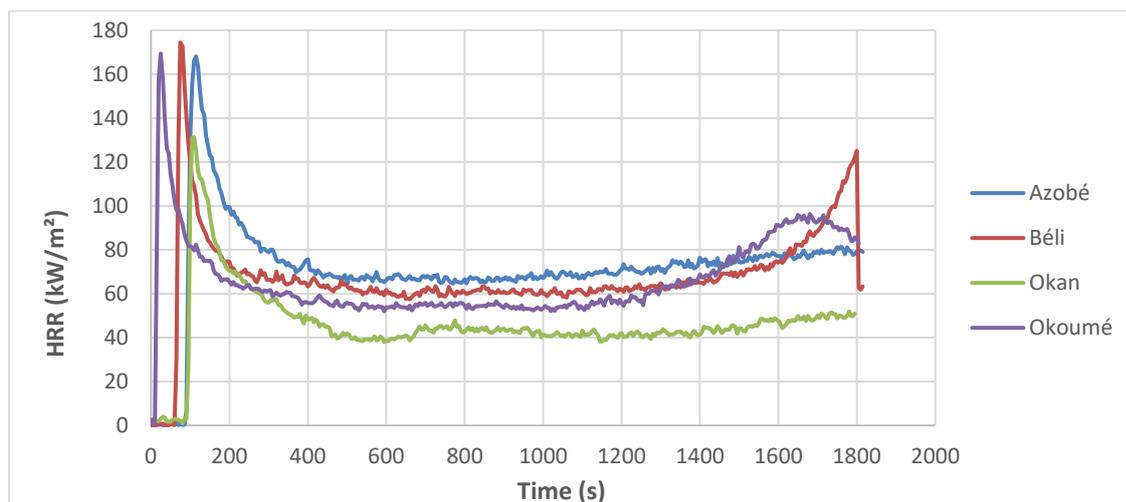


Fig. 2 : Courbes de débit calorifique (HRR) obtenues au cône calorimètres pour les duramens des différentes essences (irradiance 50 kW/m²)

Tab. 2 : Résultats obtenus au cône calorimètre pour les duramens des différentes essences

| Essences | TTI (s) | pHRR (kW/m ²) | tpHRR (s) | THR (kJ/g) |
|----------|---------|---------------------------|-----------|------------|
| Azobé | 84 ± 6 | 166 ± 2 | 107 ± 7 | 3,3 ± 0,3 |
| Béli | 59 ± 11 | 166 ± 8 | 85 ± 13 | 5,6 ± 2,0 |
| Okan | 99 ± 5 | 132 ± 3 | 113 ± 6 | 2,3 ± 0,0 |
| Okoumé | 14 ± 3 | 157 ± 11 | 27 ± 3 | 8,9 ± 0,3 |

Les résultats au PCFC mettent en évidence des différences significatives selon les différentes parties du bois testées, notamment pour les écorces de Tali et de Béli qui présentent des valeurs de débit calorifique (pHRR) et de chaleur totale libérée (THR) bien plus faibles que les autres fractions (duramen, aubier, sciure) mais également que celles des écorces des autres essences. Pour ce qui est des résultats au cône calorimètre, l'Okan se distingue de l'Azobé, du Béli et de l'Okoumé par un temps d'ignition bien plus élevé, et un débit calorifique plus faible sur la totalité de l'essai.

Des essais complémentaires sont en cours, notamment des essais au feu sur l'influence du plan de coupe des échantillons ainsi que des analyses de composition chimique des différentes fractions pour chacune des essences de bois étudiées.

Remerciements

Les auteurs remercient la Société Équatoriale d'Exploitation Forestière (SEEF), la Société de Mise en Valeur du Bois (SOMIVAB), la société BONUS HAVEST et la Société du Bois de Koulamoutou (S.B.K.) pour leur aide et leur entière collaboration dans l'échantillonnage de nos

produits. Les auteurs remercient également l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG) pour son programme de financement de doctorat à l'international.

Références

ASTM D7309 (2021) Standard Test Method for Determining Flammability Characteristics of Plastics and Other Solid Materials Using Microscale Combustion Calorimetry, ASTM International

Bossu J, Moreau J, Delisée C, Le Moigne N, Corn S, Sonnier R, Viretto A, Beauchêne J, Clair B (2023) Revealing the potential of waste fibers from timber production and clearings for the development of local bio-based insulation fiberboards in French Guiana, *Waste and Biomass Valorization*, 14:4281-4295.

Eyi Obame AP (2017) Niveau de valorisation des déchets d'exploitation forestière : identification et estimation des rebuts de bois dans l'AAC 2014 de la SEEF à Nzamaligue, mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Techniques des Eaux et Forêts.

FAO (2020) Evaluation des ressources forestières mondiales – Principaux résultats.

Gérard J et al (2016) Atlas des bois tropicaux, éditions Quae, 1000 p.

Haurie L, Giraldo MP, Lacasta AM, Monton J, Sonnier R (2019) Influence of different parameters in the fire behavior of seven hardwood species, *Fire Safety Journal*, 107:193-201.

Hugget C (1980) Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *Fire and Materials*, 4(2):61-65.

NF ISO 5660-1 (2015) Essais de réaction au feu — Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse, Partie 1 : Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique), AFNOR

Seka MJ, Bégin J (2020) Estimation des volumes bruts exploitables d'Okan (*Cylicodiscus gabunensis* harms) au Sud du Cameroun, *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo*, 15 :24-34.