

Article issu d'une présentation à la conférence :



Advancing the Sustainable Use of Tropical Forests,
26-28 août 2024, Antananarivo, Madagascar

Mandresy Fiderana Andriatahiana RAMILISON¹
Patrick ROUSSET^{2,3,4}
Joël BLIN^{3,4}
Jean-Pierre BOUILLET^{5,6,7}
Jérémy VALETTE^{3,4}
Tahiana RAMANANTOANDRO¹

¹ Université d'Antananarivo
École Supérieure des Sciences Agronomiques
Mention Foresterie et Environnement
BP 175 / Antananarivo 101
Madagascar

² CIRAD
UPR BioWooEB
97743 Saint-Pierre, Réunion
France

³ CIRAD
UPR BioWooEB
34398 Montpellier
France

⁴ BioWooEB, CIRAD, Université de Montpellier
Montpellier
France

⁵ CIRAD
UMR Eco&Sols
34398 Montpellier
France

⁶ Eco&Sols, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD,
Université de Montpellier
Montpellier
France

⁷ FOFIFA-DRFGRN
CIRAD UMR Eco & Sol
Antananarivo
Madagascar

Auteur correspondant / Corresponding author:

Mandresy Fiderana Andriatahiana Ramilison –
mandresyramilison@gmail.com

 ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-0656-9831>

Analyse comparative des charbons de bois produits par trois méthodes de carbonisation à Madagascar



Photos 1.

Conduite d'une meule améliorée à tirage inversé (MATI) :
a. arrangement des bois et mise en place de la bouche d'allumage ;
b. fabrication des événements.

Operating an Improved reversed-turn charcoal pile (IRDG):
a. arranging the wood and setting up the ignition port;
b. making the vents.

Photos M. F. A. Ramilison, 2023.

Doi : 10.19182/bft2024.361.a37542 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 24 septembre 2024 ;
date d'acceptation : 1^{er} novembre 2024 ; date de publication : 1^{er} décembre 2024.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Ramilison M. F. A., Rousset P., Blin J., Bouillet J.-P., Valette J., Ramanantoandro T., 2024. Analyse comparative des charbons de bois produits par trois méthodes de carbonisation à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, 361 : 59-76. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.361.a37542>

RÉSUMÉ

Analyse comparative des charbons de bois produits par trois méthodes de carbonisation à Madagascar

À Madagascar, 28,5 % des ménages utilisent le charbon de bois pour cuisiner. Pour répondre à la demande, des méthodes locales de carbonisation traditionnelles et peu efficaces sont utilisées. Cette étude examine trois méthodes utilisant des matériaux forestiers locaux : i) MATI (Meule améliorée à tirage inversé), actuellement en phase d'extension; ii) une meule hybride (HB) utilisée localement par les charbonniers ; et iii) la pratique traditionnelle « Doro Dedaka » (DD). Ces techniques diffèrent par la position des événements, l'humidité et l'agencement du bois à carboniser dans la meule. L'objectif est de comparer les caractéristiques physico-chimiques et énergétiques du charbon d'*Eucalyptus robusta* obtenu par ces méthodes. Le rendement brut de MATI est de 25 %, contre 19 % pour HB et 12 % pour DD. Les densités apparentes des charbons des trois types de meules sont statistiquement similaires. Un charbon d'eucalyptus acheté sur le marché (charbon x) a également été caractérisé. Les matières volatiles sont statistiquement similaires pour MATI, HB et DD tandis que celles du charbon x sont plus faibles (12,19 %). De plus, la teneur en cendres varie significativement entre les différents types de charbons : le charbon HB possède la teneur en cendres la plus faible (2,04 %), tandis que le charbon x présente la teneur la plus élevée (3,59 %). La teneur en carbone fixe des charbons fabriqués est quasi-similaire, mais celle du charbon x est légèrement inférieure (75,02 %). Le charbon MATI détient la meilleure valeur calorifique avec 31 307 J/g, contre 31 070 J/g pour HB et 29 453 J/g pour DD. Le charbon x a une valeur calorifique de 29 723 J/g. Ces résultats montrent que MATI, avec son rendement élevé et ses performances énergétiques optimales, constitue une alternative prometteuse pour améliorer l'efficacité de la production de charbon tout en préservant les ressources forestières.

Mots-clés : analyse physico-chimique, carbonisation améliorée, carbonisation hybride, carbonisation traditionnelle, charbon de bois, *Eucalyptus robusta*, Madagascar.

ABSTRACT

Comparative analysis of charcoal produced by three carbonisation methods in Madagascar

In Madagascar, 28.5% of households use charcoal for cooking. To meet this demand, local and traditional charcoal-making methods are being used, but they are not very efficient. This study examines three methods using local forest materials: i) MATI (Improved reversed-turn charcoal pile), which is currently being extended; ii) a hybrid charcoal pile (HB) used locally by charcoal makers; and iii) the traditional practice of 'Doro Dedaka' (DD). These techniques differ in the position of the vents, the humidity, and the arrangement of the wood to be charred in the charcoal pile. The aim is to compare the physico-chemical and energy characteristics of *Eucalyptus robusta* charcoal obtained using these methods. The gross yield of MATI is 25%, compared with 19% for HB and 12% for DD. The apparent densities of the charcoals from the three types of charcoal piles were statistically similar. A eucalyptus charcoal purchased on the market (charcoal x) was also characterised. Volatile matter was statistically similar for MATI, HB, and DD, while that of charcoal x was lower (12.19%). In addition, the ash content varied significantly between the different types of charcoal: HB charcoal had the lowest ash content (2.04%), while x charcoal had the highest (3.59%). The fixed carbon content of manufactured charcoals is almost identical, but that of x charcoal is slightly lower (75.02%). The MATI charcoal has the highest calorific value with 31,307 J/g, compared with 31,070 J/g for HB and 29,453 J/g for DD. Charcoal x has a calorific value of 29,723 J/g. These results show that MATI, with its high yield and optimum energy performance, is a promising alternative for improving the efficiency of charcoal production while preserving forest resources.

Keywords: physico-chemical analysis, improved carbonisation, hybrid carbonisation, traditional carbonisation, charcoal, *Eucalyptus robusta*, Madagascar.

RESUMEN

Análisis comparativo del carbón vegetal producido mediante tres métodos de carbonización en Madagascar

En Madagascar, el 28,5% de los hogares utiliza carbón vegetal para cocinar. Para satisfacer esta demanda, se utilizan métodos locales de fabricación de carbón vegetal que son tradicionales y poco eficaces. Este estudio examina tres métodos que utilizan materiales forestales locales: i) la MATI (carbonera vegetal mejorada de giro invertido), que se está ampliando actualmente; ii) una carbonera híbrida (HB) utilizada localmente por los carboneros; y iii) la práctica tradicional del «Doro Dedaka» (DD). Estas técnicas difieren en la posición de los respiraderos, la humedad y la disposición de la madera a carbonizar en la carbonera. El objetivo es comparar las características fisicoquímicas y energéticas del carbón vegetal de *Eucalyptus robusta* obtenido mediante estos métodos. El rendimiento bruto del MATI es del 25%, frente al 19% del HB y el 12% del DD. Las densidades aparentes de los carbones procedentes de los tres tipos de pilas de carbón vegetal fueron estadísticamente similares. También se caracterizó un carbón de eucalipto comprado en el mercado (carbón x). La materia volátil fue estadísticamente similar para MATI, HB y DD, mientras que la del carbón x fue inferior (12,19%). Además, el contenido de cenizas variaba significativamente entre los distintos tipos de carbón: El carbón HB tenía el contenido de cenizas más bajo (2,04%), mientras que el carbón x tenía el más alto (3,59%). El contenido de carbono fijo de los carbones manufacturados es casi idéntico, pero el del carbón x es ligeramente inferior (75,02%). El carbón MATI tiene el valor calorífico más alto con 31.307 J/g, frente a los 31.070 J/g del HB y los 29.453 J/g del DD. El carbón x tiene un valor calorífico de 29.723 J/g. Estos resultados demuestran que el MATI, con su alto rendimiento y su óptimo comportamiento energético, es una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de la producción de carbón vegetal preservando los recursos forestales.

Palabras clave: análisis físico-químico, carbonización mejorada, carbonización híbrida, carbonización tradicional, carbón vegetal, *Eucalyptus robusta*, Madagascar.

Introduction

L'usage de biomasse comme combustible solide pour la cuisine et le chauffage domestique reste omniprésent pour les pays en voie de développement. La combustion, la gazéification et la pyrolyse sont les moyens de conversion thermochimique les plus fréquemment utilisés pour produire de l'énergie à partir de la biomasse (Wang *et al.*, 2016). Le charbon de bois est le combustible produit par la pyrolyse lente du bois. Les meules traditionnelles sont les plus utilisées dans toute l'Afrique subsaharienne pour la production de charbon de bois en raison de leur faible investissement en équipements et matériaux, ainsi que de leur flexibilité en ce qui concerne leur taille et leur forme (Mugo et Poulstrup, 2003). Selon Sedano *et al.* (2016), le charbon de bois demeure la principale source d'énergie en Afrique dans un futur proche et devrait connaître une augmentation jusqu'en 2040. Avec l'augmentation de la population et l'urbanisation, le charbon de bois est le combustible le plus largement adopté dans les villes malgaches. Cela s'explique du fait que ce combustible présente plusieurs avantages par rapport au bois de feu : plus léger, plus facile à transporter et à stocker, il génère moins de fumées et possède un pouvoir calorifique plus élevé (Johnson, 2009 ; Lame et Adamu, 2018). Selon l'INSTAT (2021), 28,5 % des ménages malgaches utilisent encore le charbon de bois pour satisfaire leurs besoins énergétiques pour la cuisson des aliments. Dans la région de l'Analamanga à Madagascar, les consommations annuelles moyennes par habitant en milieu urbain sont évaluées à 104 kg de charbon de bois (Charpin *et al.*, 2019). En raison de sa situation économique actuelle, Madagascar se classe parmi les nations les plus démunies de la planète. Par conséquent, la plupart des ménages ne peuvent pas se permettre d'utiliser des combustibles de substitution tels que le gaz, le pétrole lampant et l'électricité (Ramaroson *et al.*, 2015). Cette demande croissante en énergie exerce une pression de plus en plus forte sur les ressources forestières, avec environ 1 544 millions de tonnes de charbon de bois produites au niveau national en 2021 (FAO, 2023). Cette production de charbon de bois est réalisée à partir de technologies locales ayant des rendements faibles et conduisant à des charbons de qualité très variable. Une demande de charbon de bois de cette ampleur a un impact néfaste sur l'environnement, participant à une déforestation massive et incontrôlée. Selon Rafitoson (2017), la transformation du bois en charbon de bois à vocation énergétique aurait quadruplé pendant les 20 dernières années à Madagascar et cette tendance entraîne l'accélération de la déforestation. Les besoins continuent de croître en raison de l'augmentation de la population. C'est ainsi que ce secteur a des liens directs avec le changement climatique à travers ses effets sur la dégradation des forêts et aussi en raison des émissions de gaz à effet de serre durant le processus de carbonisation (FAO, 2020). Bien que différentes techniques améliorées aient été vulgarisées dans plusieurs régions de Madagascar (Montagne *et al.*, 2010), l'adoption

de ces techniques par les charbonniers reste un défi malgré la formation de nombreux d'entre eux (Bouillet *et al.*, 2019). Le développement de techniques innovantes et économiquement viables est essentiel pour maintenir une production de charbon de bois de qualité et renouvelable. Ces dernières années, des techniques améliorées de carbonisation (TAC) utilisant une meule améliorée à tirage inversé, appelée MATI, ont été vulgarisées grâce à des projets de développement, dans les zones approvisionnant la capitale en charbon de bois. Ces techniques diffèrent des méthodes traditionnelles et des pratiques habituelles des charbonniers par l'orientation de la meule dans le sens contraire au vent dominant, le contrôle de l'entrée et de la sortie d'air au sein de la meule, l'utilisation de bois séchés sur coupe et la façon d'arranger les bois dans la meule (Montagne *et al.*, 2010). Ce sont des techniques prometteuses car elles sont particulièrement adaptées aux conditions de travail locales et leur usage permet d'améliorer les revenus des charbonniers (Bouillet *et al.*, 2019). La question qui se pose est de savoir si l'usage de ces nouvelles pratiques de carbonisations impacte la qualité des charbons produits. Cette étude émet l'hypothèse que le procédé MATI permet non seulement d'obtenir de meilleurs rendements de carbonisation, mais améliore également la qualité des charbons par rapport aux méthodes traditionnelles. L'objectif est de comparer les rendements de carbonisation, les propriétés physico-chimiques (granulométrie, densité apparente, analyse immédiate : matières volatiles, cendres et carbone fixe) et le contenu énergétique des charbons à partir des bois d'*Eucalyptus robusta* Smith provenant d'une même parcelle de forêt. Cette espèce est la plus exploitée pour la production de bois-énergie destiné à la population de la capitale. Trois procédés de carbonisation ont été testés : i) la meule MATI ; ii) la meule hybride HB (pratique courante des charbonniers locaux intégrant une partie des préconisations des TAC) ; et iii) la méthode traditionnelle utilisant une meule appelée « Doro Dedaka (DD) ».

Matériels et méthodes

L'évaluation qualitative d'une carbonisation artisanale repose principalement sur le rendement et la qualité du charbon de bois produit, notamment le taux de matières volatiles, de carbone fixe et de cendres (Temmerman *et al.*, 2019). Dans le but de produire les charbons à partir de trois méthodes de carbonisation différentes et d'évaluer leurs propriétés, les bois utilisés, âgés de 4 ans, sont issus d'une même parcelle de forêt. Ces bois provenaient majoritairement de bois juvénile, et les carbonisations ont été réalisées simultanément.

Démarche adoptée pour la pratique de carbonisation

Des carbonisations en meules de terre ont été réalisées sur le terrain, suivies d'analyses des charbons en laboratoire.

Lieu de carbonisation

La plus grosse zone productrice de charbon de bois approvisionnant la capitale est le district de Manjakandriana (Andriamifidy Andoniaina, 2014). La parcelle de forêt et le lieu de carbonisation se situent à Ambohiboalavo, hameau de la commune rurale d'Alarobia (figure 1). Ce lieu est une zone d'intervention du projet de développement intégré Aménagement et Bois Energie (DIABE) qui vulgarise les TAC avec la méthode MATI. Un maître charbonnier formé par ce projet a guidé et supervisé la réalisation des 3 types de meules retenues : MATI, HB et DD.

Conditions de chaque type de carbonisation

Les détails techniques relatifs à la fabrication des trois meules de carbonisation sont présentés dans le tableau I, offrant une vue d'ensemble sur les éléments clés à prendre en compte. Le rendement brut en charbon de bois a été déterminé par la différence de masse entre les bois initiaux avant les pyrolyses et les charbons de bois résultants.

Caractérisation physique des bois

Densité des bois

Avant carbonisation, les bois ont fait l'objet d'une mesure de densité conformément à la norme ISO 13061-2 (2014). Cette mesure a été effectuée sur du bois à 12 % d'humidité, obtenu en plaçant les échantillons collectés sur le terrain dans une enceinte climatique réglée à une température de 20 °C et 65 % d'humidité relative (HR). Ces échantillons ont une forme cubique de 2 cm de côté et sont prélevés à une hauteur de 1,30 m au-dessus du sol. La densité est déterminée par le rapport entre la masse pesée du bois et le volume de l'échantillon selon l'équation (1).

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{équation (1)}$$

où D : densité à 12 % Humidité relative, M : masse du bois à 12 % HR (g) et V : volume du bois à 12 % HR (cm³).

La masse a été obtenue en utilisant une balance de précision 0,01 g. Le volume a été déterminé par immersion dans l'eau distillée où la masse du volume déplacé est égale au volume de l'échantillon (Ilic *et al.*, 2000 in Chave *et al.*, 2006).

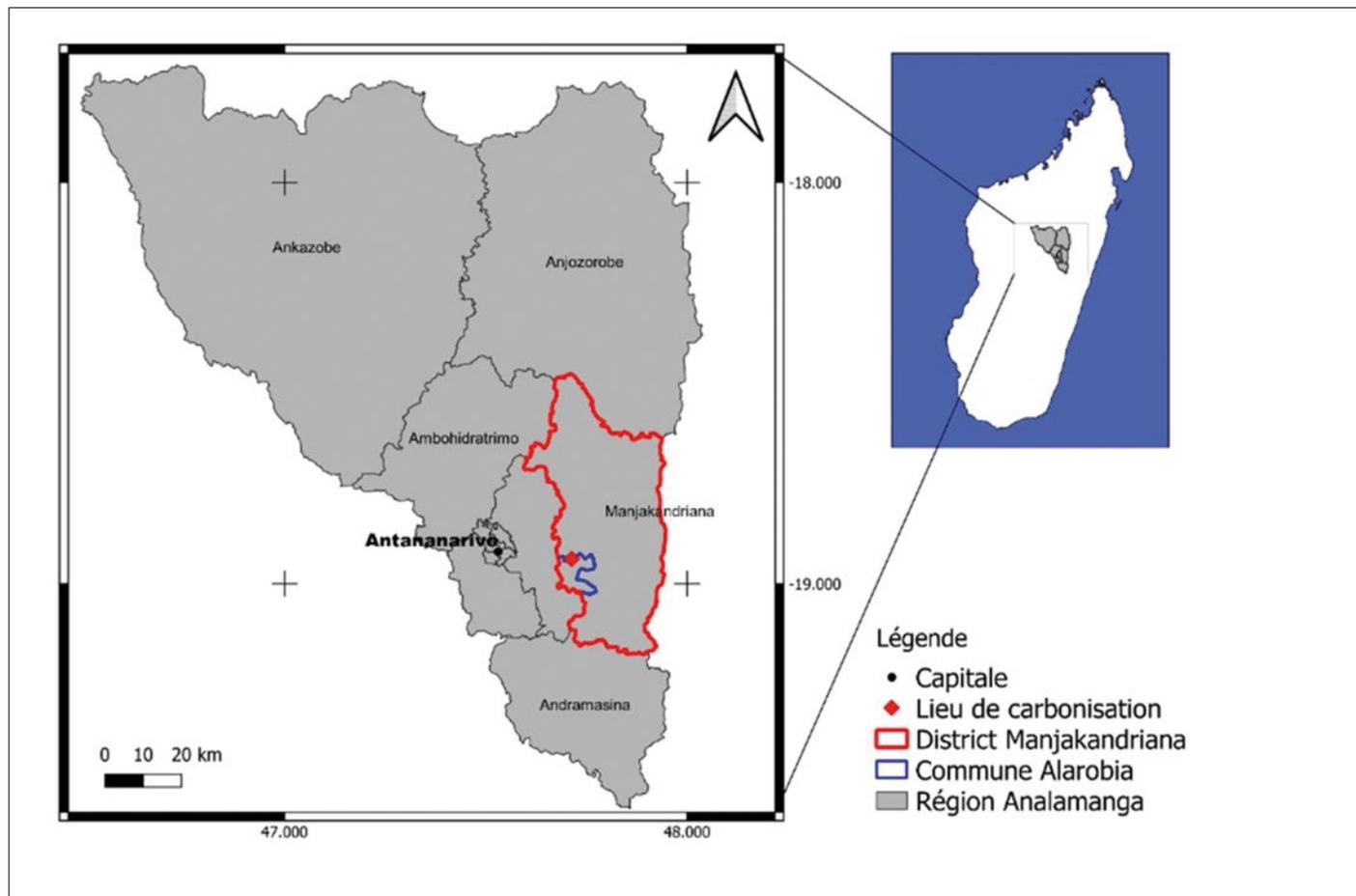


Figure 1.
Carte localisant le lieu des essais de carbonisation.
Map showing the location of the carbonisation trials.

Tableau I.

Spécifications pour la fabrication des trois meules de carbonisation testées.
Specifications for the manufacture of the three charcoal piles tested.

Meules	Spécifications et représentation schématique des étapes de la carbonisation	Schéma de montage
MATI	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de matériaux locaux. Orientation de la meule contraire au sens du vent. Bouche d'allumage : contraire au sens du vent. Meule avec des événements permettant l'entrée et la sortie d'air dans la meule : meule à tirage inversé. La charge du bois se place sur des gros longerons qui permettent la circulation d'air dans la meule. Arrangement des bois dans la meule : les bois de petite dimension sont à mettre en bas, puis ceux de grande dimension et de nouveau ceux de petites dimensions en haut. Sans accélération de la cuisson avec perçage de la meule mais existence d'un contrôle des événements d'aération par le charbonnier. Recouvrement avec des feuilles d'arbres avant le recouvrement par la terre. Surveillance de la carbonisation : fermeture ou ouverture des événements en fonction de la cuisson des charbons et de la progression de la carbonisation. Bois séchés pendant 4 semaines sur la coupe avant l'enfournement. 	
HB	<ul style="list-style-type: none"> Orientation de la meule selon le sens du vent. Bouche d'allumage : suivant le sens du vent. La charge du bois se place sur des petits longerons qui permettent la circulation d'air dans la meule. Arrangement de bois dans la meule au hasard. Sans accélération de la cuisson avec perçage de la meule au besoin. Recouvrement avec des feuilles d'arbres avant le recouvrement par la terre. Bois séchés pendant 4 semaines sur la coupe avant l'enfournement. 	
DD	<ul style="list-style-type: none"> Matériaux locaux. Pas d'évent. Bouche d'allumage : suivant le sens du vent. Pas de longeron, la charge du bois est directement posée sur terre. Pas d'arrangement de bois dans la meule. Accélération de la cuisson : les charbonniers percent la meule afin d'accélérer la cuisson. Pas de recouvrement en feuille : la meule est directement couverte par de la terre. Orientation de la meule selon le sens du vent. Bois enfournés juste après l'exploitation des bois. 	

MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ;
 DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».
 MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers;
 DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

Humidité des bois

Avant carbonisation, l'humidité de cinq échantillons de bois (bois ronds), d'un diamètre compris entre 6 et 9 cm, choisis au hasard a été mesurée en utilisant un humidimètre portable de référence *Dr.meter digital wood moisture meter* MD-812. Le principe repose sur l'insertion des deux pointes de l'humidimètre dans le bois et l'affichage donne immédiatement la valeur de l'humidité du bois en question en pourcentage (%). Pour les mesures, les écorces ont été retirées et les sondes de l'humidimètre ont été pointées sur le bois.

Caractérisation des charbons de bois

Échantillonnage des charbons

L'échantillonnage des charbons consiste à prendre des charbons qui vont représenter tout le lot fabriqué. Ces charbons échantillonnés ont été utilisés pour tous les tests et analyses. Trois prélèvements élémentaires ont été faits sur chaque sac de charbon selon la norme ISO 18135 (AFNOR, 2017) (figure 2).

Cette étape a consisté au tri des charbons en fonction de la granulométrie afin d'évaluer la taille des charbons dans chaque sac. De plus, elle visait à estimer le pourcentage des différentes tailles des charbons pour tous les sacs. Des tamis avec des mailles de 10 cm x 10 cm, 6 cm x 6 cm, 3,5 cm x 2 cm, et 1,3 cm x 1,3 cm respectivement ont été fabriqués pour trier les charbons issus de chaque prélèvement élémentaire.

La qualité du charbon de bois a été évaluée par : i) l'analyse des constituants immédiats (matières volatiles, cendres et carbone fixe) ; ii) la valeur calorifique ; iii) la densité apparente ; et iv) les dimensions du charbon de bois (Briseño-Urbe *et al.*, 2015). Pour les analyses immédiates et des contenus énergétiques, les échantillons ont été broyés sous forme de poudre de granulométrie inférieure ou égale à 200 µm en employant un mortier et un pilon en granite pour le broyage et un tamis d'analyse de type Retsch avec une maille de 200 µm pour l'obtention de la poudre.

Analyse de la propriété physique des charbons : densité apparente

La densité apparente (g/cm³) des échantillons de charbon des bois a été mesurée en suivant la Norme ASTM D2395 (Dufourny *et al.*, 2019). Cinq répétitions ont été utilisées pour chaque type de charbon analysé et la moyenne a

été prise en compte. Le volume de chaque échantillon a été déterminé par immersion dans l'eau. Pour cela, la masse du volume déplacé par l'échantillon correspond au volume de l'échantillon, et la mesure a été effectuée lorsque l'échantillon n'absorbait plus d'eau, c'est-à-dire après qu'il ait été complètement saturé en eau. La mesure est basée sur le principe d'Archimède pour avoir le volume précis d'eau déplacée en utilisant une balance de précision 0,01 g. La densité apparente a été calculée comme le rapport entre la masse sèche et le volume de l'échantillon.

Analyse des propriétés chimiques

Les propriétés chimiques analysées ont été la teneur en matières volatiles, la teneur en cendres et la teneur en carbone fixe. Les analyses ont été toutes effectuées sur une base sèche après avoir enlevé l'humidité des poudres de charbons dans une étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de leur masse. La norme NF EN 1860-2 (AFNOR, 2005) a été utilisée pour l'analyse des propriétés chimiques. Une balance analytique Sartorius PRACTUM 124-1S a été utilisée pour les pesées et les masses obtenues ont été exprimées en grammes. Pour chaque échantillon, quatre répétitions sur dix creusets ont été effectuées. La moyenne des valeurs obtenues a été retenue.

Mesure de la teneur en matières volatiles (MV)

Le four à moufle a été préchauffé à 900 °C, et l'échantillon y a été placé pendant 7 minutes sans contact avec l'air. La teneur en substances volatiles, exprimée en pourcentage de la masse, est obtenue à l'aide de l'équation (2) :

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{équation (2)}$$

où m_1 représente la masse du creuset avec son couvercle, m_2 est la masse du creuset avec son couvercle et l'échantillon (après séchage à l'étuve), et m_3 est la masse du creuset avec son couvercle et les échantillons (après 900 °C au four à moufle du type Nabertherm + stabilisation de masse dans un dessiccateur).

Détermination de la teneur en cendres

Le creuset a été introduit dans le four à moufle à température ambiante. La température a été portée à 250 °C en 30 minutes, augmentée de 250 °C à 500 °C au cours des 30 minutes suivantes, puis de 500 °C à 710 ± 10 °C en 60 minutes. Cette température a été maintenue jusqu'à

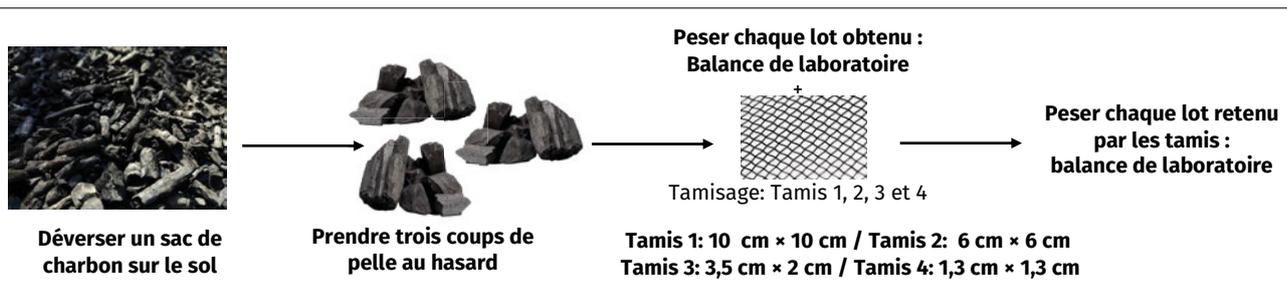


Figure 2. Échantillonnage des charbons de bois pour les tests de carbonisation.
Sampling charcoals for carbonisation tests.
Photo M. F. A. Ramilison.



Photo 2.
 Assemblage d'une meule hybride (HB) : arrangement des bois.
 Assembling a hybrid charcoal pile (HB): wood arrangement.
 Photos M. F. A. Ramilison, 2023.

l'obtention d'une masse constante. Le pourcentage massique des cendres a été calculé à partir de la masse du résidu après incinération. La teneur en cendres A (en %) s'obtient alors par l'équation (3) :

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{équation (3)}$$

où m_1 représente la masse du creuset avec son couvercle, m_2 est la masse du creuset avec couvercle + l'échantillon (après séchage à l'étuve), et m_3 est la masse du creuset avec couvercle et les cendres.

Détermination du taux de carbone fixe

Le carbone fixe est le résultat de la différence entre les teneurs en matières volatiles et matières minérales résiduelles, exprimé en pourcentage. En d'autres termes, c'est le carbone qui reste après élimination de la matière carbonique volatile et des cendres du charbon de bois sec. Le taux de carbone fixe du charbon de bois, en pourcentage, s'obtient par l'équation (4) :

$$C_{\text{fixe}} = 100 - (MV + A) \quad \text{équation (4)}$$

où C_{fixe} représente la teneur en carbone fixe (en %), MV : teneur en matières volatiles (en %) et A : teneur en cendres (en %).

Analyse du contenu énergétique : pouvoirs calorifiques et composants élémentaires

L'analyse des pouvoirs calorifiques et des composants élémentaires a été faite suivant la norme NF EN ISO 18125 (AFNOR, 2017). Pour trouver la valeur calorifique des échantillons, un calorimètre à bombe a été utilisé. Le pouvoir calorifique supérieur brut (PCS_{brut} en J/g) s'obtient par l'équation (5) :

$$PCS_{\text{brut}} = \frac{(K_1 \times E_{\text{cal}} \times (t_m - t_i) - K_1 \times (L - l) \times E_{\text{pe}})}{M} \quad \text{équation (5)}$$

où E_{cal} est l'équivalent calorimétrique du calorimètre, de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe (E_{cal} est calculé en faisant au moins 5 déterminations concordantes du PCS de l'acide benzoïque de qua-

lité « étalon pour calorimètre », E_{cal} est exprimé en Cal/°C (déterminer régulièrement, prendre la moyenne), E_{pt} est le pouvoir calorifique du platine 2,3 Cal/cm, K1 est le facteur de conversion des calories en joules = 4,1855 J/Cal, t_m est la température maximale en °C, t_i est la température initiale en °C, L est la longueur de fil de platine restante en cm et M est la masse de la pesée de l'échantillon à analyser en g.

Le pouvoir calorifique supérieur sur anhydre PCSanhydre en J/g s'obtient par l'équation (6) :

$$PCS_{anhydre} = PCS_{brut} \times \frac{100}{100 - H} \quad \text{équation (6)}$$

où H représente la teneur en humidité de l'échantillon en %.

Concernant les pouvoirs calorifiques inférieurs, les équations (7) et (8) suivantes permettent de calculer le pouvoir calorifique inférieur anhydre $PCI_{anhydre}$ en J/g, et le pouvoir calorifique inférieur brut PCI_{brut} en J/g respectivement :

$$PCI_{anhydre} = PCS_{anhydre} - (212,2 \times X) \quad \text{équation (7)}$$

où X représente la teneur en hydrogène de l'échantillon en % sur sec et

$$PCI_{brut} = PCI_{anhydre} \times (1 - 0,01 \times H) - (24,43 \times H) \quad \text{équation (8)}$$

où H représente la teneur en humidité de l'échantillon en %.

Afin d'effectuer une comparaison réaliste et à titre d'échantillon témoin, un sac de charbon d'*E. robusta* provenant du district de Manjakandriana a été acheté sur le marché et choisi de manière aléatoire (charbon x). Les données concernant l'âge et les caractéristiques des bois carbonisés pour le charbon x sont inconnues. Les analyses, telles que les constituants immédiats et les pouvoirs calorifiques, ont aussi été réalisées sur cet échantillon.

Analyse des données

Le logiciel R version 4.3.1 (R Core Team, 2023) a été utilisé pour toutes les analyses statistiques. Un test de Shapiro a permis de tester la normalité des groupes. Si la distribution des groupes suit la loi normale, une analyse de variance a été conduite, suivie d'un test de Tukey pour voir si la différence entre les groupes testés est significative au seuil de 5 %. Sinon, des tests non paramétriques ont été effectués. Dans ce cas, l'analyse de Kruskal-Wallis a permis de tester si les différences entre les caractéristiques des groupes testés étaient significativement différentes au seuil de 5 %. Si le test est significatif, ce test indique qu'il y a des preuves suffisantes pour conclure qu'au moins un groupe diffère significativement des autres, mais il ne spécifie pas quels groupes sont différents les uns des autres. Des tests de comparaisons multiples ont été ensuite effectués pour identifier les différences spécifiques entre les groupes. L'analyse de Conover-Iman a été utilisée pour identifier spécifiquement quels groupes diffèrent significativement les uns des autres après avoir rejeté l'hypothèse nulle de l'absence de différence entre les groupes testés.

Résultats et discussions

L'analyse des propriétés physiques et chimiques des bois et des charbons de bois permet de les caractériser. Cette section présente les résultats et les discussions concernant la densité des bois et des charbons de bois, le rendement de carbonisation, ainsi que les caractéristiques immédiates et énergétiques des charbons produits par rapport aux techniques utilisant les meules MATI, HB et DD. Une comparaison avec un échantillon de charbon x acheté sur le marché y est également incluse. Les informations disponibles sur le charbon acheté se limitent à sa provenance, Manjakandriana, et à l'espèce de bois carbonisé, *E. robusta*, tandis que les données relatives à l'âge et aux caractéristiques des bois carbonisés restent inconnues.

Densité des bois

La mesure de la densité à 12 % d'humidité des échantillons de bois d'*E. robusta* destiné pour les carbonisations a donné la valeur moyenne de 0,50 g/cm³ ± 0,01. L'étude de (Pereira *et al.*, 2012) a obtenu une densité de base des bois d'eucalyptus comprise entre 0,53 et 0,59 g/cm³. La méthode utilisée par cette dernière a été la méthode hydrostatique, dans laquelle les échantillons ont été immergés dans du mercure. Pour la même espèce d'*E. robusta*, Mevanarivo *et al.*, (2020) ont obtenu des valeurs de densité à 12 % d'humidité de bois de 0,543 à 0,836 g/cm³. Ces valeurs ont été déterminées par microdensitométrie à rayons X avec des bois âgés de 2 à 10 ans. La faible densité des bois observée dans cette étude pourrait s'expliquer par le jeune âge des arbres utilisés pour la carbonisation. En effet, des arbres âgés de seulement 4 ans ont été coupés pour cette étude. Cela pourrait expliquer la différence des valeurs obtenues. Selon Santos *et al.* (2011), la densité de base pour la production de charbon de bois devrait être supérieure à 0,5 g/cm³.

Humidité initiale des bois et rendement de carbonisation

Pour la carbonisation améliorée et hybride, le bois a été coupé 4 semaines auparavant, tandis que pour la carbonisation traditionnelle, le bois utilisé provenait de coupes récentes, effectuées la veille de la carbonisation. Une des spécifications d'une technique de carbonisation améliorée est l'utilisation des bois qui ont une faible teneur en humidité (< 20 %) (Montagne *et al.*, 2010 et Canal *et al.*, 2020). La technique traditionnelle n'exige aucune spécification. Le tableau II récapitule les résultats des carbonisations effectuées, montrant une comparaison de l'humidité initiale et de la quantité initiale des bois, de la durée, de la qualité de cuisson, des rendements bruts et des rendements sur une base sèche en charbon de bois.

Le grand défi du secteur de la carbonisation est d'augmenter le rendement du charbon de bois (Silva et Ataíde, 2019). L'application de la technique améliorée de carbo-

Tableau II.

Résultats des carbonisations réalisées avec les trois types de meules.
Results of carbonisation using three types of charcoal piles.

Carbonisation	MATI	HB	DD
Humidité des bois	13 - 18 %	13 - 18 %	37 - 38 %
Masse de bois chargé	1 650 kg	1 650 kg	550 kg
Sous-produit	2 % (Brisures)	2 % (Brisures)	8 % (Brisures + Incuits)
Durée	12 jours	12 jours	9 jours
Rendement brut	25 %	19 %	12 %
Rendement sur base sèche	29 %	23 %	20 %

MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».
MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

Carbonisation par l'utilisation d'une MATI double le rendement brut de la carbonisation (25 %) par rapport à la technique traditionnelle (12 %). Ce fait permettrait une utilisation plus efficace de la ressource et réduirait les besoins en bois pour produire la même quantité de charbon. La technique hybride apparaît comme une méthode intermédiaire entre l'application de ces derniers. Cette présente étude confirme les résultats obtenus par Verhaegen *et al.* (2014) et Madon (2018) qui ont obtenu un rendement pondéral des meules traditionnelles en terre allant de 10 à 12 %. L'application de TAC a aussi permis de doubler le rendement des meules (Montagne *et al.*, 2010 ; Burny *et al.*, 2008). Au moment du défournement, il a été constaté que les charbons issus de MATI et de HB ne présentaient pas d'incuits, au contraire de la meule DD qui donne en moyenne $2,86 \pm 1,63$ % d'incuits par rapport à la masse de charbon obtenue. L'application d'une MATI permet ainsi d'obtenir du charbon de bois de bonne qualité (Verhaegen *et al.*, 2014). La meule hybride HB n'est pas encore une méthode connue dans la littérature, mais c'est une variante d'une MATI et elle a donné un rendement intermédiaire. L'humidité initiale du bois pourrait être la raison des différences entre les rendements en charbons de bois issus de MATI-HB (13-18 % d'humidité de bois initiale) et DD (37-38 % d'humidité de bois initiale). Même si les bois utilisés pour MATI et HB avaient les mêmes taux d'humidité, l'orientation de la meule et l'emplacement de la bouche d'allumage par rapport au vent dominant rendent plus efficace la TAC. D'après les conclusions de l'étude de Canal *et al.* (2020) il est conseillé d'opter pour du bois dont le taux d'humidité est inférieur à 20 % (base sèche) pour la carbonisation. Dans cette fourchette, cette étude constatait une production accrue de charbon de bois, d'énergie et de carbone fixe, ainsi qu'une moindre friabilité des produits. Les études d'Orabi *et al.* (2021) et de Da Silva *et al.* (2024) confirment que la température de carbonisation joue un

rôle déterminant dans la qualité finale du charbon de bois. Dans de futures études, en suivant la même perspective que Curay *et al.* (2020), la température de production et la pression pourraient être utilisées pour déterminer les facteurs influençant la qualité du charbon de bois pendant la pyrolyse.

Échantillonnage des charbons de bois

Lors du défournage, les charbonniers ont procédé tout de suite aux ensachages des charbons de bois obtenus dans des sacs en polypropylène. Chaque sac peut contenir en moyenne 30 à 34 kg de charbon de bois en fonction du remplissage et de l'empilement par les charbonniers. Selon le type de carbonisation, des impuretés et des poussières ont été observées. L'analyse de la répartition granulométrique des charbons a été faite au laboratoire. Onze sacs de charbon issus de MATI, neuf sacs de charbons issus de HB et deux sacs de charbons issus de DD ont été obtenus. Pour les charbons issus de MATI et HB, trois sacs respectivement ont été pris au hasard. Les deux sacs de charbons issus de DD ont été considérés pour l'échantillonnage. Il n'y a pas encore de littérature existante sur le criblage des contenus des sacs de charbons de bois issus des carbonisations artisanales à Madagascar. À titre d'exemple, le tableau III donne les résultats de la répartition granulométrique des charbons de bois produits par la méthode MATI.

La figure 3 illustre le pourcentage massique de tous les charbons retenus par les tamis de séparation. Il est observable que plus de 40 % de la masse des charbons dans les sacs sont retenus par une ouverture de tamis de 3,5 cm x 2 cm.

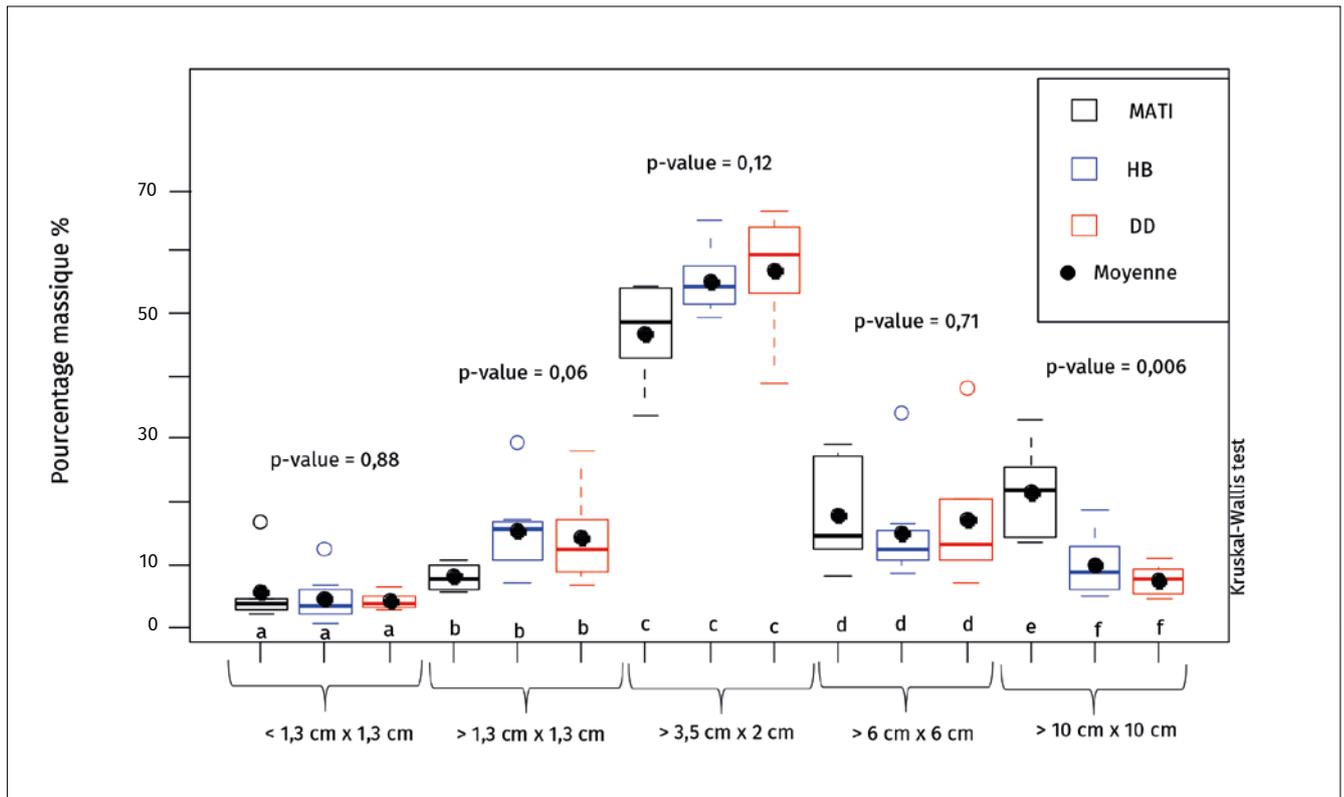
L'analyse statistique des résultats sur l'échantillonnage montre que pour les charbons retenus par une ouverture de tamis de 10 cm x 10 cm, la différence observée entre les trois types de charbons de bois issus de MATI, HB et DD est significative avec une p-value = 0,006 au seuil de 5 %. Cette différence est observée entre les charbons issus de MATI-HB (p-value = 0,001) et MATI-DD (p-value = 0,0003) mais n'est pas significative entre les charbons issus de HB-DD (p-value = 0,20). Pour les charbons retenus par une ouverture de tamis de 6 cm x 6 cm, il n'y a pas de différence significative entre eux avec une p-value = 0,71. Il en est de même pour les charbons retenus par une ouverture de tamis de 3,5 cm x 2 cm avec une p-value = 0,12, les charbons retenus par une ouverture de tamis de 1,3 cm x 1,3 cm avec une p-value = 0,06 et les charbons récupérés au-dessous du dernier tamis avec une p-value = 0,88. Il a été constaté que la méthode utilisant MATI produit des charbons de bois plus volumineux (qui sont retenus par une maille de 10 cm x 10 cm) par rapport aux deux autres pratiques de carbonisation. Ce fait pourrait s'expliquer par l'utilisation de bois généralement sec (< 20 % d'humidité) pour MATI, l'arrangement dépourvu d'interstices pour les bois et le contrôle des événements (ouverture ou fermeture) en fonction de la cuisson des charbons dans chaque partie de la meule. Par contre, le pourcentage des charbons de taille moyenne et petit est statistiquement similaire pour les trois types de carbonisations testés.

Tableau III.

Photos des charbons de bois avec des granulométries différentes (exemple : charbon MATI). MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension.

Photos of charcoals with different grain sizes (example: MATI charcoal). MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended.

Photos M. F. A. Ramilison, 2024.

**Figure 3.**

Boîtes à moustaches du pourcentage des charbons de bois récupérés au-dessous de chaque tamis selon les trois types de carbonisation. MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».

Box plots of the percentage of charcoals recovered under each sieve according to the three types of carbonisation. MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

Densité apparente des charbons fabriqués

La densité apparente des échantillons des charbons de bois d'*E. robusta* issus des trois types de carbonisation a donné les valeurs suivantes : MATI avec $0,452 \pm 0,04$ (CV = 8,84 %) ; HB avec $0,420 \pm 0,06$ (CV = 14,77 %) ; DD avec $0,427 \pm 0,02$ (CV = 4,27 %). Cette étude montre une homogénéité des produits obtenus via les mêmes bois. La différence observée entre ces valeurs de densité apparente n'est pas significative au seuil de 5 % (p -value = 0,3). L'ensemble des résultats montrent donc que les différents procédés de carbonisation n'ont pas d'impact significatif sur la densité apparente des charbons obtenus. Les valeurs trouvées lors de cette étude sont un peu faibles par rapport à celles de Doat *et al.* (1975) utilisant la même espèce de bois carbonisée qui a une densité apparente entre 0,5 à 0,6. Pour le même genre, les résultats de cette étude sont conformes avec ceux de Dufourny *et al.* (2019) et Oliveira *et al.* (2023), qui ont obtenu une densité apparente de charbon d'eucalyptus passant de 0,362 à 0,448 g/cm³ et 0,466 g/cm³ respectivement, mais un peu élevés par rapport aux résultats de Noumi *et al.* (2016), qui ont trouvé des valeurs comprises entre 0,294 et 0,405 g/cm³ pour des espèces de bois d'eucalyptus carbonisées dans des conditions de laboratoire. Pour cette présente étude, l'âge des bois carbonisés (4 ans) pourrait être la raison des différences observées par rapport à la littérature. Pour une bonne optimisation lors de l'usage, il est souhaitable que la densité apparente du charbon de bois ne soit pas inférieure à 0,40 g/cm³ (Santos, 2008).

Teneur en matières volatiles des charbons issus des trois types de carbonisation et du charbon x (acheté sur le marché)

Les boîtes à moustaches de la teneur en matières volatiles des charbons de bois (figure 4) décrivent que les trois types de charbons fabriqués ont des valeurs proches avec une teneur moyenne de $15,52 \pm 1,01$ % (CV = 6,51 %) pour HB, $16,66 \pm 2,98$ % (CV = 17,89 %) pour MATI, et $17,47 \pm 3,74$ % (CV = 21,41 %) pour DD. Pour le charbon x, sa teneur en matières volatiles est de $12,19 \pm 0,96$ % (CV = 7,88 %).

Les valeurs élevées des coefficients de variation pour MATI et DD expliquent l'hétérogénéité des résultats obtenus. Pourtant, la différence entre les trois types de charbon réalisés n'est pas significative ($p = 0,17$) au seuil de 5 %. Cela peut être dû à l'utilisation des bois de même âge issus d'une même parcelle de forêt. Les composants chimiques des bois carbonisés et les conditions environnementales ont été similaires. Ainsi, la température des différents types de pyrolyse semble similaire et n'a pas entraîné d'effets significatifs sur la composition en matières volatiles des charbons produits. Botrel *et al.* (2007), Neves *et al.* (2011), Mevanarivo (2018) et Temmerman *et al.* (2019) ont trouvé une teneur en matières volatiles assez élevée de 25,5 %, 18,92 %, 21,97 % et 29,95 %, respectivement. Les études de Mevanarivo (2018) et Temmerman *et al.* (2019) ont été faites dans des conditions contrôlées en laboratoire utilisant des bois d'*E. robusta* âgés de 2 à 10 ans et avec un four à chambre de combustion externe, respectivement. Quant au charbon du marché, il a

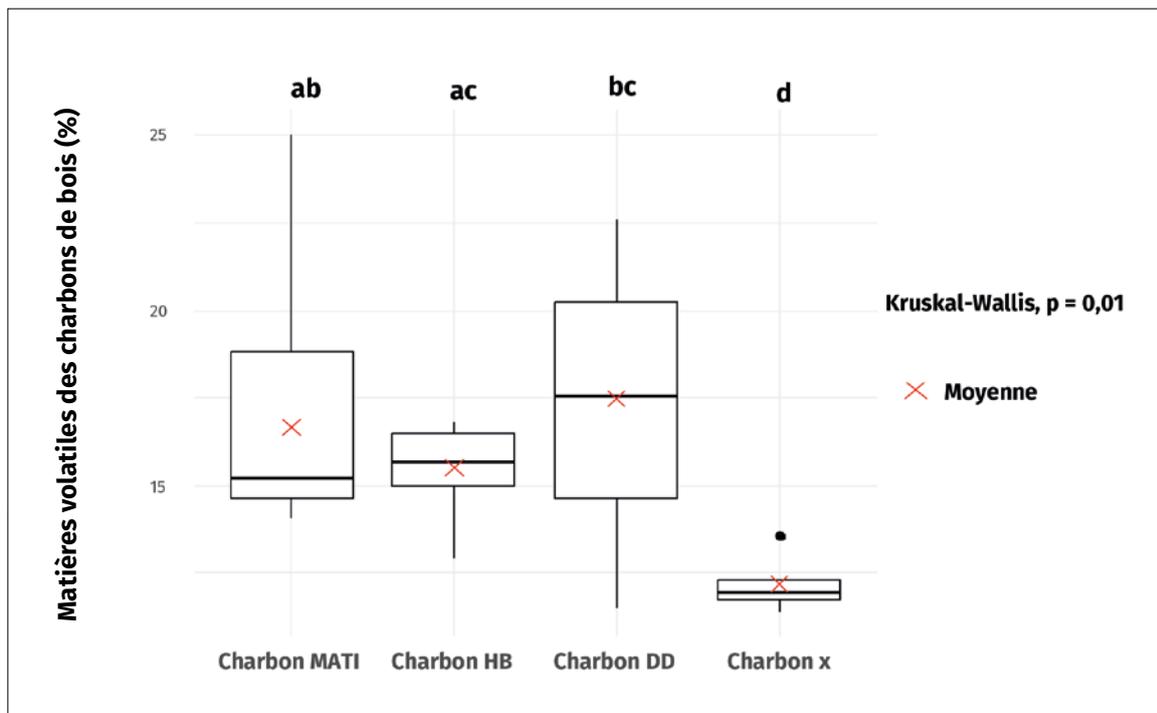


Figure 4. Teneur en matières volatiles des charbons de bois selon les trois types de carbonisation et le charbon x. MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ». *Volatile matter content of charcoals according to the three types of carbonisation and x charcoal. MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.*

une valeur en matières volatiles assez faible (12,19 %) par rapport aux trois types de charbons fabriqués. Ces variabilités peuvent être dues à l'origine, l'âge et la condition même de la carbonisation (Oliveira *et al.*, 2023). La différence en matières volatiles du charbon acheté au marché par rapport aux trois types de charbons fabriqués est significative (p -value = 0,01) au seuil de 5 %.

Teneur en cendres des charbons issus des trois types de carbonisation et du charbon x

La teneur en cendres des charbons varie de $2,04 \pm 0,44$ % (CV = 21,57 %) pour le charbon HB à $3,59 \pm 0,42$ % (CV = 11,70 %) pour le charbon x comme le montre la figure 5.

Le charbon acheté au marché, le charbon x, possédant la teneur la plus haute en cendres, indique qu'il contient une forte présence de matières minérales. Celle de DD est de $3,15 \pm 0,27$ % (CV = 8,57 %), et pour MATI, elle est de $2,96 \pm 0,09$ % (CV = 3,04 %). L'analyse statistique par paire montre que ces quatre teneurs en cendres sont significativement différentes entre elles au seuil de 5 %. Cette étude constate que la méthode de carbonisation traditionnelle DD peut laisser plus de résidus minéraux que pour MATI et HB. La valeur de la teneur en cendres trouvée par Mevanarivo (2018), qui a travaillé avec les mêmes espèces, est de 2,29 % (CV = 15,72 %) et celle de Temmerman *et al.* (2019) est de 0,44 %. Quant à Botrel *et al.* (2007) et Neves *et al.* (2011), ils ont obtenu des valeurs très faibles allant de 0,25 % à 0,80 % respectivement. Les valeurs trouvées pour MATI et DD sont ainsi généralement élevées. Une teneur élevée en cendres peut entraîner un niveau élevé de nuisance lors de son utilisation

dans les zones résidentielles. En effet, les cendres diminuent la valeur calorifique du charbon. Cela est dû au fait qu'une teneur élevée en cendres ou en matières volatiles implique une quantité plus faible de carbone fixe dans le charbon de bois (Dufourny *et al.*, 2019). Étant donné que le carbone contient de l'énergie, utiliser un charbon de bois à faible teneur en cendres est important. Cependant, un charbon de bois de bonne qualité a une teneur en cendres inférieure à 5 % (ISO 17225-1 :2021), donc les charbons de bois d'eucalyptus obtenus lors de cette étude sont tous dans les normes.

Teneur en carbone fixe des charbons issus des trois types de carbonisation et du charbon x

La teneur en carbone fixe est le principal paramètre qui détermine la qualité du charbon de bois. Plus la teneur en carbone fixe est élevée, meilleur est le charbon de bois (Elyounssi *et al.*, 2018 ; Laorach *et al.*, 2021). Par rapport aux carbonisations réalisées, les charbons issus de DD présentent une teneur moyenne en carbone fixe de $79,38 \pm 3,91$ % (CV = 4,93 %), viennent ensuite les charbons issus de MATI avec $80,58 \pm 2,94$ % (CV = 3,65 %) puis les charbons de HB avec une teneur moyenne de $82,45 \pm 1,37$ % (CV = 1,66 %) (figure 6). Le charbon x a une teneur en carbone fixe de $75,02 \pm 2,07$ %. Les charbons MATI, HB et DD ont des teneurs en carbone fixe élevées par rapport à celles observées dans la littérature. Mevanarivo (2018) à partir d'une carbonisation en laboratoire et Temmerman *et al.* (2019) à partir d'un four en béton ont trouvé des taux de carbone fixe de 76,02 % et de 74,05 %, respectivement.

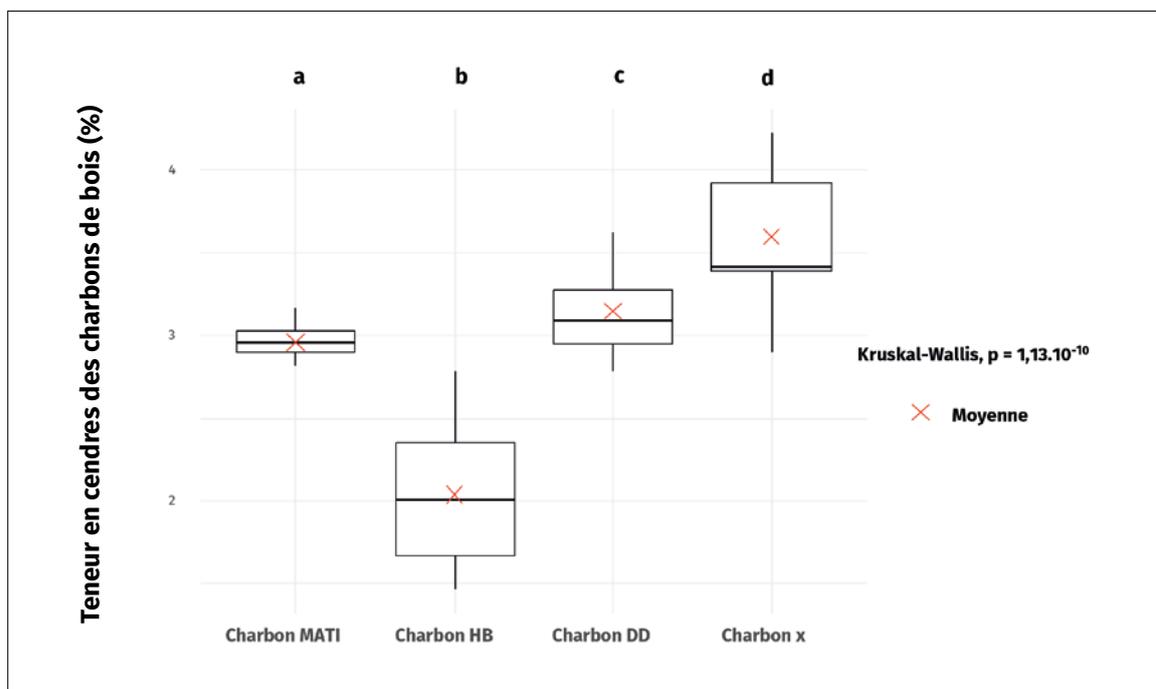


Figure 5.

Teneur en cendres des charbons de bois selon les trois types de carbonisation et du charbon x. MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».

Ash content of charcoals according to the three types of carbonisation and charcoal x. MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

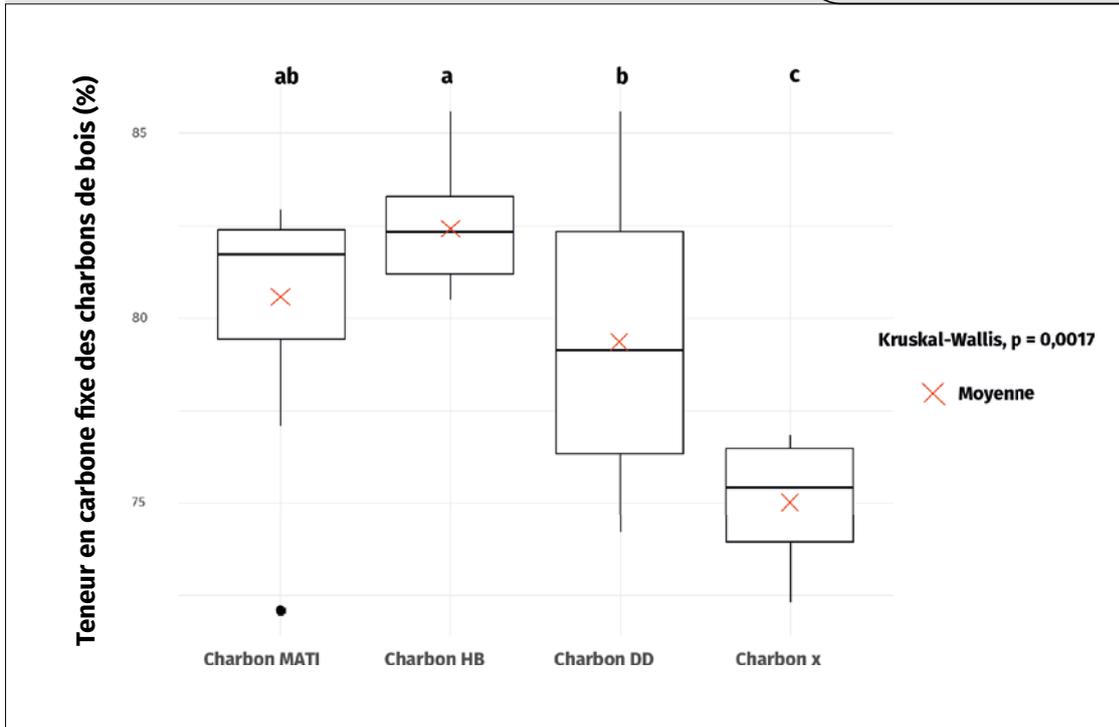


Figure 6.

Teneur en carbone fixe des charbons de bois selon les trois types de carbonisation et le charbon x.

MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».

Fixed carbon content of charcoals according to the three types of carbonisation and x charcoal.

MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

La teneur en carbone fixe des quatre types de charbon caractérisés est significativement différente au seuil de 5 % (p -value = 0,0017). Mais cette différence n'est pas significative entre les teneurs en carbone fixe des charbons issus de MATI/HB (p -value = 0,03) et MATI/DD (p -value = 0,14) d'après l'analyse comparative par paires de Conover Iman. Les résultats trouvés par cette étude montrent la différence significative entre les charbons fabriqués et les charbons achetés. Cette différence peut être attribuée à la composition chimique du bois. Pour la même espèce de bois carbonisés, l'étude de Botrel *et al.* (2007) a trouvé une teneur en carbone fixe de 74,25 %, tandis que l'étude de Neves *et al.* (2011) a trouvé une teneur en carbone fixe de 80,29 %. Les valeurs obtenues dans cette étude se situent dans la fourchette des chiffres rapportés par ces auteurs. Par rapport au charbon x, la différence observée pourrait être due à la qualité des bois utilisés et à ses propriétés chimiques et anatomiques (Pereira *et al.*, 2012) qui sont différentes des bois utilisés pour MATI, HB et DD. L'étude de Laorach *et al.* (2021) évalue des caractéristiques physiques et chimiques de charbon de bois produits à l'aide de trois procédés traditionnels de carbonisation (meule en argile, meule en ciment et meule à haute température). Les résultats montrent que chaque procédé influence différemment les propriétés du charbon, surtout sur la teneur en carbone fixe. La raison provient de la variation de température sur chaque meule de carbonisation. Ces observations montrent que

la méthode de carbonisation joue un rôle crucial dans la détermination du contenu en carbone fixe. Les différences significatives obtenues sur les teneurs en carbone fixe dans cette présente étude peuvent être expliquées par la variation de température au sein des meules. En effet, le contrôle de l'entrée d'air (aération) varie selon les meules de carbonisation. L'étude de Da Silva *et al.* (2024) confirme qu'une température de carbonisation de 500 °C est recommandée, car elle a permis d'obtenir un pourcentage plus élevé de carbone fixe et, par conséquent, une valeur calorifique plus élevée pour le charbon de bois d'eucalyptus. Cette étude a présenté des propriétés énergétiques avec un rendement total en charbon (33,23 %), une teneur en carbone fixe (63,50 %) et une teneur en cendres (0,23 %) se situant dans la plage recommandée pour un charbon de qualité.

Comparaison des pouvoirs calorifiques des charbons de bois selon les trois types de carbonisation

La figure 7 donne la comparaison des analyses des pouvoirs calorifiques des charbons obtenus lors de cette étude. Les valeurs énergétiques des charbons de bois varient peu pour les espèces de même genre lorsqu'ils ont été carbonisés dans les mêmes conditions (Jesus *et al.*, 2017). Dans cette présente étude, l'âge des bois, les conditions environnementales ont été les mêmes. La différence réside dans le procédé et la conduite de la carbonisation.

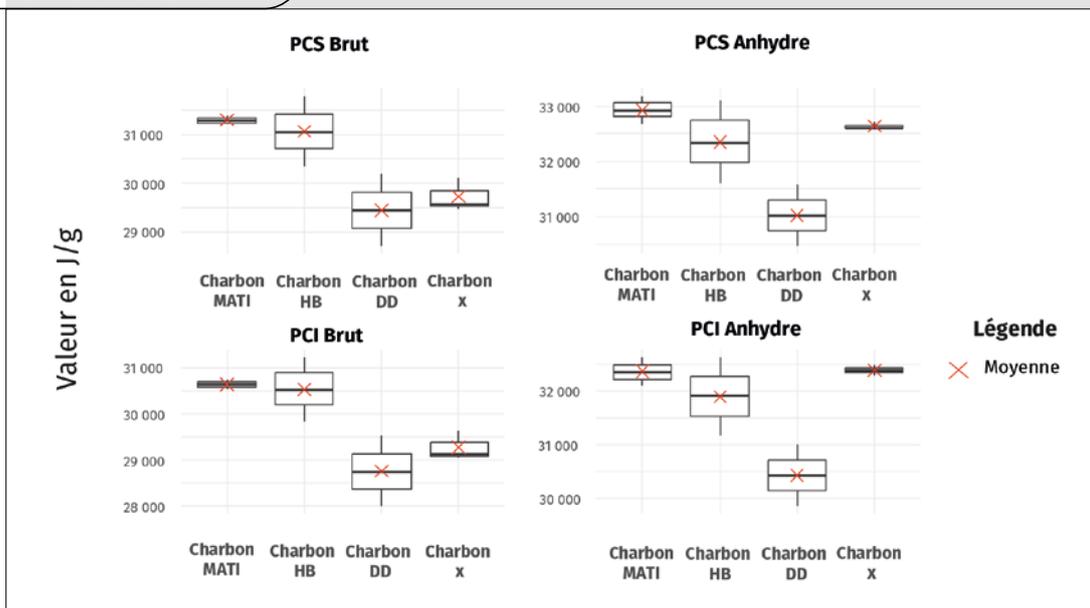


Figure 7.

Pouvoirs calorifiques des charbons de bois. PCS : Pouvoir calorifique supérieur ; PCI : Pouvoir calorifique inférieur. MATI : meule améliorée à tirage inversé, actuellement en phase d'extension ; HB : une meule hybride utilisée localement par les charbonniers ; DD : meule traditionnelle « Doro Dedaka ».
Calorific value of charcoals. PCS: Higher Calorific Value; PCI: Lower Calorific Value. MATI: Improved reversed-turn charcoal pile, which is currently being extended; HB: a hybrid charcoal pile used locally by charcoal makers; DD: the traditional practice of 'Doro Dedaka'.

Les analyses statistiques par paire des résultats de l'analyse des contenants énergétiques des charbons sont résumées dans le tableau IV. Il est constaté que le charbon MATI et le charbon HB présentent des différences significatives avec le charbon DD et le charbon x dans plusieurs paramètres, tandis que les différences entre charbon MATI et charbon HB sont moins marquées. Par conséquent, la carbonisation traditionnelle ne produit pas un charbon de bois de meilleure qualité en termes d'énergie par unité de masse.

Le pouvoir calorifique est utilisé pour évaluer le contenu énergétique du charbon de bois. Les valeurs obtenues par cette étude confirment les résultats dans la littérature, comme par exemple celle de Pereira *et al.* (2012), qui a obtenu un pouvoir calorifique supérieur moyen du charbon d'eucalyptus compris entre 29 600 J/g et 31 890 J/g.

La valeur trouvée par Mevanarivo (2018) avec des charbons d'eucalyptus provenant de Manjakandriana, mais avec une carbonisation contrôlée en laboratoire a été de 28 510 J/g avec un coefficient de variation de 24 %. Une étude récente menée par Da Silva *et al.* (2024) a rapporté une valeur calorifique supérieure de 29 492 J/g pour le charbon issu de biomasse d'eucalyptus, produit par pyrolyse à une température de 500 °C. Cette présente étude constate que la TAC permet de donner des charbons avec des pouvoirs calorifiques élevés et des valeurs homogènes, selon les boîtes à moustaches représentées dans la figure 7. Choisir la méthode MATI s'avère avantageux, car outre le rendement final en charbon, la teneur en carbone fixe et le pouvoir calorifique supérieur sont indicatifs de la qualité du charbon et de l'efficacité énergétique de la conversion pyrolytique (Elyoungssi *et al.*, 2018).

Tableau IV.

Comparaison par paire des pouvoirs calorifiques des charbons de bois des trois types de meules testées.
Pairwise comparison of the calorific values of charcoal from the three types of charcoal pile tested.

p-value	Charbon DD				Charbon HB				Charbon MATI			
	PCS Brut	PCS Anhydre	PCI Brut	PCI Anhydre	PCS Brut	PCS Anhydre	PCI Brut	PCI Anhydre	PCS Brut	PCS Anhydre	PCI Brut	PCI Anhydre
Charbon HB	0,02*	0,05	0,02*	0,05								
Charbon MATI	0,02*	0,02*	0,02*	0,06	0,5	0,19	0,5	0,5				
Charbon x	0,5	0,05	0,31	0,05	0,02*	0,48	0,02*	0,5	0,02*	0,16	0,02*	0,5

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur ; PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.
* : différence significative au seuil de 5 % (Test de Conover Iman).



Photo 3.

Assemblage d'une meule traditionnelle « Doro Dedaka » (DD) : arrangement des bois.
Assembling a traditional "Doro Dedaka" charcoal pile (DD): wood arrangement.
Photos M. F. A. Ramilison, 2023.

Conclusion

Cette étude a permis de caractériser et de comparer les charbons produits selon trois techniques de carbonisation. Les charbons obtenus étaient produits avec de l'*Eucalyptus robusta* âgé de 4 ans venant d'une même parcelle de forêt du district de Manjakandriana à Madagascar. Une technique améliorée de carbonisation (TAC) utilisant une meule améliorée à tirage inversé (MATI), une technique courante des charbonniers locaux (meule avec une méthode hybride ou HB) et une technique traditionnelle (Doro Dedaka ou DD) ont été mises en œuvre. Pour une comparaison réaliste, du charbon d'*E. robusta* acheté sur le marché (charbon x) et issu de la même zone d'exploitation a également été caractérisé. Les résultats ont révélé que les charbons produits à partir des meules MATI et HB ont des caractéristiques quasi-similaires. Les charbons HB avaient la plus faible teneur en cendres ($2,04 \pm 0,44$ %) et la plus haute teneur en carbone fixe ($82,45 \pm 1,37$ %). Les charbons MATI ont une teneur en cendres de ($2,96 \pm 0,09$ %) et possèdent une teneur en carbone fixe statistiquement égale à celle des charbons HB ($80,58 \pm 2,94$ %). Concernant les proprié-

tés énergétiques, les charbons MATI ont des valeurs élevées ($PCS_{brut} = 31\,307$ J/g) par rapport aux charbons issus de HB et DD. Comparé aux charbons issus des méthodes utilisant MATI, HB et DD, le charbon x présente la plus faible teneur en carbone fixe ainsi que le plus bas pouvoir calorifique (PCS_{brut}). Cette étude démontre que l'utilisation de la TAC avec la méthode utilisant une meule MATI produit des charbons avec de meilleures caractéristiques, tant sur le rendement de carbonisation que sur les contenus énergétiques des charbons produits avec les autres techniques de carbonisation en meules utilisées à Madagascar. Par conséquent, le charbon de bois provenant d'une meule MATI apparaît être le meilleur choix comme combustible de cuisson pour les ménages et les restaurants. Cependant, il serait également intéressant de compléter cette étude (basée sur des caractérisations physico-chimiques des charbons) par des tests de performances des différents charbons, lors de leur usage dans des foyers de combustion couramment utilisés à Madagascar. Cela permettra de déterminer lequel est le plus approprié et bénéfique pour les ménages.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude envers toutes les personnes ayant contribué à la

réalisation de ce travail. Ils remercient particulièrement le financement du Projet DIABE (Union Européenne), ainsi que les charbonniers et les étudiants du laboratoire (UFR-Bois ESSA Forêts) pour leur précieuse aide.

Financements

Le travail présenté dans cet article a bénéficié d'un financement de l'Union Européenne dans le cadre du projet DIABE (Développement Intégré Bois Energie) du programme FED / AFAFI-Centre (Appui au financement de l'agriculture et aux filières inclusives dans le centre de Madagascar), suivant la convention de subvention FED/2020/419-05, gérée par le BACE (Bureau d'appui à la coopération extérieure) du Ministère de l'Économie et des Finances de Madagascar

Accès aux données

Les données utilisées dans cette étude sont accessibles via l'entrepôt numérique du Cirad : Blin J., Ramilison M. F. A., Rousset P., Bouillet J.-P., Valette J., Ramanantoandro T., 2025. Comparaison des caractéristiques des charbons de bois issus de trois méthodes de carbonisation à Madagascar. CIRAD Dataverse. <https://doi.org/10.18167/DVN1/EEIMVQ>. L'accès est libre, conformément au principe FAIR, afin de garantir leur accessibilité, interopérabilité et réutilisation.

Références

- AFNOR, 2005. NF EN 1860-2 : 2005-06, Appareils, combustibles solides et allume-barbecue pour la cuisson au barbecue – Partie 2 : Charbon de bois et briquettes de charbon de bois pour barbecue – Exigences et méthodes d'essai. Afnor éditions. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-18602/appareils-combustibles-solides-et-allumefeu-pour-la-cuisson-au-barbecue-par/fa202228/348753>
- AFNOR, 2017. NF EN ISO 18135, Biocombustibles solides – Échantillonnage. Afnor éditions. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-18135/biocombustibles-solides-echantillonnage/fa189424/73731>
- Andriamifidy Andoniaina V., 2014. Filières bois et charbon de bois dans la région Analamanga et approvisionnement de la ville d'Antananarivo. Antananarivo, Cirad, 68 p.
- Bouillet J.-P., Razafimahatratra S., Rasamindisa A., Randriamanantena L., Rafanomezantsoa R., Rakotondraoelina H., et al., 2019. The ARINA project: A participative and inclusive approach for rural afforestation in Madagascar. Cirad, 44 p. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=589005
- Botrel M. C. G., Trugilho P. F., Rosado S. C. D. S., Silva J. R. M. D., 2007. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. Revista Árvore, 31 (3): 391-398. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>
- Briseño-Urbe K. C., Carrillo-Parra A., Bustamante-García V., González-Rodríguez H., Foroughbachk R., et al., 2015. Firewood Production, Yield and Quality of Charcoal from *Eucalyptus camaldulensis* and *E. microtheca* Planted in the Semiarid Land of Northeast Mexico. International Journal of Green Energy, 12 (9): 961-969. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.891121>
- Burny P., Montagne P., Crehay R., Randrianja H., Rasamindisa A., et al., 2008. La production de charbons de bois à Madagascar : Amélioration technique et économique. In Petrescu-Mag, Ruxandra Malina; Burny, Philippe (Eds.) Environmental policies and legislation. <https://hdl.handle.net/2268/113466>
- Canal W. D., Carvalho A. M. M., Figueiró C. G., Carneiro A. de C. O., Fialho L. de F., Donato D. B., et al., 2020. Impact of wood moisture in charcoal production and quality. Floresta e Ambiente, 27: e20170999. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.099917>
- Charpin M., Legeay D., Rabemanantsoa N., Richter F., 2019. Caractérisation des filières bois-énergie et élaboration du schéma d'approvisionnement en bois-énergie de la région Analamanga, Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, 340 : 13-25. <https://doi.org/10.19182/bft2019.340.a31704>
- Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R., Easdale T. A., Steege H. T., Webb C. O., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. Ecological Applications, 16 (6): 2356-2367. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:RAPVOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:RAPVOW]2.0.CO;2)
- Curay M., Ching A., Duran K., Talingting R., Ballardares S., 2020. Characterization of charcoal produced by different pyrolyzing techniques. Advanced Technology Research, 42 (10). <https://doi.org/10.32945/atr42210.2020>
- Da Silva R., Da Silva G., Marchesan R., De Souza P., Colares C., De Miranda Fernandes Reis G., Ferraz F., Da Silva D., 2024. Energy potential of *Eucalyptus* spp. clone biomass in the northern region of the legal Amazon. Observatório de la Economía Latinoamericana, 18 p. <https://doi.org/10.55905/oelv22n3-209>
- Doat J., Pétrouff G., 1975. La carbonisation des bois tropicaux. Essais de laboratoire et perspectives industrielles. Bois et Forêts des Tropiques, 159: 55-72. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/19272>
- Dufourny A., Van De Steene L., Humbert G., Guibal D., Martin L., Blin J., 2019. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 137: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>
- Elyounssi K., Volle G., El Hamidi A., Blin J., 2018. Yield and quality of charcoals from olive mill residues and its stone and pulp fractions: An enhanced comparative study. International Journal of Green Energy, 15 (8): 489-495. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1482469>

- FAO, 2020. Commission des forêts et de la faune sauvage pour l'Afrique. Food and Agriculture Organisation (FAO), Site web. <https://www.fao.org/africa/about-us/regional-commissions/african-forestry-and-wildlife-commission/fr>
- FAO, 2023. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023. Food and Agriculture Organisation (FAO), 384 p. <https://doi.org/10.4060/cc8166en>
- INSTAT, 2021. Rapport thématique sur les résultats du RGPH-3 : Caractéristiques des ménages et structure familiale à Madagascar. Instat Madagascar, 93 p. <https://www.instat.mg/autres/rgph-3>
- ISO 13061-2, 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- ISO 18135, 2017. Biocarburants solides – Échantillonnage. International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/fr/standard/66481.html>
- ISO 17225-1, 2021. Solid biofuels - Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements. International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/76087.html>
- Jesus M. S., Costa L. J., Ferreira J. C., Freitas F. P., Santos L. C., Rocha M. F. V., 2017. Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. Floresta, 47 (1): 11-16. <https://revis-tas.ufpr.br/floresta/article/view/48418>
- Johnson E., 2009. Charcoal versus LPG grilling: A carbon-footprint comparison. Environmental Impact Assessment Review, 29 (6): 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.02.004>
- Lame F. A., Adamu H., 2018. Relationship between chemical composition and user perception on wood-charcoal species preference in Bauchi Metropolis, Nigeria. International Journal of Innovative Approaches in Science Research, 88-102. <https://doi.org/10.29329/ijiasr.2018.152.2>
- Laorach L., Jutajan W., Masakul P., 2021. Characterization and comparison of wood charcoal from traditional charcoal burning using different processes. Journal of Physics: Conference Series, 2013: 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2013/1/012003>
- Madon G., 2018. Le bois, énergie de première nécessité en Afrique : Une ressource trop souvent négligée. Afrique contemporaine, 261-262 (1) : 201-222. <https://doi.org/10.3917/afco.261.0201>
- Mevanarivo Z. E., Ramananantoandro T., Filho M., Napoli A., Razafimahatratra A., Razakamanarivo H., et al., 2020. Variability in the physico-chemical properties of wood from *Eucalyptus robusta* depending on ecological growing conditions and forestry practices: The case of smallholdings in the Highlands of Madagascar. Maderas. Ciencia y tecnología, 22 (4): 425-438. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2020005000401>
- Mevanarivo Z. E., 2018. Impacts des pratiques sylvicoles et de l'environnement sur les propriétés du bois d'*Eucalyptus robusta* Sm. pour les filières bois énergie et bois matériau à Madagascar. Thèse de doctorat EDGRND, Université d'Antananarivo. <https://www.forets-biodiv.org/actualites/impacts-des-pratiques-humaines-et-de-l-environnement-sur-les-proprietes-du-bois-d-eucalyptus-robusta>
- Montagne P., Razafimahatratra S., Rasamindisa A., Crehay R., 2010. Arina, le charbon de bois à Madagascar : Entre demande urbaine et gestion durable. CITE-CIRAD, 187 p. <https://agritrop.cirad.fr/554583>
- Mugo F., Poulstrup E., 2003. Assessment of potential approaches to charcoal as a sustainable source of income in the arid and semi-arid lands of Kenya. <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/55037?show=full>
- Neves A., Protássio T. P., Couto A. M., Trugilho P. F., Silva V. O., Vieira C. M. M., 2011. Évaluation de clones d'*Eucalyptus* dans différents lieux de production de charbon végétal. Revue brésilienne de recherche forestière, 31 (68): 319-330. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>
- Noumi E. S., Rousset P., De Cassia Oliveira Carneiro A., Blin J., 2016. Upgrading of carbon-based reductants from biomass pyrolysis under pressure. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 118: 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.02.011>
- Oliveira L. P. D., Carneiro A. D. C. O., Peres L. C., Demuner I. F., Ferreira S. O., Fernandes S. A., et al., 2023. Wood and charcoal quality in the selection of *Eucalyptus* spp. clones and *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora* for steel industry. Revista Árvore, 47: e4722. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000022>
- Orabi M. A., Bahnasawy A. H., Ali S. A., Ashour T. H., Yehia I., 2021. Effect of kiln temperature and type of wood on charcoal quality. Misr Journal of Agricultural Engineering, 38 (3): 237-248. <https://doi.org/10.21608/mjae.2021.83843.1030>
- Pereira B. L. C., Oliveira A. C., Carvalho A. M. M. L., Carneiro A. D. C. O., Santos L. C., Vital B. R., 2012. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. International Journal of Forestry Research, 2012: 523025. <https://doi.org/10.1155/2012/523025>
- R Core Team, 2023. R: A language and environment for statistical computing (Version 4.3.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Ramaroson J. de D., Andrianaivovavelona J. O., Rakotosaona R., Rasoanaivo J. L., 2015. Étude de la transformation du charbon de terre de la Sakoa en combustible domestique. MADA-HARY, 3 : 26 p. https://scolar.archive.org/work/74gj5jevbjbpbm46f2ugw4nniq/access/wayback/http://madarevues.recherches.gov.mg/IMG/pdf/hary3_8_.pdf

Rafitoson K., 2017. La lente marche vers la transition énergétique à Madagascar : état des lieux et perspectives. Friedrich Ebert Stiftung, 43 p. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/madagaskar/15155.pdf>

Santos M. A. S., 2008. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal, vol. 1., Universidade Federal De Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brésil. CD-ROM.

Santos R. C. D., Carneiro A. D. C. O., Castro A. F. M., 2011. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. Scientia Forestalis, 90 : 221-230. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr90/cap10.pdf>

Sedano F., Silva J. A., Machoco R., Meque C. H., Siteo A., Ribeiro N., et al., 2016. The impact of charcoal production on forest degradation: A case study in Tete, Mozambique. Environmental Research Letters, 11 (9): 094020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094020>

Silva F. T. M., Ataíde C. H., 2019. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. Energy, 172: 509-516. <https://doi.org/10.1016/j.ENERGY.2019.01.159>

Temmerman M., Andrianirina R., Richter F., 2019. Performances techniques et environnementales du four de carbonisation Green Mad Retort à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, 340 : 43-55. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/31700>

Verhaegen D., Randrianjafy H., Rakotondraoelina H., Trendelenburg Rakotonirina M.-C., Andriamampianina N., Montagne P., et al., 2014. *Eucalyptus robusta* pour une production durable de bois énergie à Madagascar : Bilan des connaissances et perspectives. Bois et Forêts des Tropiques, 320 : 15-29. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20541>

Wang L., Skreiberg Ø., Van Wesenbeeck S., Grønli M., Antal M. J., 2016. Experimental Study on Charcoal Production from Woody Biomass. Energy & Fuels, 30 (10): 7994-8008. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01039>

Ramilison et al. – Déclaration de contribution des auteurs au crédit

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	M. F. A. Ramilison, P. Rousset, J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro
Gestion des données	M. F. A. Ramilison
Analyse formelle	M. F. A. Ramilison, J. Valette
Acquisition du financement	J.-P. Bouillet
Méthodologie	M. F. A. Ramilison, J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro, P. Rousset
Gestion de projet	J.-P. Bouillet
Supervision	J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro, P. Rousset
Validation	M. F. A. Ramilison, J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro, P. Rousset
Visualisation	M. F. A. Ramilison
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	M. F. A. Ramilison, J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro, P. Rousset
Écriture – Révision et édition	M. F. A. Ramilison, J. Blin, J.-P. Bouillet, T. Ramanantoandro, P. Rousset

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X