

Activation Physique De Déchets De Biomasse A Visée De Production De Charbon Actif Et D'huile Pyrolytique : Contribution A L'économie Circulaire

[Physical Activation Of Biomass Waste To Produce Activated Carbon And Pyrolytic Oil: Contribution To The Circular Economy]

RAZAKAMAMPIANINA Valisoa F.¹, RAJAONARIVELO Jeannot A.², ANDRIANOMENTSOA Bezanahary H.³, RAVONINJATOVO Achille O.⁴, RASOANAIVO Jean Luc⁵, ANDRIANAIVO Lala⁶, ANDRIAMANANTENA Ndriananja S.⁷

^{1,7} Chercheur, Université d'Antananarivo, École Doctorale des Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

^{2,3} Chercheur Enseignant, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) Fiadanana Tsimbazaza-Antananarivo

^{4,5,6} Chercheur Enseignant, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Auteur correspondant : RAZAKAMAMPIANINA Valisoa F. E-mail : razakamampianinavalisoa@gmail.com



Résumé – Compte tenu des problématiques de pollutions qui affectent l'environnement global, l'application des principes de l'économie circulaire, associée à la technologie de distillation à voie sèche nous présente une solution relativement accessible pour pallier aux adversités issues desdits problématiques. Les travaux effectués exposent la transformation optimisée des déchets de biomasses en charbon actif et en huile pyrolytique par la voie d'activation physique, ici la coque de noix de palmiste. La caractérisation expérimentale du charbon actif obtenu a permis de démontrer la performance des produits, la polyvalence de la technologie, permettant ainsi d'étendre ses applications en termes de valorisation de déchets et d'élargir les choix de précurseurs.

Mots-clés – économie circulaire ; déchets de biomasse ; activation physique ; charbon actif ; huile pyrolytique

Abstract – Given the global environmental pollution challenges, applying the principles of the circular economy, combined with dry distillation technology, offers a relatively accessible solution to mitigate these issues. This study presents the optimized transformation of biomass waste, specifically palm kernel shells, into activated carbon and pyrolytic oil through physical activation. Experimental characterization of the obtained activated carbon demonstrated the product's performance, the versatility of this technology, thereby expanding its applications in waste valorization and broadening the range of suitable precursors.

Keywords: circular economy ; biomass waste ; physical activation ; activated carbon ; pyrolytic oil

I. INTRODUCTION

La pollution est à ce jour un problème globalisé qui requiert des actions à la fois efficaces et transversales. Notre sujet de recherche se place justement dans cette optique, en contribuant à la gestion de déchets par la valorisation des déchets biomassiques [1][2][3][4] de coques de noix de palme dans le cadre de la production industrielle d'huile de palme, par la technologie de la distillation à voie sèche. Des extraits qui réduiront directement à leur tour cette dite pollution : du charbon actif et de l'huile pyrolytique à potentiel de biocarburant, seront ainsi produits[5][6][7][8]. Dans cette perspective de transversalité, la haute utilité du charbon actif couvre une multitude de secteurs fondamentaux de par ses propriétés absorbantes, que ce soit les traitements épuratoires et la détoxification[9][10], l'assainissement des sols[11][12], le stockage d'énergie et la catalyse [13][14][15], la décoloration[16][17], la désodorisation[18] : la liste n'est pas exhaustive. La diversification de la nature du précurseur est également mise en avant, impliquant la polyvalence de la technologie et du réacteur utilisé. Le présent article va surtout se focaliser sur le premier extrait cité : le charbon actif.

A premier abord, plusieurs scandales touchent la production d'huile de palme actuellement, que ce soit en termes d'écologie ou d'équité tout au long de la chaîne d'approvisionnement. C'est dans ce contexte que la pratique de production durable, particulièrement pour le cas de l'huile de palme, prend tout son sens ; le composé oléagineux étant hautement sollicité que ce soit dans l'industrie agro-alimentaire, pharmaceutique, hygiénique ou encore celle de la cosmétique et du biocarburant. Pourtant, malgré l'ampleur du scandale en question, celui-ci n'est pas en mesure de contrer la progression frénétique de la consommation de cette dernière qui n'est pas près de ralentir, d'où la création de la RSPO, Roundtable for Sustainable Palm Oil. En effet, plusieurs raisons sont en mesure d'expliquer cette tendance. Outre sa polyvalence, son rendement exceptionnel le distingue sachant que ce dernier requiert sept fois moins de terre pour une même quantité d'huile produite par rapport aux cultures oléagineuses habituelles, à savoir le soja, l'olive, le colza ou encore le tournesol. Par illustration, le palmier à huile accapare près de 40% de la production mondiale en huile végétale en n'occupant que 1 % des terres agricoles mondiales, soit 7 % des surfaces consacrées aux cultures oléagineuses. [19][20][8][21]

II. METHODOLOGIE

A. Matériels et précurseurs

Les investigations expérimentales ont été menées à bien en exploitant les moyens matériels cités, catégorisés selon les étapes succinctes de la méthodologie :

- Les caractérisations du précurseur, les coques de noix de palme (CNP), et du charbon actif obtenu (CAO), ont fait appel aux équipements de laboratoires standards : la balance de précision, l'étuve, le four à moufle, le dessiccateur, la spatule et les creusets.
- Les essais de production : le capteur thermocouple et le boîtier associé, le système de ventilateur pour propulser la montée de la température, les balances pour les pesages et manifestement le réacteur raccordé avec le condenseur, au sein duquel le procédé de pyrolyse et d'activation en soi va prendre place.
- La caractérisation expérimentale du charbon actif : les doseurs pour la manipulation précise des liquides, la balance électronique pour les mesures de masse, le noir de carbone utilisé à titre de référence pour le test. Il est à noter que la solution à traiter pour la caractérisation expérimentale est un résidu de processus de rectification de distillation d'alcool d'igname.

B. Caractérisation physico-chimique : précurseur et produit

La caractérisation physico-chimique de la tourbe a été réalisée par la détermination séquentielle des paramètres clés suivants : la teneur en eau, le taux de matières volatiles, la teneur en cendres, la teneur en carbone fixe et la densité. Ces mêmes paramètres ont ensuite été analysés pour établir les propriétés physico-chimiques du produit obtenu.

1) Teneur en eau (T_H)

Le taux d'humidité d'un matériau, ici lignocellulosique, représente sa teneur en eau par rapport à sa masse humide. Nous nous sommes basés sur la norme ISO 638 sur la détermination de la teneur en matières sèches des nanomatériaux celluloses par séchage à étuve. La teneur est calculée à partir de la perte en masse d'un échantillon après chauffage dans l'étuve à 105°C en 24 heures de temps.[22] Le taux d'humidité est alors obtenu à partir de la formule (1) ci-contre

$$T_H = \frac{M_{humide} - M_{sèche}}{M_{humide}} \times 100 \quad (1)$$

T_H : taux d'humidité en (%)

M_{humide} : masse initiale de l'échantillon

$M_{sèche}$: Masse de la matière sèche après son passage dans l'étuve

2) Taux de Matières Volatiles (MOV)

La matière volatile d'un combustible représente la fraction de ses constituants qui est libérée sous forme gazeuse lors de sa pyrolyse ou de sa combustion. Il en résulte que ce taux est un indicateur direct de l'inflammabilité du matériau, ces gaz étant les premiers à s'enflammer, initiant le processus de combustion. La norme ISO 22167:2021 régit les exigences et la méthodologie pour déterminer la matière volatile des combustibles solides de récupération, catégorie qui englobe les matériaux celluloses pertinents pour cette étude.[23] La mesure, illustrée par la formule (2), est effectuée après avoir corrigé la perte de masse due à l'humidité initiale du matériau.

$$MOV = \frac{M_{105} - M_{550}}{M_{sèche}} \times 100 \quad (2)$$

MOV : taux de matière volatiles (en %)

M_{105} : masse obtenue après chauffage à 105°C

M_{550} : masse obtenue après chauffage à 550°C

$M_{sèche} = M_{105}$

3) Teneur en cendres (T_c)

La teneur en cendres est définie comme la proportion de matière inorganique (minéraux) qui subsiste après la combustion complète d'un matériau. Cette teneur nous oriente dans la prévision du comportement de la biomasse durant la combustion et pour optimiser les processus de valorisation énergétique. Son niveau est influencé par plusieurs facteurs, notamment le type de biomasse d'origine et tout traitement préalable qu'elle a pu subir. La norme ISO 21656 nous détaille les méthodes précises pour déterminer cette teneur, interprété par la formule (3). [24]

$$T_c = \frac{M_{850}}{M_{sèche}} \times 100 \quad (3)$$

T_c : taux de cendre (en %)

M_{850} : masse obtenue après chauffage à 850°C

$M_{sèche} = M_{105}$

4) Teneur en Carbone Fixe (T_{CF})

La teneur en carbone fixe de la biomasse lignocellulosique est un paramètre essentiel pour évaluer sa qualité, surtout dans le cadre de la production de biochar. Le carbone fixe est en effet la fraction de carbone qui reste après la pyrolyse de la biomasse, une fois que les matières ont été éliminées. Le calcul de cette teneur a été réalisé selon les spécifications de la norme ISO 17225-1 relative aux biocombustibles solides, singularisé par la formule (4).[25]

$$TCF = 100 - (H + Tc + MOV) \quad (4)$$

TCF : teneur en carbone fixe exprimée en (%)

H: teneur en humidité (%)

Tc: teneur en cendres (%)

MOV: teneur en matières organiques volatiles (%)

5) Densité

La détermination de la densité apparente du charbon actif a été effectuée selon la norme ISO 5072:202, en incluant les vides et les pores présents dans sa structure, notamment à partir du pesage de trois échantillons de 1 cm x 1 cm x 1 cm pour ainsi obtenir la masse moyenne pour calculer le ratio de densité.[26]

C. Essais de production

Des étapes de prétraitement physique sont requises au préalable avant le pesage et la disposition du précurseur dans le réacteur. Celles-ci incluent spécifiquement l'homogénéisation des déchets utilisés : le triage des coques de noix de palmiste, son séchage et son broyage.

1) Disposition et conditions opératoires

Le précurseur destiné à être carbonisé et activé est versé dans le creuset qui va s'emboîter hermétiquement avec la colonne de distillation. L'ensemble sera par la suite disposé dans le fourneau et connecté à un condenseur pour ainsi optimiser la quantité d'huile pyrolytique recueillie. Le suivi de l'évolution thermique du procédé est contrôlé par le biais d'une sonde à thermocouple de type K, insérée dans le creuset.

Les produits volatiles seront de ce fait évacués à la partie supérieure de la colonne de distillation pour parcourir directement les échangeurs en serpentin : la fraction condensable, l'huile pyrolytique, sera recueillie à la sortie du condenseur tandis que le charbon actif sera déchargé du creuset après refroidissement de ce dernier.

2) Système d'activation

La carbonisation, étape cruciale avant l'activation, constitue une technique de prétraitement permettant de concentrer l'énergie contenue dans la biomasse sous forme de carbone fixe. Sous atmosphère inerte, ce premier palier atteint sa complétion au-delà de 600°C en général, toutefois chaque précurseur révèle un comportement et une cinétique propre en accord avec les paramètres de pyrolyse. A l'issue de la carbonisation, le matériau obtenu, ici du biochar de coque de noix de palmiste, présente une structure poreuse encore limitée. C'est à ce niveau que l'activation affirme sa nécessité dans le but de développer la surface spécifique du biochar et d'améliorer ses capacités adsorbantes. Les paramètres à observer en question renvoient généralement au temps de traitement, aux évolutions thermiques, mais également au burn-off, matérialisé par l'équation (5). Le burn-off reflète la perte de masse mesurée entre le précurseur et le produit final carbonisé-activé. Dans la littérature, ce taux progresse avec la durée des essais. Autrement désigné degré d'activation, c'est une mesure clé du développement de la porosité du précurseur.

$$\text{burn-off} (\%) = \frac{\text{masse}_{\text{initiale}} - \text{masse}_{\text{finale}}}{\text{masse}_{\text{initiale}}} \times 100 \quad (5)$$

Contrairement aux approches conventionnelles distinguant carbonisation et activation, notre protocole propose un procédé continu intégré, autrement dit, une pyrolyse et une activation unifiée. Une fois la carbonisation achevée aux abords de 600°C, la distillation à voie sèche est maintenue de telle sorte que la température soit progressivement élevée au-delà de 800°C et maintenue à ce plateau thermique. Cette approche monolithique permet une réduction significative du temps de traitement et une économie de ressources énergétiques, offrant ainsi une alternative optimisée aux méthodes traditionnelles en deux étapes. [26][27][28][30][31]

Les essais de production, autrement dit le processus de carbonisation-activation des déchets lignocellulosiques de coques de noix de palmiste, ont été réalisés à l'aide du réacteur de distillation à voie sèche illustré par la Fig. 1 suivante :

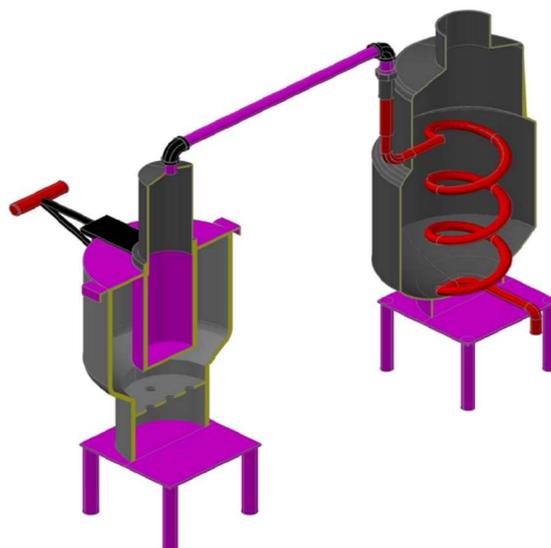


Fig. 1 Réacteur de distillation à voie sèche

3) Caractérisation expérimentale du charbon actif

La caractérisation expérimentale en question renvoie à l'estimation expérimentale de la surface spécifique du produit, directement lié à son pouvoir adsorbant. Le noir de carbone (NC) fait office de référence en raison de sa disponibilité, auquel nous allons correspondre une surface spécifique minorée de 150 m².g⁻¹ en se reportant avec les données retrouvées dans la littérature.

A partir du charbon actif obtenu, deux sortes de produits sont conditionnés : du charbon actif en poudre (CAP) et du charbon actif granulé (CAG). Quatre échantillons de 100 ml à traiter, issus d'un même distillat issu de la rectification de distillation d'alcool d'igname, seront constitués : l'échantillon (1) servira de témoin pour représenter l'aspect initial du liquide à traiter, l'échantillon (2) sera traité avec du CAP, l'échantillon (3) avec du CAG et l'échantillon (4) avec le NC.

Pour ainsi réaliser la caractérisation visuelle, le protocole de caractérisation s'organise comme suit :

- Pesage : le CAP, le CAG et le NC sont proportionnés par dose d'un gramme.
- Imprégnation : les doses précédemment constituées sont versées à l'unité dans l'échantillon qui leur correspond.
- Agitation et décantation : les mélanges sont agités pour assurer la dispersion des particules puis laissés au repos pour une durée de 24 heures.
- Observation : la limpidité de chacune des échantillons (2), (3) et (4) sont analysées et comparées visuellement au bout des 24 heures.
- Ajustement : des ajouts successifs de la dose initiale sont entrepris jusqu'à la limpidité équivalente des échantillons.

Les étapes succinctes sont répétées autant de fois qu'il sera nécessaire jusqu'à ce que la limpidité des trois échantillons traités soit identique.

Par ailleurs, un cinquième échantillon, constitué de rhum, est traité avec du CAP par la dose même dose successive de 1g jusqu'à la quasi-disparition de sa forte odeur pour ainsi démontrer le pouvoir désodorisant de l'extrait.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats nous sont exposés suivant les méthodes listées dans la partie précédente, au moyen des tableaux. TABLEAU 1, TABLEAU 2 et des figures Fig.1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 et Fig. 5.

A. Résultats portant sur les caractérisations physico-chimiques respectivement du précurseur et du produit

TABLEAU 1 : EVOLUTION DES CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA MATIERE PREMIERE AVANT ET APRES LES ESSAIS DE PRODUCTIONS

Matériau	T _H	MOV	T _C	T _{CF}
CNP	6,58	42,71	11,79	38,9
CAO	3,88	29,47	7,15	59,49

Pour le précurseur, la teneur en carbone fixe qui dépasse les 38% est un indicateur favorable pour le projet de valorisation par la technologie choisie.

Pour le produit, la teneur en eau permet une performance générale d'adsorption convenable tandis que la teneur en cendres largement inférieur au seuil de 20% nous indique que l'activité du charbon n'est pas réduite.

B. Résultats des essais de production

Les données sur les essais de production retenus sont résumées par le TABLEAU 2 :

TABLEAU 2 : DONNEES RECAPITULATIVES DES ESSAIS DE PRODUCTIONS

Séries	Masse CNP	Masse CAO	Température maximale	Masse de Combustible	Temps de séjour
01	600	177	752	2 800	3 H 15
02	600	178	962	3 000	3 H 00
03	600	176	964	3 150	3 H 05
04	600	175	985	3 000	3 H 05
05	600	176	973	3 150	3 H 00

Les courbes d'évolution de température pour chacun des essais réalisés sont illustrés par la Fig. 2 ci-dessous :

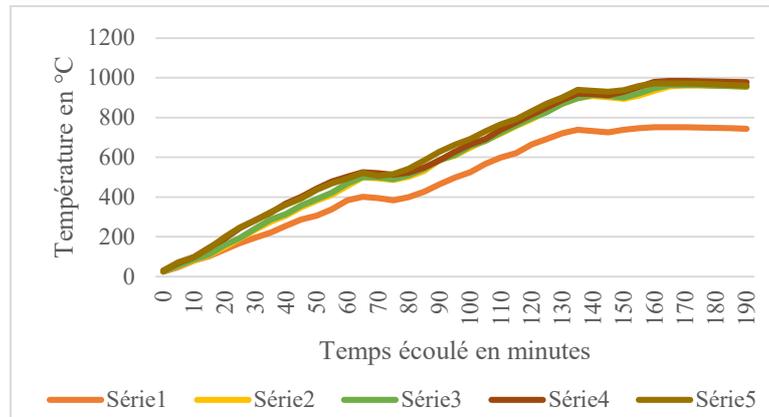


Fig. 2 Courbes d'évolution de la température

- L'évolution de la température pour chaque essai suit plus ou moins la même trajectoire pour les cinq derniers essais malgré les optimisations mineures effectuées à partir du cinquième essai où nous avons opté pour un ventilateur plus significatif en taille, et le meulage du support à partir du septième essai pour que le creuset puisse être inséré de quelques centimètres de plus dans le fourneau.
- Pour tous les essais en question, le produit a bénéficié d'au moins une heure sur une plage de température dépassant le seuil d'activation.
- Entre 300°C et 500°C, une progression particulièrement rapide de la température est remarquée. Une légère diminution de celle-ci se manifeste entre 500°C et 600°C avant de reprendre un élan qui ne se stabilisera qu'au-delà de 800°C, une fois la température d'activation obtenue.
- Le taux de burn-off moyen tourne autour de 29% avec une masse finale pondérée de 176,4 g.
- Les quatre derniers essais, les plus satisfaisants parmi l'ensemble de ceux réalisés, sont associés à un temps de séjour moyen de 3 heures et à une masse moyenne de combustible utilisée de 3,07 kg.

- Le condensat recueilli est particulièrement abondant entre 100°C et 350°C. Les fractions qui sont condensées entre cet intervalle de température prennent l'aspect d'un liquide plus clair, virant au jaune, à la sortie du condenseur. Au-delà de 350°C, le condensat recueilli devient plus opaque jusqu'à virer au noir et caractéristique à une viscosité plus prononcée. La totalité de l'huile pyrolytique recueillie avoisine les 185 ml pour chaque essai.

La Fig. 3 suivante illustre la quantité d'huile pyrolytique recueillie à la sortie du condenseur au cours de la série 04, avant que la température ne dépasse les 400°C. C'est au cours de cette plage de température, comprise dans le procédé de carbonisation, que le débit de fractions condensables observé est particulièrement important.



Fig. 3 Huile pyrolytique recueillie à moins de 400°C, série 04

C. Résultats portant sur la caractérisation expérimentale du produit

Le résultat de la caractérisation expérimentale est illustré par la Fig. 4 suivante :



Fig 4. Échantillons (1), (2), et (3) de gauche à droite

Le pouvoir adsorbant du charbon actif produit est en mesure de décolorer le résidu de rectification d'alcool représenté par l'échantillon témoin (1), pour ainsi obtenir les échantillons (2) et (3), respectivement traités avec le CAP et le CAG produit. Le procédé expérimental a ainsi permis de dégager l'équivalence selon laquelle 6g de noir de carbone permet d'atteindre approximativement la même limpidité que celle obtenue en utilisant 1g du charbon actif produit. Ainsi, en se référant à la valeur moyenne minimale de la surface spécifique du NC, la surface spécifique moyenne minorée du charbon actif produit tourne autour des 900 m².g⁻¹. La Fig. 5 nous illustre ci-dessous la limpidité équivalente des échantillons (3) et (4), de gauche à droite, l'un traité

avec le CAG produit et l'autre avec 6g de noir de carbone. Il convient de remarquer que le CAP est plus adsorbant que le CAG, étant donné que le pouvoir adsorbant est une fonction décroissante de sa granulométrie.



Fig 5. Échantillons (3) et (4), de gauche à droite

Au sujet de la vérification du pouvoir désodorisant du charbon actif produit sur 100 ml de rhum artisanal caractéristique à une odeur plus ou moins forte, 3g de charbon actif ont permis de neutraliser ladite odeur dégagée par l'échantillon en question.

D. Discussion

Le choix du précurseur est justifié par plusieurs points : les travaux de recherche sur la valorisation des déchets biomassiques, plus particulièrement ceux issus de l'exploitation industrielle des palmiers à huile gagnent aujourd'hui en popularité du fait de l'envergure des enjeux. Ces enjeux sont à la fois économiques, écologiques et entre autres sociaux. Nous remarquons notamment la production de biochars et de charbon actif [9][31][33][13], la stabilisation et la remédiation des sols par l'ajout de cendres de coques [34] ou encore l'intégration des coques concassées dans la composition du béton [35][36][37]. Il convient également de parler des options concernant l'utilisation des huiles pyrolytiques ou des charbons de coques de noix de palme à titre de biocarburant [38][39]. La fumée liquide de notre précurseur a même fait objet d'une étude sur ses pouvoirs antiseptiques, corrélés à son utilisation à titre d'insecticide.[40]

Les performances du charbon actif (CA) produit dans cette étude répondent à un degré d'exigence notable. Une comparaison avec le noir de carbone (NC) de référence a révélé une équivalence de capacité d'adsorption : 1 gramme de notre CA est équivalent à 6 grammes de NC, démontrant ainsi une capacité six fois supérieure. Nous retrouvons le même rapport, obtenu lors de nos essais de production avec la même technologie mais en ayant eu recours à la tourbe à titre de précurseur[41]. Notons que le réacteur utilisé lors de ces essais antérieurs diffère seulement au notre par l'absence du condenseur qui lui est directement raccordé pour optimiser la production d'huile pyrolytique. La polyvalence de celui-ci est ainsi prouvée, les déchets biomassiques étant un meilleur choix au regard de l'économie circulaire sachant que la tourbe est une ressource non renouvelable.

En effet, la performance observée surpasse celle attribuée au charbon actif dérivé d'endocarpe de noix de coco, où un rapport de 5:1 est généralement observé [42]. En extrapolant ce rapport, la surface spécifique de notre charbon actif est estimée à environ 1000 m²/g. Cette valeur est remarquable car elle dépasse de plusieurs dizaines de mètres carrés les surfaces spécifiques rapportées pour des charbons activés chimiquement à 25% et à 600°C à partir de bois d'eucalyptus (969 m²/g) et de coques d'arachide (900 m²/g).

La technique d'activation physique choisie en une seule étape combinée n'est pas encore prise en compte par rapport aux pratiques usuelles retrouvées dans la littérature. Bien qu'il a été démontré que le charbon afférent à cette pratique présente une structure étroitement moins développée par rapport à ceux produits en deux temps [27], la différence est relativement négligeable au vu des gains économiques et pratiques en termes de temps et de combustibles que cette option présente par rapport à une activation en deux temps. Toutefois, plusieurs auteurs affirment que la technique d'activation physique reste plus avantageuse en ce qui concerne la diffusion et le pouvoir d'adsorption par rapport à l'activation chimique. [43]

La valorisation des intrants, les coques de noix de palmiste, dénombre ainsi une multitude d'options à fort potentiel. Ayant manifestement focalisé notre intérêt sur le charbon actif obtenu, les deux autres extrants, à savoir les fractions condensables et non. Nous avons pu recueillir les fractions condensables pour être en mesure d'élargir nos recherches ultérieurement, ce qui n'est pas le cas pour les gaz produits.

IV. CONCLUSION

Cette étude a démontré la faisabilité et l'efficacité de la production de charbon actif et d'huile pyrolytique à partir de coques de noix de palmiste, en utilisant une approche innovante d'activation physique intégrée en une seule étape. Les caractérisations physico-chimiques ont confirmé la qualité du charbon actif produit, avec une teneur en carbone fixe élevée et une faible teneur en cendres. Les essais de production ont révélé des conditions optimales de température et de temps de séjour pour maximiser les rendements des produits.

L'équivalence de capacité d'adsorption de 1 g de notre charbon actif pour 6 g de noir de carbone de référence, couplée à une surface spécifique estimée à environ 1000 m²/g, positionne ce matériau comme un adsorbant de haute performance. Cette performance est comparable, voire supérieure, à celle de charbons actifs produits par des méthodes plus conventionnelles ou à partir d'autres biomasses. L'efficacité du charbon actif à décolorer des résidus de distillation d'alcool et à désodoriser du rhum artisanal souligne son potentiel pour diverses applications industrielles.

L'approche unifiée de carbonisation-activation s'est avérée prometteuse, offrant des avantages significatifs en termes de réduction du temps de traitement et d'économie de ressources énergétiques, malgré les compromis mineurs sur le développement de la porosité par rapport aux processus en deux étapes. La polyvalence du réacteur et la pertinence des coques de noix de palmiste en tant que matière première renouvelable s'inscrivent parfaitement dans les principes de l'économie circulaire.

Les perspectives de cette recherche incluent l'optimisation plus poussée des conditions opératoires pour cibler des rendements spécifiques de charbon actif ou d'huile pyrolytique, ainsi qu'une caractérisation plus approfondie de la composition chimique de l'huile pyrolytique pour des applications potentielles en biocarburants ou en produits chimiques.

RÉFÉRENCES

- [1] C. Djilani *et al.*, « Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon », *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 53, p. 112-121, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.025>.
- [2] B. H. Hameed, A. T. M. Din, et A. L. Ahmad, « Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies », *J. Hazard. Mater.*, vol. 141, n° 3, p. 819-825, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>.
- [3] L. A. da Silva *et al.*, « Methylene blue oxidation over iron oxide supported on activated carbon derived from peanut hulls », *Catal. Today*, vol. 289, p. 237-248, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.11.036>.
- [4] L. Lonappan *et al.*, « Adsorption of methylene blue on biochar microparticles derived from different waste materials », *Waste Manag.*, vol. 49, p. 537-544, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.015>.
- [5] F. Abnisa, W. M. A. W. Daud, W. N. W. Husin, et J. N. Sahu, « Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process », *Biomass Bioenergy*, vol. 35, n° 5, p. 1863-1872, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.033>.
- [6] M. I. Jahiril, M. Rasul, A. Chowdhury, et N. Ashwath, « Biofuels Production through Biomass Pyrolysis—A Technological Review », *Energies*, vol. 5, p. 4952-5001, nov. 2012, doi: 10.3390/en5124952.
- [7] S. Ho et M. M. H. Khan, « Short Review on the Use of Oil Palm Shell in Concrete and Activated Carbon », *World J. Nano Sci. Eng.*, vol. 10, p. 1-13, 2020, doi: <https://doi.org/10.4236/wjnse.2020.101001>.

- [8] W. Y. Cheah, R. P. Siti-Dina, S. T. K. Leng, A. C. Er, et P. L. Show, « Circular bioeconomy in palm oil industry: Current practices and future perspectives », *Environ. Technol. Innov.*, vol. 30, p. 103050, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103050>.
- [9] M. Issaoui, M. Belhachemi, K. Mahmoudi, M. B. Ali, S. Jellali, et M. Jeguirim, « Chapter 7 - Palm wastes valorization for wastewaters treatment », in *Palm Trees and Fruits Residues*, M. Jeguirim, B. Khiari, et S. Jellali, Éd., Academic Press, 2023, p. 243-308. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823934-6.00006-X>.
- [10] S. Ravulapalli et R. Kunta, « Removal of lead (II) from wastewater using active carbon of *Caryota urens* seeds and its embedded calcium alginate beads as adsorbents », *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n° 4, p. 4298-4309, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.033>.
- [11] S. Ullah, B. Hussain, N. Iqbal, M. Salam, M. M. Raza, et S. Pu, « Navigating soil microbiota shifts to organic pollutants: Insights into the roles of nZVI-biochar in soil ecosystem restoration », *Appl. Soil Ecol.*, vol. 212, p. 106144, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106144>.
- [12] L. Ye *et al.*, « A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms », *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n° 3, p. 116179, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116179>.
- [13] E. Astuti, Z. Mufrodi, G. Budiarti, M. Husna, et A. Dewi, « Active Charcoal from Palm Kernel Shells as a Catalyst in The Production of Biodiesel », *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 9, p. 120-125, janv. 2021, doi: 10.15294/jbat.v9i2.21991.
- [14] I. Alouiz, M. Aqil, M. Dahbi, M. Y. Amarouch, et D. Mazouzi, « Performance of high-energy storage activated carbon derived from olive pomace biomass as an anode material for sustainable lithium-ion batteries », *Resour. Chem. Mater.*, p. 100086, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.recem.2024.11.001>.
- [15] B. Réty, H.-Y. Yiin, et C. M. Ghimbeu, « Quantification of activated carbon functional groups and active surface area by TPD-MS and their impact on supercapacitor performance », *Energy Storage Mater.*, vol. 74, p. 103963, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103963>.
- [16] S. R. Mishra *et al.*, « Microporous activated carbon from *Madhuca Longifolia* flower for efficient methylene blue dye removal in wastewater treatment », *Surf. Interfaces*, vol. 69, p. 106770, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106770>.
- [17] N. Kumar, V. Kumar, et V. K. Garg, « Tailored synthesis of banana stem-derived activated carbon sponge for the efficient adsorption of industrial dye », *Mater.*, vol. 8, p. 100640, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100640>.
- [18] Y. Lei *et al.*, « Activated carbon as a deodorisation agent for *Gracilaria changii*: Impact on volatile profile, physicochemical properties, and antioxidant activity », *Food Biosci.*, vol. 69, p. 106895, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106895>.
- [19] C. Luquiau, « Une controverse autour de l'huile de palme : regard international versus regard local », *Cah. D'Outre-Mer*, vol. 278, p. 541-553, 2018, doi: <https://doi.org/10.4000/com.9610>.
- [20] A. Rival, « Huile de palme : Défis renouvelés de la durabilité », *Tech. Ing.*, vol. Agroalimentaire:F6075 V2, 2020, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/filiere-de-production-produits-d-origine-vegetale-42433210/huile-de-palme-f6075/>
- [21] Darkwah, D. Osei, et M. Ong-Abdullah, « Sustainability of the oil palm industry », *Elaeis Guineensis*, p. 81, 2021.
- [22] ISO, *Paper, board, pulps and cellulosic nanomaterials — Determination of dry matter content by oven-drying method — Part 2: Suspensions of cellulosic nanomaterials*, ISO 638-2:2021(F), 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/2a6a4d21-932f-4f5e-abfb-8635e9f6d08d/iso-638-2-2021>

- [23] ISO, *Solid recovered fuels — Determination of content of volatile matter*, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:22167:ed-1:v1:en>
- [24] ISO, *Solid recovered fuels — Determination of ash content*, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c8efde3a-e560-4693-969e-3834dec3e1a5/iso-21656-2021>
- [25] ISO, *Solid biofuels — Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements*, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/81593da3-daf7-4abc-bda6-df16fcd4fdc7/iso-17225-1-2021>
- [26] ISO, *Brown coals and lignites — Determination of true relative density and apparent relative density*, 2021.
- [27] D. Bergna, T. Varila, H. Romar, et U. Lassi, « Comparison of the properties of activated carbons produced in one-stage and two-stage processes », vol. 4, n° 3, p. 41, 2018.
- [28] S. Langlois, « Production de charbon activé par recouvrement des gaz de pyrolyse », Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux lignocellulosiques, Université du Québec, 2019.
- [29] F. Hani et M. Hailat, « Production of Bio-Oil from Pyrolysis of Olive Biomass with/without Catalyst », *Adv. Chem. Eng. Sci.*, vol. 6, n° 4, 2016, doi: 10.4236/aces.2016.64043.
- [30] N. Kannan, S. Murugavel, R. K. Seenivasan, et G. Rengasamy, « Preparation and characterisation of activated carbons obtained from agricultural wastes », *Indian J. Environ. Prot.*, vol. 23, p. 1367-1376, déc. 2003.
- [31] M. M. Mahamud, J. M. Menéndez, et P. E. Sarquís, « CO₂ activation of chars: Effect of burn-off on texture and fractal properties », *Fuel Process. Technol.*, vol. 119, p. 41-51, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.009>.
- [32] M. Labaki, « Chapter 8 - Palm wastes reuse for gaseous effluent treatment », in *Palm Trees and Fruits Residues*, M. Jeguirim, B. Khiari, et S. Jellali, Éd., Academic Press, 2023, p. 309-351. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823934-6.00007-1>.
- [33] A. Babayemi, « Performance Evaluation of Palm Kernel Shell Adsorbents for the Removal of Phosphorus from Wastewater », Department of Chemical Engineering, Anambra State University, Uli, Nigeria., 2017. [En ligne]. Disponible sur: DOI: 10.4236/aces.2017.72016
- [34] D. Endriani, N. Bawadi, et A. H. Ritonga, « The effect of adding palm shell ash on soil shear strength », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1467, p. 012014, mars 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1467/1/012014.
- [35] A. Tanash, K. Muthusamy, M. F. Md Jaafar, S. Jasni, et N. Hilal, « Properties of Oil Palm Shell Lightweight Concrete with Ceramic Tile Powder as a Partial Cement Replacement », *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 134, p. 50-60, mars 2025, doi: 10.37934/aram.134.1.5060.
- [36] J. Koti, « Valorisation des coques de noix de palmiste dans la construction des routes à faible trafic », Ecole doctorale Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique de Poitiers, Université de Limoges, Université d'Abomey-Calavi, 2022.
- [37] O. Oti, K. Nwaigwe, et N. Okereke, « Assessment of palm kernel shell as a composite aggregate in concrete », *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 19, août 2017.
- [38] L. Odeh *et al.*, « The synthesis and Characterization of Biobased Catalyst Derived from Palm Kernel Shell and Eggshell for the Production of Biodiesel », *Indian J. Adv. Chem.*, p. 409-427, déc. 2024, doi: 10.48309/AJCB.2024.475933.1244.
- [39] H. Nurdin *et al.*, « Calorific Value of Palm Kernel Shell Charcoal (PKSC) Briquette as Solid Fuel », *J. Appl. Eng. Technol. Sci. JAETS*, vol. 6, p. 780-789, juin 2025, doi: 10.37385/jaets.v6i2.6336.

-
- [40] A. Sulistyawati, N. Dayanti, M. Iman, F. Fadhila, Y. Maryana, et A. Rumidatul, « The Effectiveness of Palm Kernell Shell Liquid Smoke (*Elaeis Guineensis* Jacq) as Antiseptic Against Microbials », *J. Biomedika Dan Kesehat.*, vol. 6, p. 26-35, avr. 2023, doi: 10.18051/JBiomedKes.2023.v6.26-35.
- [41] V. Razakamampianina, « Activation physique d'une roche carbonnée : Essais de production à partir de la tourbe », *Int. J. Progress. Sci. Technol.*, vol. 35, n° 1, p. 232-241, 2022.
- [42] H. Raomaninasolo, « Production de charbon actif à partir de l'endocarpe de coco », Madagascar, 2018.
- [43] Z. Bahnes, « Activation des noyaux de jujube pour l'obtention d'un charbon actif », Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, , Département de Chimie, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, 2018.