

Study of discoloration of textile effluent by the use of activated biochar: optimization and kinetic study

Etude de décoloration d'un effluent textile par utilisation d'un charbon végétale activé : optimisation et étude cinétique

RANDRIANANTOANDRO Tahina

Laboratoire de Chimie de l'Environnement – Antananarivo (MDG)

Abstract— Wastewater from treatment of jeans is sometimes full of blue dyes, including indigo carmine. When the effluent are discharged directly into the environment, pollutants can alter the environmental aspect and the ecosystem. Constrained by these environmental problems, our study is focused to the treatment of the waters loaded with indigo carmine dye (IC) by the adsorption process. This method is considered as ecological and economical process because it doesn't need any chemical agents. Thus, in the optic of industrial ecology, we used a bio activated charcoal (BCA) from coconut shell. The principle of the experiment is the contact of the dye solution (50 mg l^{-1}) with biochar powder in ambient condition. BCA are suspended in the coloured solution by continuous stirring ($<120 \text{ rpm}^{-1}$). Some parameters influencing the adsorption process have been studied such as the concentration of the solute, the contact time and the quantity of the adsorbent. After each treatment, the solutions obtained were filtered and then centrifuged for ten minutes, then analyzed by a UV-vis spectrophotometer at 610 nm and by fluorescence X. Next, adsorption isotherms and kinetic modelling of the process were investigated. The results obtained show that IC is eliminated at a very high yield (98%) for an optimum amount of biochar of 750 mg in 100 ml experimental solution. The quantity of dye adsorbed by biochar is approximately 6.47 mg g^{-1} during 40 minutes. Chemical element analysis of treated water shows that the sodium ion and sulphur are essentially adsorbed by biochar at 99.6% and 86.3% respectively. Kinetic study of IC removal shows that IC dye adsorption on BCA is pseudo-second order and the Freundlich model allows to describe this process well by confirming that the adsorption is carried out in multilayer. It can be concluded that the use of biochar in wastewater treatment is an ecological process with very high efficiency.

Keywords— *biochar ; adsorption ; textiles dye; modeling; Antananarivo*

Résumé— Les eaux usées issues du traitement de jeans (blue-jean) sont souvent chargées de colorants bleus, essentiellement de l'indigo carmin (IC). Lorsque ces eaux sont déversées directement dans les milieux naturels par les usines, ces polluants peuvent altérer l'aspect environnemental du milieu récepteur et l'écosystème environnant. Contraint de ces problèmes environnementaux, nous essayons de traitées ces eaux chargées de l'IC par la technique d'adsorption. Cette technique est dédié comme écologique et économique car le processus ne nécessite pas l'utilisation d'agents chimiques. Ainsi, dans une optique d'écologie industrielle, nous avons utilisé des déchets de coques de noix de coco transformé en charbon végétale activé ou bio charbon activé (BCA). Le principe de l'expérience est la mise en contact de la solution de colorant (50 mg l^{-1}) et le biochar dans une condition ambiante. Les charbons sont mise en suspension dans la solution colorée par agitation continue ($<120 \text{ tr.min}^{-1}$). Quelques paramètres influençant le processus d'adsorption ont été étudiés tels que la concentration du soluté, le temps de contact et la quantité de l'adsorbant. Après chaque traitement, les solutions d'équilibre obtenues ont été filtrées sous vide et centrifugées pendant dix minutes puis analysées par un spectrophotomètre à 610 nm et par fluorescence X. Par la suite, on a étudié les isothermes d'adsorption ainsi que les modélisations cinétiques du processus. Les résultats que nous avons obtenus montrent que le colorant est éliminé à un rendement très élevé (98%) pour une quantité optimum de biochar de 750 mg dans une solution expérimentale de 100 ml. La quantité de colorant adsorbée par le biochar est d'environ $6,47 \text{ mg g}^{-1}$ pour un temps d'équilibre de 40 minutes. L'analyse élémentaire de l'eau traitée montre que l'ion sodium et le soufre sont les plus adsorbés par le biochar à des taux respectifs de

99,6 % et de 86,3 %. L'étude cinétique de l'élimination de l'IC montre que l'adsorption du colorant IC sur le BCA est de pseudo-second ordre et le modèle de Freundlich permet de bien décrire ce processus en confirmant que l'adsorption s'effectue en multicouche. On peut conclure que l'utilisation d'un charbon d'origine végétale activé dans le traitement des eaux usées colorées est un procédé écologique avec un rendement très élevé.

Mots-clés— biocharbon ; adsorption ; colorant textile ; modélisation ; Antananarivo

I. INTRODUCTION

Les industries textiles sont classées parmi les plus polluantes car elles sont responsables de 10 à 20% de la pollution de l'eau dans le monde. Une grande quantité d'eau est rejetée après le traitement et la production textile. La plupart des procédés industriels conduisent à des rejets polluants suite à l'utilisation intensive d'additifs et de colorants chimiques. Quelques procédés consomment beaucoup d'eau, tels que le lavage de vêtements lors de la finition, le lavage de jeans ainsi que le délavage de jeans. Selon le processus, certains rejets sont fortement colorés et contiennent des quantités élevées de matières en suspension. Quelquefois, les rejets évacués par les usines sont mousseux. D'après les études qu'on a effectuées auparavant, on a constaté que l'activité de traitement des tissus en jeans (lavage et délavage) est la plus polluante [1]. L'indigo carmin est le colorant le plus utilisé sur les toiles de jean. Après le lavage et délavage de jeans, les rejets colorés déversés directement dans la nature peuvent altérer l'environnement aquatique et l'équilibre écologique. Les rejets textiles chargés de colorants organiques présentent une forte teneur en DCO (Demande Chimique en Oxygène). Il est estimé que près de 20% des colorants appliqués sur les tissus ne sont pas fixés et se retrouvent dans les eaux usées [2]. Encore pire, les colorants de synthèse sont parfois difficilement biodégradables et plus toxiques. Plusieurs techniques d'élimination des colorants ont été réalisées dans la littérature à savoir les méthodes biologiques, chimiques et physiques. La coagulation – floculation [3], la filtration sur membrane [4], l'échange d'ions, la boue activée et l'adsorption [5,6,7] sont les plus utilisées dans le système de traitement classique. Mais, la technique de l'adsorption est considérée comme la méthode efficace et simple pour l'élimination des colorants. Le charbon actif est l'un des matériaux adsorbants les plus utilisés actuellement [8]. Dans une optique d'écologie industrielle et la valorisation des déchets à Madagascar, nos recherches sont axées sur l'utilisation d'un adsorbant écologique, disponible localement, fabriqué à partir des déchets de coco. Sa transformation en charbon activé est effectuée par une méthode artisanale. A noter que ce matériau est moins cher et renouvelable par rapport au charbon actif commercial [9]. Dans cet article, nous avons essayé d'optimiser l'utilisation d'un bio charbon activé

(BCA) de coque de coco en poudre dans le but de l'élimination d'un colorant d'indigo carmin (IC) pour obtenir un meilleur rendement par rapport aux autres méthodes couramment utilisées. Après, on a étudié le mécanisme d'adsorption en analysant les modèles cinétiques et d'isothermes du processus.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Préparation du charbon

L'adsorbant employé dans le cadre de cette étude est issu de l'endocarpe de noix de coco et consiste en un charbon biologique de production artisanale, élaboré localement selon des procédés traditionnels.

À la suite de la collecte des résidus, l'endocarpe est soumis à une série de prétraitements préliminaires rigoureusement contrôlés, préalablement aux étapes subséquentes de carbonisation et d'activation, en vue d'optimiser ses propriétés physico-chimiques :

- le triage : élimination des éléments étrangers.
- le séchage : séchage à l'air libre afin de réduire l'humidité et de faciliter le broyage.
- le broyage : réduction de la taille de l'endocarpe.
- le tamisage et le pesage

1) La carbonisation

L'étape de carbonisation requiert la mise en œuvre d'un dispositif expérimental comprenant un fourneau, un ventilateur électrique destiné au soufflage, un creuset servant de réceptacle au matériau à carboniser, ainsi qu'un thermomètre assurant le suivi et le contrôle rigoureux de la température opératoire.

Le mode opératoire est conduit selon le protocole expérimental suivant : le fourneau est préalablement préparé et porté aux conditions opératoires requises ; les matériaux destinés à la carbonisation sont ensuite introduits dans un creuset hermétiquement fermé. Celui-ci est disposé au sein du fourneau préchauffé, maintenu à une température comprise entre 650 °C et 700 °C pendant une durée de trois heures, la combustion du charbon de bois étant intensifiée par un ventilateur électrique afin d'assurer un apport thermique adéquat. À l'issue du traitement thermique et après refroidissement à température ambiante, le produit carbonisé est extrait du creuset.

2) Activation physique

L'étape d'activation vise à développer la structure poreuse du charbon obtenu et, par conséquent, à accroître significativement sa capacité d'adsorption. À cet effet, le matériau carbonisé est soumis à un traitement thermique pouvant atteindre 800 °C pendant une durée de trois heures. L'augmentation du débit d'air généré par le ventilateur électrique intensifie la combustion, permettant une élévation progressive de la température jusqu'à environ 1000 °C.

Après refroidissement à température ambiante, le charbon activé est récupéré du creuset, puis

soigneusement pesé afin de déterminer le rendement du procédé. En vue de son conditionnement sous forme pulvérulente, le matériau brut est ensuite broyé et tamisé, opération qui permet de séparer la fraction fine des particules grossières et d'obtenir une granulométrie adaptée aux applications d'adsorption.

À partir d'une masse initiale de 500 g d'endocarpe, la carbonisation réalisée à 650 °C pendant trois heures a permis d'obtenir 212 g de charbon, correspondant à un rendement massique d'environ 42,4 % par rapport au précurseur brut.

À l'issue de l'étape d'activation thermique conduite à 1000 °C durant trois heures, la masse finale de charbon actif récupérée s'élève à 140 g, soit un rendement global d'environ 28 % par rapport à la masse initiale d'endocarpe, et un rendement d'activation d'environ 66 % par rapport au charbon carbonisé.

B. Préparation de la solution d'adsorbat

La solution initiale de l'IC ($[IC] = 50 \text{ mg l}^{-1}$) est préparée par dissolution du colorant d'indigo carmin dans 1 litre d'eau distillée. Il s'agit d'un colorant fortement soluble dans l'eau (10 g l^{-1}). Il fait partie de la famille d'indigoïde dont sa structure est représentée dans la Fig. 1. Les solutions filles sont préparées par dilutions successives de la solution mère pour obtenir les concentrations à tester. Les solutions colorées sont ensuite analysées par spectrophotométrie à une longueur de 610 nm. On a établi ainsi la droite d'étalonnage représentant l'absorbance (A), en fonction de la concentration (C) selon la loi de Beer-Lambert (Fig. 2).

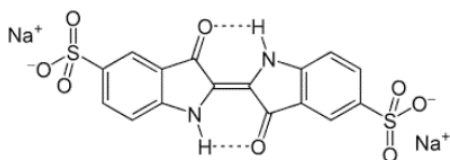


Fig. 1. Structure de l'indigo carmin ($M = 466,36 \text{ g mol}^{-1}$)

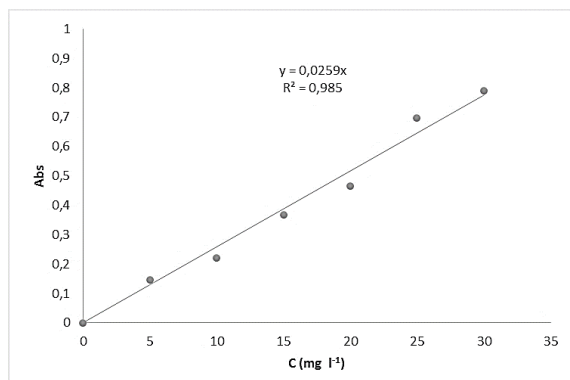


Fig. 2. Courbe d'étalonnage de l'indigo carmin illustrant la relation linéaire entre l'absorbance mesurée et la concentration de la solution

C. Processus d'adsorption

L'adsorption est réalisée par mise en contact d'une solution aqueuse colorée avec des masses

croissantes de charbon actif, introduites dans des béchers d'une capacité de 250 mL. Le temps d'agitation nécessaire à l'établissement de l'équilibre adsorptif a été préalablement déterminé expérimentalement.

À l'issue du contact solide-liquide, les échantillons sont soumis à une filtration sous vide, puis à une centrifugation afin d'éliminer toute fraction particulaire résiduelle. Les solutions clarifiées sont ensuite analysées par spectrophotométrie pour la quantification du colorant résiduel, ainsi que par fluorescence X en vue de la caractérisation élémentaire. Les concentrations sont alors déduites à partir de la loi de Beer-Lambert $A = \epsilon LC$

Avec :

A : absorbance de la solution ; ϵ coefficient d'absorption molaire de la substance; l : longueur du chemin optique et C : la concentration de la substance.

D. Les essais

1) Effet de la masse de charbon

Dans le cadre de l'étude de l'influence de la masse d'adsorbant, cinq (05) échantillons de 100 mL d'une solution d'indigo carmin (IC) de concentration initiale $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ont été préparés. Des masses croissantes de charbon actif (250 mg, 500 mg, 750 mg, 1000 mg et 1250 mg) ont été introduites dans chacune des solutions, lesquelles ont été soumises à une agitation magnétique à température ambiante pendant 60 minutes. Le pH initial de la solution, mesuré avant mise en contact, est de 4,70.

À l'issue de la période d'agitation, les suspensions ont été successivement filtrées puis centrifugées afin d'éliminer toute particule solide résiduelle. Le filtrat obtenu a ensuite été analysé à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible en vue de déterminer la concentration résiduelle du colorant.

Le rendement d'élimination en % par adsorption de l'IC est donné par la relation suivante :

$$R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

Avec C_0 : Concentration initiale du colorant (mg l^{-1}) et C_e : Concentration du colorant à l'équilibre (mg l^{-1})

2) Effet du temps d'adsorption

Afin de déterminer le temps nécessaire à l'établissement de l'équilibre d'adsorption de l'indigo carmin sur le charbon actif, cinq béchers d'une capacité de 250 mL ont été préparés. Chacun d'eux contient la masse optimale d'adsorbant préalablement déterminée lors de l'étude paramétrique, ainsi que 100 mL d'une solution d'indigo carmin. Les suspensions ont été soumises à une agitation magnétique continue à température ambiante.

L'évolution du processus adsorptif a été suivie par la mesure de l'absorbance aux intervalles de temps

suyvants : 20, 40, 60, 80, 90 et 100 minutes. À chaque échéance, la phase solide a été séparée par filtration sous vide, complétée par une centrifugation afin d'assurer une clarification optimale. Le filtrat obtenu a ensuite été analysé par spectrophotométrie UV-Visible en vue de déterminer la concentration résiduelle du colorant et d'identifier le temps d'équilibre.

La capacité d'adsorption du charbon a été calculée selon la formule :

$$q_t = (C_0 - C_e) \frac{v}{m}$$

Avec q_t : quantité adsorbée à l'instant t (mg g^{-1}) ; C_0 : concentration initiale en colorant (mg l^{-1}) ; C_e : concentration en colorant à l'instant t (mg l^{-1}) ; v : volume de la solution (ml) et m : quantité de l'adsorbant (g).

3) Effet de la concentration initiale

Dans le but de déterminer les isothermes d'adsorption, la concentration initiale de l'adsorbat a été systématiquement variée. Cinq échantillons de 100 mL chacun ont été préparés, avec des concentrations initiales d'indigo carmin de 20, 40, 60, 80 et 100 mg.l^{-1} . Chaque solution a été mise en contact avec la masse optimale de charbon actif et soumise à l'agitation magnétique à température ambiante pendant le temps de contact optimal déterminé lors des expériences précédentes.

À l'issue de l'adsorption, les suspensions ont été filtrées sous vide puis centrifugées. Les solutions clarifiées ont ensuite été analysées par spectrophotométrie UV-Visible pour mesurer l'absorbance et déterminer la concentration résiduelle du colorant.

E. Les modèles cinétiques

La modélisation de la cinétique d'adsorption de l'IC sur le charbon de coco est faite à l'aide des modèles cinétiques de la réaction de surface. On présente, ici, deux modèles cinétiques importants : le modèle pseudo premier ordre et le modèle pseudo-second ordre [10].

- Le modèle de pseudo-premier ordre (PPO):

L'équation utilisée est le modèle de Lagergren :

$$dq_t/dt = K_1 (q_e - q_t)$$

Avec K_1 : constante de vitesse de réaction d'adsorption (min^{-1}) ; q_e : quantité adsorbée à l'équilibre en (mg g^{-1}) ; q_t : quantité adsorbée à l'instant t en (mg g^{-1}) ; t : temps de contact (min).

Après intégration avec les conditions initiales $q_t = 0$ à $t = 0$, l'équation devient:

$$q_t = q_e (1 - e^{-K_1 t})$$

La linéarisation de l'équation précédente donne :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$$

On trace $\ln (q_e - q_t) = f(t)$, on obtient une droite qui donne K_1 et q_e . Ce modèle permet de décrire les phénomènes ayant lieu lors des premières minutes du processus de l'adsorption [8, 10]

- Le modèle pseudo-second-ordre (PSO):

Le modèle pseudo-second-ordre (PSO) est donné par l'expression suivante :

$$dq_t/dt = K_2 (q_e - q_t)^2$$

Avec K_2 : constante de vitesse de réaction de l'adsorption ($\text{L mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) ; q_e : quantité adsorbée à l'équilibre en (mg g^{-1}) ; q_t : quantité adsorbée au temps t en (mg g^{-1}) ; t : temps de contact (min).

Après intégration, on obtient :

$$t/q_t = 1/K_2 \cdot q_e^2 + (1/q_e) \cdot t$$

On trace $t/q_t = f(t)$ et on obtient une droite qui donne K_2 et q_e . Contrairement au modèle de premier ordre, le modèle de pseudo second ordre est applicable à un intervalle de temps plus large (généralement l'ensemble du processus d'adsorption) [10].

F. L'isotherme d'adsorption

L'isotherme d'adsorption est la courbe reliant la concentration résiduelle du soluté (C_e) et la quantité adsorbée (q). Dans notre cas, la courbe a été obtenue en étudiant l'adsorption de l'IC sur le BCA. On a utilisé 100ml de solutions de colorant (IC) de différentes concentrations : 20 mg l^{-1} à 100 mg l^{-1} traitées avec une masse de 750 mg de charbon, masse optimale déterminée expérimentalement.

G. Les modèles d'isotherme d'adsorption

Il existe de nombreux modèles théoriques pour décrire les isothermes d'adsorption mais nous nous sommes intéressés aux modèles les plus utilisés : Langmuir et Freundlich [11, 12]

- Le modèle de Langmuir

Il est décrit par l'expression suivante :

$$1/q_e = (1/K_L q_m) \cdot 1/C_e + 1/q_m$$

Avec q_e : quantité adsorbée à l'équilibre par unité de poids de l'adsorbant – capacité d'adsorption (mg g^{-1}) ; q_m : quantité maximale adsorbée (mg g^{-1}) ; C_e : Concentration d'équilibre (mg l^{-1}), K_L : la constante de Langmuir.

En portant $1/q_e$ en fonction de $1/C_e$, cette équation permet de calculer les paramètres q_m et K_L , à partir de l'ordonnée à l'origine et de la pente, respectivement.

- Modèle de Freundlich

L'équation linéaire de Freundlich est donnée par :

$$\ln q_e = \ln(K_F) + (1/n) \cdot \ln(C_e)$$

Avec q_e : quantité adsorbée par gramme du solide ;
 C_e : concentration de l'adsorbât à l'équilibre d'adsorption ;
 K_F : constantes de Freundlich caractéristique de l'efficacité d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné. En portant $\ln q_e$ en fonction de $\ln C_e$, cette équation permet de calculer les paramètres K_F et $1/n$ à partir de l'ordonnée à l'origine et de la pente respective.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Effet de la quantité du charbon (BCA)

100 mL d'une solution d'indigo carmin à 50 mg·L⁻¹ sont mises en contact avec des masses variables de charbon actif pendant une durée de 60 minutes, sous agitation à température ambiante, afin d'étudier l'influence de la quantité d'adsorbant sur l'efficacité d'adsorption.

La Fig. 3 montre une diminution de concentration du colorant lorsque la masse du charbon augmente. En ajoutant la quantité du charbon, le rendement d'élimination du colorant s'accroît également (Fig. 4). Cette expérience montre, qu'à partir de 750 mg de charbon utilisé, le pourcentage d'élimination demeure pratiquement constant jusqu'au 1250 mg de charbon. Le rendement maximum obtenu par l'utilisation du BCA est de 98,04 %. Des résultats comparables ont été obtenus par l'utilisation du charbon de tourbe industriel activé (CTA) que nous avons préparé.

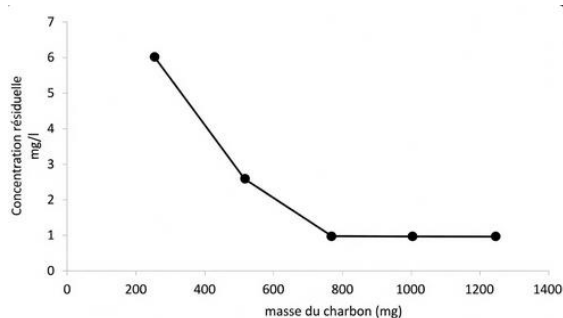


Fig. 3. Suivi de la concentration résiduelle du colorant

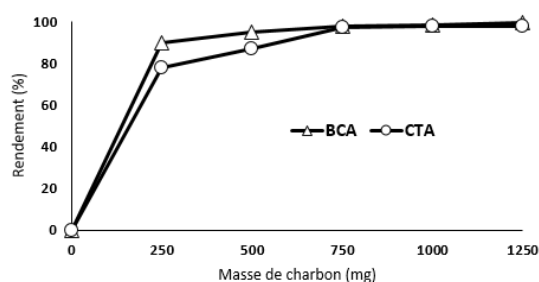


Fig. 4. Effet de la masse de charbon actif sur le rendement d'adsorption

B. Effet de temps d'adsorption

La Fig. 6 montre que la quantité maximale de colorant adsorbée par le charbon en poudre est de 6,47 mg g⁻¹. Le temps d'équilibre exact est obtenu en 40 minutes. Au-dessus de cette valeur, la quantité absorbée reste constante (Fig. 5). La courbe de la cinétique d'adsorption se subdivise en deux zones :

- la première zone, située entre 5min et 40 min, montre que l'adsorption commence très rapidement.
- la deuxième zone, située entre 40 et 60 min, présente une forme d'un plateau et montre clairement la saturation de l'adsorbant.

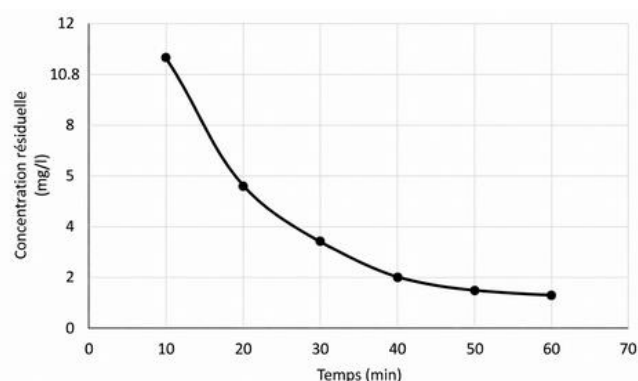


Fig. 5. Variation de la concentration résiduelle de l'indigo carmin

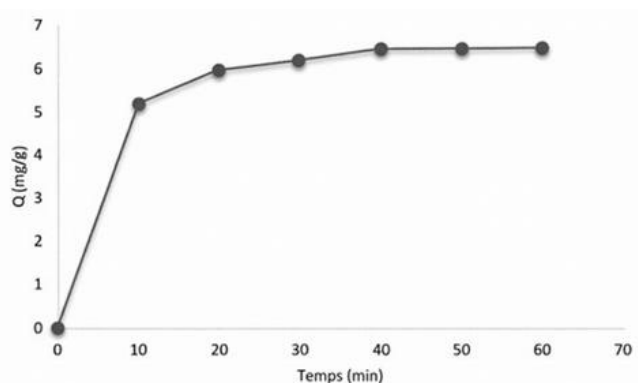


Fig. 6. Effet de temps de contact sur l'adsorption

C. Effet de la concentration initiale

La représentation graphique dans la Fig. 7 montre une allure d'isotherme de type L qui présente, à faible concentration en solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de la progression de l'adsorption. Théoriquement, les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles. Ce résultat montre que la capacité d'adsorption du charbon de coco est plus importante dans ce processus.

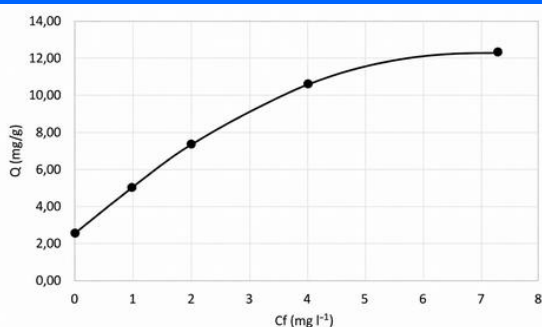


Fig. 7. Isotherme d'adsorption de l'indigo carmin sur un BCA

D. Modélisation des résultats

1) Modélisation de la cinétique d'adsorption

Les cinétiques d'adsorption de l'indigo carmin (IC) sur le charbon actif (BCA) ont été analysées à l'aide des modèles pseudo-premier ordre et pseudo-second ordre afin d'élucider les mécanismes régissant le processus adsorptif. Comme illustré respectivement aux Figures 8 et 9, les représentations linéaires associées à chaque modèle ont été établies. À partir de ces tracés, les constantes cinétiques (K), les coefficients de corrélation (R^2), ainsi que les capacités théoriques d'adsorption à l'équilibre (q_e) ont été déterminés de manière quantitative.

Les données cinétiques obtenues sont synthétisés dans le *Tableau I* ci-après.

TABLE I. DONNEES CINETIQUES D'ADSORPTION DE L'IC POUR LE MODELE DU PSEUDO-PREMIER ORDRE ET DU PSEUDO-SECOND ORDRE

	$K_{1,2}$	$q_{e,calc}(mg\ g^{-1})$	R^2
Modèle 1 ^{ère} ordre	0,077	2,53	0,9851
Modèle 2 ^{ème} ordre	0,048	6,85	0,9998

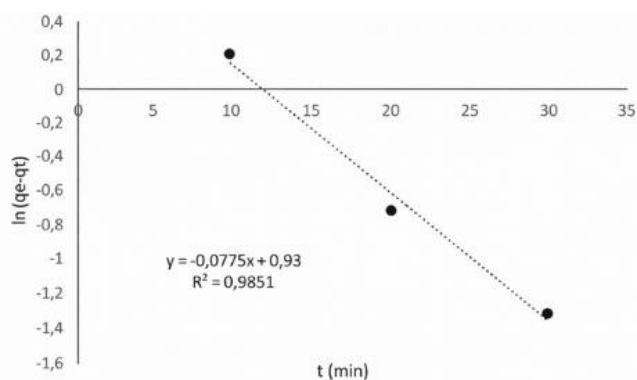


Fig. 8. Le modèle de pseudo premier-ordre de l'adsorption de l'IC sur le BCA

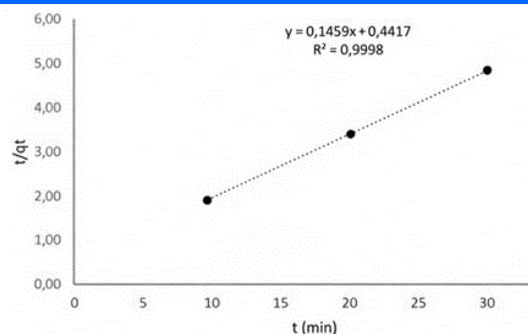


Fig. 9. Modèle cinétique pseudo-second ordre de l'adsorption de l'indigo carmin (IC) sur le BCA

D'après ces résultats, il apparaît que l'adsorption de l'indigo carmin (IC) sur le charbon actif (BCA) est mieux décrite par le modèle cinétique pseudo-second ordre, avec un coefficient de corrélation exceptionnellement élevé de 0,9998. La capacité d'adsorption à l'équilibre calculée à partir de ce modèle, $q_e = 6,85\ mg\cdot g^{-1}$, est particulièrement significative, représentant une valeur environ trois fois supérieure à celle obtenue avec le modèle pseudo-premier ordre, témoignant ainsi de la pertinence et de la fiabilité de l'ajustement.

2) Modèles des isothermes

Les représentations graphiques des isothermes de Langmuir et de Freundlich, correspondant à l'équilibre d'adsorption de l'indigo carmin (IC), ont été établies (Fig. 10 et Fig. 11), accompagnées des paramètres caractéristiques déterminant les propriétés adsorptives propres à chaque modèle.

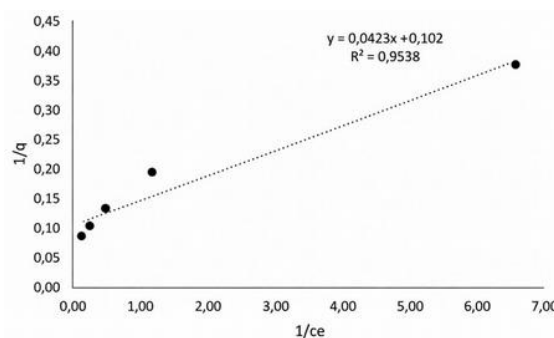


Fig. 10. Modèle de Langmuir de l'adsorption de l'IC sur BCA

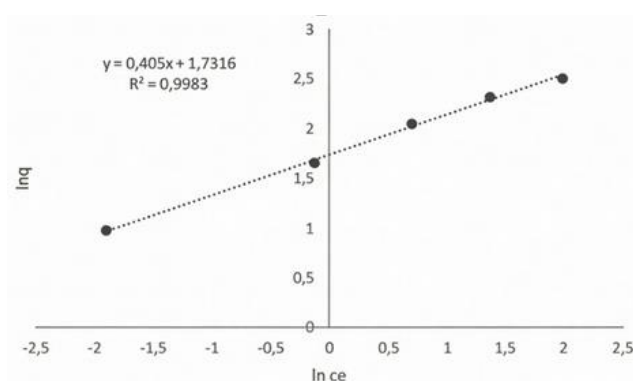


Fig. 11. Modèle de Freundlich de l'adsorption de l'IC sur le BCA

TABLE II. CONSTANTES DE LANGMUIR, DE FREUNDLICH ET LES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS DE L'IC POUR SUR LE BCA

Modèle de Langmuir			Modèle de Freundlich		
Q_m (mg/g)	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
9,803	2,41	0,9538	5,64	0,405	0,9983

En comparant les différents paramètres des deux modèles, on peut définir le modèle de mécanisme d'adsorption approprié au colorant d'IC. On observe que le coefficient de corrélation du modèle de Langmuir ($R^2=0,9538$) est inférieur à celui du modèle de Freundlich ($R^2=0,9983$). Ceci confirme que l'adsorption du colorant IC suit le modèle de Freundlich. Et puis, la valeur numérique de $1/n$ qui est comprise entre 0 et 1 indique que l'adsorption de colorant est favorable pour ce même modèle.

E. Capacité d'adsorption ionique du BCA

Dans la structure de la molécule d'indigo carmin, les groupes sulfoniques sont responsables de la coloration bleue. Lors du processus d'adsorption, ses groupements ionisables se détachent de la molécule et entraînent la décoloration de la solution mère. Ces ions s'adsorbent sur le matériau adsorbant de façon différente et à des conditions différentes. A la surface, l'interaction adsorbant/adsorbant peut être classée en deux catégories : la physisorption qui met en jeu la liaison faible de type de force de Van der Waals et la chimisorption qui met en jeu des énergies de liaison importantes de type de liaisons covalentes ou ioniques.

Les analyses élémentaires de la solution d'IC après l'adsorption dans des conditions optimums nous montrent des taux d'adsorption élevés pour certaines ions présentes dans la solution mère : Na (99,59%), S (86,26 %) et Cl (94,51 %). L'eau traitée est presque exempte de ces composantes principales de la solution d'indigo carmin. Ce phénomène permet d'obtenir une solution incolore et limpide après le processus d'adsorption sur le BCA (Photo 1).



Photo 1. Aspects de la solution bleue après les tests d'adsorption à différentes concentrations

TABLE III. RENDEMENT DE FIXATION DES IONS DE LA SOLUTION D'IC SUR LE BCA

Elément	Q_i (%)	Rendement (%)
Na	28,81	99,59
Mg	0,50	95,90
S	15,75	86,26
Cl	1,54	94,51
Fe	0,37	0
Ni	0,04	7,75

IV. CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de valoriser des matrices biosourcées pour l'élimination de l'Indigo carmin, un colorant indigoïde présent dans les effluents colorés issus de délavage du denim. L'approche expérimentale repose sur la variation systématique des paramètres opératoires de l'adsorption, ainsi que sur l'ajustement des données à différents modèles mathématiques, afin d'élucider le mécanisme d'interaction entre l'adsorbant et l'adsorbant et de déterminer les conditions optimales de traitement.

L'optimisation de la masse d'adsorbant met en évidence l'existence d'une quantité optimale de charbon biologique activé permettant d'assurer une élimination quasi complète du colorant dans le volume de solution considéré. L'état d'équilibre est atteint après un temps de contact relativement court, traduisant une cinétique rapide du processus. L'efficacité du procédé augmente avec le temps de contact jusqu'à la saturation progressive des sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant. La capacité d'adsorption déterminée expérimentalement confirme la performance notable du matériau étudié. Les investigations cinétiques révèlent par ailleurs que le processus suit un modèle de pseudo-second ordre, caractérisé par un ajustement statistique particulièrement satisfaisant entre les données expérimentales et les valeurs théoriques à l'équilibre. Ainsi, le mécanisme d'adsorption correspond au modèle d'isotherme de Freundlich. La valeur du paramètre d'hétérogénéité étant nettement inférieure à l'unité, ce qui traduit un processus caractérisé par une adsorption en multicouches du colorant et les sites les plus énergétiques sont occupés davantage. Ainsi, on a conclu que les ions sodium, soufre et chlorure sont facilement retenus sur le charbon actif issu des coques de coco. Avec ces rendements élevés et sans utilisation des produits chimiques, on peut dire que l'utilisation du biochar à base de coco dans les traitements des eaux colorées est une méthode écologique, économique et compétitive. Dans une perspective rigoureusement inscrite dans les paradigmes contemporains du développement durable et de la transition écologique, le recours aux charbons biologiques s'inscrit comme une stratégie technico-

environnementale visant à atténuer, de manière proactive, les émissions polluantes tant intentionnelles que diffuses présentes dans les effluents, tout en minimisant les pressions anthropiques exercées sur les ressources naturelles lors de leur rejet dans les milieux récepteurs, tels que les cours d'eau et les écosystèmes lacustres.

REFERENCES

- [1] Randrianantoandro Tahina Lalaina, Evaluation de la pollution générée par les industries textiles à Antananarivo-Madagascar : Caractérisation physico-chimique et traitement des effluents, IMJST, Vol. 7 Issue 5, pp. 4913-4923, 2022
- [2] Zidane F., Ohazzar A., Blais J.F., Ayoubi K., Bensaid J., Basri S.E., Kaba N., Fakhreddine Q., Lekheif B., Contribution à la dépollution des eaux usées de textile par électrocoagulation et par adsorption sur des composés à base du fer et d'aluminium. International Journal Biological and Chemical Sciences, vol. 9, pp. 1727-1745, 2011
- [3] Sbai G., Oukili k. et Loukili M., study of the degradation of the colouring agents of textile application on the methylene blue, international Journal of Innovation and Applied Studies, vol.16, pp. 273-279, 2016
- [4] Berradi M., Essamri A., Al Harfi A., Discoloration of water loaded with vat dyes by membrane process of ultrafiltration. Journal Scientifique., vol. 7, pp. 1098-1106, 2016
- [5] Rangabhashiyam S., Anu N., Selvaraju N., Sequestration of dye from textile industry waste water using agricultural waste products as adsorbents. J. of Envir. Chem. Engin, vol.1, pp. 629-641, 2013
- [6] Gumuchian D., Etude de la dégradation par ozonation de deux colorants, Th. Doc., Université Pierre et Marie Curie, 257p, 2014
- [7] Sami G., Mohamed G., Elimination d'un colorant des effluents de l'industrie textile par adsorption, Annales de Chimie Science des matériaux, vol. 25, Issue 8, pp. 615-625, 2000
- [8] Sahel M., Ferrando-Dusart, Adsorption dynamique en phase liquide sur charbon actif : comparaison et simplification de différents modèles, Journal of Water Science, Volume 6, numéro 1, pp. 63-80, 1993
- [9] Cazetta A. L., Vargas A. M.M., Nogami E. M., Kunita M. H., Guilherme M. R., Martins A. C., Silva T. L., Moraes J. C. G. and Almeida V. C., NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption, Chemical Engineering Journal, pp. 117-125, 2011
- [10] Fayoud N., Alami Younssi S., Tahiri S. et Albizane A., Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de bleu de méthylène sur les cendres de bois (Kinetic and thermodynamic study of the adsorption of methylene blue on wood ashes), J. Mater. Environ. Sci. 6 (11), pp. 3295-3306, 2015
- [11] Kifuani K.M.A., Adsorption des composés organiques aromatiques sur charbon actif à base des déchets agroindustriels. Th. Doc, Université de Kinshasa, 265 p, 2013
- [12] Masson S., Reinert L., Guittonneau S., Duclaux L., Cinétique et isothermes d'adsorption de micropolluants sur un tissu et un feutre de carbone activé, Revue Scientifique de l'Eau, vol. 28, pp.179-247, 2015