

Utilisation du plan factoriel complet pour l'optimisation des conditions opératoires d'élimination du plomb par les charbons actifs issus des coques de noix de coco

[Optimization of conditions of lead adsorption on activated carbons from coconut shells using full factorial design]

Kouassi Narcisse ABOUA¹, Kossonou Roland N'GUETTIA², Moussa DIARRA³, Kouadio DIBI¹, and Karim Sory TRAORE¹

¹Université Nangui Abrogoua, Unité de Formation et de Recherche Sciences et Gestion de l'Environnement, Laboratoire des Sciences de l'Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

²Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole (LANADA), 04 BP 612 Abidjan 04, Côte d'Ivoire

³Université Jean Lorougnon GUEDE, Unité de Formation et de Recherche Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Adsorption of heavy metals on activated carbons is influenced by various factors that must be controlled. This study investigates the optimal conditions for removal lead on activated carbon using experimental designs. Thus influence of three parameters (pH, lead concentration and activated carbon) on adsorption rate was studied. Activated carbons was prepared from coconuts shells of Côte d'Ivoire by using chemical activation method. PH, lead concentration and coal nature are the factors taken into account in the two-level complete factorial plan used for optimization. Values of lead elimination rate are between 87 % and 96 % thus indicating the pertinence of the choice of the experimental domain. Moreover, two of the three factors; pH and lead concentration have a significant influence on the lead removal rate. Also, interactions between carbon type and lead concentration and those between pH and concentration have a significant influence on adsorption. Thus, the optimal adsorption conditions of 50 mL of lead at 150 mg / L of concentration are obtained with 0.3 g of activated carbon, at pH 6 and at a temperature of 25 ° C. Experimental designs therefore make it possible to optimize lead removal conditions from wastewater.

KEYWORDS: Activated Carbon, Adsorption, Lead, Optimization, Expeimental Design, wastewater.

RÉSUMÉ: L'adsorption des métaux lourds sur charbon actif est contrôlée par divers facteurs dont la maîtrise permet de garantir une grande efficacité. L'objectif de ce travail est donc d'optimiser les conditions d'adsorption du plomb sur des charbons actifs par l'usage des plans d'expériences. Les charbons utilisés sont préparés à partir de coques de noix de coco de Côte d'Ivoire. Le pH, la concentration de plomb et la nature du charbon sont les facteurs pris en compte dans le plan factoriel complet à deux niveaux utilisé pour l'optimisation. Le taux d'adsorption constitue la réponse pour les différents tests de la matrice d'expériences et les résultats sont compris entre 87 % et 96 %. Ces valeurs indiquent la pertinence du choix du domaine d'étude. Par ailleurs, deux des trois facteurs, le pH et la concentration de plomb, ont une influence significative sur le taux d'élimination du plomb. De plus, les interactions entre le type de charbon et la concentration et celle entre le pH et la concentration influencent significativement l'adsorption. Ainsi, les conditions optimales d'adsorption de 50 mL de plomb de concentration 150 mg/L sont obtenues avec 0,3 g de charbon, à pH 6 et à la température de 25 °C. Les plans d'expériences permettent donc d'optimiser les conditions d'élimination du plomb en milieu aqueux.

MOTS-CLEFS: Charbon actif, Adsorption, Plomb, Optimisation, Plan d'expériences, Eaux usées.

1 INTRODUCTION

La pollution des eaux, accidentellement et/ou volontairement, par les métaux lourds constitue une source de dégradation de l'environnement et suscite un intérêt particulier à l'échelle internationale [1]. Le plomb est l'un des métaux lourds les plus toxiques, il est retrouvé le plus souvent dans les compartiments de l'environnement sous forme de traces. Sa présence dans les eaux usées est due à son utilisation dans de nombreux procédés industriels tels que la production de peinture, des colorants, du verre, de carburant et des batteries. Ce polluant possède la capacité de se concentrer le long de la chaîne alimentaire et de s'accumuler dans certains organes du corps humain notamment le système nerveux central, les reins et le système hématopoïétique [2]. L'élimination des ions (Pb^{2+}) à partir des milieux aqueux peut se faire par les procédés tels que la précipitation chimique, les échanges d'ions, l'osmose inverse et l'adsorption sur charbon actif [3]. Parmi ces méthodes, l'adsorption sur charbon actif est considérée comme la technique la plus efficace et la plus économique pour l'élimination du plomb [4], [5]. Par ailleurs, les phénomènes d'adsorption sont contrôlés par des paramètres d'adsorption tels que la nature du charbon actif, l'effet du rapport de masse du charbon/volume de la solution, le pH, la température et le temps de contact. Ainsi, dans le souci d'optimiser les conditions opératoires, des modèles mathématiques sont de plus en plus utilisés [6]. Les outils d'optimisation généralement employés sont les plans d'expériences qui permettent de réduire le nombre d'expériences à effectuer sans pour autant perdre sur la qualité des résultats recherchés. Il existe plusieurs types de plans d'expériences. Mais le plus couramment utilisé parce que simple, est le plan factoriel complet à deux niveaux et est noté 2^k [7]. Dans ce travail il s'agit donc d'optimiser les conditions d'élimination du plomb en prenant en compte le nature de charbon actif, le pH du milieu réactionnel et la concentration initiale du plomb. Le processus d'élimination du plomb est basé sur l'adsorption sur charbon actif synthétisé à partir de coques de noix de coco, un matériau abondant et bon marché en Côte d'Ivoire.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 RÉACTIFS ET SOLUTIONS

L'acide orthophosphorique 85%, l'hydroxyde sodium 98%, l'acide chlorhydrique 37%, le nitrate de plomb et l'acide nitrique 98% sont principalement les produits chimiques utilisés. Ils sont de qualité analytique et sont fournis par Prolabo, Suvchem, Panreac Quimica S.A.U.

Les coques de noix de coco, précurseurs des charbons actifs proviennent des déchets agricoles de Côte d'Ivoire.

Les solutions synthétiques de plomb qui ont servi aux différents tests ont été obtenues par dissolution du nitrate de plomb dans de l'eau distillée. Les principales caractéristiques physico-chimiques du plomb sont données dans le **tableau I**.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du plomb [8], [9]

Numéro atomique	82
Masse atomique	207,2 ± 0,1 u
Masse volumique	11,44 g.cm⁻³ à 20 °C
Température de Fusion	260 °C
Température d'ébullition	1755 °C
Electronégativité de Pauling	1,8
Rayon atomique (Van der Waals)	0,154 nm
Rayon ionique	0,132 nm (+II) ; 0,084 nm (+IV)

2.2 PRÉPARATION DES CHARBONS

Les charbons actifs ont été préparés par activation chimique à l'acide orthophosphorique 30% suivant le procédé décrit ci-après.

Les coques de noix de coco (300g) ayant subis un prétraitement enlever les impuretés sont imprégnés dans 300 mL une solution d'acide orthophosphorique 30 % pendant 24 h. Après les 24 heures, les échantillons imprégnés sont séchés à l'étuve à 110 °C jusqu'à évaporation complète du liquide d'imprégnation.

Les échantillons séchés sont mis dans des creusets et portés dans un four pour être carbonisés respectivement à différentes températures 400 °C et 600 °C pendant trois (03) heures. Les échantillons carbonisés sont lavés à l'eau distillée sous agitation jusqu'à ce que le pH de l'eau de rinçage soit compris entre 6,5 et 7. Ces échantillons sont enfin séchés à l'étuve à 110°C pendant 24 heures et conditionnés dans des bocaux en verre prêt à l'emploi.

2.3 CARACTÉRISATION DES CHARBONS

Différents paramètres ont été déterminés sur les charbons obtenus pour comprendre leur comportement lors des essais d'adsorption du plomb.

2.3.1 TAUX DE CENDRE

Une masse de 5g de charbon actif séchée à l'étuve à 110 °C jusqu'à stabilisation de la masse de la matière sèche puis placée dans des creusets. Les échantillons sont ensuite portés au four à 500°C pendant 8 heures. Ces creusets sont enfin pesés après avoir été refroidis.

Le calcul du taux de cendre (TC) se fait comme suit :

$$TC(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (1)$$

Où m_0 : masse du creuset vide

m_1 : masse du creuset + échantillon séché à l'étuve à 110 °C

m_2 : masse du creuset + résidu calciné

2.3.2 TAUX D'HUMIDITÉ

Le taux d'humidité (TH) est un rapport exprimé en pourcentage, il est déterminé par le séchage de l'adsorbant dans une étuve. On met 5 g de charbon actif dans un creuset. Ensuite on le sèche dans une étuve à 110 °C pendant 24 heures. Après 24 heures, le creuset est retiré du four puis pesé afin de déterminer le taux d'humidité. L'équation suivante permet de déterminer le taux d'humidité.

$$TH(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Où m_1 : masse de charbon actif avant séchage à 110 °C

m_2 : masse du charbon séché à 110 °C pendant 24 heures

2.3.3 INDICE D'IODE

L'indice d'iode, exprimé en mg/g, est la quantité d'iode (en mg) adsorbée par g de charbon actif dans une solution aqueuse de l'iode I_2 de normalité 0,02 N. Il caractérise les zones accessibles à toute particule de taille inférieure ou égale à celle de la molécule d'iode [10].

Pour déterminer l'indice d'iode nous avons utilisé une méthode qui est une adaptation de la méthode CEFIC 1989 et de la norme AWWA B600-78 [11].

Dans un bêcher de 100 ml, on pèse environ $m = 0,2$ g de charbon préalablement séché à l'étuve à 110°C pendant 24 h. On ajoute à la pipette 20 ml de la solution d'iode à 0,02 N et on agite pendant 4 à 5 mn. On filtre le mélange sur papier filtre sans cendre et on prélève 10 ml du filtrat que l'on met dans un erlenmeyer. A partir de la burette, on verse du thiosulfate de sodium dans l'erlenmeyer contenant le filtrat en présence d'amidon, jusqu'à la décoloration totale de la solution. On note V_{thio} , le volume en mL de thiosulfate à l'équivalence. L'indice d'iode exprimé en mg/g est donné par la relation suivante :

$$Q_{I_2} = \frac{C_0 \times C_{th} \times V_{th}}{2V_{I_2}} \times \frac{M_{I_2} \times V_{ads}}{m_{CA}} \quad (3)$$

Où C_0 : concentration de la solution initiale d'iode (L)

C_{th} : concentration de thiosulfate de sodium (mol/L)

V_{th} : volume de thiosulfate de sodium versé (L)

V_{i2} : volume de la solution dosé (L)

M_{I2} : masse molaire de l'iode (g/mol)

V_{ads} : volume d'adsorption (L)

m_{CA} : masse du charbon actif (g)

2.3.4 SURFACE SPÉCIFIQUE

La surface spécifique des charbons préparés est déterminée selon la méthode d'adsorption de la molécule d'acide acétique développée par [12]. Dans des erlenmeyers, on place une masse de 1g de charbon et un volume d'environ 50 ml d'acide acétique de concentration connue variant entre 0,015 et 0,15 mol. L⁻¹ y est ajouté. Ces erlenmeyers sont ensuite fermés puis placés dans un bain thermostat réglé à la température convenable et agités régulièrement pendant trente minutes (30 mn). Le mélange est laissé au repos durant une heure avant d'être filtré. Après la filtration, un volume de 5 ou 10 ml de soluté est titré par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration 0,1 mol⁻¹.

La quantité de soluté adsorbée par litre de solution est déterminée par la différence entre la concentration initiale (C_i) et la concentration à l'équilibre (C_e), ensuite on déduit la quantité d'acide acétique adsorbée à l'équilibre selon la relation suivante :

$$Q_e = \frac{C_e - C_i}{m} \quad (4)$$

Où Q_e : quantité d'acide acétique adsorbé à l'équilibre (mol/g)

C_e : concentration à l'équilibre de l'acide acétique (mol/L)

C_i : concentration initiale de l'acide acétique (mol/L)

m : la masse du charbon actif (g)

Pour la détermination de la surface spécifique S_L (m²/g), l'équation de Langmuir est écrite sous la forme :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m b} + \frac{C_e}{q_m} \quad (5)$$

Où - C_e est la concentration de la solution d'acide acétique à l'équilibre (en mol/L)

- q_e est la quantité d'acide acétique fixée à l'équilibre par le charbon (en mol/g)

- q_m est la capacité maximale de saturation du charbon (en mol/g)

- b est la constante thermodynamique de l'équilibre d'adsorption (en L/mol)

q_m est alors déduit à partir de la pente de la courbe $\frac{C_e}{q_e}$ en fonction de C_e . La connaissance de q_m conduit à la détermination

de la surface S_L par la relation :

$$S_L = q_m \cdot S_0 \cdot N_0 \quad (6)$$

Où $S = 21 \text{ \AA}^2$ est l'aire occupée par une molécule d'acide acétique

$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ est le nombre d'Avogadro.

2.4 PLANS D'EXPÉRIENCES

2.4.1 MÉTHODOLOGIE DES PLANS D'EXPÉRIENCES

Il existe différents types de modèles expérimentaux. Le plus couramment utilisé, en raison de sa simplicité, est le plan factoriel complet, noté 2^k , qui est la combinaison de tous les niveaux (2) de tous les facteurs (k) [13], [14]. Cette méthode consiste à utiliser simultanément toutes les données pour calculer chaque facteur. Le traitement des résultats se fait à l'aide de la régression linéaire multiple et de l'analyse de la variance. Elle stipule que la réponse est une fonction linéaire de tous les facteurs. Ainsi, déterminer cette fonction revient à trouver les coefficients de l'équation polynomiale suivante :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k + \dots + a_{12}X_1X_2 + \dots + a_{k-1k}X_{k-1}X_k + a_{1\dots k}X_1X_2\dots X_k \quad (7)$$

Avec :

a_i l'effet du facteur X_i et a_{ij} l'effet des interactions entre facteurs.

La détermination du domaine expérimental, des plans d'expérimentation, des estimations et les statistiques des coefficients du polynôme est réalisée à l'aide du logiciel NEMRODW [15].

2.4.2 CHOIX DES FACTEURS

Un choix adéquat des domaines de variation des paramètres est une condition essentielle pour établir un modèle précis qui décrit parfaitement le processus étudié [16], [17]. Les critères de choix des paramètres influençant l'adsorption du plomb sont nombreux (nature du charbon, masse du charbon, pH du milieu réactionnel, le temps de contact, température du milieu réactionnel...). Dans ce travail, le type de charbon actif, le pH et la concentration initiale du plomb. La réponse notée Y est le taux d'élimination du plomb. Chaque facteur (X_i) à un niveau bas et niveau haut noté respectivement (-1) et (+1) en variable codée (**Tableau II**).

Tableau 2. Domaine expérimental

Facteurs	Variable	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Nature du charbon actif	X1	CAT1	CAT2
pH	X2	4	6
Concentration initiale en mg/L	X3	30	150

2.5 TECHNIQUE ANALYTIQUE

L'adsorption du plomb a été effectuée en batch à la température de la salle (30 ± 2 °C). Pour chaque test, un volume de 50 mL de solutions synthétiques contenant le plomb a été utilisé. Les conditions opératoires pour l'optimisation sont fixées par le plan d'expérimentation. Le mélange charbon actif/solution métallique est agité pendant un intervalle de temps et filtré avant analyse au spectromètre d'absorption atomique à flamme (SAA) de marque Shimadzu de type AA6500. La quantité de plomb adsorbée à l'équilibre est calculée suivant l'expression :

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (8)$$

Où m est la masse de l'échantillon (g),

V le volume de la solution (L)

C_o est la concentration initiale en métaux (mg/L)

C_e est la concentration des métaux à l'équilibre (mg/L)

q_e la quantité de métaux adsorbée à l'équilibre (mg/g d'adsorbant).

Pour calculer le taux de plomb adsorbé (T), l'expression suivante est utilisée :

$$T(\%) = \frac{(C_o - C_r) \times 100}{C_o} \quad (9)$$

où C_r est la concentration résiduelle de plomb.

3 RESULTATS

3.1 CARACTÉRISATION DES CHARBONS ACTIFS

Deux types de charbons sont obtenus au terme du processus de préparation. Il s'agit de CAT1 pour $T = 400^\circ\text{C}$ et CAT2 pour $T = 600^\circ\text{C}$. Les résultats des tests de caractérisation des deux types de charbons sont consignés dans le **tableau III**.

Tableau 3. Résultats de caractérisation des charbons actifs

Type de charbon	Surface spécifique (m^2/g)	Indice d'iode (mg/g)	Taux de cendre (%)	Taux d'humidité (%)	Rendements (%)
CAT1 à 400 C	97,96	456,86	1,50	8,00	37,17
CAT2 à 600 C	75,72	426,40	2,50	2,00	34,83

3.2 DÉTERMINATION DES TEMPS D'ÉQUILIBRE

L'étude l'influence du temps d'agitation permet de déterminer la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption pour chaque charbon actif préparé.

Les résultats obtenus exprimés en termes de taux d'adsorption en fonction du temps sont présentés dans la **figure 1**.

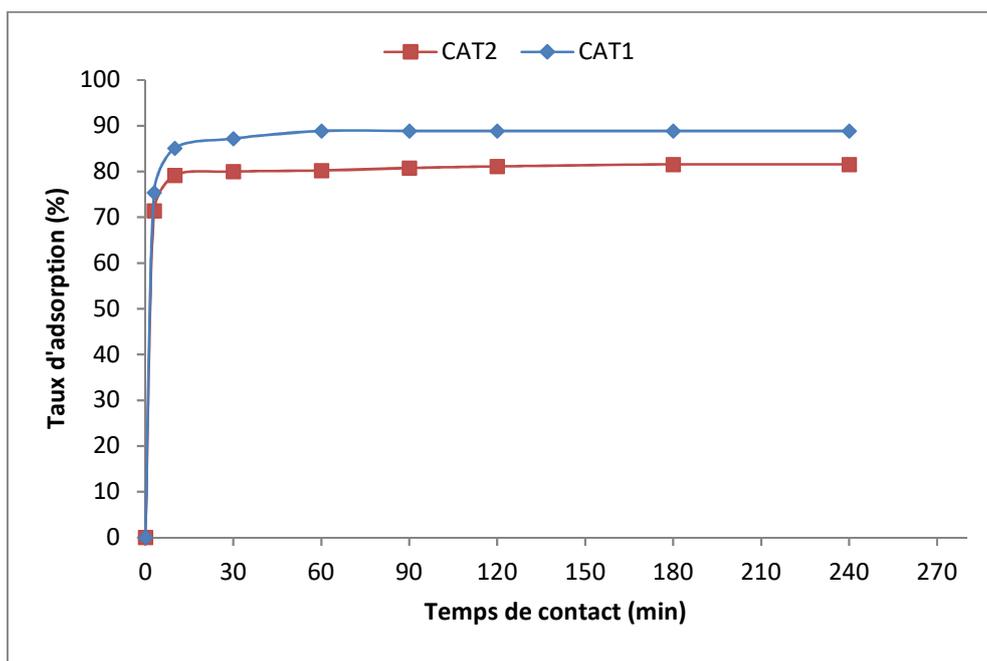


Fig. 1. Influence du temps de contact sur l'adsorption du plomb.
($T = 25^\circ\text{C}$, $m = 0,3\text{ g}$, $V = 50\text{ mL}$ et $[\text{Pb}] = 30\text{ mg}/\text{L}$)

3.3 OPTIMISATION DES CONDITIONS D'ADSORPTION DU PLOMB

3.3.1 PLAN D'EXPÉRIMENTATION ET COEFFICIENT DES FACTEURS

Le **tableau IV** regroupe le plan d'expérimentation et les résultats expérimentaux par rapport aux trois facteurs étudiés.

Tableau 4. Plan d'expérimentation des trois facteurs

N°Exp	Type de CA	pH	Concentration	Taux d'adsorption (%)
1	CAT1	3	30	89,78
2	CAT2	3	30	91,84
3	CAT1	6	30	89,06
4	CAT2	6	30	88,01
5	CAT1	3	150	88,91
6	CAT2	3	150	86,91
7	CAT1	6	150	96,15
8	CAT2	6	150	93,72

Ce tableau comportant huit (8) conditions expérimentales, dans un ordre aléatoire, est obtenu en remplaçant dans la matrice d'expériences les niveaux extrêmes (bas et haut) des variables par les valeurs réelles des facteurs associés. La réponse expérimentale est le taux d'adsorption de chacun des huit (8) tests d'adsorption.

3.3.2 ESTIMATION ET STATISTIQUE DES COEFFICIENTS

Le **tableau V** présente les estimations et les statistiques des différents coefficients du polynôme. Le test de significativité de chaque coefficient du modèle a été effectué en prenant la valeur absolue des coefficients qui doit être supérieure à deux fois l'écart-type.

Tableau 5. Estimation et statistique des coefficients

Nom	Coefficient	Ecart-Type	Signif. %
b0	90,548	0,335	0,236 **
b1	-0,428	0,335	42,3
b2	1,188	0,335	17,5*
b3	0,875	0,335	23,3*
b12	-0,443	0,335	41,3
b13	-0,680	0,335	29,1*
b23	2,325	0,335	9,1*

3.3.3 ÉTUDE DES INFLUENCES DES DIFFÉRENTS FACTEURS

L'importance des effets des facteurs ainsi que celle de leurs interactions est illustrée par la **figure 2**.

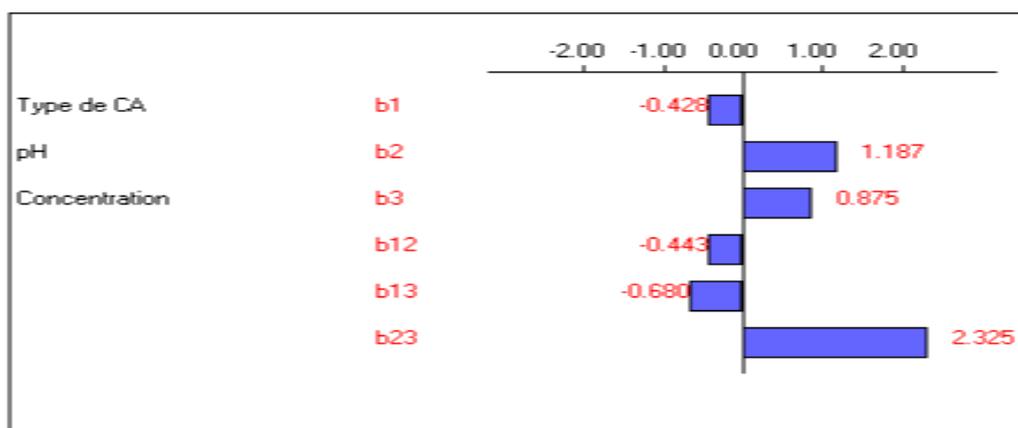


Fig. 2. Etude graphique des effets des facteurs sur la réponse (taux d'adsorption)

Les figures 3 et 4 permettent de visualiser respectivement l'interaction entre le type de charbon et la concentration et celle entre le pH et la concentration. Les valeurs dans chaque petit carré représentent les combinaisons des niveaux des deux facteurs.

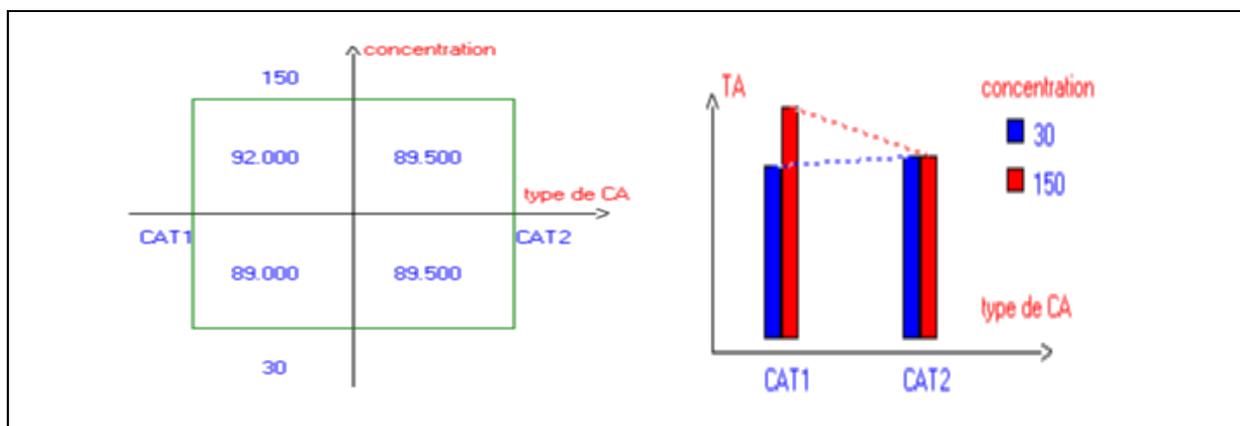


Fig. 3. Étude graphique de l'interaction type de CA/concentration du plomb

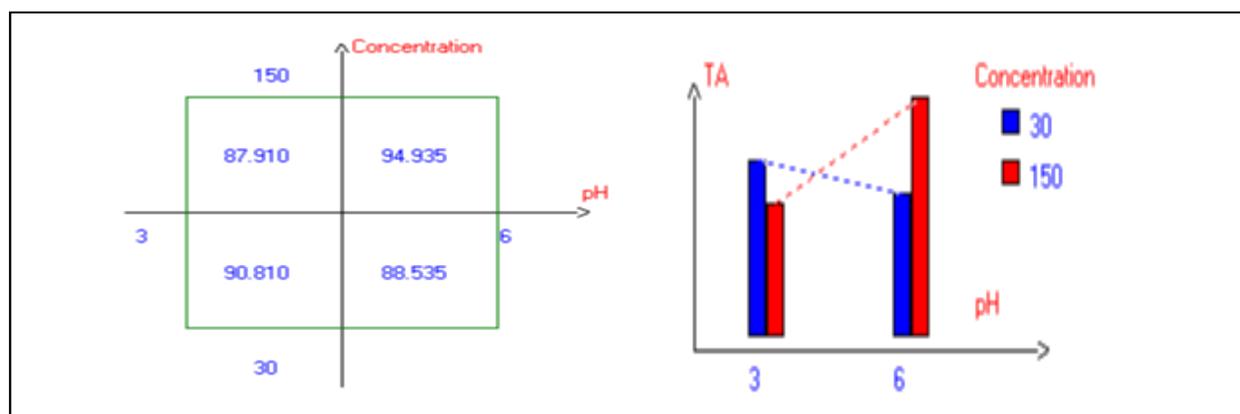


Fig. 4. Étude graphique de l'interaction pH/concentration du plomb

4 DISCUSSION

Les deux types de charbons ont été caractérisés afin d'apprécier leur capacité d'adsorption. En effet, un charbon est meilleur qu'il a un faible taux de cendre et d'humidité et une grande surface spécifique [18]. Dans cette étude, le taux de cendre est inférieur à 3 % et le taux d'humidité ne dépasse pas 8 %. Quant aux valeurs de la capacité d'adsorption, elles sont au-delà de 400 mg/g. Ces valeurs comparables à celles obtenues par [19] et [20], indiquent que les charbons obtenus sont de bonne qualité.

L'étude de de la cinétique d'adsorption donne un temps d'équilibre de 30 minutes et 10 minutes respectivement pour CAT1 et CAT2 avec plus de 80 % d'élimination du plomb. L'adsorption rapide observée pendant les premiers instants pourraient être due à la disponibilité des sites actifs pour l'élimination du plomb [21], [22]. La différence de vitesse d'adsorption (au bout de 10 min, par exemple, 85,81% de plomb adsorbé sur CAT1 et 79,17% sur CAT2) au niveau de cette phase, pourrait être liée à la nature des pores à la surface des charbons. On pourrait donc en déduire que la température de carbonisation, a une influence sur le développement de la porosité à la surface du charbon. Selon [23], lorsque la température atteint la valeur de 600°C, une restructuration a lieu provoquant une diminution de la capacité d'adsorption du charbon actif. Ces auteurs soulignent qu'à ces températures les micropores sont détruits au profit des macropores.

L'optimisation des conditions opératoires d'élimination du plomb des eaux a conduit au choix d'un domaine expérimental avec les trois facteurs d'étude. Dans ce domaine, les tests réalisés donnent des taux d'adsorption compris entre 87 % et 96 % montrant ainsi la pertinence de ce choix. Le tableau IV et la figure II montrent par ailleurs que deux des trois facteurs ont une

influence significative sur le taux d'élimination du plomb par les charbons préparés. Il s'agit du pH (Variable X_2) et à la concentration de plomb (variable X_3). De plus, les interactions entre le type de charbon (Variable X_1) et la concentration (Variable X_3) et celle entre le pH (Variable X_2) et la concentration (Variable X_3) influencent significativement l'adsorption. En effet, la valeur absolue des coefficients du pH et de la concentration du plomb et celles des interactions susmentionnées est supérieure à deux fois l'écart-type [24]. Dans le domaine expérimental prédéfini, l'équation du taux d'adsorption (Y) du plomb en fonction des différents paramètres est ainsi donnée par le modèle mathématique suivant.

$$Y = 90,548 + 1,188X_2 + 0,875X_3 + 2,325X_2X_3 - 0,680X_1X_3 \quad (10)$$

L'étude détaillée des différents coefficients des facteurs ayant une influence significative sur l'adsorption du plomb permet de comprendre l'effet de ces derniers et de leurs interactions. Ainsi, pour le pH, lorsque la valeur passe de 3 à 6, la capacité d'adsorption du plomb augmente 2,38 % (valeur de $b_2 = 1,188$). On en déduit qu'une élévation du pH en milieu acide entraîne une élévation du taux d'adsorption du plomb. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par [25] [26] [27]. Ces derniers qui ont étudié l'adsorption d'ions Pb^{2+} sur des matériaux issus de la biomasse. Pour ces auteurs, cette augmentation pourrait s'expliquer par le fait qu'en milieu acide il y a production d'ions H^+ qui rendrait moins favorable l'adsorption des ions Pb^{2+} . L'augmentation du pH qui indique la diminution des protons, libère donc les sites d'adsorption du charbon les rendant ainsi plus disponibles pour l'adsorption des ions Pb^{2+} . Le maximum de fixation de ces derniers est obtenu à pH égal à 6. Ce constat a été observé pour l'adsorption du plomb des sédiments de rivière sur la sciure d'épicéa [28].

Concernant l'influence de la Concentration initiale du plomb, on note l'accroissement en moyenne de 1,75 % de la capacité d'adsorption lorsque la concentration du plomb passe de 30 à 150 mg/L. Une augmentation de la concentration a donc une action positive sur la capacité d'adsorption. Ces résultats sont confortés par ceux de [29] qui ont travaillé sur l'élimination des ions Pb^{2+} par adsorption sur des charbons actifs préparés et encapsulés dans un réacteur agité fermé. Pour ces auteurs, l'augmentation de la quantité adsorbée avec la concentration peut s'expliquer par une grande variabilité des sites d'adsorption et de la surface présente. Ainsi, le transfert du soluté se ferait d'autant mieux que la concentration des solutions est élevée. **Knappe et al.**, [30] sont parvenus au même résultat et affirment que plus la concentration est élevée, plus l'adsorption est élevée.

Les résultats de l'interaction type de charbon et concentration indiquent que, lorsque la concentration passe de 30 mg/L à 150 mg/L, le taux d'adsorption moyenne du plomb passe de 89 % à 92 % soit une augmentation de 3 % pour le charbon CAT1. En revanche, pour la même variation de la concentration du plomb, le taux d'adsorption reste inchangé lorsqu'il s'agit du charbon CAT2. Dans ce domaine, l'effet de la concentration du plomb dépend du type de charbon. Le meilleur taux d'adsorption du plomb est atteint à la valeur maximale de la concentration (150mg/L) avec le charbon CAT₁. Ces résultats montrent que l'augmentation de la concentration du plomb améliore le taux d'adsorption du plomb qu'avec le CAT1.

Concernant l'interaction pH et concentration, on remarque une augmentation de 7,03 % lorsque le pH passe de 3 à 6 et que la concentration est à son niveau haut (150 mg/L). Cependant, quand la concentration du plomb est à son niveau bas (30 mg/L), le taux d'adsorption subit une réduction de 2,28 % pour la même variation de pH. Dans ce domaine, l'effet de la concentration du plomb sur le taux d'adsorption dépend du niveau du facteur pH. En définitive, les conditions optimales d'adsorption du plomb, dans le domaine expérimental, sont obtenues avec 0,3 g de charbon, à pH 6 et à la température de 25 °C. A ces conditions, pour 150 mg/L de plomb, au bout de 30 minutes, un taux d'adsorption de 96 % est obtenu.

5 CONCLUSION

Ce travail est basé sur l'utilisation des plans d'expériences pour l'optimisation des conditions opératoires d'élimination du plomb par les charbons actifs. Les charbons utilisés ont été obtenus par le procédé de préparation chimique, à partir des coques de noix de coco abondamment disponibles en Côte d'Ivoire. La technique du plan factoriel complet à deux variables a permis de déterminer l'effet de trois facteurs et leurs interactions sur l'adsorption du plomb. On note ainsi que l'adsorption du plomb dépend du pH et de la concentration du polluant ainsi que de leurs interactions. Un taux d'élimination de près de 95 % est obtenu pour une concentration 150 mg/L à pH = 6. Il est donc possible à partir des outils mathématiques d'optimiser les conditions opératoires d'assainissement des milieux aqueux par le procédé d'adsorption sur charbon actif issu des déchets agricoles.

REFERENCES

- [1] S. Demim, N. Drouiche, A. Aouabed, T. Benayad, O Dendene-Badache and S. Semsari, "Cadmium and nickel: assessment of the physiological effects and heavy metal removal using a response surface approach by L. Gibba", *Ecol. Eng.* 61, pp. 426–435, 2013.
- [2] X. L. Song, H. Y. Liu, L. Cheng, and Y. X. Qu, "Surface modification of coconut-based activated carbon by liquid-phase oxidation and its effects on lead ion adsorption", *Desalination*, 255, pp. 78–83, 2010.
- [3] Y. A. Yobouet, K. N. Aboua, K. Adoubi et K. B. Yao, "Élimination du plomb et du cuivre en solution aqueuse par des charbons à base de bois de *Pterygota macrocarpa*" *Afrique Science*, 14 (2), pp. 38 – 47, 2018.
- [4] K. S. Gbamele, G. P. Atheba, B. K. Dongui, P. Drogui, D. Robert, O. D. Kra, S. Konan, G. G. M. De Bouanzi et A. Trokourey, "Contribution à l'étude de quatre charbons activés à partir des coques de noix de coco", *Afrique Science*, 12(5) pp. 229–245, 2016.
- [5] M. N. Murat, M. A. Ahmad and M. N. Idris, "Optimization of preparation conditions for rice husk based activated carbons for the removal of methylene blue dye" *Int J Petrochem Res.*, 2 (2), pp. 186-188, 2018.
- [6] I. Tchakala, L. M. Bawa, G. Djaneje-Boundjou, K. S. Doni et P. Nambo, "Optimisation du procédé de préparation des Charbons Actifs par voie chimique (H_3PO_4) à partir des tourteaux de Karité et des tourteaux de Coton", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6(1), pp. 461-478. 2012.
- [7] K. N. Aboua, K. B. Yao, S. Gueu and A. Trokourey, "Production of activated carbon from biomass resources – optimization using experimental designs", *Res. J. & Biol. Sci.*, 6(6), pp. 665-670, 2010.
- [8] I.F. Me Convey and G. Me Kay, "Mass transfer model for the adsorption of basic dyes on woodmeal in agitated batch adsorbers" *Chem. Eng. Process.*, 19, pp. 267-275, 1985.
- [9] M. Mazet, O. Dusart, M. Roger et D. Dussoubs-Marmier, "Elimination de colorants de l'industrie textile par des sciures de bois", *Journal of Water Science*, 3, pp. 129-149, 1990.
- [10] M. Gueye, "Développement de charbon actif à partir de biomasses lignocellulosiques pour des applications dans le traitement de l'eau", Thèse de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement (2IE), Ouagadougou, Burkina Faso. 215p., 2015.
- [11] S. D. B. Maazou, H. I. Hima, M. M. Malam Alma, Z. Adamou et I. Natatou, "Elimination du chrome par du charbon actif élaboré et caractérisé à partir de la coque du noyau de *Balanites Aegyptiaca*", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6(1), pp. 3050-3065, 2017.
- [12] J. Avom, M. J. Ketcha, M. R. L. Matip and P. Germain "Adsorption isotherme de l'acide acétique par des charbons d'origines végétale", *African Journal of Science and Technology (AJST). Science and engineering Series*, 2(2), pp. 1-7, 2001.
- [13] M. Feinberg, "La validation des Méthodes d'Analyse : Une Approche Chimométrique de l'assurance qualité au laboratoire" Masson, Paris, France, pp. 217-239, 1996.
- [14] D. L. Massart, B. G. M. Vandeginste, S. N. Deming, Y. Michotte and L. Kaufman, "Chimiometrics : A Texbook", *Elsevier*, Amsterdam, Holland, 2 (4), pp 298-299, 1988.
- [15] D. Mathieu, J. Nony et R. Phan-Tan-Luu, "Nemrod-W : Génération des matrices d'expériences en fonction des objectifs et traitement des réponses expérimentales", Version 9901.
- [16] F. Z. Choumane, "Élimination des métaux lourds et pesticides en solution aqueuse par des matrices argileuses", Thèse de doctorat de Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, République Algérienne Démocratique et Populaire, 187p., 2016.
- [17] T. Depci, R. A. Kul and Y. Önal, "Competitive Adsorption of Lead and Zinc from Aqueous Solution on Activated Carbon Prepared from Van Apple Pulp : Study in Single- and Multi-Solute Systems", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 200-202, pp. 224-236, 2012.
- [18] S. Gueu, K. B. Yao, K. Adoubi et G. Ado, "Élimination des métaux lourds des eaux avec le charbon actif préparé à partir de noix de coco et de graine de palmiste". *9èmes Journées Anuelles de la Soc. Ouest-Afr. Chim*, Dakar, Sénégal, 2006.
- [19] S. Zeroual, K. Guerfi, S. Hazourli et C. Charnay, Estimation de l'hétérogénéité d'un charbon actif oxydé à différentes températures à partir de l'adsorption des molécules sondes. *Revue des Energies Renouvelables*, 14 (4), pp. 581-590, 2011.
- [20] S. O. Mamane; A. Zanguina; I. Daou et I. Natatou, "Préparation et caractérisation de charbons actifs à base de coques de noyaux de *Balanites Aegyptiaca* et de *Zizyphus Mauritiana*", *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 041, pp. 59- 67, 2016.
- [21] S.D. Khattra and M. K. Singh, "Removal of malachite green from dye wastewater using neem sawdust by adsorption", *Journal of Hazardous Materials*, 167, pp. 1089-1094, 2009.
- [22] F. Bouhamed, Z. Elouear, J. Bouzid and B. Ouddane, "Batch sorption of Pb (II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from date stones : equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies", *Desalination and Water Treatment*, 52(10-12), pp. 2261-2271, 2013.
- [23] K. Mohanty, D. Das, M. N. Biswas, "Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from *Tectona grandis* sawdust by $ZnCl_2$ ", *Chemical Engineering Journal*, 115, pp. 121–131, 2005.

- [24] E. Assidjo, B. Yao, E. Akou and G. Ado, 2005. Optimisation of the treatment conditions of cocoa butter in order to reduce non-quality. *J. Chemometrics*, 19 : pp. 543-548, 2005.
- [25] D. Hamane et Z. Bendjama, "Adsorption de Pb (II) par la Sciure de Bois d'Eucalyptus. Récents", *Progrès en Génie des Procédés*, Vol.92., 2005.
- [26] S. Arris, "Etude Expérimentale de l'Élimination des Polluants Organiques et Inorganiques par Adsorption sur des Sous-Produits de Céréales", Thèse de Doctorat Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Constantine. Algérie, 151p. 2008.
- [27] F. Boudrahem, F. Aissani-Benissad and A. Soualah, "Adsorption of Lead (II) from Aqueous Solution by Using Leaves of Date Trees As an Adsorbent" *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56, 1804–1812, 2011.
- [28] J. Marin et J.Ayele, "Removal of some heavy metal cations from aqueous solutions by spruce sawdust. I. Study of the binding mechanism through batch experiments", *Environmental Technology*, 23, pp. 1157-1171, 2002.
- [29] L. Mouni, L. Belkhiri, F. Zougaghe and M. Tafer, "Removal of Pb (II) from aqueous solution by adsorption using activated carbon developed from Apricot stone : equilibrium and kinetic", *Desalination and Water Treatment*, 52, (34-36), pp. 6412-6419, 2014.
- [30] D.R.U Knappe, Y Matsui. and V. L. Snoeyink, "Predicting the capacity of Powdered Activated Carbon for trace organic compounds in natural waters", *Environmental science & technology*, 32(11), pp. 1694-1698, 1998.