Évaluation des propriétés de charbons actifs de résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) par adsorption d'iode en solution aqueuse

Properties of activated carbon prepared from residues of African pearwood (*Baillonella toxisperma* Pierre) and tested by iodine adsorption from aqueous solution

Morvan Clotaire Nko'o Abuiboto, Jérôme Avom et Richard Mpon

Volume 29, numéro 1, 2016

Reçu le 10 septembre 2013, accepté le 10 avril 2015

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1035716ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1035716ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Nko'o Abuiboto, M. C., Avom, J. & Mpon, R. (2016). Évaluation des propriétés de charbons actifs de résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) par adsorption d'iode en solution aqueuse. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(1), 51–60. <https://doi.org/10.7202/1035716ar>

Résumé de l'article

L'adsorption d'une solution aqueuse d'iode a été étudiée, en régime discontinu, sur quatre échantillons de charbons actifs des résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) d'origine camerounaise (C1, C2, C3, C4) et sur trois échantillons de charbons actifs commerciaux (C5, C6, C7). Le calcul de l'indice d'iode et l'analyse des isothermes d'adsorption par utilisation des théories de Langmuir et de Freundlich ont permis de déterminer le type d'adsorption. Il apparaît que la valeur de l'indice d'iode de l'un des échantillons des charbons des résidus de Moabi (C4) est proche des valeurs de celui des échantillons commerciaux. De plus, l'adsorption de l'iode obéit aux isothermes de Langmuir avec des capacités maximales d'adsorption variant entre 9,35 mmol·g⁻¹ (C4) et 13,18 mmol·g⁻¹ (C7).

ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS DE CHARBONS ACTIFS DE RÉSIDUS DE MOABI (*BAILLONELLA TOXISPERMA* PIERRE) PAR ADSORPTION D'IODE EN SOLUTION AQUEUSE

*Properties of activated carbon prepared from residues of African pearwood (*Baillonella toxisperma* Pierre) and tested by iodine adsorption from aqueous solution*

MORVAN CLOTAIRE NKO'O ABUIBOTO¹*, JÉRÔME AVOM¹, RICHARD MPON¹

¹Laboratoire de Chimie Macromoléculaire, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, B.P. 812 Yaoundé, Cameroun

Reçu le 10 septembre 2013, accepté le 10 avril 2015

RÉSUMÉ

L'adsorption d'une solution aqueuse d'iode a été étudiée, en régime discontinu, sur quatre échantillons de charbons actifs des résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) d'origine camerounaise (C1, C2, C3, C4) et sur trois échantillons de charbons actifs commerciaux (C5, C6, C7). Le calcul de l'indice d'iode et l'analyse des isothermes d'adsorption par utilisation des théories de Langmuir et de Freundlich ont permis de déterminer le type d'adsorption. Il apparaît que la valeur de l'indice d'iode de l'un des échantillons des charbons des résidus de Moabi (C4) est proche des valeurs de celui des échantillons commerciaux. De plus, l'adsorption de l'iode obéit aux isothermes de Langmuir avec des capacités maximales d'adsorption variant entre 9,35 mmol·g⁻¹ (C4) et 13,18 mmol·g⁻¹ (C7).

Mots-clés : *Charbon actif, activation, adsorption, isothermes de Langmuir et de Freundlich, Moabi.*

ABSTRACT

The removal of iodine through adsorption on four types of activated carbon (C1, C2, C3, C4) obtained from local Cameroonian Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) residues and on three commercial activated carbons (C5, C6, C7) was studied in a batch mode. The calculation of the iodine index and the analysis of adsorption isotherms obtained using the Langmuir and Freundlich theories allow for the determination of the classification of adsorption. It was found that the iodine index of one activated carbon obtained from Moabi residues (C4) is near to those obtained for the commercial activated carbons. Moreover, the iodine adsorption is clearly described by the Langmuir theory with the maximum capacity of adsorption varying between 9.35 mmol·g⁻¹ (C4) and 13.18 mmol·g⁻¹ (C7).

Key Words: *Activated carbon, activation, adsorption, Langmuir and Freundlich isotherms, Moabi.*

*Auteur pour correspondance :
Téléphone : (+237) 677749738
Courriel : abuibotomorvan@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'activité humaine dans le monde est à l'origine des gaz à effet de serre à travers les déchets industriels, dont les résidus du bois. Beaucoup de ces résidus issus de la transformation industrielle des billes de bois sont brûlés, jetés ou enfouis dans le sol et contribuent à la pollution de l'environnement. Leur gestion est impérative et pose un ensemble de problèmes, dont la pollution de l'environnement. D'autre part, l'industrie textile consomme de très grandes quantités d'eau. Celles-ci une fois rejetées provoquent des altérations du milieu aquatique à cause de leurs charges en colorants stables, très toxiques et faiblement biodégradables. L'élimination de ces colorants s'effectue par des procédés économiquement acceptables, utilisant plusieurs techniques : traitement biologique pour les biodégradables (ALTINBAS *et al.*, 1995), coagulation, adsorption sur charbon actif (EL-GUENDI, 1991), par méthode électrochimique (LIN et PENG, 1994) et par des procédés membranaires (RIVET, 1989).

Le charbon actif est un adsorbant carboné fortement poreux, hydrophobe et apolaire préparé de façon à avoir un haut degré de porosité qui lui confère une surface spécifique considérable. Il est obtenu à partir de matières végétales (AVOM et HAJAL, 1983; NKO'O *et al.*, 2013), de matières d'origine minérale (LYUBCHIK *et al.*, 1997) et de matières organiques animales (AVOM, 2004). Il fait partie des adsorbants les plus couramment utilisés dans de nombreuses applications en phase liquide et en phase gazeuse pour ses propriétés adsorbantes liées à la porosité et à la surface spécifique. La diversité de ses applications, son impact sur le développement industriel et la santé, montrent son importance à l'heure actuelle.

Dans le cadre des recherches sur la valorisation de la biomasse camerounaise, nous nous sommes intéressés au Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) dont l'abondance est signalée et dont l'usage se limite très souvent à la menuiserie, laissant ainsi beaucoup de déchets non valorisés. La présente étude porte sur la détermination et la comparaison des propriétés adsorbantes de charbons actifs de résidus de Moabi et de charbons actifs commerciaux par adsorption de l'iode.

Ce travail vise deux objectifs : valoriser les résidus de Moabi en préparant les charbons actifs et contribuer au traitement des eaux : domestique et industrielle. D'après AVOM *et al.* (1997), le diamètre relativement petit de la molécule d'iode ($d < 4,94 \text{ \AA}$) par rapport à celui des pores des charbons actifs ($d = 10\text{-}30 \text{ \AA}$) permet son adsorption sélective en solution sur la surface de ces matériaux. Ainsi, l'adsorption de l'iode par les charbons actifs est une alternative à l'adsorption en phase gazeuse dans l'établissement des isothermes d'adsorption.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Préparation des charbons actifs

Les charbons (C1, C2, C3, C4) proviennent des copeaux de Moabi de la région de Yaoundé et ont été préparés par activation chimique. Après séchage à l'étuve à 110°C pendant 24 h, les copeaux ont été imprégnés pendant un temps déterminé par une solution d'agent activant (NaOH , H_2SO_4 , H_3PO_4) de concentration pondérale connue, puis carbonisés dans un réacteur fermé (à fort défaut d'oxygène) à une vitesse de chauffe précise jusqu'à la température requise. Après refroidissement, les charbons obtenus ont été lavés à l'acide chlorhydrique à 5 %, puis à l'eau distillée et enfin séchés. Les réactions d'activation ont été effectuées dans le four électrique ISUNI (type MINI 51A, Rubí, Espagne) à régulation automatique, muni d'un programmeur de température relié au four par un thermocouple de type K, d'un réacteur en quartz. Les charbons (C5, C6, C7) sont des charbons actifs commerciaux granulés d'origine végétale préparés et vendus par la société CHEMVIRON CARBON (Feluy, Belgique).

Tous les charbons ont été broyés et les fractions retenues ($d \leq 80 \text{ }\mu\text{m}$) ont été placées pendant 24 h dans une étuve à 110°C puis conservées, à température ambiante, dans un dessiccateur. Les tableaux 1 et 2 présentent respectivement les échantillons de charbons de résidus de Moabi et de charbons actifs commerciaux.

Tableau 1. Échantillons des charbons de résidus de Moabi.
Table 1. Samples of activated carbons from Moabi residue.

Échantillon	Code	Imprégnation				Vitesse de chauffe ($^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	Température du palier ($^\circ\text{C}$)	Durée du palier (h)
		Durée (h)	Agent activant	Concentration (%)	Taux d'imprégnation ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)			
MO72*	C1	–	–	–	–	1	700	2
6MOP407	C2	06	H_3PO_4	40	1/15	1	700	2
2MOS207	C3	02	H_2SO_4	20	1/15	1	700	2
2MON207	C4	02	NaOH	20	1/15	1	700	2

Tableau 2. Échantillons des charbons actifs commerciaux.
Table 2. Samples of commercial activated carbons.

Référence	Code	Société	Matière première (activant)	Granulométrie (mm)	BET ^a (m ² ·g ⁻¹)	Indice d'iode (mg·g ⁻¹)	Utilisation
F100	C5	CHEMVIRON CARBON	Charbon bitumineux (vapeur)	0,8-1,0	900	838 ± 13	Déchloration de l'eau, élimination des odeurs
F200	C6	CHEMVIRON CARBON	Charbon bitumineux (vapeur)	0,6-0,7	900	863 ± 13	Déchloration de l'eau, élimination des odeurs
F300	C7	CHEMVIRON CARBON	Charbon bitumineux (vapeur)	0,4-0,5	900	876 ± 13	Déchloration de l'eau, élimination des odeurs

^aSurface spécifique obtenue avec le modèle Brunauer–Emmett–Teller (BET)

2.2 Détermination des indices d'iode

Les études (AVOM *et al.*, 2002) montrent que la détermination des indices d'iode présente un double objectif : elle permet d'une part l'étude du rôle joué par l'activation sur l'augmentation du diamètre des pores, d'autre part c'est un test de contrôle de l'efficacité des charbons actifs obtenus dans les applications en phase aqueuse.

D'après MAREC (1996), l'indice d'iode (mg·g⁻¹) ou la quantité en milligramme d'iode adsorbé par gramme de charbon actif est donné par la relation suivante :

$$\text{Indice d'iode (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{)} = \frac{\left[C_o - \frac{C_n V_n}{2V_{I_2}} \right] \times M_{I_2} \times V_{abs}}{m_{CA}} \quad (1)$$

où C_o est la concentration de la solution initiale d'iode (mol·L⁻¹), C_n la concentration de la solution de thiosulfate de sodium (mol·L⁻¹), V_n le volume de la solution de thiosulfate de sodium à l'équivalence (mL), V_{I_2} le volume de solution d'iode dosé (10 mL), M_{I_2} la masse molaire moléculaire de l'iode (254 g·mol⁻¹), V_{abs} le volume d'adsorption (20 mL) et m_{CA} la masse de charbon actif (g).

En prenant $C_o = 0,1$ mol·L⁻¹, $C_n = 0,1$ mol·L⁻¹, $V_{abs} = 20$ mL, $V_{I_2} = 10$ mL, $M_{I_2} = 254$ g·mol⁻¹, V_n (mL) et m_{CA} (g), la relation 1 devient alors la formule 2 de GUEYE *et al.* (2011) :

$$\text{Indice d'iode (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{)} = \frac{25,4 \times (20 - V_n)}{m_{CA}} \quad (2)$$

Le mode opératoire utilisé est la méthode suggérée par GUEYE *et al.* (2011) en utilisant la solution d'iode de 0,200 ± 0,001 N normalisée. Un volume de 20 mL de la

solution d'iode a été traité par 0,2000 ± 0,0001 g de charbon actif. Après l'équilibre, l'iode restant dans le filtrat a été titré par 0,1 N de thiosulfate de sodium.

2.3 Détermination des isothermes d'adsorption

Pour l'établissement d'une isotherme, le mode opératoire utilisé est le protocole mis au point par AVOM *et al.* (2002). La masse d'iode adsorbée à l'équilibre par gramme de charbon (Q) est calculée de la même manière que pour l'indice d'iode, et pour le calcul de la concentration de l'iode en solution à l'équilibre (C_e), il faut tenir compte de l'équilibre $I_2 + KI \leftrightarrow KI_3$ dont la constante d'équilibre $K_e = 870$ à 25 °C, par application de la loi d'action des masses :

$$K_e = \frac{[KI_3]_e}{[I_2]_e [KI]_e} \quad (3)$$

Pour une meilleure exploitation de l'isotherme d'adsorption, notons qu'il faut considérer la concentration de l'iode libre en solution et non la concentration totale de l'iode à l'équilibre.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Indices d'iode

D'après AWWA (1991), la détermination de l'indice d'iode est un test simple et rapide donnant une indication sur la microporosité des charbons actifs. Les valeurs des indices d'iode des charbons actifs préparés à partir des copeaux de Moabi sont comparables à celles des charbons actifs commerciaux étudiés. Ces valeurs sont présentées au tableau 3.

Tableau 3. Résultats relatifs à l'isotherme d'adsorption de l'iode.
Table 3. Adsorption isotherm results for iodine.

Échantillon	Indice d'iode (mg·g ⁻¹)	Modèle de Langmuir ^a				Modèle de Freundlich ^b		
		Q_0 (mmol·g ⁻¹)	K_L (10 ⁴) (L·mol ⁻¹)	S_L (m ² ·g ⁻¹)	R^2	n	K_F (L·g ⁻¹)	R^2
MO72* (C1)	159 ± 13	8,39	6,27	1 073	0,802	0,168	9,160	0,971
6MOP407 (C2)	495 ± 13	9,27	0,35	1 187	0,871	0,195	6,815	0,991
2MOS207 (C3)	533 ± 13	8,80	1,52	1 126	0,527	0,179	8,436	0,942
2MON207 (C4)	629 ± 13	9,35	0,25	1 197	0,796	0,309	6,219	0,896
F100 (C5)	838 ± 13	8,47	1,09	1 084	0,969	0,308	7,626	0,769
F200 (C6)	863 ± 13	9,17	0,83	1 174	0,796	0,220	7,451	0,897
F300 (C7)	876 ± 13	13,18	0,31	1 687	0,876	0,310	8,739	0,971

^a Q_0 : quantité de soluté nécessaire pour recouvrir la surface de l'adsorbant d'une monocouche de molécules adsorbées ; K_L : constante caractéristique du couple adsorbant-adsorbat ; S_L : surface spécifique de l'adsorbant

^b n : constante permettant de décrire l'isotherme d'adsorption ; K_F : constante caractéristique du couple adsorbant-adsorbat

Les charbons actifs des résidus de Moabi ont donc des pores accessibles à la molécule d'iode. La caractérisation de la porosité permet de choisir le type de charbons actifs à utiliser pour éliminer une catégorie de polluants donnés. Pour éliminer les polluants macromoléculaires, les charbons actifs possédant beaucoup de macropores et de mésopores sont plus indiqués, alors que les charbons actifs disposant majoritairement de micropores sont plus adaptés pour traiter les molécules de faibles poids moléculaires. L'ordre croissant des valeurs des indices d'iode obtenues C1 < C2 < C3 < C4 < C5 < C6 < C7 confirme que l'activation chimique entraîne non seulement la création de nouveaux pores, mais aussi l'élargissement des pores disponibles. De plus, le type d'agent activant utilisé dans la préparation des charbons actifs a une influence sur l'efficacité de ces charbons. Ces tests de caractérisation à l'indice d'iode montrent une microporosité plus forte chez le charbon actif C4 (préparé à partir de NaOH) pour ce qui est des charbons de résidus de Moabi avec un indice d'iode de 629 mg·g⁻¹ et C7 pour les charbons actifs commerciaux avec 876 mg·g⁻¹. Cette microporosité est très faible pour le charbon non activé C1 avec un indice d'iode de 159 mg·g⁻¹. Ainsi, NaOH est le meilleur agent activant dans notre étude.

3.2 Isothermes d'adsorption

3.2.1 Détermination de Q_e et de C_e

3.2.1.1 Détermination de Q_e (masse d'iode adsorbée à l'équilibre par gramme de charbon)

La masse d'iode adsorbée à l'équilibre par gramme de charbon (Q_e) est calculée à partir de la formule de l'indice d'iode :

$$Q_e = \frac{\left[C_0 - \frac{C_n V_n}{2V_{I_2}} \right] \times M_{I_2} \times V_{abs}}{m_{CA}} \quad (4)$$

où les constantes gardent la même signification que dans la relation 1.

3.2.1.2 Détermination de C_e (concentration de l'iode en solution à l'équilibre)

Pour le calcul de C_e des études (AVOM, 2004) montrent qu'il faut tenir compte de l'équilibre $I_2 + KI \leftrightarrow KI_3$ dont la constante d'équilibre $K_e = 870$ à 25 °C. Le dosage par le thiosulfate permet de déterminer la concentration en iode total en solution sous forme de I_2 (iode libre) et I_3^- (iode combiné) et d'après HILL et MARSH (1968) l'adsorption de l'iode par le charbon ne dépend que de l'iode libre en solution. L'expression de C_e est :

$$C_e = C_{I_2} \left(1 - \frac{K_e C_{KI}}{1 + K_e C_{KI} + K_e C_{I_2}} \right) \quad (5)$$

où C_{I_2} est la concentration de l'iode total à l'équilibre (mol·L⁻¹) et est obtenue par dosage volumétrique en utilisant une solution de thiosulfate de sodium de concentration connue, C_{KI} étant la concentration de la solution initiale de KI .

3.2.2 Modèles

Les modèles mathématiques utilisés sont les modèles de Langmuir et de Freundlich, car plus appropriés pour des substances hydrophobes à l'instar des charbons actifs.

3.2.2.1 Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose la formation d'une couche monomoléculaire à la surface de l'adsorbant. L'équation de Langmuir relative à l'adsorption d'une monocouche est :

$$Q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

où Q_e est la quantité de soluté adsorbée à l'équilibre par unité de masse d'adsorbant (mg·g⁻¹), Q_0 la quantité de soluté nécessaire

pour recouvrir la surface de l'adsorbant d'une monocouche de molécules adsorbées ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), K_L la constante caractéristique du couple adsorbant-adsorbé dans l'équation de Langmuir, C_e la concentration d'adsorbé en solution à l'équilibre (soluté non adsorbé), par unité de masse de solide ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$).

Les valeurs de Q_e (Q_{exp}) et de C_e , reportées dans les tableaux 4 et 5, ont permis de construire les isothermes de Langmuir $Q_e = f(C_e)$. Ces isothermes, réalisées suivant la régression non linéaire, sont rassemblées dans les figures 1 et 2. En effet, différentes méthodes peuvent être utilisées pour la détermination des paramètres de Langmuir, comme, par

exemple, la transformation des données expérimentales sous une forme linéaire. La meilleure alternative de la linéarisation est la régression non linéaire (BOULINGUIEZ *et al.*, 2008).

La connaissance de la valeur de Q_o conduit à la détermination de la surface spécifique S_L par application de la relation :

$$S_L = Q_o \sigma N_A \left(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1} \right) \quad (7)$$

L'aire occupée par une molécule d'iode est égale à $\sigma = 21,3 \text{ \AA}^2$. $N_A = 6,023 \times 10^{23}$ est le nombre d'Avogadro.

Tableau 4. Résultats expérimentaux des charbons de résidus de Moabi.
Table 4. Experimental results for the Moabi residue activated carbons.

C_e^a (mmol·L ⁻¹)	Q_{exp}^b (mmol·g ⁻¹)	Q_{modL}^c (mmol·g ⁻¹)	Q_{modF}^d (mmol·g ⁻¹)
MO72* (C1)			
0,0006	2,45	0,30	2,63
0,0103	4,40	3,29	4,24
0,0539	5,65	6,47	5,61
0,1200	7,02	7,41	6,41
0,2410	7,65	7,87	7,21
0,3050	8,05	7,97	7,50
0,5270	8,15	8,14	8,22
0,7880	8,20	8,22	8,80
1,0700	8,28	8,27	9,26
6MOP407 (C2)			
0,1230	4,50	2,79	4,53
0,2650	5,30	4,46	5,26
0,4620	6,00	5,73	5,86
0,7720	6,40	6,77	6,48
1,1400	6,80	7,41	6,99
1,5000	7,50	7,79	7,37
2,0100	7,80	8,12	7,81
2,5800	8,10	8,35	8,19
3,1900	8,50	8,51	8,54
3,8200	9,00	8,62	8,85
2MOS207 (C3)			
0,0167	4,15	1,78	4,06
0,0740	5,25	4,66	5,29
0,1750	6,25	6,40	6,18
0,4000	6,50	7,56	7,16
0,4620	7,00	7,70	7,35
0,6710	8,00	8,01	7,86
0,6930	8,20	8,04	7,90
0,8050	8,65	8,14	8,12
2MON207 (C4)			
0,2040	3,40	3,16	3,80
0,3710	4,30	4,50	4,58
0,5070	5,70	5,23	5,04
0,7320	6,60	6,05	5,65
1,1300	6,80	6,90	6,46
1,6100	7,00	7,49	7,21
2,1600	7,20	7,89	7,89
2,6400	7,90	8,12	8,40
3,0400	9,00	8,26	8,77

Tableau 5. Résultats expérimentaux des charbons commerciaux.
Table 5. Experimental results for the commercial activated carbons.

C_e^a (mmol·L ⁻¹)	Q_{exp}^b (mmol·g ⁻¹)	Q_{modL}^c (mmol·g ⁻¹)	Q_{modF}^d (mmol·g ⁻¹)
F100 (C5)			
0,0153	1,70	1,21	2,11
0,0611	3,00	3,39	3,22
0,1330	4,30	5,01	4,10
0,2270	5,70	6,03	4,83
0,3160	7,30	6,56	5,35
0,5970	7,50	7,34	6,51
0,9580	7,80	7,73	7,53
1,3900	8,00	7,95	8,44
1,9500	8,10	8,09	9,37
2,5700	8,20	8,18	10,20
F200 (C6)			
0,0092	2,00	0,65	2,65
0,0195	4,10	1,28	3,13
0,1200	4,50	4,58	4,67
0,2800	5,10	6,41	5,63
0,3940	6,60	7,02	6,07
0,5410	7,90	7,50	6,51
0,9140	8,00	8,10	7,30
1,3500	8,20	8,42	7,96
1,8700	8,40	8,61	8,55
2,4500	8,60	8,74	9,08
3,1000	8,80	8,83	9,56
3,7900	9,10	8,89	9,99
F300 (C7)			
0,0081	2,00	0,32	1,97
0,0348	3,60	1,28	3,09
0,1370	4,30	3,93	4,72
0,3000	4,90	6,35	6,02
0,4240	6,30	7,49	6,70
0,5760	7,70	8,45	7,37
1,1600	9,20	10,31	9,15
1,5700	9,70	10,93	10,05
1,8700	10,90	11,24	10,61
2,1700	12,20	11,47	11,11
2,7200	12,60	11,78	11,91

^a C_e : concentration de l'iode en solution à l'équilibre

^b Q_{exp} : valeur expérimentale de Q_e (masse d'iode adsorbée à l'équilibre par gramme de charbon)

^c Q_{modL} : valeur de Q_e obtenue par le modèle de Langmuir

^d Q_{modF} : valeur de Q_e obtenue par le modèle de Freundlich

Figure 1. Isothermes d'adsorption de l'iode suivant le modèle de Langmuir (charbons de Moabi). Exp : valeurs expérimentales; modL et modF : valeurs obtenues par le modèle de Langmuir et celui de Freundlich.
Iodine adsorption isotherms according to the Langmuir model (Moabi activated carbons). Exp: experimental values; modL and modF: values obtained using the Langmuir and Freundlich models.

Figure 2. Isothermes d'adsorption de l'iode suivant le modèle de Langmuir (charbons commerciaux). Exp : valeurs expérimentales; modL : valeurs obtenues par le modèle de Langmuir.
Iodine adsorption isotherms according to the Langmuir model (commercial activated carbons). Exp: experimental values; modL: values obtained using the Langmuir model.

L'équation 7 devient alors la relation :

$$S_L = Q_o \sigma N_A (m^2 \cdot g^{-1}) = 1,28 \times 10^5 Q_o (m^2 \cdot g^{-1}) \quad (8)$$

Les valeurs des surfaces spécifiques (S_L) et de la constante Q_o sont rapportées au tableau 3.

Une classification des différentes formes d'isothermes d'adsorption a été proposée par BRUNAUER *et al.* (1940). Des mécanismes d'adsorption, ainsi que des caractéristiques de porosité d'adsorbant y ont été associés (GIRAUDET, 2006). Par exemple, l'isotherme de type II concerne des adsorptions où le nombre de couches de molécules adsorbées n'est pas limité. L'isotherme de type IV représente une adsorption multicouche avec condensation capillaire dans les pores de l'adsorbant. Pour que ce phénomène de capillarité existe, il faut que l'isotherme présente une hystérésis au cours d'un cycle d'adsorption-désorption. Cette hystérésis, pendant la phase de désorption, peut également indiquer la présence de mésopores. Le type I ne s'observe qu'avec des adsorbants microporeux où l'adsorption semble limitée à une ou deux couches. Ceci est une conséquence de l'encombrement stérique des molécules adsorbées.

Les isothermes d'adsorption des échantillons C1, C2 pour les charbons de résidus de Moabi et C5, C6 pour les charbons commerciaux sont de type I dans la classification de Brunauer présentée par certaines études (ANDERSON et BOUDART, 1993), alors que les échantillons C3, C4 et C7 donnent des isothermes de type II (figures 1 et 2).

Les charbons C1, C2, C5 et C6 peuvent être considérés comme des adsorbants microporeux où l'adsorption semble limitée à une ou deux couches. D'après SFYRAKIS *et al.* (1995), ces charbons ont des pores dont le diamètre moyen se situe entre 0 et 25 Å. Par contre, les échantillons C3, C4 et C7 concernent des adsorptions où le nombre de couches de molécules adsorbées n'est pas limité. En effet, plus les pores sont fins, plus leur contribution à la surface est importante. Le charbon C7 possède donc la structure la plus fine. L'ordre croissant du pouvoir adsorbant déterminé par rapport à la valeur de Q_o est le suivant : C1 < C5 < C3 < C6 < C2 < C4 < C7. Cet ordre n'est pas très différent de celui déduit par mesure de l'indice d'iode. La légère différence peut être liée, aux erreurs d'expérience, au phénomène de condensation capillaire dans les pores de l'adsorbant ou au remplissage irrégulier de la surface du charbon, résultat qui est confirmé par ceux d'AVOM *et al.* (2002). Tous les charbons actifs faisant l'objet de notre étude ont une capacité d'adsorption supérieure à celle du charbon non activé C1; ceci est conforme au schéma classique de l'activation qui est la création des pores par le départ des solides et fluides amorphes, suivie de l'élargissement des pores disponibles par l'attaque du squelette carboné.

3.2.2.2 Modèle de Freundlich

L'équation empirique de Freundlich, basée sur l'hypothèse qu'une couche monomoléculaire est adsorbée, est donnée par la relation 9 :

$$Q_e = K_F (C_e)^n \quad (9)$$

où Q_e est la quantité de soluté adsorbée à l'équilibre par unité de masse d'adsorbant ($mg \cdot g^{-1}$), K_F la constante caractéristique du couple adsorbant-adsorbat dans l'équation de Freundlich, n la constante permettant de décrire l'isotherme d'adsorption, C_e la concentration d'adsorbat en solution à l'équilibre (soluté non adsorbé) par unité de masse de solide ($mg \cdot L^{-1} \cdot g^{-1}$).

Les valeurs de Q_e (Q_{exp}) et de C_e , consignées dans les tableaux 4 et 5, ont permis de tracer la courbe $Q_e = f(C_e)$ en réalisant la régression non linéaire sur le modèle de Freundlich. Les isothermes de Freundlich obtenues sont rassemblées dans les figures 3 et 4. Cette méthode de régression a permis de déterminer les valeurs des constantes de Freundlich consignées dans le tableau 3.

Le modèle de Freundlich est caractérisé par la constante n qui est une indication sur l'amplitude et la diversité des énergies liées à un type particulier d'adsorption alors que K_F indique la capacité d'adsorption. D'après WEBER *et al.* (1992), plus la valeur de K_F est élevée, plus grande est l'affinité de l'adsorbant pour l'adsorbat et plus l'adsorbant est poreux. L'ordre croissant du pouvoir adsorbant déterminé par rapport à la valeur de K_F est le suivant : C4 < C2 < C5 < C6 < C3 < C7 < C1. En outre, les études (ANWAR, 2007) montrent que la constante n est un paramètre compris entre 0 et 1 et traduit l'état de surface de l'adsorbant (degré d'homogénéité). Plus cette constante s'approche de l'unité, plus la surface est homogène; lorsqu'elle tend vers zéro, la surface devient hétérogène. L'ordre croissant du degré d'homogénéité est le suivant par rapport à la valeur de la constante n : C1 < C3 < C2 < C6 < C5 < C4 < C7.

Les résultats obtenus par exploitation des données expérimentales par le modèle de Freundlich sont différents de ceux déduits par le modèle de Langmuir. La différence pourrait s'expliquer par les restrictions liées aux hypothèses d'application de ces modèles, car, d'après PORQUET (1999), l'adsorption avec le modèle de Langmuir ne permet pas la superposition de molécules sur les sites déjà occupés et cette adsorption est monomoléculaire. D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'adsorption de l'iode par les charbons étudiés est mieux décrite par le modèle de Freundlich (coefficient de corrélation proche de 1).

Figure 3. Isothermes d'adsorption de l'iode suivant le modèle de Freundlich (charbons de Moabi). Exp : valeurs expérimentales; modF : valeurs obtenues par le modèle de Freundlich.

Iodine adsorption isotherms according to the Freundlich model (Moabi activated carbons). Exp: experimental values; modF: values obtained using the Freundlich model.

Figure 4. Isothermes d'adsorption de l'iode suivant le modèle de Freundlich (charbons commerciaux). Exp : valeurs expérimentales; modF : valeurs obtenues par le modèle de Freundlich.

Iodine adsorption isotherms according to the Freundlich model (commercial activated carbons). Exp: experimental values; modF: values obtained using the Freundlich model.

4. CONCLUSION

La présente étude montre que les charbons actifs de résidus de Moabi pourraient être utilisés pour l'élimination des colorants organiques en solution aqueuse. Le plus adsorbant des charbons préparés est l'échantillon C4, obtenu après imprégnation pendant 2 h dans la soude (20 %) et carbonisé à 700 °C. La valeur de l'indice d'iode de ce charbon (629 mg·g⁻¹) est comparable à celle du meilleur charbon commercial C7 (876 mg·g⁻¹). Le meilleur agent activant dans nos conditions de travail est la soude. La théorie de Freundlich permet de mieux décrire l'adsorption de l'iode dans notre étude.

Des études complémentaires (surface BET, distribution de la taille des pores, point de charge nulle) sont en cours pour optimiser les applications des charbons préparés.

REMERCIEMENTS

Nous remercions particulièrement le professeur M. Ndikontar pour toutes les suggestions.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALTINBAS U., S. DOKMECI et A. BARISTIRAN (1995). Treatability study of wastewater from textile industry. *Environ. Technol.*, 16, 389-394.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA) (1991). *B600-90: AWWA standard of powder activated carbon*. American Water Works Association, STB_0029782, Denver, USA, 28 p.

ANDERSON J.R. et M. BOUDART (1993). Morphology and scaling macromolecules. *Catal. Sci. Technol.*, 2, 171.

ANWAR E. (2007). *Réactivité thermique et cinétique de dégradation du bois d'arganier. Application à l'élaboration de charbon actif par activation chimique à l'acide phosphorique*. Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V, Maroc, 150 p.

AVOM J. et I.J. HAJAL (1983). Préparation et étude physico-chimique des charbons de rafles de régime de palmes. *Sci. Technol.*, 3 (1, 2), 1-8.

AVOM J., J.M. KETCHA, C. NOUBACTEP et P. GERMAIN (1997). Adsorption of methylene blue from an aqueous solution on to activated carbons from palm-tree cobs. *Carbon*, 35 (3), 365-369.

AVOM J., J.M. KETCHA, D.D. BABALE, A.I. NGONO et G. PATRICK (2002). Adsorption de l'iode par des charbons actifs de rafles de régimes de palmes. *Déchets Sci. Tech.*, 28, 26-32.

AVOM J. (2004). *Contribution à la valorisation de l'Ayous (Triplochiton scleroxylon), de l'Akom (Terminalia superba) et des rafles de régime de palmes : Carbonisation - Activation - Propriétés adsorbantes. Application au traitement des eaux*. Thèse de doctorat, Univ. Yaoundé I, Cameroun, pp. 14-170.

BOULINGUIEZ B., P. LE CLOIREC et D. WOLBERT (2008). Revisiting the determination of Langmuir parameters - application to tetrahydrothiophene adsorption onto activated carbon. *Langmuir*, 24, 6420-6424.

BRUNAUER S., L.S. DEMING, W.E. DEMING et E. TELLER (1940). On a theory of the Van der Waals adsorption of gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 62 (7), 1723-1732.

EL-GUENDI M.S. (1991). Colour removal from textile effluents by adsorption techniques. *Water Res.*, 25 (3), 271-273.

GIRAUDET S. (2006). *Performances et sécurité des procédés de traitement des composés organiques volatils par adsorption sur charbon actif*. Thèse de doctorat, Univ. de Nantes, France, pp. 83-109.

GUEYE M., J. BLIN et C. BRUNSCHWIG (2011). Étude de la synthèse des charbons actifs à partir de biomasses locales par activation chimique avec H₃PO₄. *6^{ème} édition Journées Scientifiques du 2iE*, 4 au 8 avril, Ouagadougou, Burkina Faso.

HILL A. et H. MARSH (1968). A study of the adsorption of iodine and acetic acid from aqueous solutions. *Carbon*, 6 (1), 31-39.

LIN S.H. et C.F. PENG (1994). Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Water Res.*, 28 (2), 277-282.

LYUBCHIK S.B., H. BENADDI, V.V. SHAPRANOV et F. BEGUIN (1997). Activated carbons from chemically treated anthracite. *Carbon*, 35 (1), 162-165.

- MAREC J. F. (1996). *Fabrication et caractérisation d'un charbon actif rustique issu de la biomasse*. Thèse de doctorat, Univ. de Technologie de Compiègne, France, pp. 29-32.
- NKO'O A.M.C., J. AVOM, R. MPON, J.M. KETCHA et B.J.P. BELIBI (2013). Valorization of a Cameroonian species: Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) into activated carbon. *Int. J. Curr. Res. Rev.*, 5 (8), 1-10.
- PORQUET C. (1999). *Élaboration des charbons actifs magnétisables*. Thèse de doctorat, Univ. de Technologie de Compiègne, France, 24 p.
- RIVET P. (1989). Traitement et valorisation des eaux résiduaires dans l'industrie textile. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 130, 31-32.
- SFYRAKIS J., A.J. FALIAGAS et J. SIMITZIS (1995). Influence of pyrolysis temperature on the adsorptive properties of adsorbents produced from novolac and biomass. *J. Appl. Polym. Sci.*, 55 (13), 1739-1746.
- WEBER W.J., P.M. MCGINLEY et L.E. KATZ (1992). A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. Conceptual basis and equilibrium assessments. *Environ. Sci. Technol.*, 26 (10), 1955-1962.