

ÉLIMINATION D'UN COLORANT DES REJETS DE L'INDUSTRIE TEXTILE PAR LA TECHNIQUE D'ADSORPTION SUR UNE ARGILE NATURELLE DANS UN LIT FLUIDISÉ

N. Hamouda^{a*}, I. Zouari^b, A. Gannouni^a, A. Bellagi^c

^a *École Nationale d'Ingénieurs de Gabès, 6029 Gabès, Tunisie*

^b *ISSET de Radès, 172, 2098 Radès Médina, Tunisie*

^c *École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 5060 Monastir, Tunisie*

(Reçu le 10 Mai 2006, accepté le 23 Mars 2007)

RÉSUMÉ : L'étude porte sur l'élimination d'un colorant organique, le bleu de méthylène de formule chimique $C_{16}H_{18}ClN_3S, 2H_2O$, par la technique d'adsorption. L'adsorbant utilisé est une argile naturelle. L'utilisation d'un lit fluidisé permet de s'affranchir du problème de colmatage de l'adsorbant en milieu fixe.

Dans la première partie on a identifié les deux modèles d'isothermes d'adsorption, de Langmuir et de Freundlich, et on a trouvé que seulement celui de Langmuir lisse les points expérimentaux avec une capacité d'adsorption de 238 mg/g.

La deuxième étape de cette étude est consacrée à la mise au point d'une installation répondant à notre objectif. La troisième partie traite de l'identification du régime hydrodynamique de fonctionnement de la colonne d'adsorption tout en optimisant la masse d'argile ainsi que le débit de la solution assurant une bonne fluidisation. L'étude hydrodynamique est complétée par celle du temps de séjour DTS. Pour cela on a utilisé le mode d'injection par impulsion de KCl de concentration 1 mole/l, comme traceur. Le suivi de la conductance de ce sel a permis d'identifier le régime d'écoulement.

Dans la dernière partie, un système d'équations aux dérivées partielles traduisant le comportement de la colonne vis-à-vis de l'adsorption du bleu de méthylène est établi. Ce système est transformé en un système différentiel en effectuant une discrétisation spatiale. La résolution est effectuée en utilisant la méthode numérique, de Runge Kutta.

Mots clés : adsorption, argile, lit fluidisé, hydrodynamique.

ABSTRACT: The aim of this work is the elimination of one organic dye that is the methylene blue of raw chemical formula $C_{16}H_{18}ClN_3S, 2H_2O$ by the adsorption technique. The used adsorbant is natural clay that is a bentonite. Its utilization requires a streamlined regime of the fluidization in order to overcome the problem of the plugging of the clay bed.

In the first stage of this work two types of isotherm models were tested to determine the adsorption capacity of our clay vis-à-vis the methylene blue; that is those of Langmuir and Freundlich. We find that the model of Langmuir describes the adsorption and gives an adsorption ultimate capacity of the order of 238 mg/g.

In the second stage, we built up a pilot installation so as to use it in an industrial scale.

The third part is about the identification of the streamlined regime of working of the adsorption column. We localized the streamlined regime of the column adsorption, therefore the mass of clay and the speed of the solution in order to assure a good fluidization.

This streamlined survey is followed by the residence time distribution survey (RTD).

For it, the method of injection by impulse of a salt that is the KCl to a concentration of 1 mol/l is used. To follow the historic of this tracer, a conductimeter method is used. This part permits to identify the model of out-flow that is piston with an axial dispersing.

In a last step, a modelisation of adsorption in a fluidized bed is made.

This system is based on matter balance in the column of adsorption and on the equation of the model of adsorption isotherm. This one is transformed into a differential system by doing a spatial discretisation and using a Runge Kutta method.

Key words: adsorption, clay, fluidised bed, hydrodynamic.

1. INTRODUCTION

L'industrialisation et le développement ont favorisé la modification voire même la destruction accélérée du milieu naturel. Le dégagement des gaz toxiques dans l'atmosphère et le rejet des eaux usées dans les mers et les cours d'eau ont provoqué la dégradation de l'écosystème.

* correspondant ; e-mail: nadia.hamouda@isetg.rnu.tn



Ces problèmes préoccupent l'humanité et l'engagent à trouver des solutions concrètes pour protéger l'environnement. Pour cela, plusieurs règlements et restrictions ont été adoptés par les gouvernements pour conserver la nature et limiter la pollution domestique, agricole et industrielle.

Parmi les règles imposées, on cite celles qui obligent les industriels à traiter leurs rejets hydriques avant de les déverser dans les réseaux d'assainissement. Des normes bien précises doivent être respectées par ces usines afin d'éviter toute sorte de toxicité du milieu environnant ou d'altération de l'écosystème.

Plusieurs procédés techniques, pour traiter ces rejets, sont utilisés dans l'industrie, mais la technique la plus répandue et la plus économique est celle de l'adsorption.

Cette étude s'intègre dans le cadre de valorisation d'un matériau naturel et son utilisation dans le domaine de la dépollution hydrique. Le choix de l'argile en tant qu'adsorbant des colorants en lit fluidisé sur colonne est judicieux, du fait qu'il nous permet d'éviter le problème du colmatage du lit ainsi que le traitement d'un débit hydrique plus important.

Nous avons débuté ce travail par une caractérisation de l'adsorbant suivi de l'étude de la thermodynamique d'adsorption. En seconde étape, l'hydrodynamique de l'installation de fluidisation liquide est caractérisée. Enfin, une modélisation est proposée pour décrire l'adsorption du bleu de méthylène en lit fluidisé.

De ce fait et après avoir donné quelques caractéristiques de l'adsorbant nous avons déterminé l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène dans le but de prévoir la capacité ultime d'adsorption de l'argile. Ensuite nous avons caractérisé l'hydrodynamique de l'installation de fluidisation du liquide avant de proposer une modélisation pour décrire l'adsorption du bleu de méthylène en lit fluidisé.

2. PARTIE EXPERIMENTALE

2.1 Caractérisation de l'argile naturelle

L'adsorbant utilisé lors de cette étude est un matériau argileux brut préalablement soumis à un prétraitement qui consiste à le mettre en suspension dans l'eau suivi d'un tamisage humide puis d'un séchage à 60 °C.

Les résultats des analyses physicochimiques du matériau, sont portés dans les tableaux I et II. Sa composition chimique est déterminée à l'aide de différentes techniques d'analyse classique, spectroscopie d'émission atomique (ICP), fluorescence X, est regroupée dans le tableau II. Elle fait apparaître en particulier un rapport molaire $\frac{n(\text{SiO}_2)}{n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{Al}_2\text{O}_3)} = 4.79$, avec n le nombre de moles du composé correspondant par cent grammes d'argile, identifiant le matériau comme appartenant à la famille des smectites.

Les résultats de ces analyses ont permis, en procédant selon la méthode décrite par la référence [1] de dégager la formule structurale de l'argile brute.

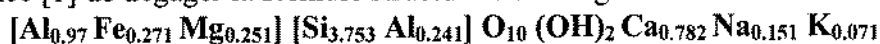


Tableau I. Caractéristiques texturales de l'argile.

Désignation	Résultat	Méthode
Surfaces spécifiques (m ² /g)	510	Méthode du bleu de méthylène (méthode de la tâche)
	71	Isotherme d'adsorption de l'azote à 77 K (BET)
Volume total des pores (cm ³ /g)	143.9 10 ⁻³	Porosimétrie à l'azote
% du volume occupé par les macropores	36	Porosimétrie à l'azote
Rayon moyen des pores (Å)	46	Isotherme de désorption de l'azote à 77 K (BJH)
	36	Isotherme d'adsorption de l'azote à 77 K (BET)
Masse volumique apparente (g/cm ³)	2.05	Pycnomètre au mercure
Masse volumique vraie (g/cm ³)	2.56	Pycnomètre à l'hélium

Tableau II. Composition chimique moyenne de l'argile exprimée en % massique.

Composé	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₅	P ₂ O ₅	P-F (perte au feu)
%	49.22	13.75	6.08	9.34	2.22	0.56	1.16	1.10	0.43	15.75

2.2 Etude de l'isotherme d'adsorption

2.2.1. Étude expérimentale

La méthode dite «bottle point méthode» [2] est utilisée pour déterminer l'isotherme d'adsorption. Cette méthode consiste à prendre différents erlenmeyers, chacun rempli par 500 ml de solution de colorant de concentration initiale connue (40, 30, 20, 15, 10, 7.5 et 5 mg/l) et contenant une masse d'argile déterminée (400 mg). Ces erlenmeyers bien fermés et agités à l'aide d'agitateur magnétique sont placés dans un bain thermostaté afin d'avoir une température identique pour toutes les solutions. Cette méthode permet d'avoir plusieurs points de l'isotherme au même temps et dans les conditions expérimentales pratiquement identiques permettant ainsi de minimiser les erreurs de manipulation.

L'évolution de la concentration en colorant est suivie par la mesure de la densité optique. La longueur d'onde maximale d'absorption du bleu de méthylène est $\lambda_{\max} = 660$ nm. On a constaté que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermodynamique d'adsorption est inférieur à une heure et la concentration résiduelle de la solution de bleu de méthylène est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage préalablement obtenue.

2.2.2. Résultats et Interprétations

La capacité maximale d'adsorption vis-à-vis du bleu de méthylène a été déterminée à partir des isothermes d'équilibre. Les modèles les plus utilisés pour l'adsorption en phase liquide sont ceux de Langmuir et de Freundlich donnés par les deux expressions suivantes [3-5] :

$$\text{Langmuir} \quad \theta = \frac{q_e}{q_0} = \frac{a C_e}{1 + a C_e}$$

$$\text{Freundlich} \quad q_e = k C_e^{1/n}$$

La valeur de la capacité ultime d'adsorption est déterminée en utilisant les expressions linéarisées de Langmuir

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0 a C_e} + \frac{1}{q_0}$$

et de Freundlich

$$\text{Log}(q_e) = 1/n \text{Log}(C_e) + \text{Log}(k)$$

Les figures 1 et 2 représentent les transformées linéaires correspondant à ces deux modèles. En comparant les deux graphiques, nous remarquons que le modèle de Freundlich ne lisse pas bien les points expérimentaux, donc la capacité ultime du matériau utilisé ne peut être déterminée que par l'expression linéarisée du modèle de Langmuir.

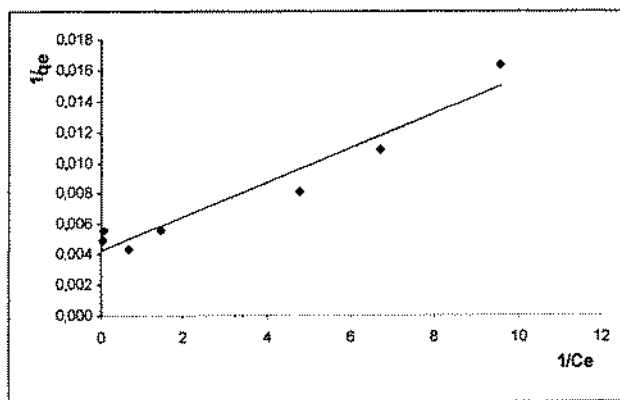


Figure 1. L'isotherme de Langmuir du BM sur le matériau argileux, sous sa forme linéaire.

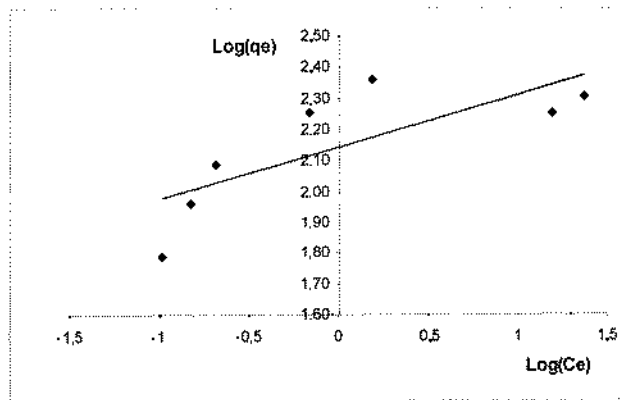


Figure 2. L'isotherme de Freundlich du BM sur le matériau argileux, sous sa forme linéaire.



A partir de la pente de la droite de Langmuir et de l'ordonnée à l'origine on a trouvé la capacité ultime d'adsorption de l'argile brute qui est de 238 mg/g et donc sa surface spécifique au bleu de méthylène de 525 m²/g, valeur très proche à celle déterminée par la méthode de la tâche.

2.3 Etude hydrodynamique

L'objectif de cette étude est l'identification du régime hydrodynamique de l'installation afin de modéliser correctement l'unité de fluidisation et prévoir les performances de la colonne. Pour toutes les expériences réalisées dans cette partie, le fluide utilisé est l'eau du réseau urbain.

2.3.1. Étude de la courbe caractéristique du lit fluidisé

L'étude expérimentale est réalisée à l'aide du banc schématisé par la figure 3.

Il s'agit d'un ensemble d'équipements constitués essentiellement d'une colonne d'adsorption, une pompe centrifuge pour alimenter le lit en eau et de deux bacs l'un d'alimentation et l'autre de réception du fluide.

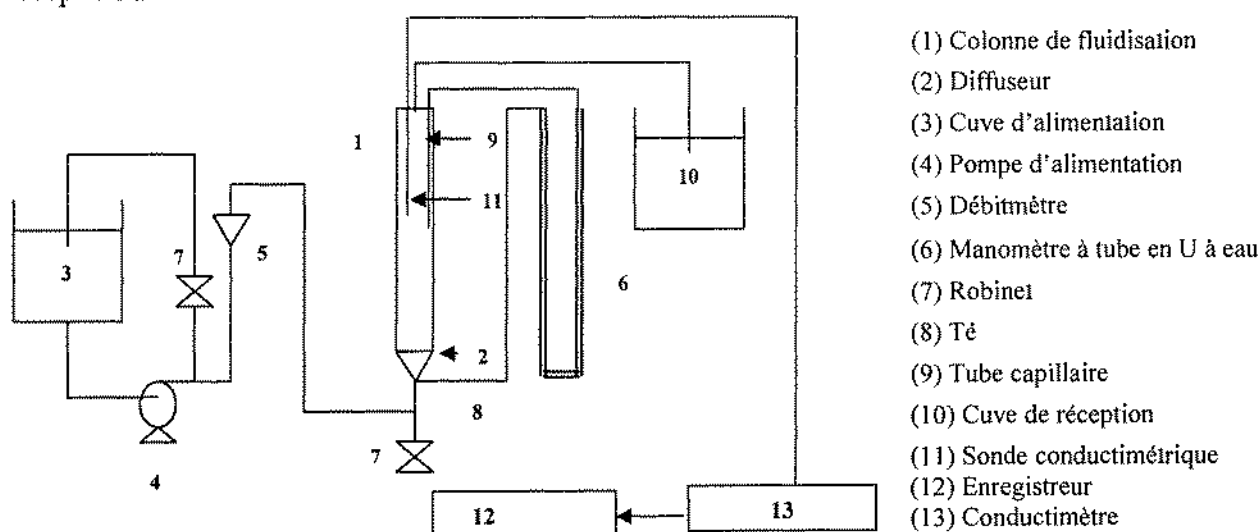


Figure 3. Montage expérimental.

Les caractéristiques de la colonne sont portées dans le tableau III.

Tableau III. Les caractéristiques de la colonne d'adsorption.

Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Section (m ²)	Volume (m ³)	Hauteur du lit (mm)	Masse d'argile (g)
27	500	5.72.10 ⁻⁴	2.86.10 ⁻⁴	40 à 120	14 à 27

La solution provenant du réservoir d'alimentation (3) par l'intermédiaire de la pompe centrifuge (4) traverse la colonne (1) qui contient une quantité d'argile. L'énergie potentielle dissipée (perte de charge) par l'eau lors de son passage, est déterminée par une variation de la hauteur de l'eau dans le manomètre à tube en U (6). Ce tube est relié par l'une de ses deux extrémités à l'entrée de la colonne par un té (8) et à la sortie par un tube capillaire (9) qui peut se déplacer manuellement dans la colonne suivant la hauteur du lit d'argile. La perte de charge mesurée est la somme de celle du diffuseur (à vide) et du lit d'argile.

L'objectif de cette partie est la détermination du débit de liquide et la masse d'argile correspondante pour assurer une bonne fluidisation.

Un premier essai a permis de déterminer la perte de charge à vide, à travers le diffuseur. Par la suite, pour une masse donnée d'argile de granulométrie de 1mm et de porosité de 0,35, le débit de la solution fût varié et à la fois on note la perte de charge totale et la hauteur du lit d'argile dans la colonne. Pour s'assurer de la reproductibilité des résultats, chaque essai est refait au moins cinq fois pour chaque masse d'argile. Les évolutions de la perte de charge nette du lit par unité de hauteur en fonction du débit, pour différentes masses d'argile, sont portées sur la figure 4 (a, b, et c).

De la figure 4, nous avons déduit les débits minimums de la fluidisation rapportés, avec les pertes de charge par unité de hauteur du lit, sur le tableau IV.

Tableau IV. Débit minimal de fluidisation (Q_{mf}) et perte de charge rapportée à la hauteur du lit ($(pdc/l)_{mf}$) en fonction de la masse d'argile.

m (g)	$Q_{mf} 10^{-6} (m^3/s)$	$(pdc/l)_{mf} (cm \text{ de } H_2O/cm)$
26	2.580	0.600
22	2.200	0.494
18	1.02	0.336

L'étude hydrodynamique montre que la masse de l'adsorbant, le débit minimal de fluidisation et la perte de charge par unité de hauteur du lit d'argile varient dans le même sens.

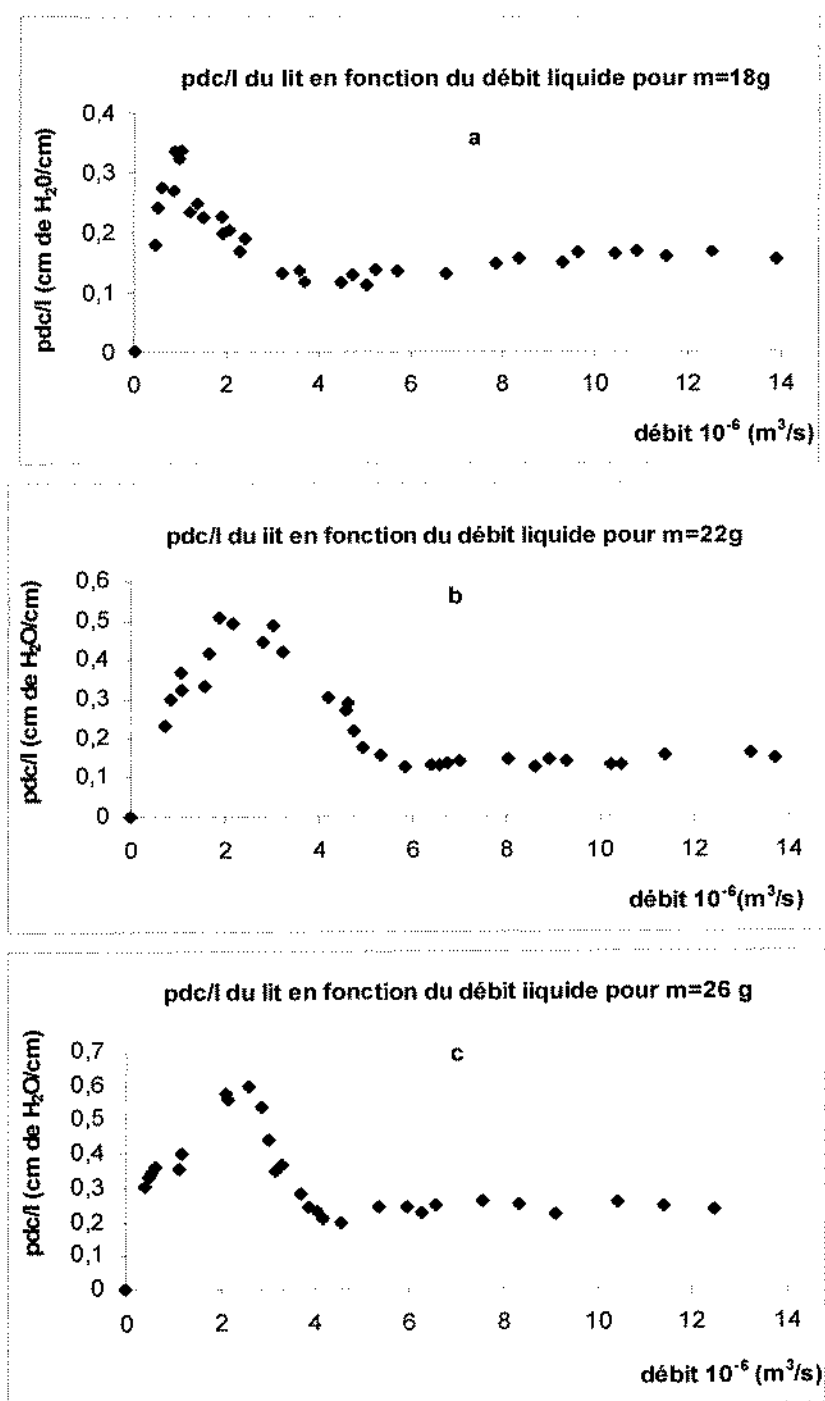


Figure 4: Pertes de charge par la hauteur du lit d'argile pour différentes masses d'adsorbant.



2.3.2. Étude de la distribution du temps de séjour

Le principe de la méthode consiste à « marquer » les molécules entrant dans la colonne, puis suivre leur historique jusqu'à la sortie. Certaines méthodes de détermination du temps de séjour, citées dans la littérature font appel soit à un traceur radioactif [6] utilisant un sel ($^{24}\text{Na}_2\text{CO}_3$), soit à des méthodes optiques utilisant des caméras ou fibre optique et laser [7], d'autres utilisent la mesure des concentrations du solide par absorption lumineuse selon la loi de Beer Lambert [8,9] et d'autres le KCl [10] à 1 mol/l comme un traceur pour caractériser l'hydrodynamique de l'agitation en travaillant avec une adsorption en discontinu. Cette dernière méthode est utilisée pour caractériser la colonne. Une quantité du traceur (KCl) ne dépassant pas 5% du volume de la colonne, est introduite par le bas, au niveau du diffuseur. L'injection est réalisée sous forme d'impulsion rapide tout en faisant attention de ne pas perturber le régime d'écoulement. L'évolution de la conductance de la solution est mesurée à la sortie de la colonne (haut). Le traceur doit répondre aux critères suivants :

- pas de réaction avec la solution, inerte,
- dispose de propriétés physiques similaires à celles de la solution du bleu de méthylène,
- complètement soluble dans l'eau.

Le signal de sortie (figure 5) est la fonction de distribution du temps de séjour "DTS". La DTS obtenue montre que la colonne se comporte comme un réacteur piston avec une dispersion axiale.

En se basant sur les travaux de Villermaux [11], on peut identifier et caractériser le régime d'écoulement du fluide dans la colonne. On définit $C(t)$ et C_0 , respectivement les concentrations de KCl à l'instant t et à $t_0 = 0$, V est le volume de la colonne, Q est le débit d'entrée de la solution et $E(t)$ la fonction de distribution du temps de séjour (DTS) alors,

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{V}{Q} E(t) = \tau E(t) = E(\theta) \quad (1)$$

Soit μ_n : le moment d'ordre n autour de l'origine de la DTS défini par la relation 2 :

$$\mu_n = \int_0^{\infty} t^n E(t) dt \quad (2)$$

Les moments d'ordre 0 et 1 permettent d'accéder au temps de séjour t_s moyen.

$$t_s = \frac{\mu_1}{\mu_0} = \frac{\int_0^{\infty} t E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} \quad (3)$$

Le moment d'ordre 2 autour de la moyenne, ou moment centré est défini par :

$$\mu'_2 = \int_0^{\infty} (t - t_s)^2 E(t) dt \quad (4)$$

La variance réduite de la distribution est donnée par l'expression 5 :

$$\sigma^2 = \frac{\mu'_2}{t_s^2} \quad (5)$$

L'équation 6 relie la variance réduite au nombre de PECLLET, en supposant que la colonne est fermée à la diffusion :

$$\sigma^2 = \frac{2}{P_e} - \frac{2}{P_e^2} [1 - \exp(-P_e)] \quad (6)$$

La relation 7 donne le nombre (j) de réacteurs parfaitement agités, équivalents au réacteur réel pour le modèle de mélangeurs en cascade.

$$j = \frac{1}{\sigma^2} \quad (7)$$

A l'aide des formules précédentes, on détermine les différents paramètres nécessaires à la modélisation (tableau V).

Tableau V. Différents paramètres pour qualifier l'écoulement du liquide.

$Q \cdot 10^{-6} (\text{m}^3/\text{s})$	τ (s)	t_s (s)	σ^2	Pe	j
1.6	25	27	0.38	4	2,63

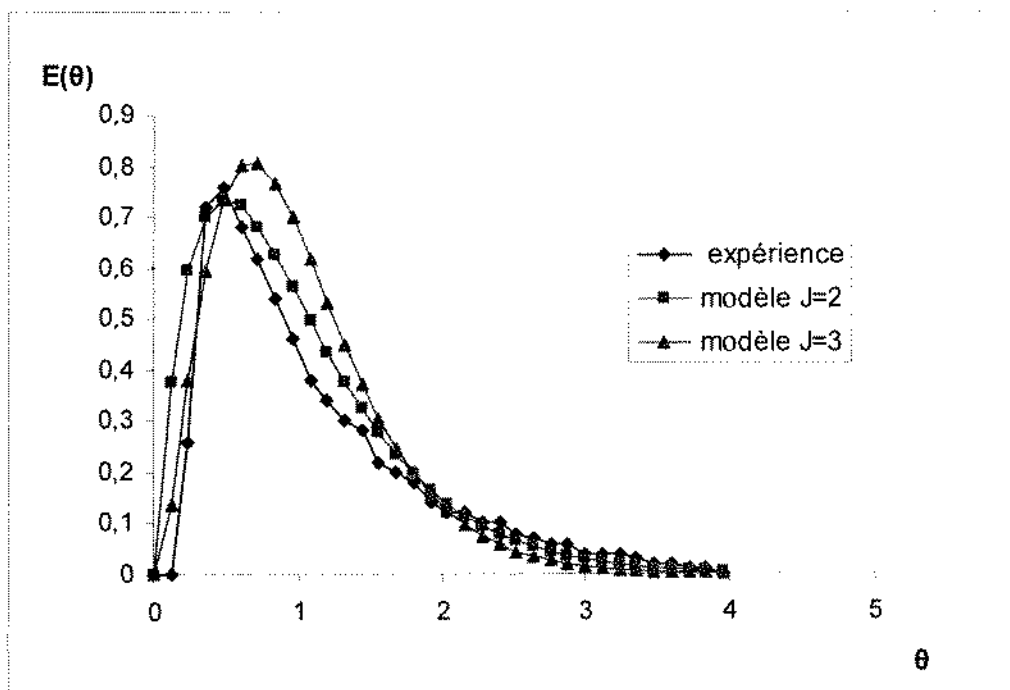


Figure 5. La courbe de DTS en fonction du temps réduit pour un débit du fluide de $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

La courbe de distribution du temps de séjour (DTS) en coordonnées réduites ne montre pas de pic dans les premières instants, donc pas de court-circuit. Le temps de séjour donné par la relation 3, indique une valeur de 27 secondes qui est très proche de temps de passage qui est de 25 secondes. La variance réduite de 0,38, laisse penser à un comportement assez proche de réacteur parfaitement agitée en série. La figure 5, montre que les points expérimentaux peuvent être modélisés par deux mélangeurs en cascade. Les travaux de Trambouze et col. [14] ont démontré qu'une colonne dont la hauteur du lit est supérieure à deux fois son diamètre peut être modélisée par une cascade d'étage parfaitement agités ayant une hauteur égale au diamètre du lit. Pour notre cas le diamètre de colonne est de 2.69 cm et la hauteur du lit de 7 cm, ce qui est en accord avec les travaux de Trambouze et col. [14].

Un autre modèle peut être proposé, celui d'un piston avec dispersion axiale avec le nombre de Peclet égal à 2,65, ce qui donne une valeur de la dispersion axiale de $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

3. MODELISATION DE L'ADSORPTION

Dans cette partie, on présente le modèle développé pour l'adsorption du bleu de méthylène en lit fluidisé. Il s'agit d'un ensemble d'équations mathématiques obtenues à partir du modèle de l'isotherme et du bilan matière dans la phase fluide.

Toutes ces équations sont couplées et les conditions aux limites sont consignées pour chaque cas particulier (de température et de pression).

3.1 Équations du modèle

On considère une solution de bleu de méthylène de concentration C_0 , traversant avec un débit volumique, Q , constant, un lit fluidisé d'adsorbant, de section droite, S , et de hauteur L représenté par la figure 6.



Pour la mise en équation du bilan de matière, on considère les hypothèses suivantes [12]:

- (1) L'adsorption est isotherme,
- (2) Le fluide est incompressible,
- (3) Pas de gradient radial de concentration dans le lit.

Le bilan de matière sur un élément de volume dv , limité par les sections de cotes z et $(z+dz)$ et les parois de la colonne, pendant un intervalle de temps dt , s'écrit de la forme suivante :

$$-Dax \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + U_i \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\rho_a}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

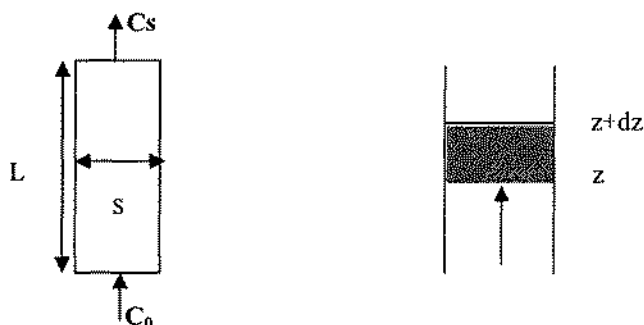


Figure 6. Colonne d'adsorption.

3.2 Résolution des équations

3.2.1. Écriture du système sous sa forme canonique

Le problème se résume dans la résolution du système (S_1) formé par le bilan matière et l'équation d'équilibre d'adsorption régit par la loi de Langmuir :

$$S_1 \quad \begin{cases} -Dax \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + U_i \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_a}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \\ q = f(C) \end{cases}$$

Le changement de variables, concentration réduite $X=C/C_0$ et hauteur réduite $Z=z/L$ permet de transformer le système d'équations précédentes en un autre (S'_1) . Ce système prend la forme suivante :

$$(S'_1) \quad \begin{cases} -\frac{Dax}{L^2} \frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} + \frac{U_i}{L} \frac{\partial X}{\partial Z} + \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\rho_a}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_0 X)^2} \frac{\partial X}{\partial t} \\ \text{Conditions initiales :} \\ \quad \begin{cases} t = 0 \quad \text{et} \quad 0 \leq Z \leq 1 \\ X(Z, 0) = 0 \\ q(Z, 0) = 0 \end{cases} \\ \text{Conditions aux limites :} \\ \quad \begin{cases} Z = 0 ; X(0, t) = 1 \quad \text{quel que soit} \quad t > 0 \\ Z = 1 ; \frac{\partial X}{\partial Z} = 0 \quad \text{quel que soit} \quad t > 0 \end{cases} \end{cases}$$

3.2.2. Résolution numérique du système (S'_1)

Ce système est transformé en un système différentiel et ce, en effectuant la discrétisation spatiale suivante :

$$\left[\frac{\partial X}{\partial Z} \right]_j \approx \frac{X_j - X_{j-1}}{h_z} \quad \text{et} \quad \left[\frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} \right]_j \approx \frac{X_{j+1} - 2X_j + X_{j-1}}{h_z^2}$$

X_j est une approximation de X au point Z_j ,

h_z est le pas de discrétisation spatiale, $h_z = 1/n$.

Le système (S'_1) d'équations différentielles sous sa forme canonique se transforme en (S_2) qui représente le système sous sa forme finie approchée.

$$(S_2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } j=1 \quad \frac{dX_j}{dt} = \left[a_1 \frac{1-2X_j+X_{j+1}}{h_z^2} - a_2 \frac{X_j-1}{h_z} \right] \frac{(1+a_4 X_j)^2}{a_3 + (1+a_4 X_j)^2} \\ \text{Pour } j=2..n-2 \quad \frac{dX_j}{dt} = \left[a_1 \frac{X_{j+1}-2X_j+X_{j-1}}{h_z^2} - a_2 \frac{X_j-X_{j-1}}{h_z} \right] \frac{(1+a_4 X_j)^2}{a_3 + (1+a_4 X_j)^2} \\ \text{Pour } j=n-1 \quad \frac{dX_j}{dt} = \left[a_1 \frac{X_{j-1}-X_j}{h_z^2} - a_2 \frac{X_j-X_{j-1}}{h_z} \right] \frac{(1+a_4 X_j)^2}{a_3 + (1+a_4 X_j)^2} \end{array} \right.$$

Avec: $\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{Dax}{L^2} \\ a_2 = \frac{U}{L \varepsilon} \\ a_3 = \frac{\alpha \rho_a}{\varepsilon} \\ a_4 = \beta C_0 \end{array} \right.$

Ce système peut être représenté sous la forme (S') :

$$(S') \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = F(t, X) \text{ avec } X(t=0) = X_0 \\ F = (f_1, \dots, f_{n-1}) \end{array} \right.$$

La résolution de ce système a été réalisée par l'intermédiaire du logiciel «MATLAB 5.2» en utilisant la méthode de Runge Kutta [13].

Afin de comparer le modèle avec les résultats expérimentaux, nous avons travaillé avec une colonne de dimensions réduites (1.6 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur).

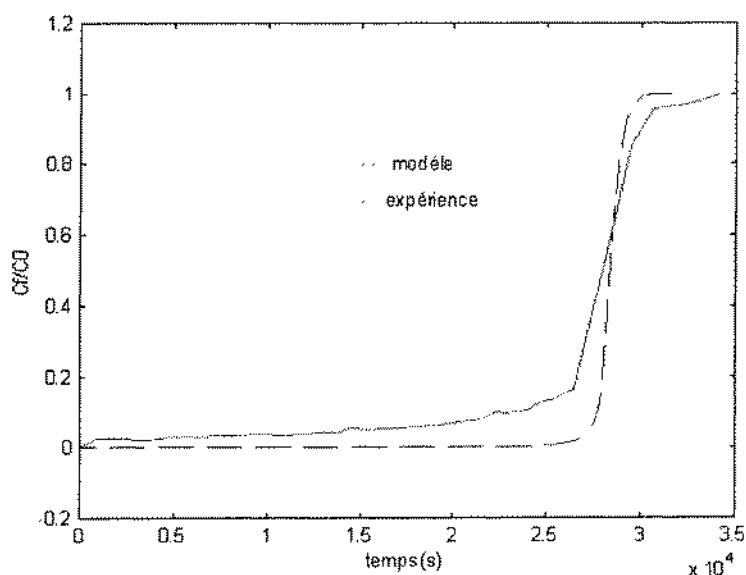


Figure 7. Courbes de perçage obtenues par le modèle et par l'expérience pour une concentration de bleu de méthylène de 40 mg/l.



Sur la figure 7, nous avons représenté le résultat de la simulation avec un coefficient de dispersion axiale D_{ax} de $4.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. L'expérience est réalisée pour une concentration en bleu de méthylène de 40 mg/l et pour une masse d'argile de 4g.

On remarque un écart entre le modèle et l'expérience au niveau de la zone de perçage de la colonne et rapprochement remarquable en dehors de cette zone

4. CONCLUSION

Ce travail est réalisé dans des conditions purement expérimentales. Le choix de l'argile en tant qu'adsorbant des colorants est judicieux, du fait qu'il permet aux utilisateurs de disposer d'un gisement naturel à proximité et de bénéficier de ses caractéristiques adsorbantes, à savoir une capacité d'adsorption de l'ordre de 238 (mg/g) et une surface spécifique au bleu de méthylène de $525 \text{ m}^2/\text{g}$. L'exploitation optimale des capacités de cette argile nécessite des conditions opératoires spécifiques. De ce fait, nous avons choisi d'opérer avec une adsorption en lit fluidisé sur colonne. Les propriétés les plus avantageuses de la fluidisation par rapport aux lits fixes sont les suivantes :

- La phase solide est parfaitement mélangée au sein de la suspension. Cette homogénéité permet l'augmentation du transfert de matière. Ce qui présente un avantage par rapport aux lits fixes qui se comportent souvent d'un écoulement avec un court circuit ou un volume mort.
- Le lit fluidisé peut fonctionner en mode opératoire discontinu (batch) ou continu (semi batch ou ouvert). En effet, étant donné la facilité du prélèvement et d'ajout des particules solide dans le lit fluidisé pendant l'utilisation, la phase solide peut être au besoin renouvelée continuellement. A l'échelle industrielle ; on peut prévoir une cascade de colonne à lit fluidisé, chaque fois que la première colonne se sature de colorant ; on la régénère tout en laissant l'installation en marche par simple déplacement de l'entrée de la solution à décolorer à la colonne suivante.

Les avantages fournis par la technique de fluidisation ne sont pas sans contrepartie, en effet on peut relever un inconvénient dû à l'attrition des particules par un frottement permanent entre elles engendrant une diminution progressive de la taille des particules d'une part, et la formation de fines particules susceptibles de s'entraîner facilement d'autre part.

Les études hydrodynamiques nécessaires pour la maîtrise de cette technique ont été réalisées sur un banc expérimental, mis au point pour ces fins. La première partie de ce travail nous a permis de connaître les conditions donnant une bonne fluidisation en déterminant la variation du débit de liquide en fonction de la masse d'argile utilisée. La deuxième partie, l'identification et la caractérisation du régime hydrodynamique dans la colonne par la distribution du temps de séjour (DTS), a montré que l'écoulement du fluide dans la colonne peut être modélisé par un piston à dispersion axiale ou par un parfaitement agitée avec $j=2$.

Le modèle d'adsorption, basé essentiellement sur le bilan matière dans la colonne et l'équation de l'isotherme, conduit à un système différentiel non linéaire dont l'intégration par voie numérique a été réalisée à l'aide de la méthode de Runge Kutta. Ce modèle présente un accord acceptable avec l'expérience.

NOMENCLATURE

a	:	Constante de l'équation de Langmuir (L.M^{-1})
C_e	:	Concentration résiduelle en colorant (M.L^{-1})
C_0	:	Concentration initiale en colorant (M.L^{-1})
C	:	Concentration du soluté en phase fluide à l'instant t (M.L^{-1})
D_{ax}	:	Coefficient de la dispersion axiale ($\text{L}^2.\text{T}^{-1}$)
$E(t)$:	Fonction de distribution de temps de séjour (T^{-1})
$E(\theta)$:	Fonction de distribution de temps de séjour en temps réduit
τ	:	temps de passage (T)
θ	:	temps réduit est égal à t/τ



ts	:	Temps de séjour dans la colonne (T)
j	:	Nombre des réacteurs parfaitement agités
k et n	:	Les deux constantes de Freundlich
m	:	Masse d'adsorbant dans le volume v en (M)
Pe	:	Nombre de Peclet
Q	:	Débit d'entrée de la solution ($L^3.T^{-1}$)
q ₀	:	Capacité ultime d'adsorption, obtenue par extrapolation ($M.M^{-1}$)
q _e	:	Quantité adsorbée par gramme d'argile à l'équilibre, $q_e = (C_0 - C_e)v/m$
U _i	:	Vitesse interstitielle du fluide dans le lit ($L.T^{-1}$)
V	:	Volume de la colonne (L^3)
v	:	Volume de la solution (L^3)
ε	:	Porosité externe du lit
σ ²	:	Variance de la distribution des temps de séjour
ρ _a	:	Masse volumique du lit en vrac ($M.L^{-3}$)
μ _n , μ' ₂	:	Moments d'ordre n et centré d'ordre 2

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] E. C. Weaver, "Developments in sedimentology 44, clays, Muds and shales", Elsevier, Amsterdam-oxford, 1989.
- [2] G. McKay, "Adsorption of dyestuffs from aqueous solution with activated carbon, I-Equilibrium and batch contact-time studies", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 1982, 32, 759-772.
- [3] M.S. El Geundi, "Colour removal from textile effluents by adsorption techniques", *Wat. Res.*, 1991, 25, 271-273.
- [4] M. Suzuki, "Adsorption Engineering", Elsevier, New York, Amsterdam, 1990.
- [5] S.J. Gregg, K.S.W. Sing, "Adsorption, Surface Area and Porosity", Academic press, London-Toronto, 1982.
- [6] K. Wittman, D. Wippert, H. Schlingmann, H. Halmrich, K. Schugerl, "Solid particule mixing in a continuously operated fluidized bed reactor", *Chem. Eng. Sci.*, 1983, 38, 1391-1397.
- [7] F. Berruti, A.G. Liden, D.S. Scott, "Measuring and modelling residence time distribution of low density solids in a fluidised bed reactor of sand particles", *Chem. Eng. Sci.*, 1988, 43, 739-748.
- [8] G. Genin, J.L. Houzelot, A. Kotro, G. Martin, "Nouvelles méthodes de mesure des distributions de temps de séjour d'une phase solide transportée", *Chem.Eng. J.*, 2001, 81, 301-306.
- [9] K. Krishniah, Y. Pydisetty, Y.B.G. Varma, "Residence time distribution of solids in multistage fluidisation", *Chem. Eng. Sci.*, 1982, 37, 1371-1377.
- [10] A. Leitao, E. Conceicao, R. Santos, "Modeling of solid-liquid adsorption: effects of adsorbent loads on model parameters", *Can. J. chem. Eng.*, 1992, 70, 690-698.
- [11] J. Villiermaux, "Génie de la réaction chimique, Conception et fonctionnement des réacteurs", Lavoisier, Paris, France, 1985.
- [12] Filippov L., "A combined method for measurement of isotherms of adsorption of vapors and gases", *Chem. Eng. Sci.*, 1991, 46, 2323-2329.
- [13] B.W. Bequette, "Process dynamics Modeling, Analysis, and Simulation", Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [14] P. Trambouze, J.P. Euzen, "Les réacteurs chimiques de la conception à la mise en oeuvre", Technip, Paris, France, 2002.

