

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

قسم علوم المادة
DEPARTEMENT Sciences de la Matière



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Option : Chimie Inorganique

Par : Mlle. DJAMATE Maria Meriem

THEME

Synthèse d'une nouvelle matrice à base d'argile et surfactant

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. HAMDY Ahmed	MCA	Président
Mr. GHERIB Abdelaziz	Pr	Examineur
Mme. HAMDY Fatima Zohra Karima	MCB	Examinatrice
Mlle. BATANA Fatima Zohra	MCA	Promotrice
Mlle. BRICHI Nour Elhouda	Doctorante	Invité

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Dieu pour la force et la patience qui m'ont permis de réussir mon travail.

Je remercie également mon encadreur pour son précieux soutien et ses conseils avisés

Dr. BATANA Fatima Zohra

Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour ses conseils constants, son soutien inconditionnel, son esprit critique constructif et son aide précieuse tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour leur précieuse contribution.

Dr. HAMDI Ahmed d'avoir accepté de présider le jury

Ainsi que

Pr. GHERIB Abdelaziz et **Dr. HAMDI Fatima Zohra Karima**

d'avoir eu l'amabilité de lire et de juger ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers **Dr. HAMDI Ahmed**, chef du département, ainsi que tous les enseignants du département des Sciences de la Matière, pour leur précieuse contribution, que ce soit par le biais de leurs enseignements ou de leurs conseils

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers les ingénieurs du laboratoire pédagogique pour leur soutien précieux et leurs encouragements continus

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Leur implication et leur soutien ont été d'une importance capitale.

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier mon cher père qui a été mon premier soutien
tout au long de mon parcours académique

Je tiens également à rendre à ma chère mère, sans laquelle mon parcours
académique n'aurait pas été complet

À mes chers frères, qui sont mes piliers et ma fierté dans la vie.

Et à l'âme de mon cher grand père défunt, que Dieu ait son âme, qui souhaitait
voir arriver ce jour et qui était toujours fier de moi.

À toute ma famille

À mes très chers collègues et compagnons de route dans cette aventure d'étude,

Metlili Abderrahmane et Benomrane yousra

Terbah hanaa

À tous ceux qui ont étudié avec moi.

Et à tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre, Dans la réalisation de
ce travail.

Merci à tous.

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Partie bibliographique	3
I.1 Colorants	3
I.1.2 Domaines d'application des colorants	3
I.1.3 Classification des colorants	4
I.1.4 Toxicité des colorants	4
I.1.5 Violet de gentiane (VG).....	4
I. 2 Matériaux adsorbants	5
I.2.1 Argile	5
I.2.2 Bentonite	5
I.2.3 Propriétés des bentonites	6
I.2.4 Utilisations	6
I.3 Adsorption	6
I.3.1 Types d'adsorption	7
I.3.2 Mécanisme d'adsorption	7
I.3.3 Facteurs influents sur l'adsorption.....	8
I.3.4 Capacité d'adsorption	8
I.3.5 Cinétique d'adsorption.....	8
I.3.6 Thermodynamique d'adsorption.....	9
I.4 Tensio-actifs.....	10
I.4.1 Bromure Cétyl Trimethyl-Ammonium (CTAB).....	10
II. Partie expérimentale	12
II.1. Produits	12
II.2. Matériels	12
II.3. Préparation des solutions de VG	12
II.4. Préparation de l'adsorbant bentonite (pontage).....	13

II.5. Analyse par spectrophotométrie d'absorption UV-Visible	13
II.6. Etablissement de la courbe d'étalonnage	14
II.7. Protocoles expérimentaux	15
II.7.1. Processus d'adsorption	15
II.7.2 Effet de la masse.....	15
II.7.3 Effet du temps de contact sur l'adsorption	16
II.7.4 Effet du pH	17
II.7.5 Effet de la température	18
II.8. Modèles cinétiques	19
II.8.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre (Lagergren).....	19
II.8.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre (Blanchard)	20
II.8.3. Modèle cinétique de la diffusion intra-particulaire (DIP)	21
II.9. Etude thermodynamique.....	23
Conclusion générale	13
Références bibliographiques	15

Liste des abréviations

C : Epaisseur de la couche limite	
C_e : Concentration à l'équilibre du soluté en solution	(mg. L ⁻¹)
CEC : Capacité d'échange cationique	
C₀ : Concentration initiale de l'adsorbat	(mg. L ⁻¹)
CTAB : Bromure Cétyltriméthyl-Ammonium	
DIP : Diffusion intra-particulaire	
K_d : Constante de distribution	(L. g ⁻¹)
K_{id} : Constante de la vitesse de diffusion intra-particulaire	(mg. g ⁻¹ .min ^{1/2})
K₁ : Constante de vitesse d'adsorption du pseudo premier ordre	(min ⁻¹)
K₂ : Constante de vitesse d'adsorption de pseudo second ordre	(g. mg ⁻¹ .min ⁻¹)
m : Masse de l'adsorbant	(g)
PPO : Pseudo-premier ordre	
PSO : Pseudo-second ordre	
q_e : Quantité d'adsorbât à l'équilibre, par gramme d'adsorbant	(mg. g ⁻¹)
q_{e, calc} : Capacité d'adsorption à l'équilibre calculée	(mg. g ⁻¹)
q_{e, exp} : Capacité d'adsorption à l'équilibre expérimentale	(mg. g ⁻¹)
q_t : Quantité d'adsorbât à l'instant t, par gramme d'adsorbant	(mg. g ⁻¹)
R : constante des gaz parfait	(J. K ⁻¹ .mol ⁻¹)
R : Rendement d'élimination	(%)
R² : Coefficient de corrélation des régressions linéaires	
T : Température absolue	(K)
V : Volume de la solution	(L)
VG : Violet de gentiane	
ΔH° : Variation de l'Enthalpie	(j. mol ⁻¹)
ΔG° : Variation de l'enthalpie libre standard	(j. mol ⁻¹)
ΔS° : Variation de l'Entropie	(j. mol ⁻¹ .k ⁻¹)

Liste des figures

Figure I. 1: Structure de Bentonite.	6
Figure I. 2: Différentes étapes d'adsorption	7
Figure I. 3: Structure de tensio-actif.....	10
Figure II. 1: Principe du spectrophotomètre UV-visible.....	13
Figure II. 2: Spectre UV-vis relatif au pic du VG.	14
Figure II. 3: Représentation la courbe d'étalonnage de VG ($\lambda=560$ nm).....	14
Figure II. 4: Effet de la masse d'adsorbant sur la quantité adsorbée de VG ($V=50$ ml, $C_0 = 30$ mg . L ⁻¹ , $v = 250$ tr. min ⁻¹ , $T= 20 \pm 2$ °C, $pH = 6 \pm 0.2$).....	15
Figure II. 5: Effet du temps de contact sur l'adsorption du VG par la bentonite et le rendement ($V = 50$ ml, $C_0=30$ mg. L ⁻¹ , $v = 250$ tr.min ⁻¹ , $T= 20 \pm 2$ C°, $pH = 6 \pm 0.2$, $m = 5$ mg).....	16
Figure II. 6: Effet du pH de la solution sur l'adsorption du VG par la bentonite ($V=50$ ml, $C_0 = 30$ mg. L ⁻¹ , $v = 250$ tr. min ⁻¹ , $T= 20 \pm 2$ C°, $m = 5$ m g, $t_{eq} = 20$ min).....	17
Figure II. 7: Effet de la température de la solution sur la quantité de VG adsorbée par la bentonite ($V = 50$ ml, $C_0 = 30$ mg. L ⁻¹ , $m = 5$ mg, $v = 250$ tr. min ⁻¹ , $pH = 6 \pm 0.2$, $t_{eq}=20$ min).....	18
Figure II. 8: Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VG sur la bentonite (global)...	19
Figure II. 9: Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VG sur la bentonite (avant équilibre).....	20
Figure II. 10: Cinétique d'adsorption du pseudo second ordre du VG sur la bentonite.....	20
Figure II. 11: Cinétique d'adsorption de VG sur la bentonite selon le modèle de diffusion intra particulaire	21
Figure II. 12: Effet de la température sur la constante de distribution du phénomène d'adsorption de VG sur la bentonite.....	23

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Principaux groupements chromophores et auxochromes	3
Tableau I. 2: Caractéristiques physico-chimiques et structurales du VG.....	5
Tableau II. 1: Caractéristiques de la régression linéaire de VG.....	15
Tableau II. 2: Valeurs des constantes de vitesse et coefficients de corrélation des différents modèles cinétiques.....	22
Tableau II. 3: Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de VG sur la bentonite	23

Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'antiquité, l'homme a cherché à utiliser des colorants dans diverses industries telles que la papeterie, le textile, la cosmétique et l'agro-alimentaire. Malheureusement, entre 15 et 20 % de ces colorants sont évacués avec les effluents liquides sans aucun traitement préalable, contaminant ainsi les cours d'eau. Ces colorants, généralement d'origine synthétique et dotés de structures moléculaires complexes, sont très stables, résistants à la décoloration et difficiles à se dégrader, ce qui les rend néfastes pour l'environnement et la santé. Leur faible biodégradabilité en fait des polluants majeurs, mettant en péril la qualité de notre environnement et la santé des êtres vivants.

De nos jours, les colorants de synthèse sont devenus une industrie florissante et un pilier de la chimie moderne. Leur facilité de synthèse, leur production rapide et leur large gamme de couleurs en font des alternatives attractives aux colorants naturels. Parmi ces colorants, on trouve le violet de gentiane, qui est un colorant cationique largement utilisé pour teindre le coton, la soie, le papier, la paille, le cuir et dans des domaines biomédicaux [1].

Il existe plusieurs méthodes de traitement qui peuvent être utilisées pour éliminer les colorants des eaux usées. Parmi celles-ci, on peut citer la coagulation-floculation, l'oxydation, l'échange ionique et l'adsorption, qui est l'une des techniques les plus prometteuses en raison de sa facilité et de sa simplicité d'utilisation et son efficacité, elle est devenue une méthode analytique privilégiée. Le principe du traitement par adsorption consiste à fixer les colorants sur la surface d'un matériau solide appelé adsorbant tels que les argiles, les zéolites, les alumines activées, les boues, les biomasses et le charbon actif, ce qui permet leur élimination de manière efficace. L'adsorption offre de nombreux avantages, tels que sa simplicité d'utilisation, sa capacité à traiter une large gamme de colorants et sa flexibilité en termes de choix d'adsorbants [2].

La sélection de la bentonite en tant qu'adsorbant pour le traitement des solutions colorées est motivée par sa structure poreuse remarquable, sa surface spécifique et sa capacité de gonflement et par conséquent, une adsorption importante.

Dans cette étude, notre objectif était d'éliminer le violet de gentiane, un colorant cationique, des solutions aqueuses en utilisant de la bentonite pontée.

Nous avons réalisé des études pour évaluer l'influence de certains paramètres tels que la quantité d'adsorbant, le pH et la température de la solution. De plus, nous avons examiné la cinétique et les paramètres thermodynamiques afin de mieux comprendre le mécanisme de fixation de ce colorant.

Ce travail est divisé en deux parties :

La première comprend :

- Une revue de la littérature qui présente des informations générales sur les colorants, plus spécifiquement le violet de gentiane.
- Des rappels sur les adsorbants, notamment la bentonite.
- Des généralités sur le phénomène d'adsorption, incluant l'étude cinétique et thermodynamique.
- Des rappels sur les tensioactifs.

La deuxième comprend :

- La description du protocole expérimental, l'analyse des produits et des matériel utilisés.
- L'interprétation des résultats obtenus et leur discussion.

Enfin, l'étude s'achève par une conclusion générale.

Partie bibliographique

I. Partie bibliographique

I.1 Colorants

Un colorant est une substance naturelle ou synthétique [3] extraite du milieu naturel qui possède deux propriétés qui sont la couleur et l'aptitude à être fixée sur un support.

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber la lumière dans le spectre visible (de 380 à 800 nm) par certains groupes d'atomes appelés chromophores. La molécule n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements appelés auxochromes [4].

Les principaux groupements chromophores et auxochromes sont regroupés dans le Tableau I.1

Tableau I. 1: Principaux groupements chromophores et auxochromes

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
Azo (-N=N-)	Amine Primaire (-NR ₂)
Sulfure (>C=S)	Donneurs d'électrons (-Cl)
Vinyl (-CH=CH -)	Hydroxyl (-OH)
Carbonyle (>C=O)	Amine tertiaire (-NR ₂)
Nitro (-NO ₂)	Alkoxy (-OR)
Nitroso (-N=O)	Amine secondaire (-NHR)

I.1.2 Domaines d'application des colorants

Les colorants sont utilisés dans différents secteurs industriels tels que :

- Industrie textile, fourrure, cuir.
- Industrie des matières plastiques (pigments).
- Industrie du bâtiment.
- Imprimerie (encres).
- Industrie pharmaceutique.
- Industrie des cosmétiques.
- Industrie agroalimentaire [4].

I.1.3 Classification des colorants

Les colorants synthétiques sont classés en deux catégories selon leur structure chimique et leur méthode d'application (chimique et tinctoriale).

I.1.3.1 Classification chimique

Elle se base sur la structure chimique et la nature du groupement chromophore : azoïques, triphénylméthanes, indigoïdes, xanthènes, anthraquinoniques, phtalocyanines, nitrés et nitrosés.

I.1.3.2 Classification tinctoriale

Elle concentre sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation : acides (anioniques), basiques (cationiques), développés ou azoïques insolubles, cuve, réactifs, directs, mordants et dispersés [5].

I.1.4 Toxicité des colorants

A cause de leur faible biodégradabilité, les colorants sont toxiques pour l'homme et pour l'environnement.

Ils peuvent provoquer des risques cancérigènes de la thyroïde, des tumeurs urinaires, des actions sur le système nerveux central et des irritations de la peau avec production d'eczéma [4].

Pour l'environnement, la génération d'une quantité considérable des rejets résiduels dans l'écosystème est une source de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique de la vie aquatique en affectant l'activité photosynthétique [5].

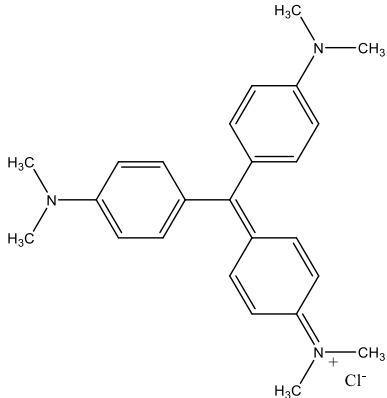
Pour notre étude, nous nous sommes intéressés à un colorant cationique appelé le violet de gentiane VG.

I.1.5 Violet de gentiane (VG)

Il est soluble dans l'eau et moyennement dans l'alcool. Il est surtout utilisé aujourd'hui en bactériologie comme fongicide, anti staphylococcique et antistreptococcique. Les indications sont alors les plaies, les brûlures infectées, les candidoses et les dermatoses [6].

Le Tableau I.2 récapitule les différentes caractéristiques physico-chimiques du VG [7].

Tableau I. 2: Caractéristiques physico-chimiques et structurales du VG

Formule brute	C ₂₅ H ₃₀ N ₃ Cl
Formule développée	
λ_{max} (nm)	560
Masse molaire (g. mol ⁻¹)	407,98
Solubilité (eau, 25 °C)	4 g·L ⁻¹

I. 2 Matériaux adsorbants

I.2.1 Argile

C'est un ensemble d'espèces minérales ou une classe granulométrique comprenant des particules dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètres [8].

1.2.2 Bentonite

Les roches argileuses formées suite à l'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre et qui font partie du groupe des smectites, portent le nom de bentonite (gisement de Fort Benton, Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite.

En Algérie, les gisements de la bentonite les plus importants se trouvent dans l'Oranie (ouest Algérien), en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) et celle de Mostaganem (M'zila) [8].

La structure de la bentonite est signalée dans la figure suivante :

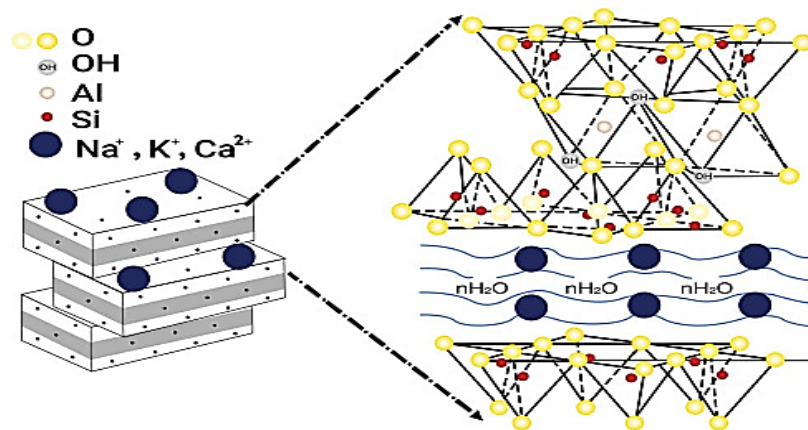


Figure I. 1: Structure de Bentonite.

I.2.3 Propriétés des bentonites

Elles se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques particulières (thixotropie).

I.2.4 Utilisations

Les bentonites sont largement utilisées dans :

- Boues de forage et fonderie.
- Génie civil.
- Industrie agro-alimentaire.
- Industrie de céramiques.
- Industrie des peintures et de papier.
- Pharmaceutiques et cosmétiques [9].

I.3 Adsorption

L'adsorption est un phénomène au cours duquel une substance s'accumule dans le voisinage d'une interface. Dans le cas de notre étude, il s'agit de la fixation des molécules liquides sur la surface d'un solide.

Le solide sur lequel se produit l'adsorption est appelé l'adsorbant et le liquide qui s'adsorbe est l'adsorbat. La quantité de liquide adsorbée dépend généralement de la surface accessible et des conditions physique ou chimique [10].

I.3.1 Types d'adsorption

On distingue deux types d'adsorption

1.3.1.1 Physisorption (adsorption physique)

La physisorption est la résultante des forces de Van Der Waals et des forces d'attraction entre l'adsorbat et l'adsorbant[10].

1.3.1.2 Chimisorption (adsorption chimique)

La chimisorption fait intervenir des liaisons covalentes ou ioniques entre l'adsorbat et l'adsorbant. Elle nécessite une énergie d'activation et est généralement un processus irréversible. L'énergie de chimisorption est 7 fois plus grande que celle de la physisorption[10].

I.3.2 Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes qui sont représentés sur la Figure I. 2 [11]. Avant son adsorption, le soluté va passer par les étapes suivantes :

1. Diffusion de l'adsorbât de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
2. Diffusion extra-granulaire de la matière (transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains).
3. Transfert intra-granulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des grains vers les sites actifs).
4. Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile.

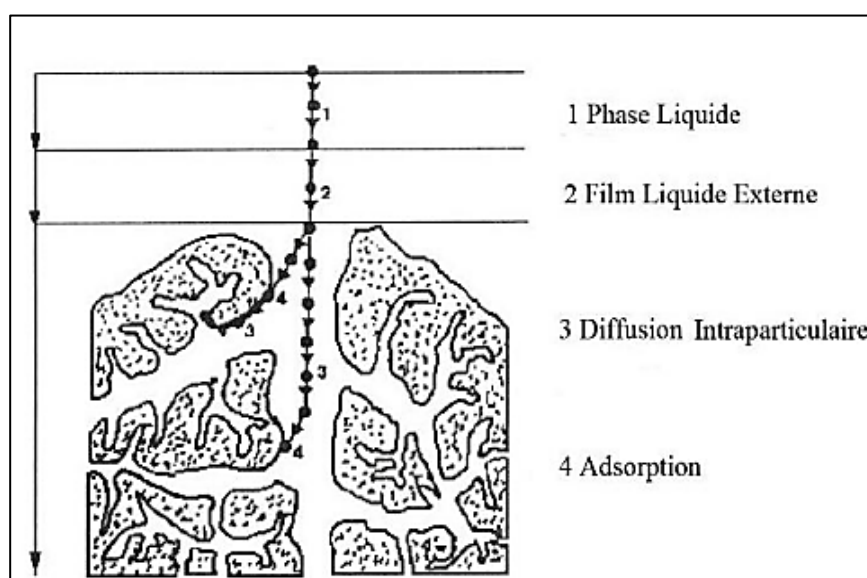


Figure I. 2: Différentes étapes d'adsorption

I.3.3 Facteurs influents sur l'adsorption

L'équilibre d'adsorption entre l'adsorbant et l'adsorbé est influencé par de nombreux paramètres tels que :

- **Nature de l'adsorbant et l'adsorbé** : apolaires ou polaires.
- **Conditions opératoires** : dimension des pores, surface spécifique, température, pH et concentration initiale de la solution [11].

I.3.4 Capacité d'adsorption

La cinétique d'adsorption est étroitement corrélée à la quantité de substance qui est capturée ou adsorbée, ainsi qu'à la durée et aux conditions de l'interaction entre la substance et la surface d'adsorption [12]. La quantité adsorbée est donnée par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad \text{I. 1}$$

q_e : Quantité adsorbée du soluté par unité de masse d'adsorbant à l'équilibre (mg. g⁻¹).

V : Volume de solution (L).

C_0 : Concentration initiale de soluté (mg. L⁻¹).

C_e : Concentration de soluté à l'équilibre (mg. L⁻¹).

m : masse d'adsorbant (g).

On peut aussi calculer le rendement d'élimination à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$R(\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \cdot 100 \quad \text{I. 2}$$

I.3.5 Cinétique d'adsorption

L'ordre de la réaction est un paramètre très important dans la détermination des mécanismes réactionnels [13]. Les ordres les plus cités dans la littérature sont :

I.3.5.1 Cinétique du pseudo premier ordre

Exprimé par l'équation de Lagergen

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 (q_e - q_t) \quad \text{I. 3}$$

K_1 : Constante cinétique de pseudo-premier-ordre (min⁻¹).

Cette équation est linéarisée sous la forme :

$$\text{Ln} (q_e - q_t) = \text{Ln} q_e - K_1 t \quad \text{I. 4}$$

En traçant $\text{Ln} (q_e - q_t)$ en fonction du temps t , on peut obtenir et déterminer k_1 et q_e

I.3.5.2 Cinétique du pseudo-second ordre

Ce modèle suppose que la vitesse d'adsorption est proportionnelle au carré de la quantité adsorbée et s'écrit par l'équation :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 (q_e - q_t)^2 \quad \text{I. 5}$$

K_2 : Constante cinétique de pseudo-second-ordre ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Après intégration, on obtient la forme linéaire :

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{I. 6}$$

I.3.5.3 Modèle de la diffusion intra particulaire

L'expression cinétique de la diffusion intra particulaire est souvent présentée simplement par l'équation :

$$q_t = K_{id} + t^{0.5} + C \quad \text{I. 7}$$

K_{id} : Constante de vitesse de diffusion dans les pores ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$).

C : Epaisseur de la couche limite ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

I.3.6 Thermodynamique d'adsorption

Le phénomène d'adsorption est toujours accompagné par un échange thermique, soit exothermique ou endothermique. La mesure de la chaleur d'adsorption est le principal critère qui permet de différencier la chimisorption de la physisorption [14].

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad \text{I. 8}$$

$$\Delta G^0 = -RT \text{Ln} K_d \quad \text{I. 9}$$

$$\text{Ln} K_d = \left(\frac{\Delta S^0}{R} \right) - \left(\frac{\Delta H^0}{R} \right) \frac{1}{T} \quad \text{I. 10}$$

K_a : Constante de distribution (L. g⁻¹).

ΔG° : Variation de l'enthalpie libre standard (J. mol⁻¹).

ΔH° : Variation de l'Enthalpie (J. mol⁻¹).

ΔS° : Variation de l'Entropie (J. mol⁻¹. K⁻¹).

R : Constante des gaz parfaits (8.314 J. K⁻¹.mol⁻¹)

T : Température absolue (K).

I.4 Tensio-actifs

Les tensio-actifs (Figure I.3) sont des composés chimiques organiques dont la molécule comporte un groupement polaire hydrophile appelé la tête assurant la solubilité dans l'eau et une chaîne carbonée de caractère lipophile (hydrophobe) appelée la queue. Cette structure permet de modifier certaines propriétés physiques au niveau des contacts solides-liquides [15].

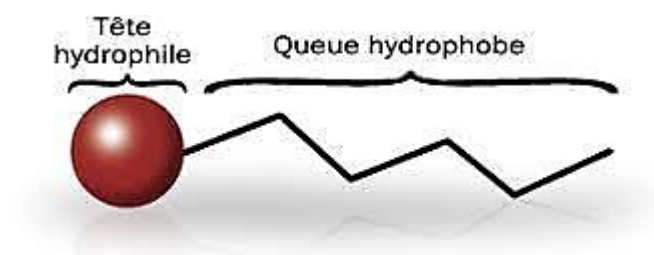


Figure I. 3: Structure de tensio-actif.

I.4.1 Bromure Cétyl Trimethyl-Ammonium (CTAB)

Le bromure Cétyl Trimethyl-Ammonium (CTAB) de formule Brute C₁₉H₄₂NBr est un composé chimique de masse molaire égal à 364,45 g. mol⁻¹ et degré de pureté (98%) est utilisé comme tensioactif cationique et agent de solubilisation dans divers domaines de la chimie, de la biochimie et de la biologie moléculaire [16].

I.4.1.1 Toxicité de CTAB

Toxicité aiguë : Le CTAB peut être toxique lorsqu'il est ingéré, appliqué sur la peau ou inhalé à fortes concentrations. Des études ont montré que l'ingestion de CTAB peut causer des effets néfastes sur la santé, notamment des lésions du foie et des reins

Irritation cutanée : Le CTAB peut provoquer des irritations cutanées, en particulier chez les personnes ayant une peau sensible. Des études ont montré que l'application de CTAB non dilué sur la peau peut causer des rougeurs, des démangeaisons et des brûlures

Irritation oculaire : Le contact du CTAB avec les yeux peut provoquer des irritations, des rougeurs et des douleurs. En cas de contact oculaire, il est recommandé de rincer abondamment à l'eau claire et de consulter un médecin si les symptômes persistent

Il est important de noter que la toxicité du CTAB peut varier en fonction de sa concentration, de la durée d'exposition et de la sensibilité individuelle. Il est recommandé de suivre les consignes de sécurité et d'utiliser le CTAB conformément aux directives du fabricant et aux réglementations locales.[\[17\]](#)

Partie expérimentale

II. Partie expérimentale

Cette étude a été menée au sein du laboratoire pédagogique du département des Sciences de la Matière de l'Université Amar Telidji de Laghouat, elle est consacrée à l'élimination du violet de gentiane (VG) par adsorption. L'étude a été réalisée dans le but de déterminer les meilleures conditions d'élimination de ce colorant cationique sur un matériau adsorbant (bentonite).

Dans cette partie, nous allons décrire les produits et matériels utilisés ainsi que les méthodes suivies lors des procédés expérimentaux et leurs interprétations.

II.1. Produits

- Violet de gentiane VG (Grade pharmaceutique).
- Bentonite sodée.
- Nitrate d'argent AgNO_3 (99.5%).
- Acide chlorhydrique HCl (37%).
- Hydroxyde de sodium NaOH (97%).
- Bromure de cétyle triméthyl ammonium CTAB (98%).
- Eau distillée préparée au laboratoire.

II.2. Matériels

- Etuve (Mettler).
- Agitateurs magnétiques (OVAN).
- Balance (OHAUS).
- Flocculateur Jar test (VELP SCIENTIFICA JLT6).
- UV-visible (SP-3000 nano OPTIMA).
- Centrifugeuse type (Sinla TD4 A).
- pH mètre (HANNA instruments).
- Thermomètre Digital.
- Verrerie courante de laboratoire.

II.3. Préparation des solutions de VG

Nous avons préparé une solution mère de concentration égale à 1 g. L^{-1} , en diluant 100 mg du violet de gentiane VG dans 100 ml d'eau distillée, à partir de cette dernière, des solutions filles ont été préparées.

II.4. Préparation de l'adsorbant bentonite (pontage)

Une masse de 1g de bentonite sodée et une masse de 0.492 g de bromure de Cétyltriméthyl ammonium (CTAB) correspondant à 1,5 CEC ont été mélangé ensemble avec 100 ml d'eau distillée pendant 1 heure à une vitesse d'agitation de 250 tr. min⁻¹ dans un flocculateur Jar Test. Plusieurs lavages ont été effectués (jusqu'à test négatif avec AgNO₃). On procède à un séchage dans l'étuve à 105°C pendant 5 heures suivi par un broyage.

II.5. Analyse par spectrophotométrie d'absorption UV-Visible

La spectroscopie UV-visible est réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre, lorsque la cuve contenant la solution est placée dans un spectrophotomètre, elle reçoit un rayonnement d'intensité (I_0). Une partie de cette lumière incidente sur le milieu et le reste noté (I) est transmis.

La Figure II.1 schématise le principe du spectrophotomètre UV-visible.

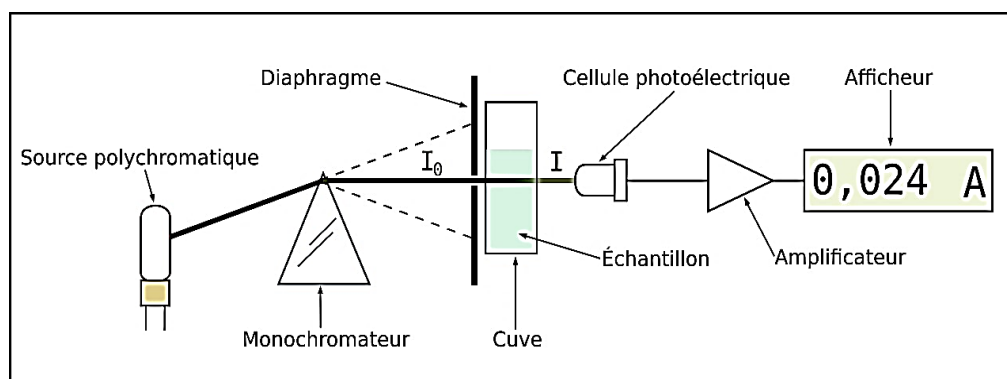


Figure II. 1: Principe du spectrophotomètre UV-visible.

La concentration du colorant dans la solution est déterminée par la dose spectrale dans le domaine visible. En utilisant la loi de Beer-Lambert :

$$A = \log \frac{I}{I_0} = \epsilon.l.C$$

II. 1

A : Absorbance ou densité optique.

C : Concentration massique du composé dosé (mg. L⁻¹).

I, I₀ : Intensités du faisceau émergent et incident

ε : Coefficient d'extinction moléculaire (L. mg⁻¹. cm⁻¹).

l : Epaisseur de la cuve (cm).

L'appareil utilisé est un spectrophotomètre UV visible (SP-3000 nano OPTIMA) basé sur l'absorption du rayonnement par des molécules dans la gamme de 190 à 800 nm.

Le spectre UV visible associé à la molécule de violet de gentiane VG est représenté sur la Figure suivante :

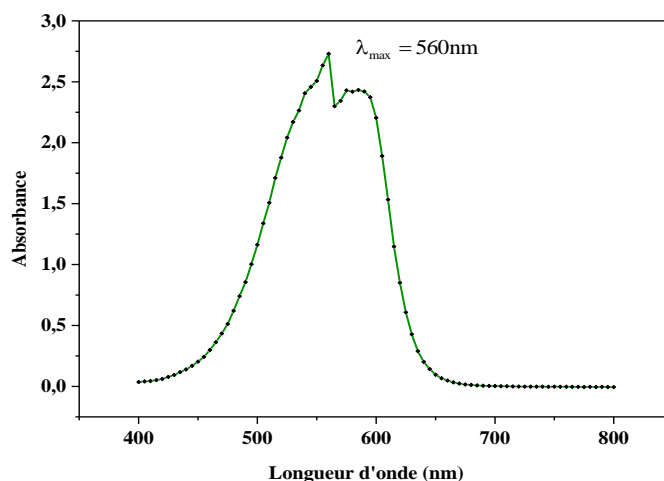


Figure II. 2: Spectre UV-vis relatif au pic du VG.

L'analyse quantitative UV-visible entre 400 nm et 800 nm nécessite la détermination de λ_{\max} . A cette valeur de longueur d'onde qui est égale à 560 nm, l'absorption est maximale.

II.6. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Nous avons procédé à l'établissement de la courbe d'étalonnage pour le colorant utilisé afin de déterminer le domaine de concentration pour lequel la loi de Beer-Lambert est respectée (Domaine de linéarité). Les mesures ont été faites sur des solutions préparées par dilution de la solution mère. La courbe d'étalonnage représentant l'absorbance en fonction de la concentration, $ABS = f(C_0)$ est établit et les résultats obtenus sont représentés sur la Figure suivante :

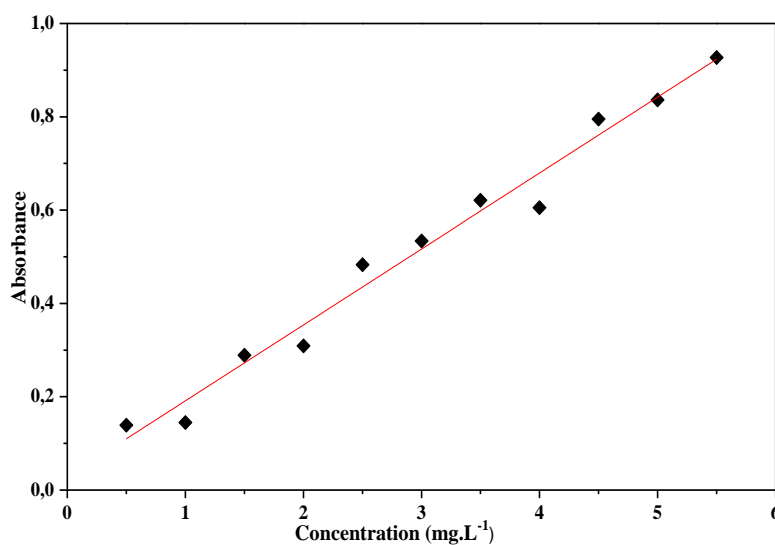


Figure II. 3: Représentation la courbe d'étalonnage de VG ($\lambda=560\text{nm}$).

D'après la Figure II.3, la courbe d'étalonnage établie est sous forme d'une droite avec un coefficient de corrélation R^2 égal à 0,977, elle montre une bonne linéarité et la loi de Beer-Lambert est ainsi respectée.

Tableau II. 1: Caractéristiques de la régression linéaire de VG.

Composé	Equation	Coefficient de corrélation R^2
Violet de gentiane (VG)	$Y = 0,16276 x + 0,02835$	0,977

II.7. Protocoles expérimentaux

II.7.1. Processus d'adsorption

La réaction est effectuée dans des flacons contenant 50 ml de solution de colorant VG avec une concentration initiale de 30 mg. L^{-1} , une masse définie d'une phase solide (bentonite), le tout est soumis à une agitation continue par un agitateur magnétique à une vitesse constante de 250 tr. min^{-1} pendant une durée déterminée. Les deux phases sont séparées par centrifugation à l'aide d'une centrifugeuse à $3000 \text{ tr. min}^{-1}$ pendant 5 minutes, suivie par une analyse UV-visible à $\lambda=560 \text{ nm}$.

II.7.2 Effet de la masse

Dans le but d'étudier l'effet de la masse de la bentonite sur le processus d'adsorption de VG, nous avons varié cette dernière entre 5 mg à 50 mg [18]. La Figure II.4 représente la quantité adsorbée en fonction de la masse d'adsorbant :

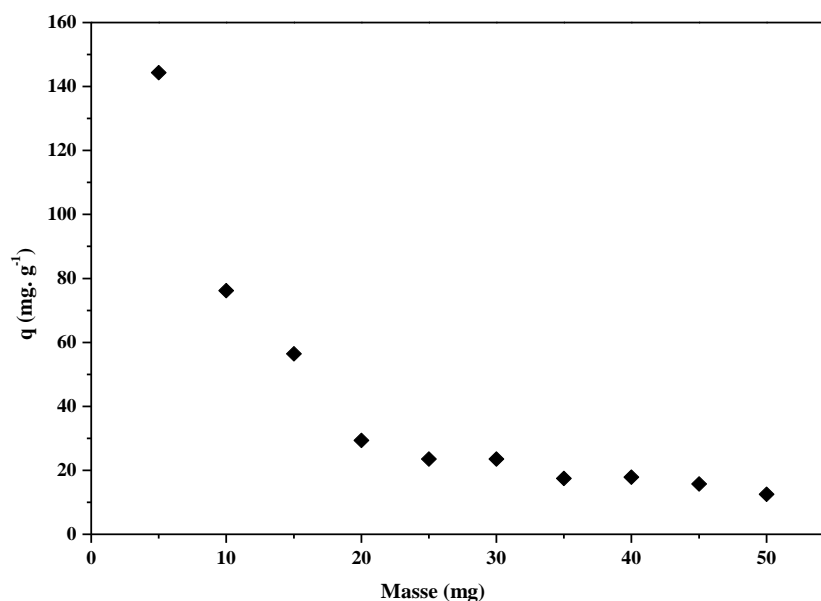


Figure II. 4: Effet de la masse d'adsorbant sur la quantité adsorbée de VG ($V=50 \text{ ml}$, $C_0 = 30 \text{ mg. L}^{-1}$, $v = 250 \text{ tr. min}^{-1}$, $T= 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6 \pm 0.2$).

D'après la Figure II.4, la quantité de colorant adsorbée diminue avec l'ajout de l'adsorbant jusqu'à une masse de 30 mg. Au-delà de cette valeur, la quantité adsorbée reste presque constante.

Ce comportement peut être dû à une augmentation du nombre de sites d'adsorption avec une augmentation de la quantité d'adsorbant mais les cations colorés ne peuvent plus s'approcher de ces sites du fait de la masse importante [18] qui crée des agglomérations de particules donc une diminution de la surface totale d'adsorption et une diminution de la quantité adsorbée du colorant en fonction d'unité de masse d'adsorbant [19].

Pour le reste de notre étude, nous avons opté pour une masse de 5 mg

II.7.3 Effet du temps de contact sur l'adsorption

L'étude du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption c'est à dire un état de saturation d'adsorbant par l'adsorbé. Elle permet également de déterminer, de façon comparative, la quantité de colorant adsorbée en fonction du temps de contact. Des prélèvements à différents temps (entre 30s et 60min) ont été effectués.

La Figure II.5 montre l'évolution de la quantité de colorant adsorbée en fonction du temps $q_t = f(t)$ et le rendement

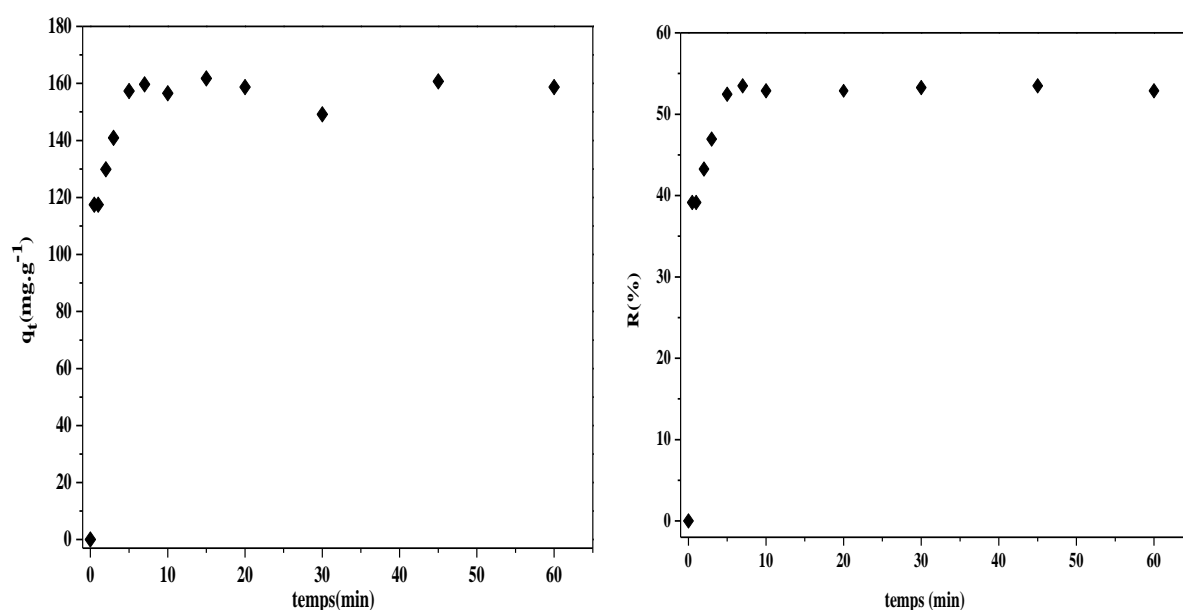


Figure II. 5: Effet du temps de contact sur l'adsorption du VG par la bentonite et le rendement ($V = 50 \text{ ml}$, $C_0 = 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $v = 250 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, $T = 20 \pm 2 \text{ C}^\circ$, $\text{pH} = 6 \pm 0.2$, $m = 5 \text{ mg}$).

D'après la Figure II. 5, on observe que la quantité adsorbée augmente en fonction du temps jusqu'à l'obtention d'un palier après 10 minutes de contact, au-delà de ce temps, la quantité reste presque constante. Aussi la présence de deux étapes de fixation du colorant VG sur la bentonite

- La première étape, l'adsorption est très rapide pour les premières minutes de contact, environ 157 mg. g^{-1} ce qui correspond à 52 % ceci est expliqué par la disponibilité de nombreux sites actifs libres sur la surface de la bentonite et donc une adhésion rapide des molécules [20].
- Pour la deuxième étape, l'adsorption est lente avec une quantité maximale adsorbée de l'ordre de 162 mg. g^{-1} ce qui représente 55 % du rendement d'élimination qui correspond à l'équilibre après l'occupation de tous les sites et donc à la saturation du matériau absorbant [18].

II.7.4 Effet du pH

Le pH de la solution est parmi les facteurs les plus importants qui contrôlent l'adsorption du colorant. Nous avons étudié l'évolution de la quantité adsorbée du colorant cationique pour différentes valeurs de pH (2 à 10), ce dernier est ajusté par ajout d'acide chlorhydrique HCl (0,1M) pour avoir un milieu acide, et le milieu basique est obtenu par l'addition d'hydroxyde de sodium NaOH (0,1M). Chaque solution est agitée pendant un temps correspondant au temps d'équilibre [21].

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure II.6 qui montre l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du pH :

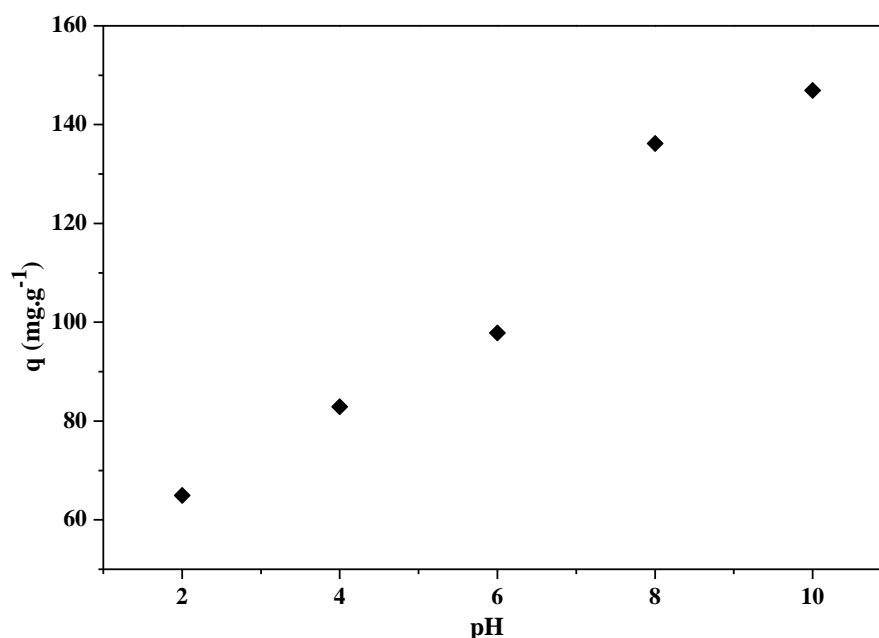


Figure II. 6: Effet du pH de la solution sur l'adsorption du VG par la bentonite ($V=50 \text{ ml}$, $C_0 = 30 \text{ mg. L}^{-1}$, $v = 250 \text{ tr. min}^{-1}$, $T = 20 \pm 2 \text{ C}^\circ$, $m = 5 \text{ m g}$, $t_{eq} = 20 \text{ min}$).

D'après les résultats obtenus, l'augmentation du pH entraîne l'augmentation de la capacité d'adsorption qui passe de 65 mg. g^{-1} (pH= 2) jusqu'à 147 mg. g^{-1} (pH =10).

La faible capacité d'élimination de VG dans un milieu acide peut s'expliquer par le fait que la surface de l'adsorbant est entourée de protons H^+ qui réduisent le contact entre VG et les sites d'adsorption en raison de la répulsion électrostatique et de la compétition entre les protons H^+ et le colorant cationique pour les sites d'adsorption.

En revanche, dans un milieu basique, une interaction favorable se produit entraînant une augmentation de la quantité adsorbée qui atteint une valeur de 147 mg. g^{-1} (pH =10). Cette amélioration est due à la charge négative de la surface de la bentonite, qui crée une attraction forte avec le VG chargé positivement [21].

II.7.5 Effet de la température

La température est un paramètre physique important qui peut modifier la capacité d'adsorption de l'adsorbant, l'effet de ce paramètre sur l'élimination de VG par la bentonite a été étudié entre 20°C à 50°C [21].

La Figure II.7 montre l'effet de la température sur la quantité de colorant adsorbée par la bentonite.

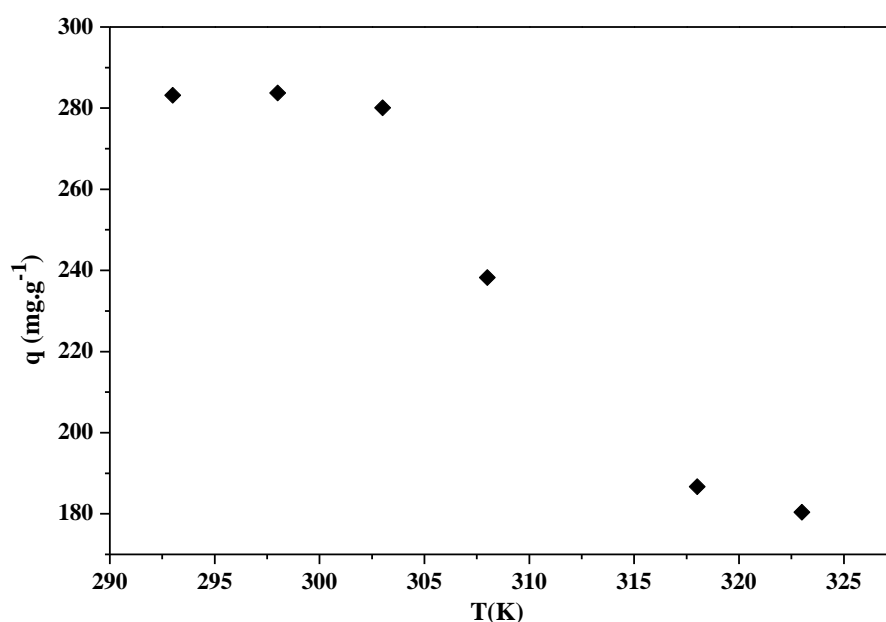


Figure II. 7: Effet de la température de la solution sur la quantité de VG adsorbée par la bentonite ($V = 50 \text{ ml}$, $C_0 = 30 \text{ mg. L}^{-1}$, $m = 5 \text{ mg}$, $v = 250 \text{ tr. min}^{-1}$, $\text{pH} = 6 \pm 0.2$, $t_{\text{eq}}=20 \text{ min}$).

La Figure II.7 indique que l'augmentation de la température correspond à une diminution de la quantité de colorant adsorbée.

L'élévation de la température défavorise le déroulement du phénomène d'adsorption ceci s'explique physiquement par l'augmentation de l'énergie cinétique des molécules adsorbées à la

surface du matériau adsorbant, ce qui conduit à une augmentation de la possibilité de les séparer de la surface de l'adsorbant.

Le paramètre de température explique qu'une température plus élevée peut changer le mécanisme d'adsorption. Nous allons garder pour la suite des expériences la température ambiante car elle donne des résultats meilleurs.

II.8. Modèles cinétiques

Afin de déterminer l'ordre des cinétiques de rétention du colorant et des constantes de vitesse d'adsorption sur bentonite, nous avons adopté les trois modèles cinétiques suivants : pseudo premier ordre PPO, pseudo second ordre PSO et diffusion intra-particulaire DIP.

II.8.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre (Lagergren)

Ce modèle assume que la vitesse cinétique est proportionnelle à la concentration résiduelle du soluté dans le liquide. Le graphique de la représentation linéaire $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps est représenté sur la Figure II.8 :

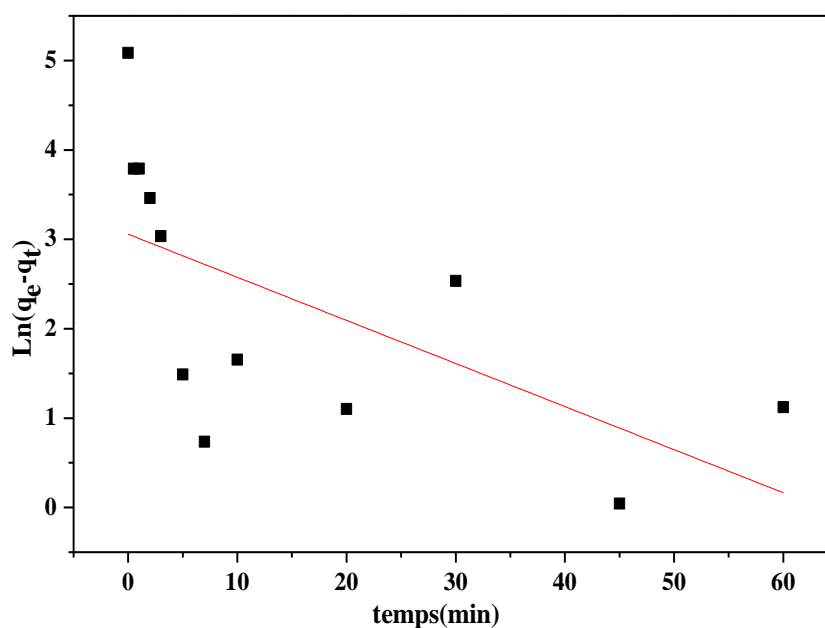


Figure II. 8: Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VG sur la bentonite (global).

Ce modèle permet de décrire les phénomènes ayant lieu lors des premières minutes du processus d'adsorption.

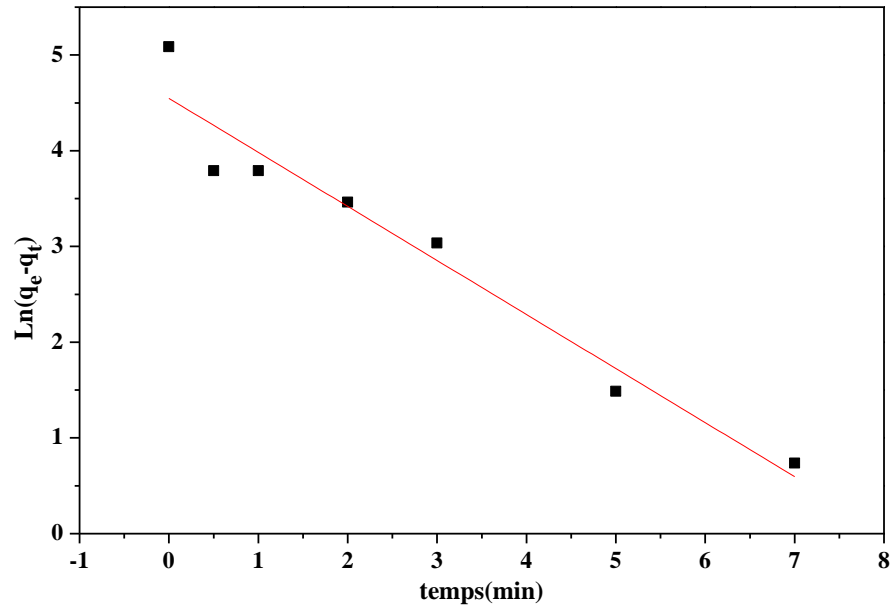


Figure II. 9: Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VG sur la bentonite (avant équilibre).

II.8.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre (Blanchard)

Le modèle PSO représenté sur la Figure II.10 permet de caractériser la cinétique d'adsorption en considérant à la fois l'état de fixation rapide des solutés sur les sites les plus réactifs et l'état de fixation lente sur les sites peu réactifs.

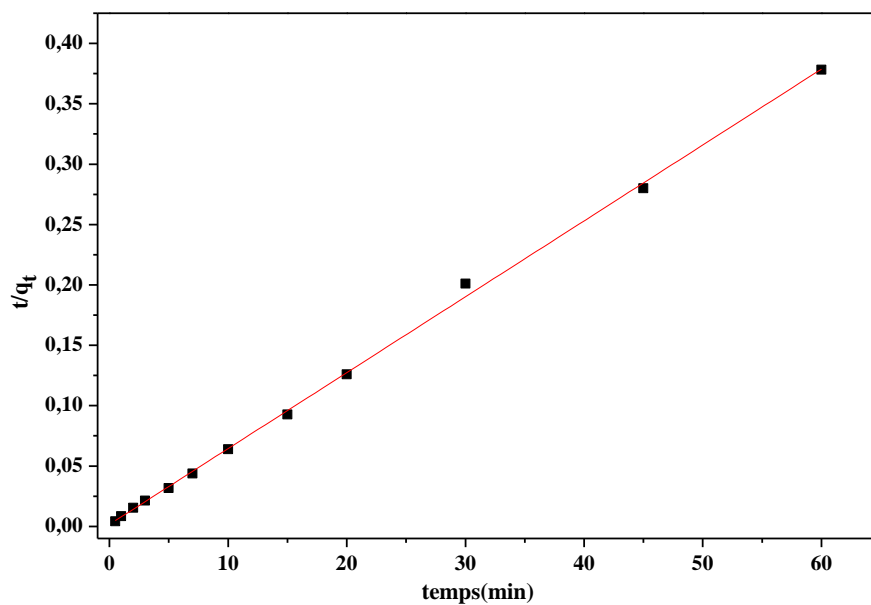


Figure II. 10: Cinétique d'adsorption du pseudo second ordre du VG sur la bentonite

Contrairement au modèle précédent, le modèle de pseudo second ordre est applicable à un intervalle de temps plus large (généralement l'ensemble du processus d'adsorption).

II.8.3. Modèle cinétique de la diffusion intra-particulaire (DIP)

Afin de prédire l'étape limitante dans une opération de fixation de molécules, nous avons tracé dans la Figure II.11, la quantité adsorbée q_t en fonction de la racine carrée du temps de contact ($t^{1/2}$) dont la pente est assimilée à la constante de vitesse (k_{id}).

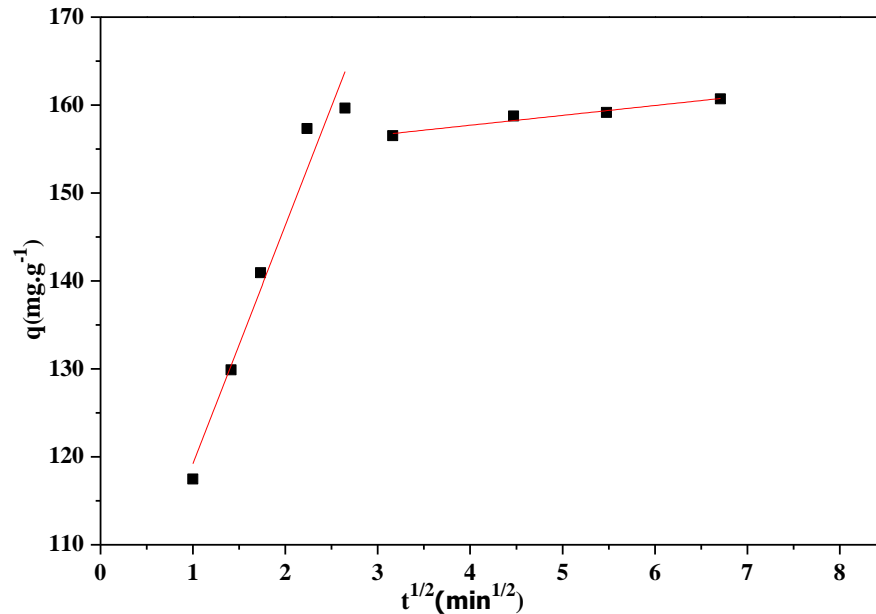


Figure II. 11: Cinétique d'adsorption de VG sur la bentonite selon le modèle de diffusion intra-particulaire

A partir des graphiques précédents, nous avons pu regrouper les différentes constantes de chaque modèle dans le Tableau II.2.

D'après les graphes obtenus précédemment et le Tableau II.2, les résultats expérimentaux de la cinétique d'adsorption de VG sur la bentonite pontée ont conduit aux remarques suivantes :

- Lorsqu'on applique la cinétique du pseudo premier ordre, on constate une différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre expérimentalement $q_{e, \text{exp}}$ **161.751 mg. g⁻¹** et celle calculée $q_{e, \text{cal}}$ **21.263 mg. g⁻¹** avec un coefficient de régression linéaire $R^2 = 0.33$ et ceci pour un intervalle du temps entre 0 et 60 minutes ;
- Par contre, pour les premières minutes de l'expérience, ou bien avant d'atteindre l'équilibre, la quantité calculée à l'équilibre $q_{e, \text{cal}}$ est égale à **94.34 mg. g⁻¹** qui est moyennement proche de celle obtenue expérimentalement avec R^2 de l'ordre de **0.94**.

Tableau II. 2: Valeurs des constantes de vitesse et coefficients de corrélation des différents modèles cinétiques

$q_{e, \text{exp}} \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$	161,75	
Pseudo premier ordre		
	Global	Avant équilibre
$K_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0,048	0,565
$q_{e, \text{calc}} \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$	21.268	94.41
R^2	0,330	0,940
Pseudo second ordre		
$K_2 \text{ (g. mg}^{-1}\text{.min}^{-1}\text{)}$	0.0246	
$q_{e, \text{calc}} \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$	158.98	
R^2	0,999	
Diffusion intra-particulaire		
$K_{id1} \text{ (mg. g}^{-1}\text{. min}^{1/2}\text{)}$	27.09	
$C_1 \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$	92.12	
R_1^2	0,953	
$K_{id2} \text{ (mg. g}^{-1}\text{. min}^{1/2}\text{)}$	1,12	
$C_2 \text{ (mg. g}^{-1}\text{)}$	153.21	
R_2^2	0,940	

- Selon le modèle du pseudo-second ordre, presque une égalité entre les valeurs des quantités adsorbées (calculée **158.98 mg. g⁻¹** et expérimentale **161.751 mg. g⁻¹**) avec un coefficient de corrélation proche de l'unité et égal à **0.999**. Cette observation indique que le modèle du pseudo-second ordre offre une meilleure description des données expérimentales et que le processus d'adsorption est principalement régi par ce modèle [22] [23].
- Le modèle de diffusion intra-particulaire a été utilisé pour étudier l'étape limitante de l'adsorption et les mécanismes de diffusion du VG sur la bentonite. Les résultats montrent clairement la présence de deux droites, ce qui suggère que le processus d'adsorption est contrôlé par deux étapes distinctes.
- Le premier segment, caractérisé par une constante de vitesse plus élevée, correspond à la diffusion externe, tandis que le deuxième segment correspond à la diffusion à l'intérieur des micropores. Les lignes ne passent pas par l'origine, ce qui indique que la diffusion n'est pas l'étape

limitante. De plus, ces résultats suggèrent qu'il existe d'autres phénomènes qui influencent le processus d'adsorption lors de la deuxième phase [24].

II.9. Etude thermodynamique

L'étude des paramètres thermodynamiques est très importante pour comprendre l'effet de la température sur l'adsorption. Elle nous donne le principe de prédire la force des liaisons entre les adsorbants et les adsorbats et la spontanéité du processus d'adsorption, et pour comprendre ce phénomène, nous avons tracé $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ [25].

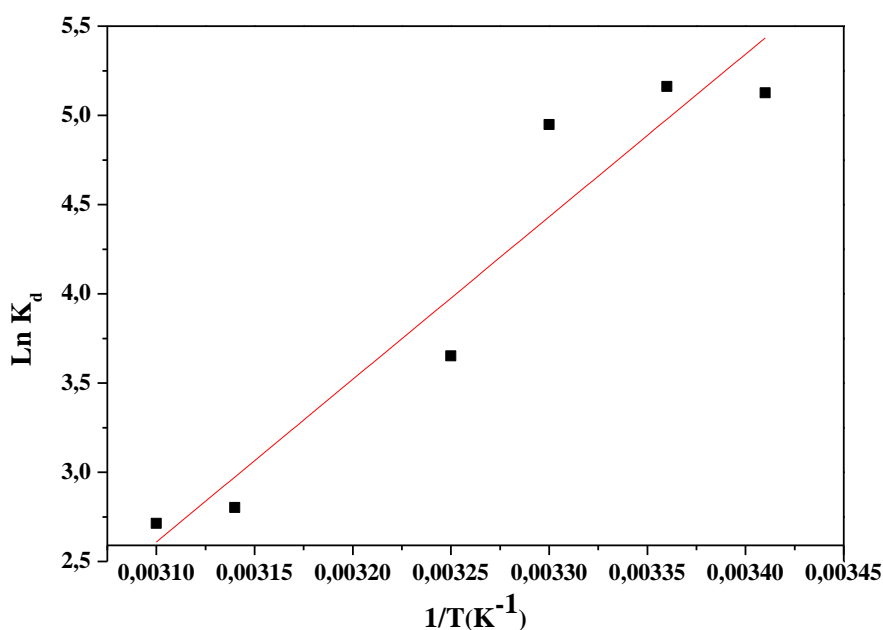


Figure II. 12: Effet de la température sur la constante de distribution du phénomène d'adsorption de VG sur la bentonite.

A partir de la Figure II.12, nous avons pu récapituler les paramètres thermodynamiques dans le Tableau ci-dessous :

Tableau II. 3: Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de VG sur la bentonite

T(K)	ΔH° (KJ. mol ⁻¹)	ΔS° (J. mol ⁻¹ . K-1)	R ²	ΔG° (KJ. mol ⁻¹)
293				-13.30
298				-12.24
303	-75.75	-213.16	0,90	-11.17
308				-10.11
313				-9.04
323				-6.908

D'après le Tableau II.3, il est possible de conclure que la valeur négative de l'enthalpie $\Delta H^\circ < 0$ indique que le processus d'adsorption du VG sur bentonite est de nature exothermique, confirmant ainsi les résultats précédemment obtenus.

De plus, La valeur négative de l'entropie standard $\Delta S^\circ < 0$ indique une diminution du désordre à l'interface entre l'adsorbant et la solution de VG lors du processus d'adsorption, cela conduit à une organisation plus structurée des molécules de colorant au niveau des sites d'adsorption.

Les valeurs négatives de l'enthalpie libre ΔG° indiquent que la réaction d'adsorption est spontanée. Cependant, cela suggère également que la faisabilité de l'adsorption diminue à des températures élevées [25].

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude se concentre sur l'influence de certains paramètres tels que le temps de contact, la masse de l'adsorbant, la température et le pH de la solution sur la rétention d'un colorant cationique (violet de gentiane) par une bentonite pontée.

Nous avons effectué une modélisation de la cinétique d'adsorption en utilisant les modèles du pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre et de la diffusion intra-particulaire.

Les résultats obtenus indiquent que :

- La quantité de colorant adsorbée diminue lorsque de l'adsorbant est ajouté, ce phénomène peut s'expliquer par la non-saturation des sites d'adsorption.
- On observe une diminution de la capacité d'adsorption lorsque la température augmente, ce qui rend la réaction défavorable.
- Une augmentation de l'adsorption est observée lorsque le pH du milieu augmente, ce phénomène est attribué à la forte attraction entre la surface de la bentonite chargée négativement et le violet de gentiane chargé positivement.
- La cinétique d'élimination du violet de gentiane (VG) révèle un temps de contact de 20 minutes se déroulant en deux étapes distinctes : une fixation initiale rapide suivie d'un équilibre plus lent. Cette cinétique suit un modèle de pseudo-second ordre et la diffusion intra-particulaire n'est pas la seule étape limitante du processus d'élimination du VG.
- L'étude thermodynamique des paramètres (ΔH° , ΔG° et $\Delta S^\circ < 0$) a prouvé que le processus d'adsorption est exothermique et spontané. De plus, une diminution du caractère aléatoire à l'interface solide/liquide.

Ainsi, nous pouvons conclure que la bentonite présente une forte affinité avec le violet de gentiane (VG) et une grande capacité d'adsorption.

Afin de finaliser ce travail et comme perspectives, il est important de :

- Utiliser d'autres adsorbants pour comparaison.
- Pontage de la bentonite par d'autres composés.
- Procéder à une caractérisation du support étudié par différentes techniques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Azbar, N., T. Yonar, and K. Kestioglu, *Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent*. Chemosphere, 2004. **55**(1): p. 35-43.
2. Annadurai, G., R.-S. Juang, and D.-J. Lee, *Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions*. Journal of hazardous materials, 2002. **92**(3): p. 263-274.
3. Benzerrouk, M.K., Y. Ouldali, and A. Bouherama, *Etude de la biodégradation des colorants par des bactéries rhizosphériques*, 2022.
4. Zahaf, F., *Etude Structurale des argiles modifiées Appliquées à l'adsorption des polluants*. 2017.
5. Hider, F., Z. Benkhodja-Graba, and N.K.N. Hider, *Elimination d'un polluant organique (bleu de méthylène) par un résidu agricole (cactus)*. 2022.
6. Chevallier, J., *La peau teinte... Histoire de l'utilisation des colorants en dermatologie*, in *Images en Dermatologie* 2016. p. 177-182.
7. Otero, M., et al., *Elimination of organic water pollutants using adsorbents obtained from sewage sludge*. Dyes and Pigments, 2003. **57**(1): p. 55-65.
8. Bouchekara, M., et al., *Elaboration et caractérisation de matériaux poreux à base d'argile modifiée. Application à la rétention de polluants*.
9. Murray, H.H., *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*. Applied clay science, 2000. **17**(5-6): p. 207-221.
10. Roque-Malherbe, R.M., et al., *Lead, copper, cobalt and nickel removal from water solutions by dynamic ionic exchange in LECA zeolite beds*. International Journal of Environment and Pollution, 2007. **31**(3-4): p. 292-303.
11. Abidi, N., *Interactions argiles naturelles-effluents teinturiers: influence des propriétés de surface des argiles et mécanismes d'adsorption des colorants*, 2015, Université de Strasbourg; Université de Carthage (Tunisie).
12. Ruthven, D.M., *Principles of adsorption and adsorption processes* 1984: John Wiley & Sons.
13. Belaid, K.D. and S. Kacha, *Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant basique sur la sciure de bois*. Revue des Sciences de l'eau, 2011. **24**(2): p. 131-144.
14. KHELIFI, O., *Etude de l'adsorption du nickel et du cuivre sur un charbon actif préparé à partir des boues de station d'épuration*, 2018.
15. Le Coeur, C., et al., *La diffusion de neutrons-comment peut-elle nous aider à comprendre la matière molle?* 2022.
16. da Silva, G.G., et al., *Cashew apple byproduct: Gastroprotective effects of standardized extract*. Journal of Ethnopharmacology, 2021. **269**: p. 113744.
17. Andersen, F., *Final report on the safety assessment of cetrimonium chloride, cetrimonium bromide, and stearyltrimonium chloride*. Int J Toxicol, 1997. **16**(3): p. 220.
18. Karim, A.B., et al., *Élimination du colorant basique «Bleu de Méthylène» en solution aqueuse par l'argile de Safi*. Revue des sciences de l'eau, 2010. **23**(4): p. 375-388.
19. Saad, S., S.B. Amor, and A.B. Slimane, *Comparative study between adsorbents based on magnetic nanoferrite. Application to the removal of methyl orange from wastewater*. 2021.
20. Bellir, K., et al., *Sorption study of a basic dye "Gentian violet" from aqueous solutions using activated bentonite*. Energy Procedia, 2012. **18**: p. 924-933.
21. Batana, F.Z., M.N. Rebizi, and A. Guibadj, *Algerian Bentonite Bridged for removes cationic dye from aqueous solutions by adsorption: Modelling, optimization and kinetics*

- study*. International Journal of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering, 2022. **11**(3): p. 11-27.
22. Boudia, R., *Etude comparative de l'élimination de colorants textiles par deux adsorbants: naturel et activé*, 2021.
 23. Gherbi, N. and A. Meniai, *Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels*. 2017.
 24. Liang, Y.-D., et al., *Adsorptive removal of gentian violet from aqueous solution using CoFe₂O₄/activated carbon magnetic composite*. Journal of Water Process Engineering, 2019. **27**: p. 77-88.
 25. Boumchita, S., et al., *Elimination d'un colorant cationique dans une solution aqueuse par un déchet alimentaire: Epluchure de pomme de terre [Removal of cationic dye from aqueous solution by a food waste: Potato peel]*. J. Mater. Environ. Sci, 2016. **7**: p. 9-17.