

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم هندسة الطرائق	
	Department of Process Engineering	

N°d'ordre:M2/GP/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Spécialité: Génie des procédés de l'environnement

Thème

**Valorisation des boues activées de la STEP de Sidi-Ali pour
l'élimination des colorants organiques**

Présenté par

1- BRALEM Ghania

2-BENATIA Bahria

Soutenu le 28/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	BELARBI Ilham	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	BENOSMANE Sarah	MCB	Université de Mostaganem
Rapportrice :	BENYEKKOU Nabila	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

Avant tout, Nous rendons grâce à ALLAH le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Dr **BENYEKKOU Nabila** pour avoir accepté de nous encadrer tout au long de ce projet. Sa disponibilité, ses conseils avisés, ses encouragements constants et sa bienveillance ont été d'un précieux soutien à chaque étape de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements et toute notre gratitude aux membres du jury, Dr **BELARBI Ilham**, et Dr **BENOSMANE SaRrah**, maitres de conférences classe B, à l'université de Mostaganem, pour l'honneur qu'elles nous font en participant à l'évaluation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à la **Faculté des Sciences et de la Technologie** de l'**Université de Mostaganem** pour nous avoir offert le cadre d'études approprié, ainsi qu'à l'ensemble du personnel du **Laboratoire Pédagogique** pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse et leur soutien constant tout au long de la période de nos expérimentations.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution au bon déroulement de ce travail.

Dédicaces

Au nom d'ALLAH, le Clément, le Miséricordieux, Je dédie ce modeste travail avec tout mon cœur :

À mon cher père, modèle de sagesse, de patience et de dévouement, pour ses sacrifices silencieux, son soutien inconditionnel et sa foi constante en moi.

À ma chère mère, source inépuisable d'amour, de courage et de douceur, merci pour ta patience, tes encouragements et ton soutien sans faille.

À mon cher fiancé Lakhder, pour son amour sincère, sa présence rassurante, son soutien constant et ses encouragements précieux tout au long de ce parcours.

À mes chères sœurs, Salima et Hanane, qui, par leur amour et leur affection, ont illuminé mon chemin et réchauffé mon cœur.

À ma chère amie Kenza, que je considère comme ma propre sœur, pour sa fidélité, sa précieuse amitié et sa présence à mes côtés dans les moments les plus importants.

Ce travail est le fruit de nos efforts conjoints, et je leur en suis profondément reconnaissante.

BRALEM ghania

Dédicaces

Louange à ALLAH, Le Très-Haut, pour Son infinie bonté, Sa miséricorde et Son aide précieuse qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours universitaire.

Je Le remercie pour la force, la patience et le courage qu'Il m'a accordés afin de surmonter les difficultés et poursuivre ce chemin jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

À mes très chers parents,

Aucune parole ne saurait exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous.

Merci pour vos sacrifices, votre soutien inconditionnel, vos encouragements constants et vos prières qui ont illuminé chacun de mes pas.

Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chères sœurs,

Merci pour votre présence, votre affection, votre patience et tous les moments de réconfort que vous m'avez offerts.

Votre soutien moral a été une véritable source de motivation et de sérénité.

À ma directrice de mémoire,

Madame BENYEKKOU Nabila,

Je tiens à vous adresser mes sincères remerciements pour votre accompagnement, votre disponibilité, vos précieux conseils ainsi que votre bienveillance tout au long de la réalisation de ce travail.

Votre encadrement et vos orientations ont grandement contribué à l'aboutissement de cette étude.

À toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin,

Je dédie humblement ce travail en témoignage de reconnaissance, de respect et de gratitude.

Merci à tous ceux qui ont laissé une belle empreinte dans mon parcours académique et personnel.

BENATIA bahria

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicases.....	ii
Liste des matière.....	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Résumé.....	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre I.Généralités sur les Boues Activées et leurs Voies de Valorisation	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition des boues... ..	4
I.3. Origine des Boues.	4
I.4. Choix dans le Traitement Biologique	4
I.5. La Composition des Boues Activées	5
I.6. Caractérisation des Boues activée	5
I.7. Gestions et alorisation des Boues Activée	5
I.7.1. Problématique de la Gestion des Boues activées.....	5
I.7.2. Principales Voies de Valorisation.....	6
I.7.2.1. Valorisation Biochimique : La Méthanisation.....	6
I.7.2.2. Valorisation Agrologique : Recyclage de la Matière	7
I.7.2.3. Valorisation en Génie Civil : Matériaux de Construction.....	7
I.7.2.4. valorisation en matériaux Adsorbant (Notre application).....	7
I.8. Transformation des Boues Activée en Adsorbant	7
I.8.1. Principe de Valorisation.....	7
I.8.2. Définition et concepts de base	8
I.8.3. Types d'adsorption	8
I.8.3.1. .Adsorption physique (Physisorption).....	8
I.8.3.2. L'adsorption chimique (chimisorption).....	9

I.8.4. Mécanisme d'adsorption	10
I.8.5. Clasification des Les adsorbants..... iv	10
I.8.6. Facteur influençant l'adsorption	11
I.8.7. Classification des isothermes d'adsorption	12
I.8.7.1. Classification du Giles.....	12
I.8.7.2. Classification de L'TUPAC.....	13
I.8.8. Isothermes d'adsorption.....	14
I.8.8.1. isotherme de langmuir	14
I.8.8.2. isotherme de freundlich.....	14
I.8.9. Modélisation des cinétiques d'adsorption	15
I.8.9.1. Pseudo-premier ordre	15
I.8.9.2. Pseudo-deuxième ordre	15
I.8.10. Etude thermodynamique	16

chapitre II Résulta et discussion

II.1. Introduction	17
II.2. Réactifs utilises... ..	17
II.2.1. Préparation de l'adsorbant (Boues activées)	17
II.2.2. Choix des colorants.	18
II.2.3. Caractéristiques physico-chimiques des colorants	18
II.2.3.1. Bleu de Méthylène (BM)	18
II.2.3.2. Rouge Congo (RC).....	19
II.2.4. Les solutions préparées.....	19
II.2.4.1. Préparation de la solution mère de bleu de méthylène (BM).....	19
II.2.4.2. Préparation de la solution mère de Rouge congo(RC).....	20
II.2.4.3. préparation de la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH).....	20
II.2.4.4. Préparation de la solution d'acide chlorhydrique (HCl)	20
II.3. Matériels... ..	21
II.3.1. La spectrophotométrie UV – VIS.....	21
II.3.2. Centrifugeuse	22
II.3.3. Agitateur magnétique	22
II.3.4. Thermomètre.....	23
II.3.5. pH – mètre	23

chapitre III Résultats et discussion

III.1. Introduction	26
---------------------------	----

III.2. Courbes d'étalonnage.....	26
III.2.1. Bleu de Méthylène (BM).....	26
III.2.2. Rouge Congo (RC).....	27
III.3. Effet des paramètres physico-chimiques... ..	28
III.3.1. Effet du temps de contact	28
III.3.1.1. Bleu de Méthylène (BM).....	28
III.3.1.2. Rouge Congo (RC).....	29
III.3.2. Effet de la dose de la boue active.....	29
III.3.2.1. Bleu de Méthylène (BM).....	29
III.3.2.2. Rouge Congo (RC).....	30
III.3.3. Effet du pH.....	31
III.3.3.1. Bleu de Méthylène (BM).....	31
III.3.3.2. Rouge Congo (RC).....	32
III.4. .Effet de la temperature	32
III.4.1. .Bleu de Méthylène (BM).....	32
III.4.2. Rouge Congo (RC).....	33
III.5. Isothermes d'adsorption.....	34
III.5.1. Profil de l'isotherme d'adsorption de BM.	35
III.5.2. Profil de l'isotherme d'adsorption de RC	36
III.5.3. Modèle de Langmuir	36
III.5.3.1. Bleu de Méthylène (BM).....	37
III.5.3. .2.Rouge Congo (RC).....	38
III.5.4. Modèle de Freundlich.....	38
III.5.4.1. Bleu de Méthylène (BM).....	39
III.5.4.2. Rouge Congo (RC).....	39
III.6. Cinétique d'adsorption.....	40
III.6.1. Pseudo-premier ordre	40
III.6.1.1. Bleu de Méthylène (BM).....	41
III.6.1.2. Rouge Congo (RC).....	41
III.6.2. Pseudo-second ordre.....	41
III.6.2.1. Bleu de Méthylène (BM).....	42
III.6.2.2. Rouge Congo (RC).....	42
Conclusion générale	44
Références bibliographiques	47

Liste des figures

Figure I.1. Les étapes biochimiques de la méthanisation pour la production du biogaz	6
Figure I.2. schéma explicatif sur l'adsorption physique.....	8
Figure I.3. schéma illustratif de l'adsorption chimique.....	9
Figure I.4. Représentation du processus d'adsorption	10
Figure I.5. Classification des isothermes d'adsorption.....	12
Figure I.6. Classification des isothermes selon IUPAC	13
Figure I.7. mécanisme d'adsorption selon le modèle de Langmuir	14
Figure I.8. mécanisme d'adsorption selon le modèle de freundlich.....	15
Figure II.1. Procédé de préparation des boues activées (adsorbant)	17
Figure II.2. Colorant Bleu de Méthylène	18
Figure II.3. Colorant Rouge Congo	19
Figure II.4. Solution mère de BM.....	19
Figure II.5. Solution mère de RC	20
Figure II.6. Solution de NaOH et HCl.....	21
Figure II.7. spectrophotomètre	21
Figure II.8. centrifugeuse	22
Figure II.9. agitateur magnétique	22
Figure II.10. thermomètre	23
Figure II.11. pH-mètre.....	23
Figure III.1. La courbe d'étalonnage de BM	26
Figure III.2. La courbe d'étalonnage de RC	27
Figure III.3. Effet de temps sur l'adsorption de BM	28
Figure III.4. Effet de temps sur l'adsorption de RC	29
Figure III.5. Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption de BM... ..	30
Figure III.6. Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption de RC.....	30
Figure III.7. Effet de pH sur l'adsorption de BM.....	31
Figure III.8. Effet de pH sur l'adsorption de RC.....	32
Figure III.9. Evolution de Ln Kd enfonction de 1/T pour l'adsorption de BM.....	32
Figure III.10. Evolution de Ln Kd enfonction de 1/T pour l'adsorption de RC.....	33

Figure III.11. Isotherme d'adsorption expérimentale du bleu de méthylène sur les boues active.....	35
Figure III.12. Isotherme d'adsorption expérimentale du Rouge Congo sur les boues actives... ..	36
Figure III.13. Isotherme d'adsorption Langmuir pour l'adsorption de BM.....	37
Figure III.14. Isotherme d'adsorption freundlich pour l'adsorption de BM	38
Figure III.15. Isotherme d'adsorption Langmuir pour l'adsorption de RC.....	39
Figure III.16. Isotherme d'adsorption freundlich pour l'adsorption de RC	39
Figure III.17. La cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre de BM.....	41
Figure III.18. La cinétique d'adsorption du pseudo second ordre de BM.....	41
Figure III.19. La cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre de RC	42
Figure III.20. La cinétique d'adsorption du pseudo second ordre de RC.....	42

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I.1. Différences fondamentales entre physisorption et chimisorption.....	7
Tableau II.1. propriétés et valeurs de bleu méthylène	18
Tableau II.2. propriétés et valeurs de Rouge Congo.....	19
Tableau III.1. Valeurs obtenue pour l'établissement de la courbe d'étalonnage de BM... ..	26
Tableau III.2. Valeurs obtenue pour l'établissement de la courbe d'étalonnage de RC	27
Tableau III.3. Paramètres thermodynamique d'adsorption de BM... ..	32
Tableau III.4. Paramètres thermodynamique d'adsorption de RC	33
Tableau III.5. Les caractéristiques de Langmuir pour l'adsorption de BM... ..	34
Tableau III.6 Les caractéristiques de Freundlich pour l'adsorption de BM... ..	37
Tableau III.7. Les caractéristiques de Langmuir pour l'adsorption de RC	38
Tableau III.8. Les caractéristiques de Freundlich pour l'adsorption deRC.....	39
Tableau III.9. Paramètres de cinétique d'adsorption de BM et RC	43

Liste des abréviations

UMAB	Université Abdelhamid Ibn Badis –Mostaganem
FST	Faculté des Sciences et de la Technologie
T	Facteur de transmission ou transmittance.
A	Absorbance ou densité optique.
C	Concentration massique du composé dosé.
ε	Le coefficient d'absorption molaire(L/mol.cm).
C _{eq}	Concentration a l'équilibre de l'adsorbat(mg/l)
K _L	Constante de Langmuir liée à l'affinité de liaison entre adsorbat et adsorbant
Q _{max}	La capacité maximale d'adsorption(mg/l)
K _F	Constante de Freundlich liée à la capacité d'adsorption
ΔG^0	Variation de l'énergie libre (KJ/mol)
ΔS^0	Variation de l'entropie(kJ/mol.K)
ΔH^0	Variation de l'enthalpie(kJ/mol)
K ₁	Constant de vitesse du pseudo premier ordre (1/min)
K ₂	Constante de vitesse de pseudo deuxième ordre(g/mg.min)
1/n	Constant liée à l'intensité de l'adsorption
R	Constant des gaz (J/mol.K) parfait
$\Lambda_{\max}$	La longueur d'onde(g/mol)
BM	Bleu méthylène
RC	Rouge Congo
NaOH	Hydroxy de disodium
HCl	Acide chlorhydrique
H ₂ O	L'eau
Abs	Abs: absorbance
Abs _i	Absorbance avant le traitement
Abs _t	Absorbance après le traitement
C	La concentration de BM en mg/l
K _d	Le coefficient de distribution
C ₀	Concentration initiale de l'adsorbat (mg/l)
V	Volume de l'adsorbant (ml)
M	La masse de l'adsorbant(g)
Q _e	La capacité d'adsorption à l'équilibre(mg/g)

ملخص

تُعالج هذه الدراسة إشكالية التلوث المائي الناتجة عن الميكروبات العضوية، من خلال اعتماد مقاربة بيئية تهدف إلى تثمين الحمأة المنشطة (الطمي) الناتجة عن محطة تصفية مياه الصرف الصحي بسيدي علي (مستغانم)، عبر تحويلها إلى مادة ماصة حيوية منخفضة التكلفة. تم تحضير هذه المادة الكربونية الخام بطريقة بسيطة من خلال التكيف الحراري (التجفيف عند 105 درجة مئوية، سحق والغزلة)، مع استبعاد التنشيط الكيميائي عمداً لتقليل التكاليف الاقتصادية والبيئية. وُضعت المادة الماصة الحيوية المحضرة في دراسة مقارنة لإزالة صبغتين نموذجيتين في المحاليل المائية: أزرق الميثيلين (صبغة كاتيونية) والورق كونغو (صبغة أنيونية). شمل العمل دراسة تأثير مجموعة من العوامل التشغيلية في نظام الدفعات مثل جرعة الممتز، درجة الحموضة، درجة الحرارة، وزمن التلامس لتحديد الشروط المثلى لعملية الاحتجاز (pH).

وقد أظهرت النتائج التجريبية كفاءة امتزاز عالية لكلا الملوثين. وبإجراء تقييم إيزوثرمات التوازن توافقاً ممتازاً مع نموذج فيما يخص نظام امتصاص أزرق الميثيلين. أما من حيث الحركية، فقد أثبت نموذج المرتبة الثانية (Langmuir) لانغموير الزائفة ملاءمته الأفضل لوصف ديناميكية انتقال الكتلة لكلا الصبغتين، مما يشير إلى تحكم بالية الامتزاز الكيميائي. وأخيراً، أكدت الدراسة الترموديناميكية أن عملية الامتزاز ماصة للحرارة لكلا النظامين، وتترافق مع زيادة في العشوائية عند السطح البيني الفاصل بين المادة الصلبة والسائلة. ختاماً، يُثبت هذا العمل أن استخدام الحمأة المنشطة الخام يمثل بديلاً بيئياً، فعالاً واقتصادياً للغاية لمعالجة التدفقات الصناعية السائلة.

الكلمات المفتاحية: الحمأة المنشطة، محطة سيدي علي، مادة ماصة حيوية خام، الامتزاز، أزرق الميثيلين، الاحمر كونغو، الإيزوثرمات، الحركية، الترموديناميك

Abstract

This study addresses the critical issue of water pollution caused by organic micropollutants through an eco-friendly approach aimed at valorizing activated sludge from the Sidi Ali wastewater treatment plant (STEP) in Mostaganem into a low-cost bio-adsorbent. This raw carbonaceous material was prepared using a simple thermal conditioning process (drying at 105°C, crushing, and sieving), deliberately excluding any chemical activation to minimize both economic and environmental costs. The resulting bio-adsorbent was applied for the comparative removal of two model dyes in aqueous solutions: Methylene Blue (MB, cationic) and Congo Red (CR, anionic). The influence of key operational parameters, including adsorbent dose, pH, temperature, and contact time, was rigorously investigated in a batch system to optimize the retention process.

The experimental results demonstrated high adsorption efficiency for both pollutants. Equilibrium isotherm evaluation showed an optimal correlation with the Langmuir model for the Methylene Blue retention system. Kinetic modeling revealed that the pseudo-second-order model was the most adequate to describe the mass transfer dynamics for both dyes, suggesting a chemisorption-controlled mechanism. Finally, the thermodynamic study confirmed the endothermic nature of the adsorption process for both systems, accompanied by an increase in randomness at the solid-liquid interface. In conclusion, this work demonstrates that the utilization of raw activated sludge represents a sustainable, high-performing, and highly cost-effective alternative for the treatment of industrial wastewater effluents.

Keywords: Activated sludge, Sidi Ali STEP, Raw bio-adsorbent, Adsorption, Methylene Blue, Congo Red, Isotherms, Kinetics, Thermodynamics.

Résumé

Cette étude traite de la problématique de la pollution hydrique par les micropolluants organiques, en adoptant une approche éco-compatible qui vise la valorisation des boues activées de la STEP de Sidi Ali (Mostaganem) en un bio-adsorbant à faible coût. Ce matériau carboné brut a été préparé par un simple conditionnement thermique (séchage à 105°C, broyage et tamisage), excluant délibérément toute activation chimique afin de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Le bio-adsorbant obtenu a été appliqué pour l'élimination comparative de deux colorants modèles en solution aqueuse : le Bleu de Méthylène (BM, cationique) et le Rouge Congo (RC, anionique). L'influence des paramètres opératoires, tels que la dose d'adsorbant, le pH, la température et le temps de contact, a été rigoureusement étudiée en système discontinu afin d'optimiser le processus de rétention.

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une efficacité d'adsorption élevée pour les deux polluants. L'évaluation des isothermes d'équilibre montre une corrélation optimale avec le modèle de Langmuir pour le système de rétention du Bleu de Méthylène. Sur le plan cinétique, le modèle du pseudo-second ordre s'est révélé être le plus adéquat pour décrire la dynamique de transfert de masse des deux colorants, ce qui suggère un contrôle par chimisorption. Enfin, l'étude thermodynamique a confirmé le caractère endothermique de l'adsorption pour les deux systèmes, accompagnée d'une augmentation du désordre à l'interface solide-liquide. En somme, ce travail démontre que l'utilisation des boues activées brutes constitue une alternative écologique, performante et hautement économique pour le traitement des effluents industriels.

Mots-clés : Boues activées, STEP de Sidi Ali, Bio-adsorbant brut, Adsorption, Bleu de Méthylène, Rouge Congo, Isothermes, Cinétique, Thermodynamique.

Introduction générale:

Le traitement des eaux usées et la gestion des effluents liquides constituent des enjeux environnementaux et sanitaires majeurs dans la wilaya de Mostaganem. Face à l'augmentation continue des volumes d'eaux usées domestiques et industrielles, les stations d'épuration (STEP), telle que celle de Sidi Ali, génèrent des quantités massives de boues activées comme sous-produits inévitables du traitement biologique par boues activées.

L'accumulation constante de ces résidus solides pose un problème de gestion écologique et économique important pour les gestionnaires des stations. Traditionnellement considérées comme des déchets encombrants à éliminer via la mise en décharge ou l'incinération, les tendances scientifiques actuelles s'orientent vers la valorisation de cette biomasse dans le cadre de l'économie circulaire. Parmi les voies de valorisation techniquement viables, la transformation de ce sous-produit en matériau adsorbant pour l'épuration des eaux contaminées suscite un grand intérêt en génie des procédés.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel de valorisation des boues activées issues de la STEP de Sidi Ali en tant que précurseur pour la préparation d'un bio-adsorbant à faible coût, destiné à l'élimination de micropolluants organiques en solution aqueuse. Cette étude examine comparativement l'efficacité de rétention de ce matériau vis-à-vis de deux colorants modèles aux caractéristiques ioniques opposées : le Bleu de Méthylène (colorant cationique) et le Rouge Congo (colorant anionique).

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire est structuré en trois chapitres fondamentaux :

- **Chapitre I** : Étude bibliographique axée sur les généralités des boues activées, leurs filières de valorisation, les mécanismes de l'adsorption et la modélisation mathématique des isothermes et des cinétiques.
- **Chapitre II** : Matériels et méthodes expérimentales décrivant le protocole de préparation du bio-adsorbant brut et les techniques d'analyses physico-chimiques appliquées au laboratoire.
- **Chapitre III** : Résultats et discussions des essais d'adsorption en système discontinu, incluant l'influence des paramètres opératoires, l'application des modèles théoriques et l'évaluation thermodynamique

Etude bibliographique

Chapitre I

Généralités sur les Boues Activées et leurs Voies de Valorisation

I.1. Introduction

Le traitement des eaux usées constitue une obligation environnementale majeure pour préserver les ressources hydriques face aux rejets anthropiques. Cependant, le fonctionnement des stations d'épuration (STEP) génère inévitablement un sous-produit solide volumineux : les boues résiduelles. À la STEP de Sidi Ali, la gestion et l'accumulation continue de ces flux représentent une problématique environnementale et économique de premier plan. Face à cette contrainte, la transition d'une logique d'élimination classique vers une stratégie de valorisation s'avère indispensable. C'est précisément dans cette dynamique que s'inscrit l'objectif de ce mémoire, qui vise à évaluer l'efficacité de la valorisation de ces boues activées en les transformant par conditionnement thermique en un matériau adsorbant à faible coût pour l'élimination de colorants organiques.

I.2. Définition des Boues

Selon Laskri (2016), les boues activées de stations d'épuration représentent le sédiment résiduel solide, pâteux ou semi-liquide, issu de la séparation physique entre l'eau épurée et la biomasse bactérienne. C'est une matrice complexe constituée d'eau, de matières organiques (micro-organismes et polymères) et de substances minérales.

I.3. Origine des Boues

La production des boues activées s'effectue au cours du traitement secondaire (biologique) des eaux usées à travers trois phases successives :

- **Phase de Synthèse Biologique** : Dans le bassin d'aération, les micro-organismes en suspension (principalement des bactéries) absorbent et métabolisent la pollution organique pour se multiplier, formant des agrégats appelés "flocs biologiques" (Kardache, 2016).
- **Phase de Séparation** : Le mélange eau-boue s'écoule vers le clarificateur (décanteur secondaire) où les flocs sédimentent par gravité, permettant de séparer l'eau clarifiée des boues denses (Seddiki & Ould Khesal, 2025).
- **Gestion des Flux** : Une partie des boues décantées est recirculée vers le bassin d'aération pour maintenir la concentration de la biomasse, alors que le surplus (boues en excès) est extrait du système pour être traité (Mezzou & Naili, 2017).

I.4. Choix dans le Traitement Biologique

Le mode opératoire de la STEP détermine la nature et la stabilité de la boue produite (Laskri, 2016) :

- **Aération Prolongée (Faible Charge) :** Caractéristique de la STEP de Sidi Ali. Le temps de séjour prolongé induit une auto-oxydation cellulaire (respiration endogène), générant des boues hautement minéralisées, stables et imputrescibles (Seddiki & Ould Khesal, 2025).
- **Forte et Moyenne Charge :** Procédés à croissance rapide produisant des boues riches en matières organiques instables, nécessitant une stabilisation ultérieure impérative (Rebbouh, 2024).

I.5. La Composition des Boues Activées

La matrice solide des boues se compose de trois fractions distinctes (Boudraa et al., 2017) :

- **Fraction organique (60 - 80% MS) :** Composée de polymères extracellulaires (EPS), de débris cellulaires, de protéines et de polysaccharides.
- **Micro-organismes (10 - 20% de la fraction organique) :** Biomasse vivante active (bactéries, protozoaires, champignons).
- **Fraction minérale (20 - 40% MS) :** Composée de cations métalliques, de silicates, de sables et de précipités de phosphore et d'azote.

I.6. Caractérisation des Boues Activées

- **Humidité et Siccité :** À l'état brut, la boue est liquide avec une humidité de 95 à 99%. Après déshydratation sur les lits de séchage, l'humidité diminue et le taux de matière sèche (MS) est déterminé (Boudraa et al., 2017).
- **Matière Volatile Sèche (MVS) :** Représente la perte au feu à 550°C, servant d'indicateur direct de la proportion de matière organique présente dans la matière sèche (Cheurfi et al., 2016).
- **Caractéristiques Biologiques :** La présence de micro-organismes actifs implique une surveillance de la charge pathogène pour des raisons de sécurité sanitaire (Laskri, 2016).

I.7. Gestions et Valorisation des Boues activées

I.7.1. Problématique de la Gestion des Boues activées

L'accumulation des boues solides engendre des coûts d'évacuation importants et des contraintes d'encombrement sur les lits de séchage de la STEP de Sidi Ali, rendant nécessaire le développement de filières alternatives.

I.7.2. Principales Voies de Valorisation

I.7.2.1. Valorisation Biochimique : La Méthanisation

ette voie repose sur la **digestion anaérobie** (en l'absence d'oxygène) où la matière organique est transformée en **biogaz** (méthane et CO₂). Ce processus se déroule en quatre étapes biochimiques successives :

- **L'Hydrolyse** : Dégradation des macromolécules complexes en unités solubles.
- **L'Acidogénèse** : Conversion des produits en acides gras volatils et alcools.
- **L'Acétogénèse** : Transformation en acétate et hydrogène.
- **La Méthanogénèse** : Production finale du méthane (CH₄) par des archées spécifiques.

L'énergie ainsi produite permet d'assurer une partie de l'autonomie énergétique de la station (Henze et al., 2015).

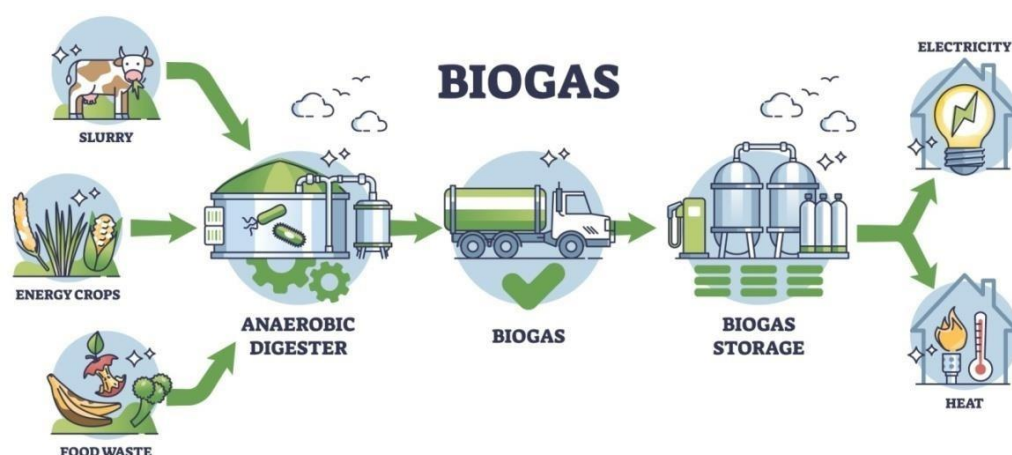


Figure I.1. Les étapes biochimiques de la méthanisation pour la production du biogaz.

I.7.2.2. Valorisation Agrologique : Recyclage de la Matière

Grâce à leur teneur élevée en éléments fertilisants (N, P, K), les boues peuvent être utilisées comme **amendement organique** pour améliorer la structure et la fertilité des sols agricoles.

- **Compostage** : Il permet de stabiliser les boues et d'éliminer les odeurs et les pathogènes
- **Contrôle sanitaire** : Une attention particulière est portée à la teneur en métaux lourds (Pb, Cd, Zn) afin de respecter les normes de sécurité alimentaire et environnementale (Abibsi, 2011).

I.7.2.3. Valorisation en Génie Civil : Matériaux de Construction

Les boues, après traitement thermique ou stabilisation, peuvent intégrer le secteur de la construction comme matériaux secondaires :

- **Ciments et bétons** : Elles servent de charge (filler) ou remplacent partiellement les granulats.
- **Briques et composites** : L'incorporation de cendres de boues dans la fabrication de briques cuites améliore leurs capacités d'isolation thermique.
- **Vitrification** : À très haute température (1100°C), les boues sont transformées en un matériau vitreux inerte, immobilisant ainsi les polluants de manière définitive (Mazouni & Ramdani, 2017).

I.7.2.4. valorisation en matériaux Adsorbant (Notre application) : Transformation directe de la boue séchée en matériau poreux solide pour élimination des polluants organique , offrant une solution locale et économique.

I.8. Transformation des Boues Activée en Adsorbant

I.8.1. Principe de Valorisation

Le procédé utilise la boue brute séchée provenant de la STEP de Sidi Ali, traitée thermiquement à 105°C en étuve, puis broyée et tamisée. Ce travail exclut délibérément toute activation chimique (ZnCl_2 , H_3PO_4) afin de réduire les coûts économiques et d'éliminer la production d'effluents chimiques secondaires toxiques. Ce traitement thermique minimal préserve les groupements fonctionnels naturels (hydroxyles -OH, carboxyles -COOH) en surface du matériau.

I.8.2. Définitions et concepts de base

L'adsorption est un phénomène de surface spontané et généralement exothermique, caractérisé par l'accumulation d'espèces chimiques (atomes, ions ou molécules) à l'interface séparant deux phases :

- **L'adsorbant** : Le solide poreux doué d'une texture poreuse et d'une surface spécifique active. Dans le cadre de ce travail, il est représenté par la boue activée brute.
- **L'adsorbat** : L'entité chimique (polluant) initialement dissoute dans la phase liquide et transférée vers les sites actifs du solide. Dans notre étude, ce rôle est tenu par le Bleu de Méthylène (BM) et le Rouge Congo (RC).

I.8.3. Types d'adsorption

Selon la nature des forces de liaison qui unissent l'adsorbat à la surface de l'adsorbant, on distingue classiquement deux mécanismes distincts, dont les divergences fondamentales sont synthétisées dans le **Tableau I.1**:

I.8.3.1. Adsorption physique (Physisorption) :

La physisorption est régie par des interactions intermoléculaires faibles, principalement des forces de Van der Waals ou des interactions électrostatiques à longue distance. Elle se caractérise par une faible énergie de liaison (généralement inférieure à 40kJ/mol), un caractère hautement réversible favorisant la désorption, et la possibilité d'une condensation en multicouches moléculaires à la surface du solide (**Figure I.1**). Ce phénomène est prédominant à basse température.

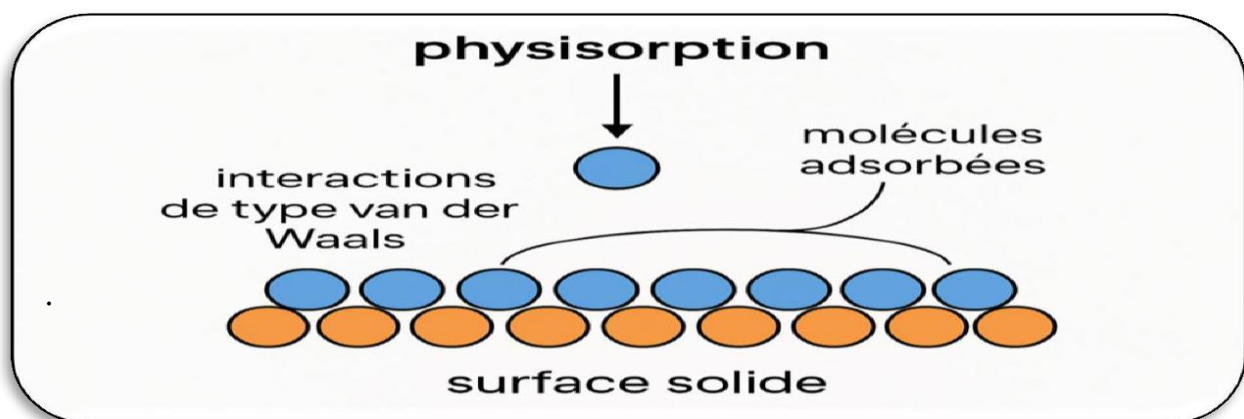


Figure I.2. schéma explicatif sur l'adsorption physique.

I.8.3.2. L'adsorption chimique (chimisorption):

La chimisorption implique un transfert ou un partage d'électrons, conduisant à la formation de liaisons chimiques fortes (covalentes ou ioniques) entre l'adsorbat et les sites de surface (**Figure I.2**). Cette interaction se distingue par une énergie d'adsorption élevée (40 à 200 kJ/mol), un caractère souvent irréversible, et une stricte limitation à une monocouche moléculaire. Elle est stimulée par un apport thermique.

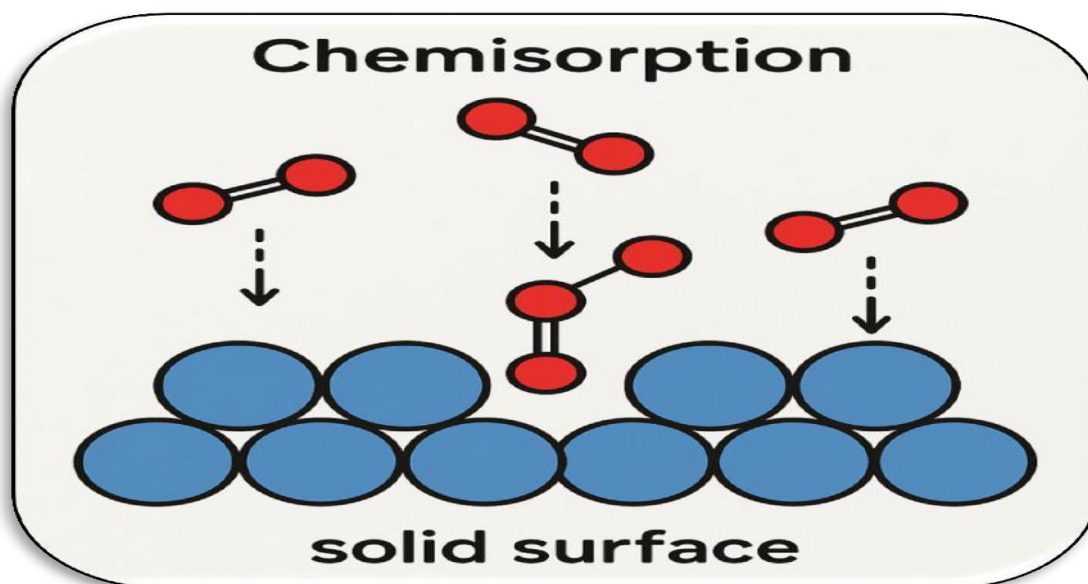


Figure I.3:schéma illustratif de l'adsorption chimique .

L'adsorption joue un rôle fondamental dans de nombreux procédés physico-chimiques. Ce phénomène peut se produire sous deux formes distinctes : l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption). Afin de mieux comprendre leurs mécanismes et domaines d'application, il est essentiel d'établir dans le tableau I.1 une comparaison entre ces deux types d'adsorption :

Tableau I.1: Différences fondamentales entre physisorption et chimisorption.

Paramètres	Physisorption	Chimisorption
Nature des interactions	Forces de Vander Waals	Liaisons chimiques
Énergie d'adsorption	<40 kJ/mol	40–200 kJ/mol
Réversibilité	Oui	Non
Température optimale	Basse	Elevée
Formation de multicouches	Oui	Non

I.8.4. Mécanisme d'adsorption:

Le processus global d'adsorption requiert un transfert progressif du polluant depuis le cœur de la solution vers les sites de fixation du solide. Ce phénomène s'articule autour de trois étapes cinétiques successives (**Figure I.3**) :

1. **La diffusion externe (ou de film)** : Transport des molécules de colorant (BM ou RC) à travers la couche limite fluide entourant la particule de boue brute.
2. **La diffusion interne (intraparticulaire)** : Migration des molécules à l'intérieur du réseau poreux et le long des canaux internes du matériau.
3. **L'adsorption proprement dite** : Fixation finale de l'adsorbat sur les sites fonctionnels actifs de la boue.

L'identification de l'étape la plus lente (étape limitante) est essentielle pour modéliser adéquatement la vitesse du système.

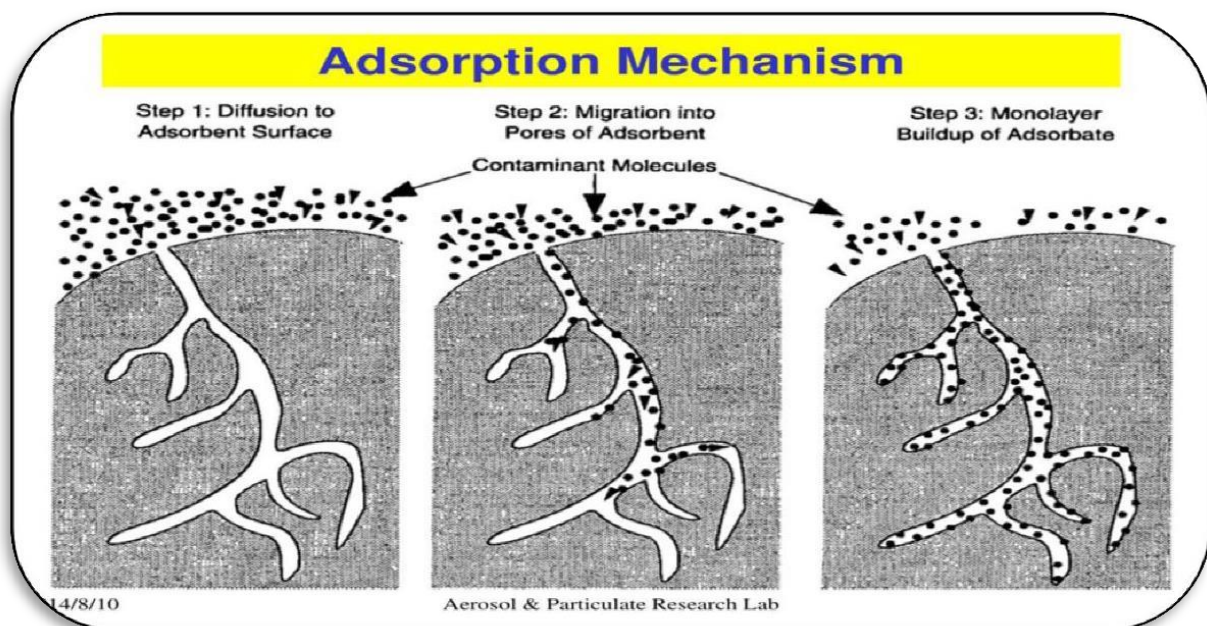


Figure I.4. Représentation du processus d'adsorption.

I.8.5. Classification des adsorbants :

Les matériaux adsorbants sont couramment répertoriés selon leur origine structurale et chimique :

- **Les adsorbants minéraux** : Structures naturelles ou synthétiques (argiles, zéolithes, alumine, gels de silice) dotées d'un réseau cristallin ou amorphe poreux.
- **Les charbons actifs** : Matériaux hautement carbonés obtenus par pyrolyse et activation de précurseurs organiques.
- **Les polymères adsorbants** : Résines de synthèse macromoléculaires fonctionnalisées, optimisées pour la rétention sélective d'ions.
- **Les bio-adsorbants** : Matrices d'origine biologique issues de sous-produits ou de déchets. Ils tirent leur efficacité de la présence innée de groupements fonctionnels réactifs (hydroxyles, carboxyles, amines) capables de chélater les polluants. Notre boues activées brute s'insère parfaitement dans cette catégorie.

I.8.6. Facteur influençant l'adsorption:

L'efficacité de rétention des colorants sur la boue brute est corrélée à plusieurs variables physico-chimiques :

- **La texture de l'adsorbant** : La surface spécifique disponible conditionne le nombre total de sites accessibles.
- **La concentration initiale en adsorbat** : Une concentration élevée accroît la force motrice de transfert de masse, favorisant la diffusion jusqu'à la saturation progressive des sites.
- **Le pH de la solution** : Paramètre critique qui régit simultanément la spéciation ionique des colorants (cationique pour le BM, anionique pour le RC) et la charge nette de surface du bio-adsorbant.
- **La température** : Modifie l'agitation thermique des molécules et oriente le caractère thermodynamique (exothermique ou endothermique) du procédé.
- **Le temps de contact** : Durée requise pour que le système atteigne l'état d'équilibre dynamique entre l'adsorption et la désorption.
- **La taille moléculaire de l'adsorbat** : Les molécules de faibles dimensions (comme le BM) manifestent des vitesses de diffusion intraparticulaire généralement plus rapides que les structures volumineuses à longue chaîne (comme le RC).

I.8.7. Classification des isothermes d'adsorption:

À température constante, l'équilibre d'adsorption est formalisé par le tracé de la quantité de soluté fixée par unité de masse d'adsorbant (q_e , en mg/g) en fonction de la concentration résiduelle d'équilibre en solution (C_e mg/L). Deux typologies fondamentales permettent de décrire ces profils :

I.8.7.1. Classification de Giles

Établie par Giles et al. (1960), elle classe les isothermes en quatre groupes selon la pente de la section initiale de la courbe (**Figure I.4**) :

- **Le type H (Haute affinité)** : Traduit une interaction soluté-solide extrêmement forte à très faible concentration.
- **Le type L (Langmuir)** : Profil classique indiquant une diminution progressive de la disponibilité des sites au fur et à mesure de la couverture de la surface.
- **Le type C (Partition constante)** : Courbe linéaire montrant que le nombre de sites disponibles reste proportionnel à la concentration.
- **Le type S (Sigmoïde)** : Courbe en forme de S, caractéristique d'une adsorption coopérative.

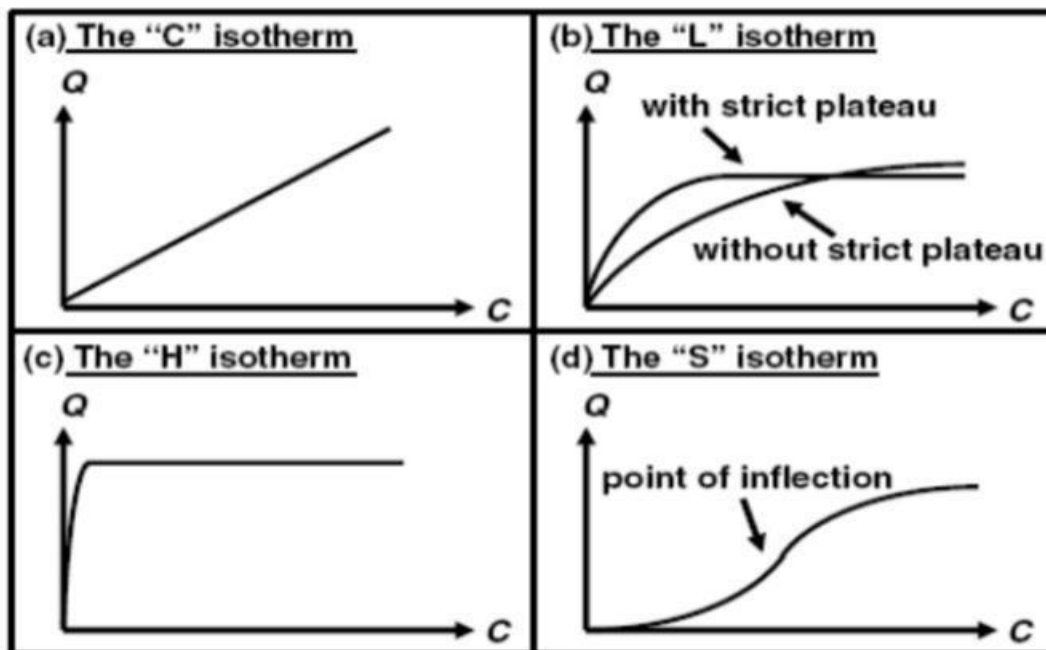


Figure I.5. Classification des isothermes d'adsorption.

I.8.7.2. Classification de l'IUPAC:

L'IUPAC retient une classification en six types distincts (BDDT) corrélés à la structure poreuse du solide (**Figure I.5**) :

- **Type I** : Profil typique des solides microporeux à adsorption limitée à une monocouche (modèle de Langmuir).
- **Type II** : Caractéristique des solides non poreux ou macroporeux, décrivant une transition continue d'une monocouche vers des multicouches.
- **Type III** : Profil concave sans plateau, illustrant un système à faible affinité adsorbant-adsorbé.
- **Type IV** : Propre aux solides mésoporeux, matérialisé par l'apparition d'une boucle d'hystérésis liée au phénomène de condensation capillaire.
- **Type V** : Équivalent au type III à basse pression, mais présentant une hystérésis aux pressions saturantes.
- **Type VI** : Isotherme en marches d'escalier, illustrant une adsorption successive couche par couche.

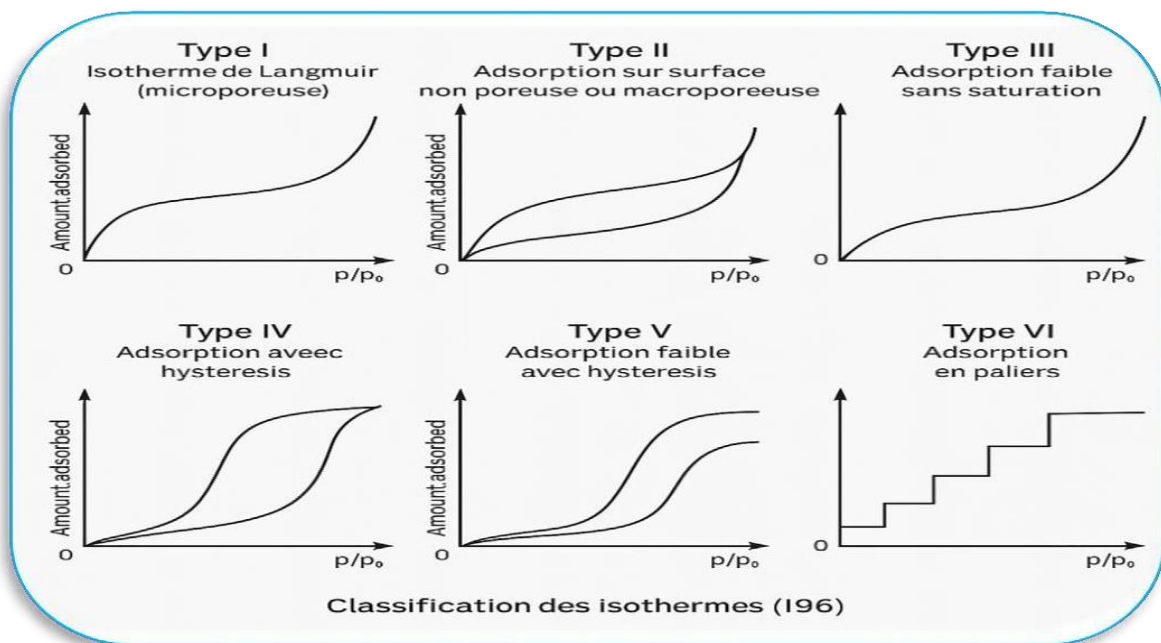


Figure I.6: Classification des isothermes selon IUPAC.

I.8.8. Isothermes d'adsorption:

L'interprétation des données d'adsorption repose sur l'application de modèles d'isothermes, qui permettent de caractériser le mécanisme de rétention de l'adsorbat sur l'adsorbant. Les deux isothermes les plus couramment utilisées dans la littérature scientifique pour modéliser ce phénomène sont celles de **Langmuir**, et **Freundlich**.

I.8.8.1. Isotherme de Langmuir:

Le modèle de Langmuir repose sur l'hypothèse que l'adsorption s'effectue sur une surface parfaitement homogène comme montrée **la figure II.6**, où chaque site d'adsorption est identique et n'accueille qu'une seule molécule d'adsorbat. Ce modèle suppose également qu'il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées.

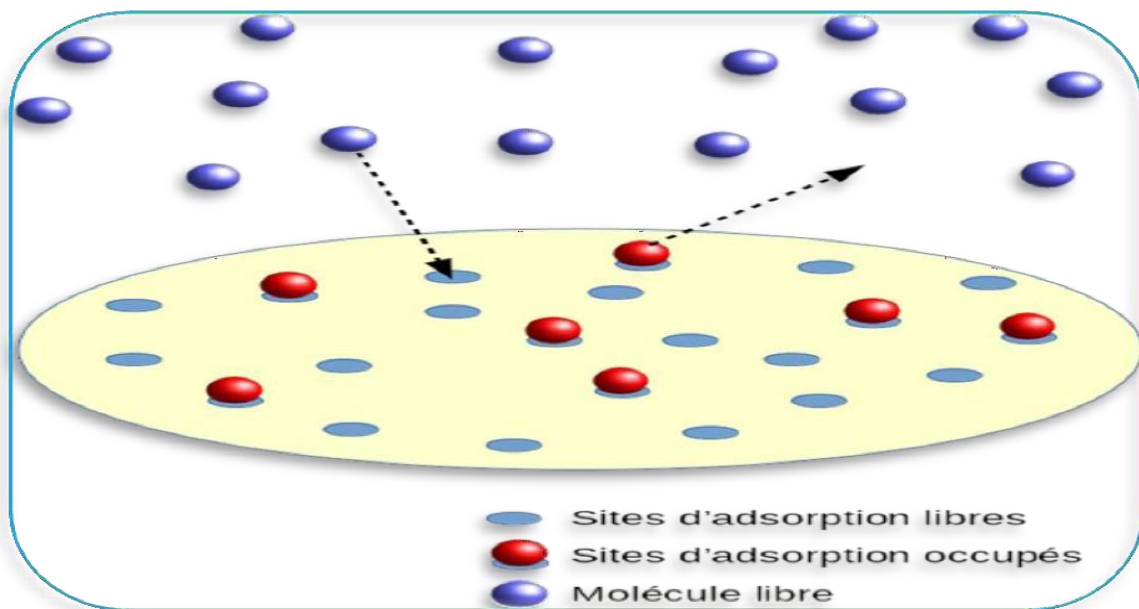


Figure I.7: mécanisme d'adsorption selon le modèle de Langmuir.

I.8.8.2. Isotherme de Freundlich:

Le modèle de Freundlich est une approche empirique qui décrit l'adsorption des substances sur une surface solide, en particulier dans des systèmes où l'énergie d'adsorption varie de manière hétérogène. Ce modèle est couramment utilisé pour étudier l'adsorption de composés organiques, en particulier sur des matériaux comme le charbon actif.

Contrairement à d'autres modèles tels que celui de Langmuir, qui suppose une surface d'adsorption homogène, le modèle de Freundlich prend en compte une distribution variée

des énergies d'adsorption sur la surface de l'adsorbant .

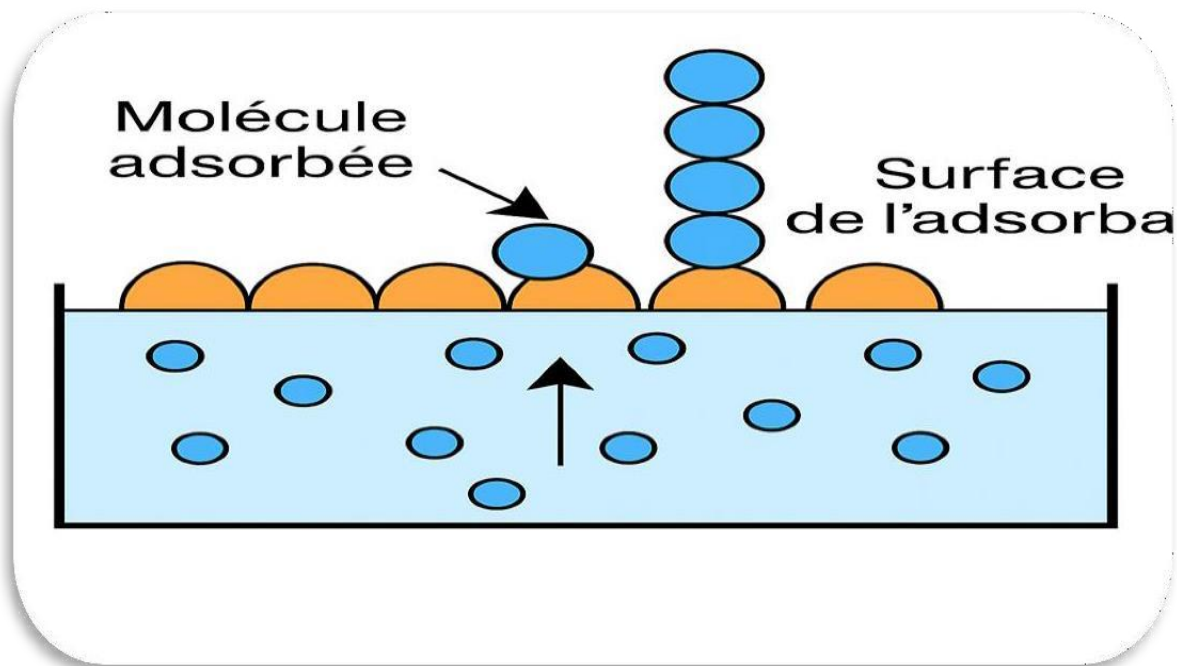


Figure I.8: mécanisme d'adsorption selon le modèle de freundlich

I.8.9. Modélisation des cinétiques d'adsorption:

La modélisation cinétique joue un rôle crucial dans l'étude des processus d'adsorption, car elle permet de comprendre les mécanismes sous-jacents ainsi que de prédire les taux d'adsorption dans diverses conditions expérimentales. Elle est aussi essentielle pour le dimensionnement des systèmes de traitement à grande échelle. En analysant la vitesse d'adsorption d'un polluant sur un adsorbant, on peut déterminer si le processus est contrôlé par la diffusion externe, interne, ou par des réactions de surface .

I.8.9.1. Modèle du pseudo-premier ordre:

le modèle du pseudo-premier ordre, proposé initialement par Lagergren en 1898, repose sur l'idée que la vitesse d'adsorption est liée à la quantité de soluté restant en solution à un moment donné .

I.8.9.2. Modèle du pseudo-deuxième ordre:

Ce modèle, développé par Ho et McKay (1999), suppose que la vitesse d'adsorption dépend du carré de la différence entre la quantité à l'équilibre et celle à un instant donné, suggérant un mécanisme de chimisorption .

I.8.10. Etude thermodynamique:

L'étude thermodynamique de l'adsorption permet d'élucider les mécanismes qui régissent les interactions entre adsorbat et adsorbant. Elle fournit des données essentielles sur la spontanéité du processus, ainsi que sur la nature endothermique ou exothermique de

l'adsorption et les variations d'entropie associées. De telles informations sont indispensables dans des applications variées, notamment le traitement des eaux usées, la purification de l'air, ou la séparation de composés chimiques. Les paramètres thermodynamiques classiques étudiés dans les processus d'adsorption :

L'énergie libre de Gibbs standard ΔG° , l'enthalpie standard ΔH° , l'entropie standard ΔS° , le coefficient de distribution K_d .

Ces paramètres sont dérivés à partir des constantes d'équilibre obtenues à différentes températures.

Interprétation Thermodynamique:

$\Delta G^\circ < 0 \rightarrow$ adsorption spontanée.

$\Delta H^\circ > 0 \rightarrow$ processus endothermique.

$\Delta H^\circ < 0 \rightarrow$ processus exothermique.

$\Delta S^\circ > 0 \rightarrow$ augmentation du désordre à l'interface solide/liquide, souvent associée à une désorganisation des molécules d'eau autour de l'adsorbat

Chapitre matériels et Méthodes

II.1 Introduction

Ce chapitre constitue une partie essentielle de ce mémoire, car il présente les matériels utilisés ainsi que les méthodes expérimentales adoptées dans notre étude. L'objectif principal est de valoriser les boues activées en les utilisant comme biosorbant pour l'élimination des colorants organiques présents dans les eaux usées.

Notre travail porte sur l'étude de l'adsorption de deux colorants modèles, à savoir le Bleu de Méthylène (BM) et le Rouge Congo (RC), afin d'évaluer les performances adsorbantes des boues activées préparées.

II.2. Réactifs utilisés :

II.2.1. Préparation de l'adsorbant (Boues activées)

Les boues activées utilisées comme adsorbant ont été collectées à partir d'une station d'épuration. Elles ont subi plusieurs étapes de traitement avant leur utilisation :

Lavage à l'eau de robinet, puis à l'eau distillée pour éliminer toutes les impuretés

Séchage à l'étuve à 105°C pendant 2 heures

Broyage pour obtenir une poudre homogène

Tamisage (maille $\approx 0,1$ mm) pour obtenir une granulométrie uniforme

Le produit final obtenu est utilisé comme biosorbant brut dans les expériences d'adsorption.



Figure II.1. Procédé de préparation des boues activées (adsorbant)

II.2.2. Choix des colorants :

Dans cette étude, deux colorants ont été choisis en raison de leur large utilisation industrielle et de leur présence fréquente dans les rejets des eaux usées :

Bleu de Méthylène (BM) : colorant cationique

Rouge Congo (RC) : colorant anionique

Ces colorants sont considérés comme des polluants importants en raison de leur stabilité chimique, leur toxicité et leur résistance à la biodégradation. Ils sont également facilement détectables par spectrophotométrie, ce qui facilite leur analyse expérimentale.

II.2.3. Caractéristiques physico-chimiques des colorants

II.2.3.1. Bleu de Méthylène (BM)

Propriétés	Valeurs
Numéro de CAS	61-73-4
Formule chimique	C ₁₆ H ₁₈ CIN ₃ S
Masse molaire	319,85g/mol
λ_{max}	664 nm
Point de fusion	180 °C
Densité	1750 Kg/ m ³
Etat	Poudre
Couleur	bleu foncé
Odeur	Inodore
Nature	Cationique
Solubilité dans l'eau	43,6 g/L à 25 °C



Tableau II.1.propriétés et valeurs de bleu méthylène méthylène

Figure II.2 : Colorant Bleu

II.2.3.2 Rouge Congo (RC)

Propriétés	Valeurs
Numéro	573-58-0
Formule chimique	C32H22N6Na2O6S2
Masse molaire	696,66 g/mol
λ_{max}	497 nm
Point de fusion	>360 °C
Densité	1470 Kg/ m ³
Etat	Poudre
Couleur	rouge brun
Odeur	Inodore
Nature	Anionique
Solubilité dans l'eau	40 g/L à 25 °C



Tableau II.2 propriétés et valeurs de Rouge Congo

Figure II.3 : Colorant Rouge Congo

II.2. 4. Les solutions préparées :

II.2.4.1. Préparation de la solution mère de bleu de méthylène (BM)

Le bleu de méthylène (BM) est utilisé comme colorant modèle dans les expériences d'adsorption afin d'évaluer la capacité d'élimination des polluants.

Pour la préparation de la solution mère, une masse de 0,5 g de bleu de méthylène a été soigneusement pesée à l'aide d'une balance analytique. Cette quantité a ensuite été introduite dans une fiole jaugée de 500 mL contenant un faible volume d'eau distillée.

Le mélange a été agité jusqu'à dissolution complète du colorant. Par la suite, le volume a été ajusté avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, permettant ainsi d'obtenir une solution mère de concentration 50mg/L.

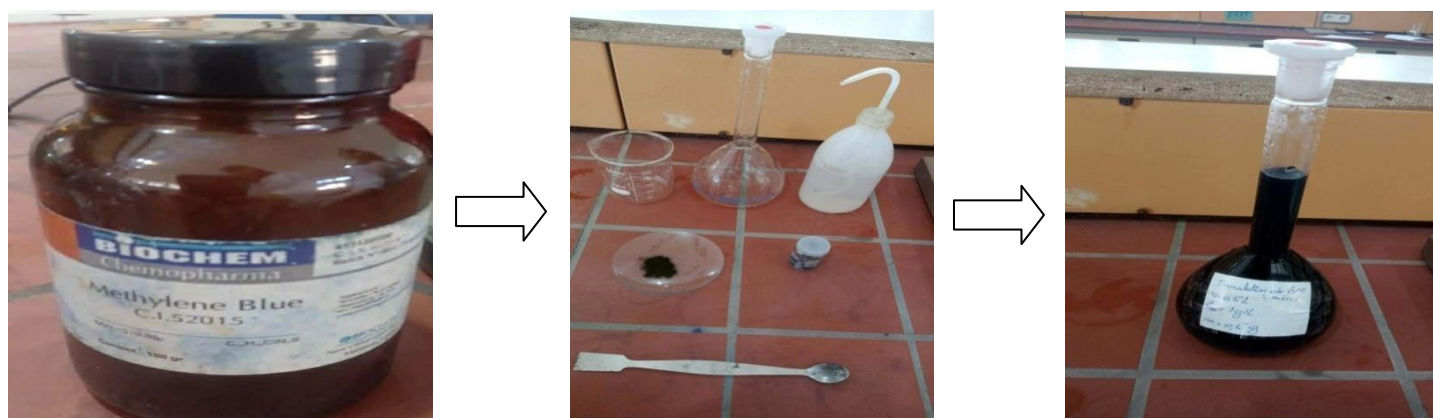


Figure II.4: Solution mère de BM.

II.2.4.2. Préparation de la solution mère de Rouge congo(RC):

Pour préparer la solution mère, une masse de 0,5 g de rouge congo (RC) a été pesée avec précision, puis introduite dans une fiole jaugée d'un litre contenant une petite quantité d'eau distillée. Le mélange a été agité manuellement jusqu'à dissolution complète du colorant. Le volume a ensuite été complété avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, ce qui a permis d'obtenir une solution mère de concentration **50 mg/L**.



Figure II.5: Solution mère de RC.

II.2.4.3. préparation de la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH):

La préparation d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration 1 mol/L a été effectuée en pesant avec précision une masse de 4 g de pastilles de NaOH à l'aide d'une balance analytique. Cette masse a été introduite dans une fiole jaugée de 100 mL contenant initialement une petite quantité d'eau distillée. Après agitation et dissolution complète des pastilles, le volume a été ajusté avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge pour obtenir la concentration souhaitée.

II.2.4.4. Préparation de la solution d'acide chlorhydrique (HCl)

Pour la préparation d'une solution d'acide chlorhydrique (HCl) de concentration 0,1 mol/L, un volume précis a été prélevé à partir d'une solution mère commerciale. Ce volume a été introduit avec précaution dans une fiole jaugée de 100 mL contenant déjà un fond d'eau distillée. Le mélange a été homogénéisé, puis le volume final a été ajusté jusqu'au trait de jauge par ajout d'eau distillée.

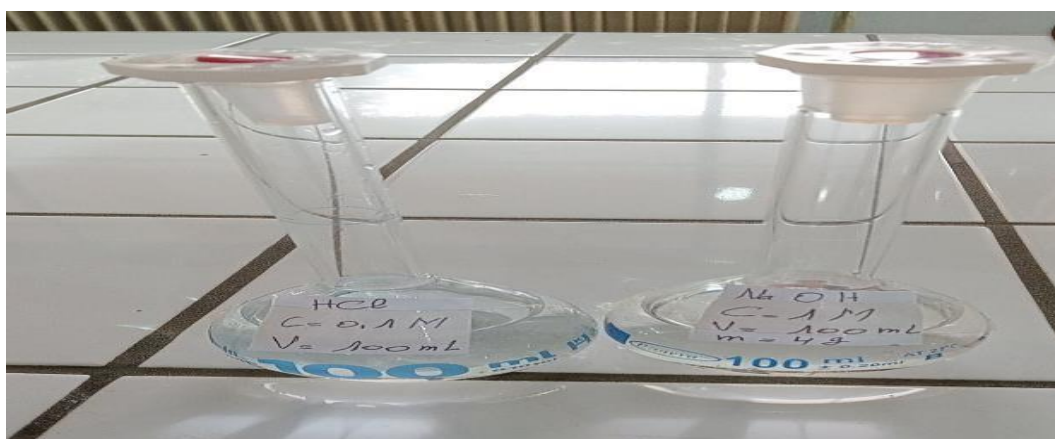


Figure II.6: Solution de NaOH et HCl.

II.3. Matériel :

II.3.1. La spectrophotométrie UV - VIS :

La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance d'une substance chimique en solution. Elle repose sur la capacité de la matière à absorber une partie de la lumière incidente à une longueur d'onde spécifique (λ). Le principe de mesure est régi par la loi de Beer-Lambert, qui établit une relation de proportionnalité entre l'absorbance (A) et la concentration (C) de l'espèce chimique selon la formule :

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C.$$

A : Absorbance (sans unité).

ε : Coefficient d'extinction molaire ($L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$).

l : Trajet optique de la cuve (cm).

C : Concentration molaire de la solution ($mol \cdot L^{-1}$).

Cette technique est utilisée pour déterminer avec précision la concentration des analytes après calibration de l'appareil avec des solutions étalons. (RODIER, MO .2009.)



Figure II.7 . La spectrophotométrie UV - VIS.

II.3.2. Centrifugeuse :

Appareil de séparation des phases basé sur la force centrifuge. Sa rotation rapide permet de sédimenter les particules les plus denses (culot) pour les isoler du liquide (surnageant).



Figure II.8: La centrifugeuse.

II.3.3. Agitateur magnétique :

Dispositif d'homogénéisation fonctionnant par champ magnétique. Un barreau aimanté placé dans la solution tourne pour assurer un mélange constant et uniforme du milieu.



Figure II.9: Agitateur magnétique.

II.3.4. Thermomètre :

Instrument de mesure thermique fondé sur la dilatation d'un fluide ou la variation d'une propriété physique, permettant le contrôle précis de la température réactionnelle

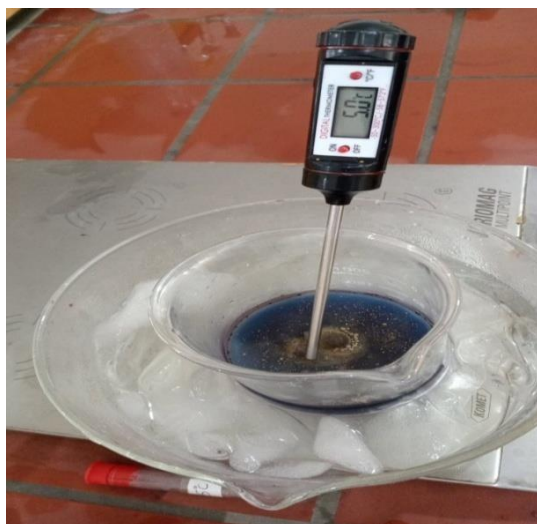


Figure II.10. Thermomètre.

II.3.5. pH - mètre :

Le pH - mètre est un appareil utilisé pour mesurer le pH (l'acidité ou la basicité) d'une solution.

fonctionne sur la base d'un capteur électrochimique appelé électrode combinée.

L'électrode mesure la différence de potentiel entre une électrode de référence et une électrode de mesure, qui est influencée par la concentration des ions hydrogène (H^+) dans la solution.

Cette différence de potentiel est ensuite convertie en une valeur de pH à l'aide d'une courbe de calibration. Le pH - mètre détermine la concentration en ions hydrogène ($[H^+]$) et calcule la valeur du pH en fonction de la relation logarithmique : $pH = -\log [H^+]$



Figure II.11: Le pH - mètre.

Etude expérimentale

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude du processus de adsorption de deux polluants organiques modèles : le **Bleu de Méthylène (BM)**, en tant que colorant cationique (charge positive), et le **Rouge Congo (RC)**, en tant que colorant anionique. L'adsorbant biologique utilisé dans son état naturel est la **boue activée brute (non activée chimiquement)**, issue de la station d'épuration (STEP), afin d'évaluer son efficacité environnementale et d'étudier l'influence de différents paramètres physico-chimiques indépendants (dose, temps, pH et température), suivis par la modélisation mathématique de la cinétique et de l'équilibre d'adsorption.

III.2. Courbes d'étalonnage

L'obtention des droites d'étalonnage a été réalisée à partir de la préparation, pour chaque colorant, d'une solution mère ayant une concentration de 1 g/L. À partir de ces dernières, des séries de solutions filles ont été conçues par le biais de dilutions progressives, permettant ainsi de mesurer les valeurs respectives de l'absorbance. La plage des concentrations étudiées pour le Bleu de Méthylène s'étend de 0 à 10 mg/L, avec des mesures d'absorbance effectuées à une longueur d'onde de 664 nm. Pour le Rouge Congo, en appliquant le même protocole opératoire, la plage des concentrations explorées s'étend également de 0 à 10 mg/L, avec des suivis spectrophotométriques réalisés à sa longueur d'onde caractéristique de 497 nm.

III.2.1. Bleu de Méthylène (BM)

Tableau III.1 Valeurs obtenue pour l'établissement de la courbe d'étalonnage du Bleu de méthylène.

C(mg/l)	0	2	4	6	8	10
Absorbance	0	0.1695	0.33	0.478	0.6	0.7225

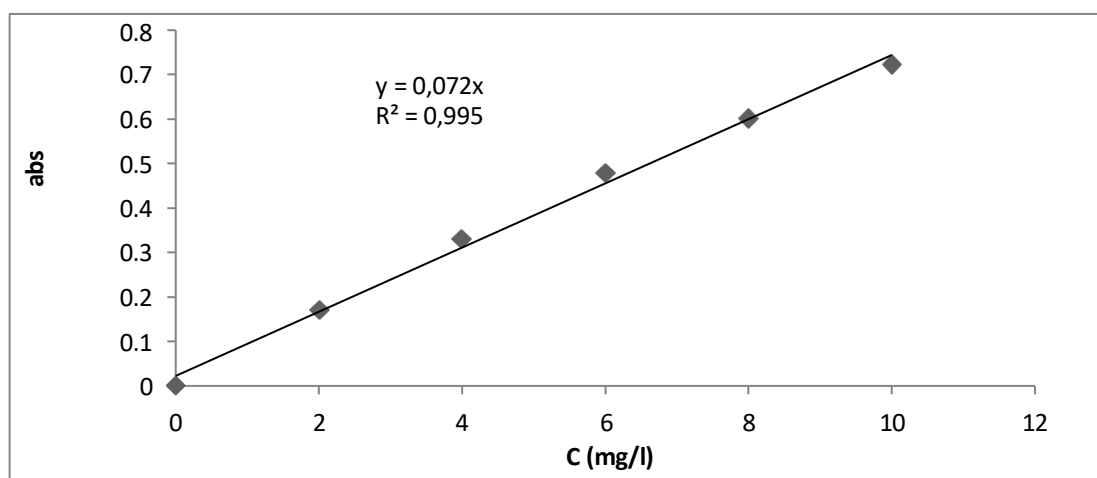


Figure III.1 La courbe d'étalonnage de BM.

La courbe représente la variation de l'absorbance en fonction des concentrations préparées au laboratoire (de 0 à 10 mg/L). À travers l'analyse de régression linéaire, on note une excellente linéarité et une parfaite conformité avec la loi de Beer-Lambert, avec un coefficient de corrélation très élevé ($R^2 = 0,999$). Cela confirme la précision des préparations et la fiabilité du spectrophotomètre pour le calcul des concentrations résiduelles tout au long des essais expérimentaux.

III.2.2. Rouge Congo (RC)

Tableau III.2 Valeurs obtenues pour l'établissement de la courbe d'étalonnage du Rouge Congo .

C(mg/l)	0	2	4	6	8	10
Absorbance	0	0.038	0.132	0.188	0.246	0.308

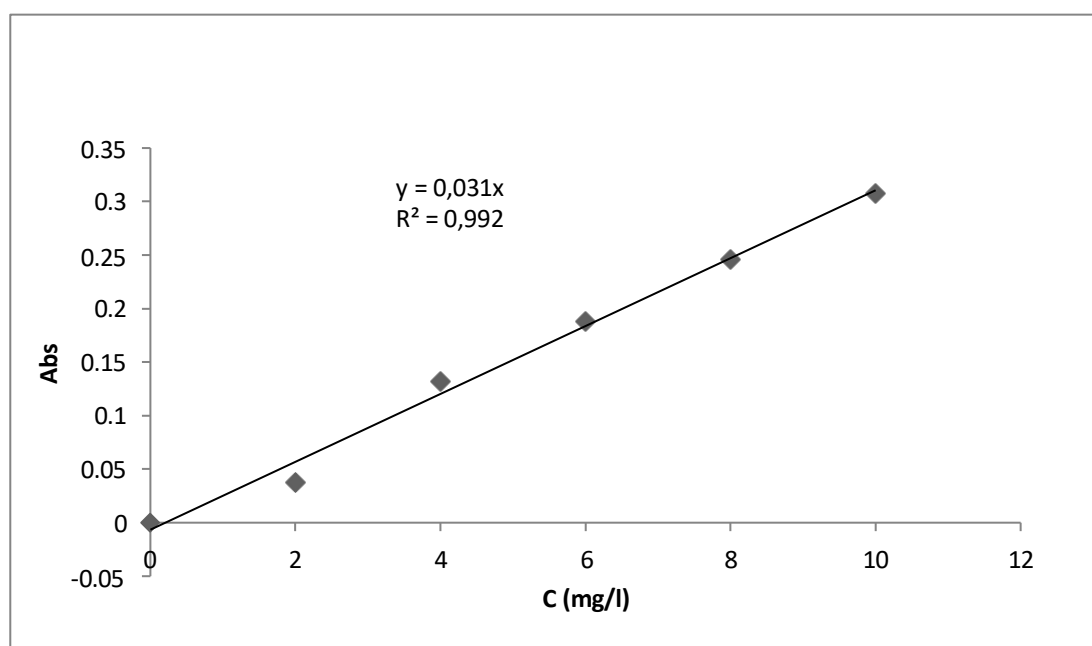


Figure III.2 La courbe d'étalonnage de RC.

La courbe montre une relation linéaire positive entre les valeurs d'absorbance et les concentrations diluées de ce colorant anionique. La droite présente un coefficient de détermination (R^2) très proche de l'unité, ce qui permet de suivre et de calculer les échantillons d'adsorption avec une haute précision à cette longueur d'onde spécifique.

III.3. Effet des paramètres physico-chimiques

L'objectif principal de cette section est d'évaluer l'influence des différentes variables physico-chimiques sur le processus d'adsorption du bleu de méthylène (BM), afin de déterminer et d'optimiser les conditions opératoires idéales pour le traitement.

III.3.1. Effet du temps de contact

Dans le but de déterminer le temps requis pour atteindre l'équilibre d'adsorption, un volume de 100 mL de solution de chaque colorant (BM et RC), à une concentration initiale de 50 mg/L, a été mis en contact avec différentes masses de boue épuratoire brute à température ambiante : (0,1 g ; 0,2 g ; 0,4 g et 0,6 g) pour le BM, et (0,1 g ; 0,2 g ; 0,4 g ; 0,6 g et 0,8 g) pour le RC.

Les systèmes ont été soumis à une agitation mécanique continue sur des intervalles de temps s'étalant de 30 secondes (0,5 min) jusqu'à 120 minutes. À la fin de chaque cycle d'agitation, la séparation de la phase solide du liquide a été assurée par centrifugation pendant 10 minutes. Les concentrations résiduelles ont ensuite été quantifiées par des mesures d'absorbance à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis.

III.3.1.1. Bleu de Méthylène (BM) :

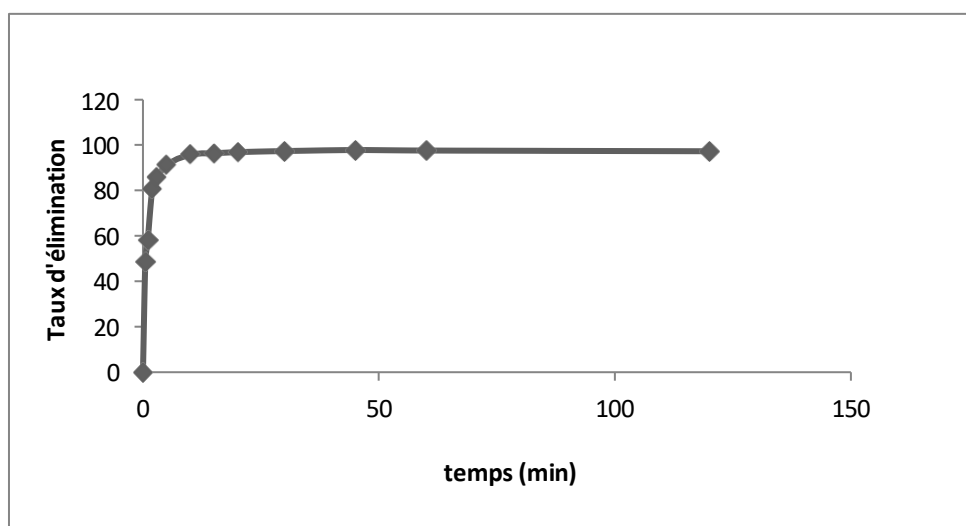


Figure III.3. Effet de temps sur l'adsorption de BM

Le temps d'équilibre optimal retenu est de 20 minutes, car il représente le moment exact où le système atteint sa stabilisation maximale et où le taux d'élimination cesse d'évoluer, marquant ainsi la fin de la réaction d'adsorption.

III.3.1.2. Rouge Congo (RC) :

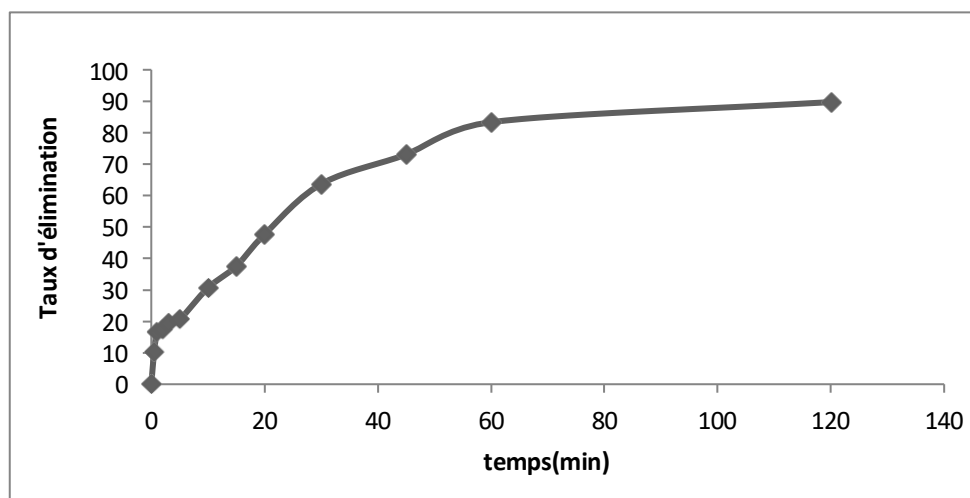


Figure III.4. Effet de temps sur l'adsorption de RC

Le temps d'équilibre optimal retenu pour le RC est donc de 60 minutes. Ce temps, plus long que celui du BM (20 min), est scientifiquement justifié par la structure moléculaire volumineuse et complexe du RC (colorant anionique à longue chaîne), qui nécessite un temps de contact supplémentaire pour accomplir le mécanisme de diffusion intra-particulaire et saturer les sites actifs de la boue brute.

III.3.2. Effet de la dose de la boue activée

La dose de l'adsorbant est un paramètre indépendant crucial pour déterminer l'efficacité économique du processus d'épuration. Cet effet a été étudié à des concentrations et volumes initiaux fixes pour les deux colorants, en utilisant différentes masses de boue activée brute :

III.3.2.1. Bleu de Méthylène (BM) :

L'effet de la dose a été étudié en variant la masse des boues activées de 0,1 à 0,6 g.

La Figure III.5 représente la variation du % d'adsorption du BM en fonction de la dose du matériau utilisé

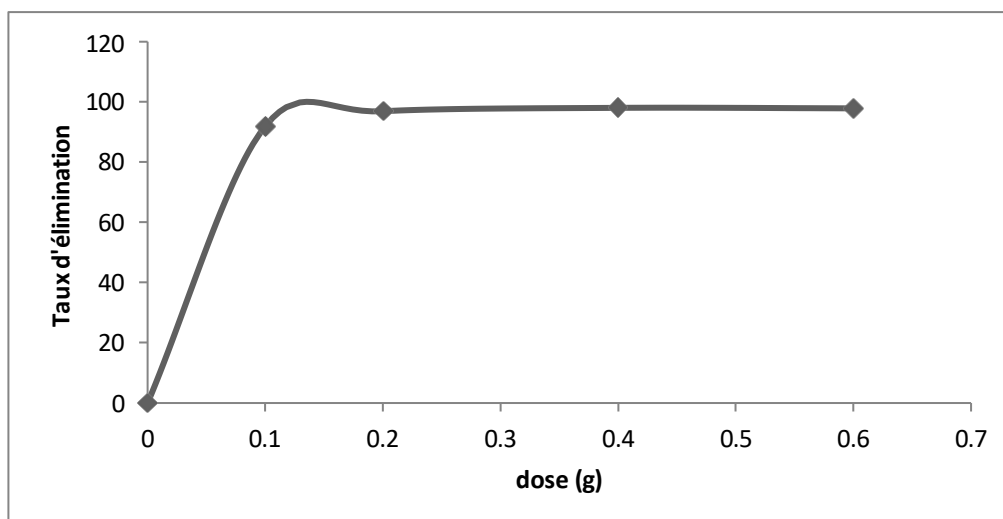


Figure III.5. Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du Blue de Méthylène (BM).

L'analyse statistique des résultats montre une forte relation proportionnelle entre la quantité de boue utilisée et le taux d'élimination :

Il est constaté que le pourcentage d'adsorption augmente avec l'augmentation de la dose de l'adsorbant jusqu'à atteindre un maximum de 98 % à une dose optimale de 0,2 g. Au-delà de cette valeur, le rendement d'adsorption diminue.

L'augmentation du taux d'adsorption avec la dose est due à l'augmentation de la surface spécifique et du nombre de sites actifs disponibles. En revanche, la diminution observée aux fortes doses s'explique par l'agglomération des particules de l'adsorbant.

III.3.2.2. Rouge Congo (RC) :

La Figure III.6 représente la variation du % d'adsorption du RC en fonction de la dose du matériau utilisé

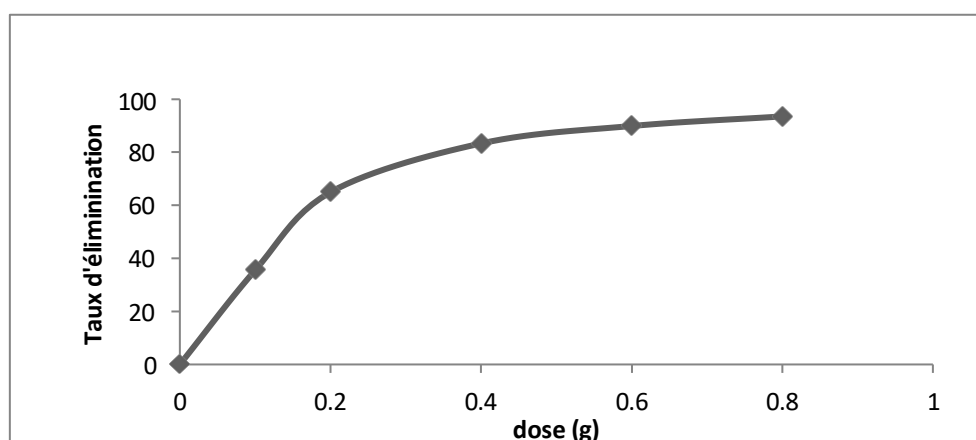


Figure III.6 Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du Rouge du Congo (RC).

le taux d'élimination du Rouge Congo (RC) augmente avec la masse de la boue brute. Aux faibles doses (0,1 g et 0,2 g), l'adsorption reste limitée (25,87% et 34,19%) à cause de la saturation rapide des sites face à la structure volumineuse du RC. **La dose de 0,4 g a été choisie comme masse optimale** pour la suite des essais (cinétique à 60 min). Elle représente le meilleur compromis technico-économique : elle offre une surface de contact suffisante tout en évitant une surconsommation de matériau, car le passage aux fortes doses (0,6 g et 0,8 g) n'apporte qu'un gain mineur (de 84,51% à 88,00%) qui ne justifie pas le doublement de la masse.

III.3.3. Effet du pH

Le pH est le facteur le plus critique et influent dans le processus d'adsorption, car il modifie à la fois la charge de surface de l'adsorbant (la boue activée étant riche en groupements fonctionnels comme les hydroxyles et les carboxyles) et l'état d'ionisation des colorants en solution.

III.3.3.1. Bleu de Méthylène (BM) :

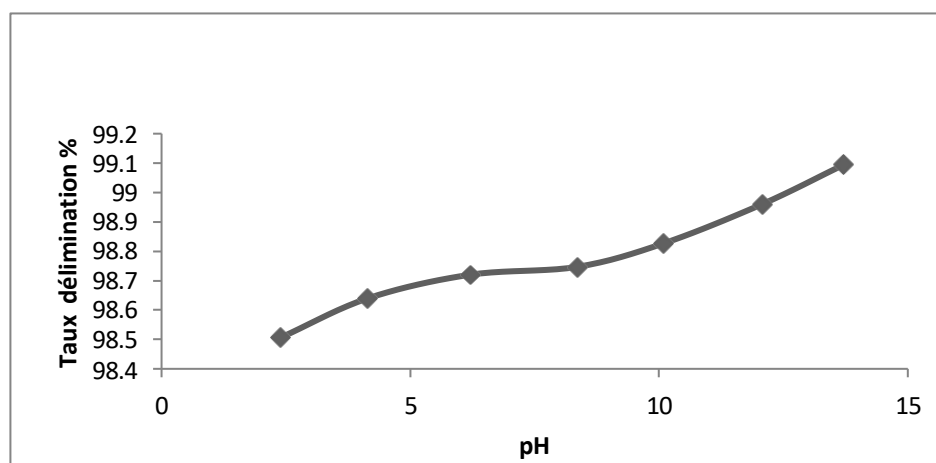


Figure III.7. Effet de pH sur l'adsorption de BM.

L'analyse de la **Figure III.7** montre que le taux d'élimination du Bleu de Méthylène (BM) reste extrêmement élevé et stable sur l'ensemble de la gamme de pH étudiée. Le rendement d'adsorption oscille de **98,5% à pH acide (2,4)** jusqu'à **99,09% à pH fortement basique (13,7)**. Cette performance quasi-totale indique que la boue activée brute possède une excellente affinité naturelle pour ce colorant cationique, indépendamment des variations de l'acidité du milieu.

III.3.3.2. Rouge Congo (RC) :

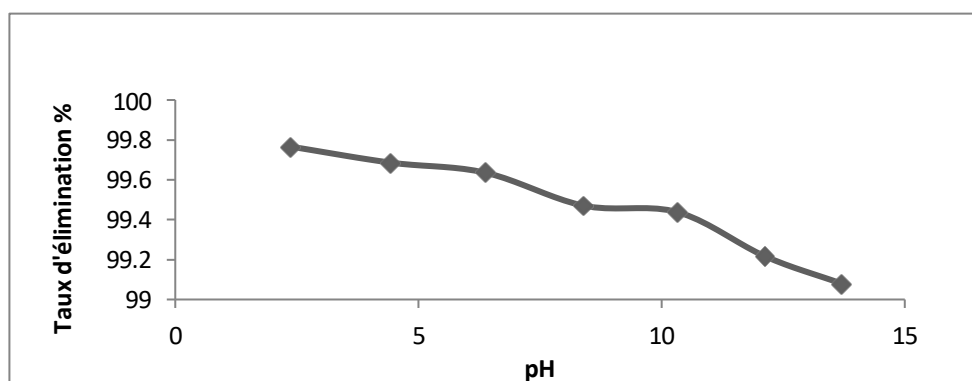


Figure III.8. Effet de pH sur l'adsorption de RC.

La **Figure III.8** révèle un comportement similaire pour le Rouge Congo (RC), avec une efficacité de rétention très élevée et stable sur toute la plage de pH. Le taux d'élimination varie entre **99,76% (à pH acide 2,38)** et **99,08% (à pH basique 13,7)**. Bien qu'il s'agisse d'un colorant anionique, la boue brute maintient sa capacité maximale de fixation, ne montrant qu'une variation mineure et négligeable en milieu basique.

La boue brute montre une performance d'adsorption maximale (>99%) pour les deux colorants sur une large plage de pH, ce qui prouve son efficacité industrielle sans nécessité de modification stricte du pH.

III.4. Etude thermodynamique

Les résultats expérimentaux de la variation de la température montrent un effet direct sur la capacité d'adsorption à l'équilibre (q_e) et sur le coefficient de distribution (K_d) :

III.4.1. Bleu de Méthylène (BM) :

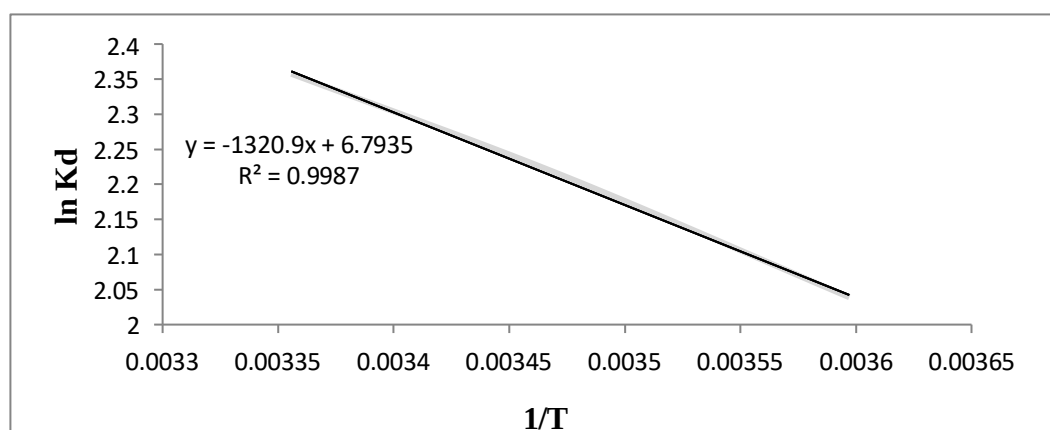


Figure III.9 Evolution de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption de BM.

A partir de cette courbe de Van't Hoff (la pente et l'ordonnée à l'origine) et l'équation ci-dessous, est possible de déterminer les paramètres thermodynamique suivants : la variation d'entropie standard, la variation d'enthalpie standard :

$$\ln K_d = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R}$$

Tableau III.3. Paramètres Thermodynamique d'adsorption de BM

ΔG° (kJ/mol)			ΔH° (KJ/mol)	ΔS° (KJ/mol.k)
T=288K	T=298K	T=331K		
-5.30	-5.87	-6.67	10.98	0.0565

Les paramètres thermodynamiques déduits de la droite de Van 't Hoff ($\ln K_d = f(1/T)$) pour l'adsorption du BM sur la boue brute sont regroupés dans le Tableau III.3.

L'enthalpie ($\Delta H^\circ = +10,98$ kJ/mol) : Sa valeur positive confirme que le processus est **endothermique**, indiquant que l'élévation de la température fournit l'énergie nécessaire pour activer les sites de fixation et favoriser la diffusion du colorant.

L'entropie ($\Delta S^\circ = +0,0565$ kJ/mol.K) : La valeur positive traduit une augmentation de l'aléa à l'interface solide-liquide suite à la libération des molécules d'eau lors de la fixation du BM, ce qui reflète une bonne affinité entre le polluant et le biosorbant.

L'énergie libre de Gibbs (ΔG°): Les valeurs obtenues sont **positives** (+6,26, +5,63 et +3,51 kJ/mol), ce qui montre que le processus n'est pas spontané à basse température. Cependant, la diminution progressive de (ΔG°): avec la température prouve que la chaleur favorise la faisabilité thermodynamique du système, en parfait accord avec le caractère endothermique.

III.4.2. Rouge Congo (RC) :

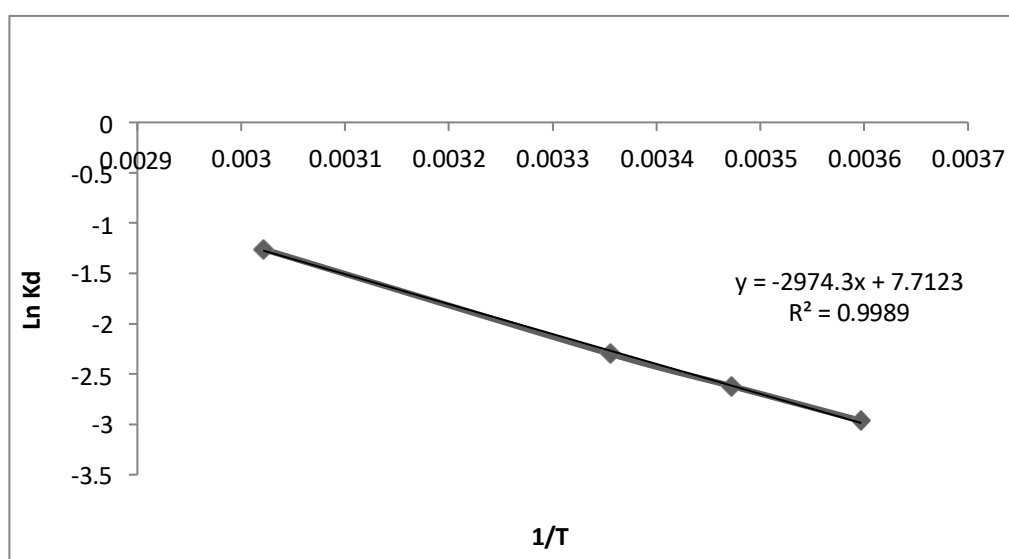


Figure III.10 Evolution de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption de RC.

Figure III.10 ci-dessus représente l'évolution de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption de RC par les boues activées.

Tableau III.4 Paramètres Thermodynamiques d'adsorption de RC

$\Delta G^\circ (\text{kJ/mol})$			$\Delta H^\circ (\text{KJ/mol})$	$\Delta S^\circ (\text{KJ/mol.k})$
T=288K	T=298K	T=331K		
6.27	5.63	3.51	24.73	0.0641

Les paramètres thermodynamiques déduits de l'équation de Van 't Hoff ($\ln K_d = -2974,3437(1/T) + 7,7123$) pour l'adsorption du RC sur la boue brute sont regroupés dans le Tableau III.4.

- **L'enthalpie (ΔH°) = +24,73 kJ/mol** : Sa valeur positive confirme que le processus est **endothermique**, indiquant que l'élévation de la température fournit l'énergie nécessaire pour favoriser la diffusion de ce colorant volumineux vers les sites actifs.
- **L'entropie (ΔS°) = +0,0641 kJ/mol. K** : La valeur positive traduit une augmentation de l'entropie à l'interface solide-liquide, ce qui reflète une bonne affinité naturelle entre le RC et la boue brute.
- **L'énergie libre de Gibbs (ΔG°)**: Les valeurs obtenues sont **positives** (+6,26, +5,63 et +3,51 kJ/mol), ce qui montre que le processus n'est pas spontané à basse température. Cependant, la diminution progressive de (ΔG°) : avec la température prouve que la chaleur favorise la faisabilité thermodynamique du système, en parfait accord avec le caractère endothermique.

III.5. Isothermes d'adsorption

L'étude des isothermes d'adsorption permet de déterminer la capacité maximale de fixation du polluant et d'identifier son mécanisme. La quantité adsorbée à l'équilibre (X/m ou q_{eq}) est calculée par l'équation suivante

$$X/m = [(C_0 - C_{eq})/m] \cdot V \quad \text{Eq (1)}$$

Avec :

C_0 : Concentration initiale de l'adsorbat (mg/l)

C_{eq} : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg/l)

V : Volume de la solution d'adsorbat (ml)

m : Masse de l'adsorbant (g)

Dans une série de fioles, nous avons introduit successivement la quantité optimisée des boues activées et 100ml de solution de polluant de concentration variant de 10 à 350 mg/L.

Les mélanges sont agités dans les conditions optimales (masse et temps de contact), puis centrifugés et analysés. On calcule ensuite la quantité adsorbée. Ensuite, nous traçons les courbes des modèles de Freundlich et Langmuir, puis choisissons celui qui s'ajuste le mieux aux données expérimentales.

III.5.1. Profil de l'isotherme d'adsorption de BM

Le profil de l'isotherme d'adsorption expérimentale du Bleu de méthylène sur les boues activées est représenté par la courbe $q_e = f(C_e)$ ci-dessous :

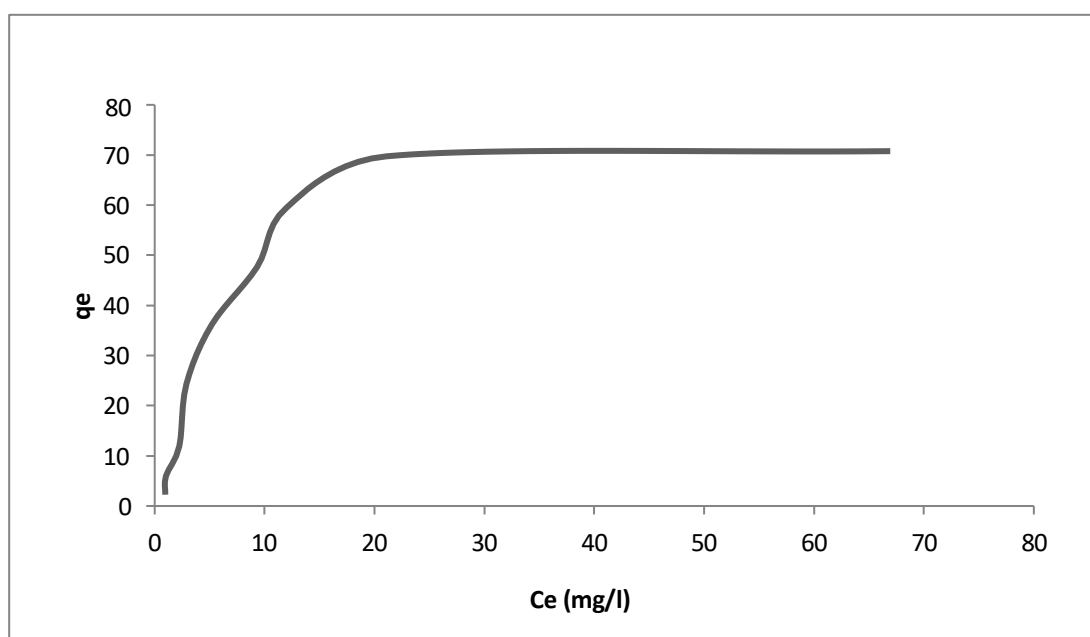


Figure III.11: Isotherme d'adsorption expérimentale du bleu de méthylène sur les boues activées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur notre matériau

L'isotherme correspond au **Type L** selon la classification de Giles (et au **Type I** selon l'IUPAC). Ce profil indique une forte affinité initiale entre le colorant et les sites actifs de la boue brute. La formation d'un plateau horizontal strict traduit la saturation complète des sites et la fixation du polluant en **monocouche**, ce qui valide le modèle de Langmuir ($R^2 = 0,9953$).

III.5.2. Profil de l'isotherme d'adsorption de RC

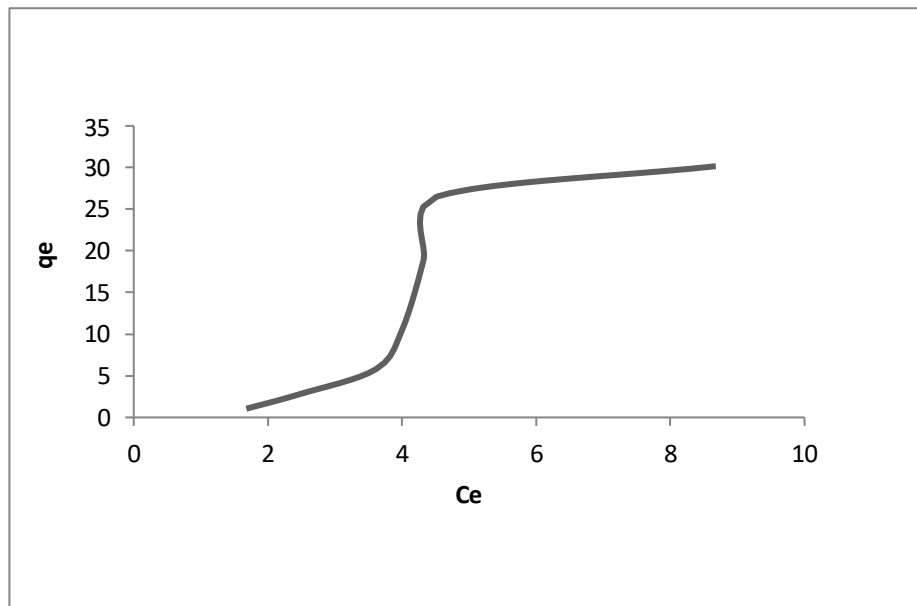


Figure III.12. Isotherme d'adsorption expérimentale du Rouge Congo sur les boues activées

D'après les résultats obtenus, l'isotherme d'adsorption du rouge congo sur notre matériau correspond au Type S selon la classification de Giles. Ce profil indique une faible affinité initiale à basse concentration, suivie d'une adsorption coopérative multicouche. Ce comportement explique la non-linéarité du modèle de Langmuir ($R^2 = 0,230$) et l'adéquation avec le modèle de Freundlich ($R^2 = 0,962$), adapté aux surfaces hétérogènes.

Afin de comprendre le mécanisme de distribution des molécules de polluants entre la phase liquide et la phase solide à l'équilibre, deux modèles mathématiques célèbres ont été appliqués :

III.5.3. Modèle de Langmuir :

Représenté graphiquement par (C_e/q_e) en fonction de (C_e) . Il suppose la formation d'une monocouche sur une surface énergétiquement homogène. selon l'équation linéaire suivante :

$$C_e / q_e = (1/Q_{\max} \cdot K_L) + (C_e / Q_{\max}) \quad \text{Eq(2)}$$

Avec :

K_L : constante de Langmuir liée à l'affinité de liaison entre adsorbat et adsorbant

$Q_{\max}$: capacité maximale d'adsorption (mg/g).

III.5.3.1. Bleu de Méthylène (BM)

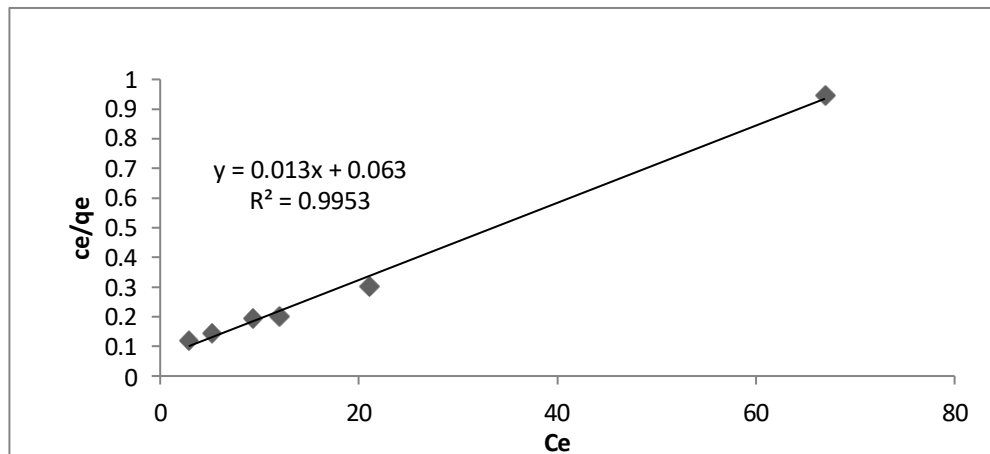


Figure III.13. Isotherme d'adsorption Langmuir pour l'adsorption de BM.

En linéarisant les données expérimentales du BM, le modèle de **Langmuir** a affiché un coefficient de corrélation ($R^2 = 0.9953$) très élevé et nettement supérieur à celui du modèle de Freundlich. Cette correspondance graphique parfaite prouve que l'adsorption du BM sur la boue activée brute s'effectue sur des sites spécifiques énergétiquement équivalents, formant une monocouche uniforme sur la surface, avec une excellente capacité maximale d'adsorption ($Q_{\max}$).

A partir de la courbe ci-dessus, il est possible de déterminer la capacité maximale et les constantes d'équilibre de Langmuir à l'aide de l'interception et la pente, respectivement (Fellahi Zohra Kaouther & Hadroug Nadjjet, 2024).

Le tableau ci-dessous indique leurs valeurs:

Tableau III.5. Les caractéristiques de Langmuir pour l'adsorption de BM.

Equation de Langmuir	$Q_{\max}(\text{mg/g})$	$K(\text{mg/L})$	R^2
$y=0.013x+ 0.063$	76.923	0.206	0.9953

III.5.3.2. Rouge Congo (RC)

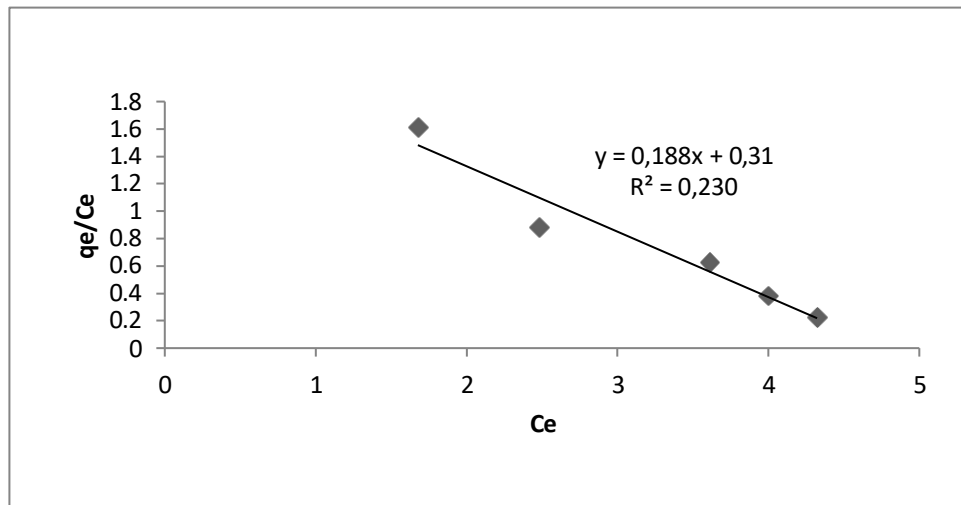


Figure III.14. Isotherme d'adsorption Langmuir pour l'adsorption de RC.

A partir de la courbe ci-dessus, il est possible de déterminer la capacité maximale et les constantes d'équilibre de Langmuir à l'aide de l'interception et la pente, respectivement (Fellahi Zohra Kaouther & Hadroug Nadjjet, 2024).

Le tableau ci-dessous indique leurs valeurs:

Tableau III.7 Les caractéristiques de Langmuir pour l'adsorption de RC.

Equation de Langmuir	Qmax(mg/g)	K(mg/g)	R ²
y=0.188x+0.31	5.319	0.606	0.230

III.5.4. Modèle de Freundlich :

Représenté graphiquement par (log qe) en fonction de (log Ce). Il suppose une adsorption multicouche sur une surface hétérogène. C'est le deuxième modèle que nous avons étudié, son équation linéaire est donnée par la formule suivante :

$$\text{Log } Q_e = 1/n \log C_e + \log K_f \quad (3)$$

Avec :

K_f : Constante de Freundlich liée à la capacité d'adaptation

$1/n$: Constante liée à l'intensité de l'adsorption.

III.5.4.1. Bleu de Méthylène (BM)

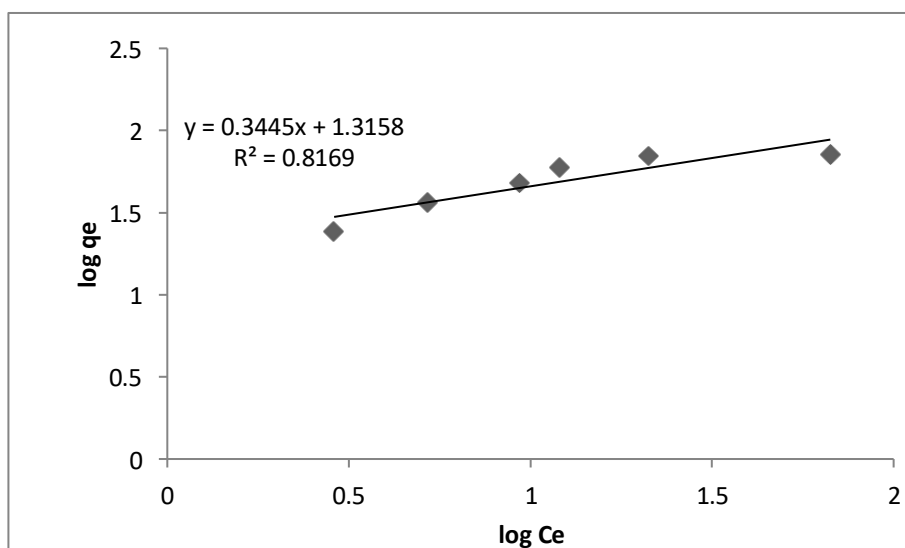


Figure III.15. Isotherme d'adsorption Freundlich pour l'adsorption de BM.

A partir de la courbe ci-dessus, il est possible de déterminer la capacité d'adsorption et les constantes de Freundlich à l'aide de la pente et l'interception, respectivement. Le tableau ci-dessous indique leurs valeurs:

Tableau III.6. Les caractéristiques de Freundlich pour l'adsorption de BM.

Equation de freundlich	n	K(mg/g)	R ²
y=0.3445 x +1.3158	2.902	20.691	0.8169

III.5.4.2. Rouge Congo (RC)

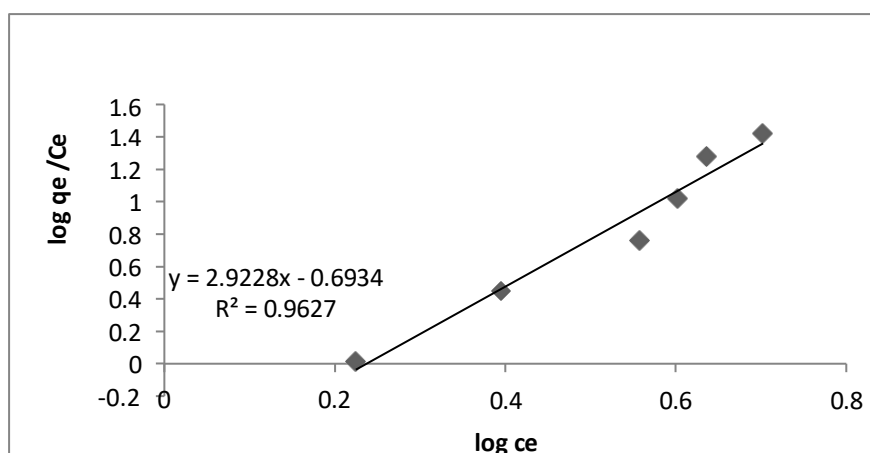


Figure III.16. Isotherme d'adsorption Freundlich pour l'adsorption de RC.

Apartir de la courbe ci-dessus, il est possible de déterminer la capacité d'adsorption et les constantes de Freundlich à l'aide de la pente et l'interception, respectivement.

Le tableau ci-dessous indique leurs valeurs:

Tableau III.8. Les caractéristiques de Freundlich pour l'adsorption de RC.

Equation de freundlich	n	K(mg/g)	R ²
$y=2.922x- 0.693$	0.3405	0.2106	0.962

Les résultats de la modélisation de l'équilibre d'adsorption du Rouge Congo (RC) sur la boue activée brute montrent une divergence totale entre les deux modèles appliqués. La représentation linéaire du modèle de **Langmuir** affiche un coefficient de détermination très faible ($R^2 = 0.2312$), ce qui indique une inadéquation flagrante avec ce modèle. En revanche, le modèle de **Freundlich** présente un ajustement nettement supérieur avec un coefficient de corrélation plus satisfaisant ($R^2 = 0.962$).

De plus, la valeur du paramètre de Freundlich ($n = 0.3405$, soit $1/n > 1$) traduit que l'adsorption est **défavorable** dans les conditions d'étude, ce qui peut être attribué aux forces de répulsion électrostatique entre les molécules anioniques du RC à mesure qu'elles s'accumulent sur la surface de la boue.

III.6. Cinétique d'adsorption

L'étude de la cinétique d'adsorption a été réalisée pour déterminer l'étape limitante de la vitesse de la réaction et son mécanisme, à l'aide de deux modèles cinétiques :

III.6.1. Pseudo-premier ordre :

Représenté graphiquement par $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps.

III.6.1.1. Bleu de Méthylène (BM)

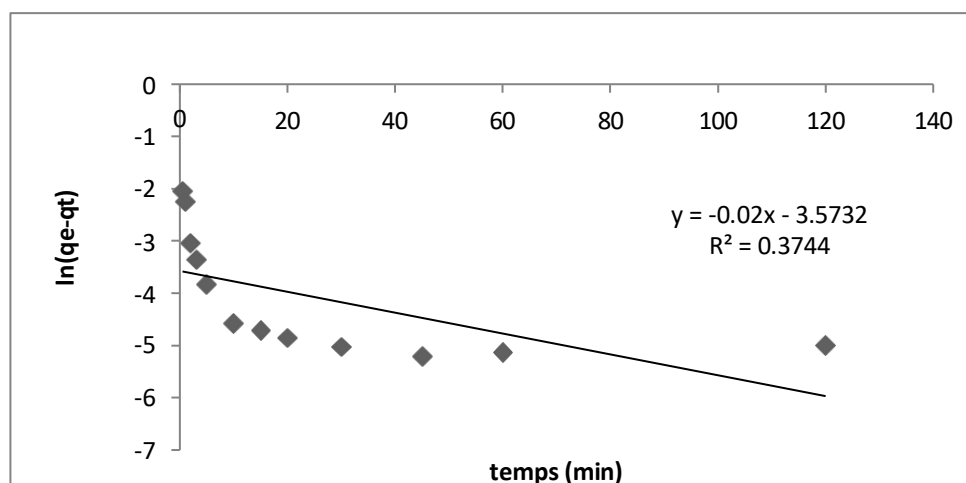


Figure III.17. La cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre pour le BM.

La représentation graphique de $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps pour le BM montre une dispersion des points expérimentaux et une faible linéarité (coefficient de détermination R^2 éloigné de 1). De plus, il existe un écart significatif entre la capacité d'adsorption calculée ($q_{e\text{calc}}$) et la valeur expérimentale ($q_{e\text{exp}}$). Par conséquent, ce modèle est inadéquat pour décrire la cinétique d'adsorption du BM.

III.6.1.2. Rouge Congo (RC)

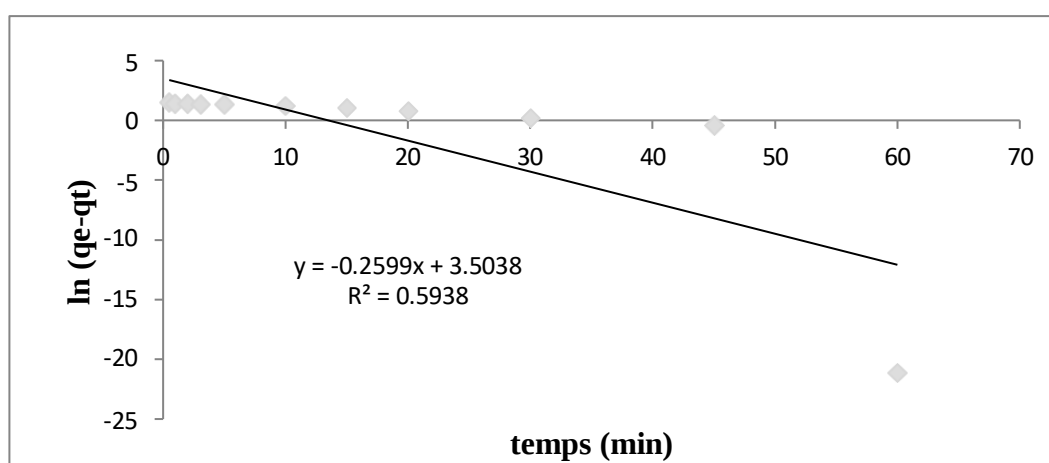


Figure III.18. La cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre pour le RC

De manière similaire au BM, la courbe du pseudo-premier ordre pour le Rouge Congo ne présente pas une bonne corrélation linéaire. L'insuffisance des coefficients de régression indique que ce modèle mathématique ne reflète pas fidèlement les phénomènes de transfert de masse qui ont lieu durant la rétention du RC sur la boue.

III.6.2. Pseudo-second ordre : Représenté graphiquement par t/q_t en fonction du temps.

III.6.2.1. Bleu de Méthylène (BM)

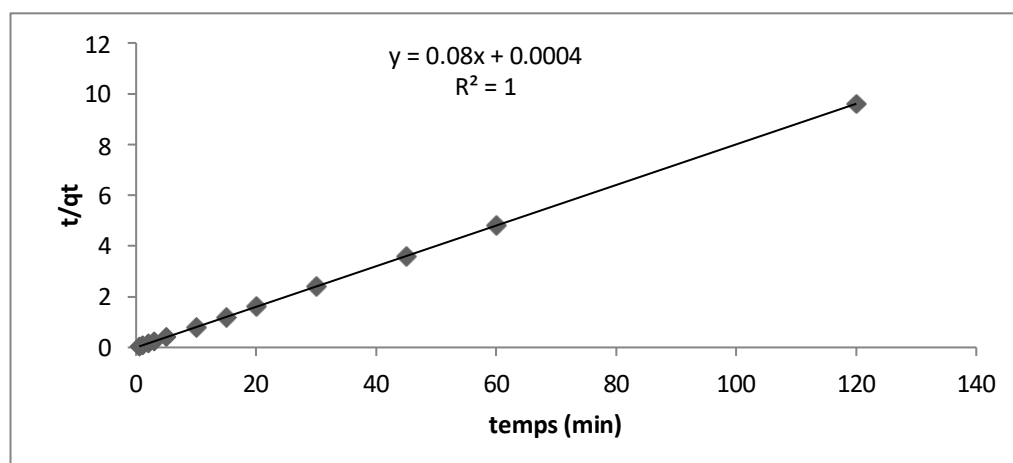


Figure III.19. La cinétique d'adsorption du pseudo second ordre pour le BM.

Les données expérimentales montrent un accord quasi-parfait et idéal avec le modèle du **pseudo-second ordre**, où la courbe de (t/q_t) forme une excellente ligne droite avec un coefficient de détermination proche de l'unité ($R^2 = 1$). De plus, la valeur de la capacité d'adsorption à l'équilibre calculée par le modèle (q_e) est en parfaite adéquation avec la valeur expérimentale réelle (q_e). Cela prouve rigoureusement que le mécanisme d'adsorption du BM est régi par une **chimisorption** (adsorption chimique), impliquant des échanges d'électrons ou des liaisons covalentes et ioniques entre les groupements fonctionnels de la boue et le colorant.

III.6.2.2. Rouge Congo (RC)

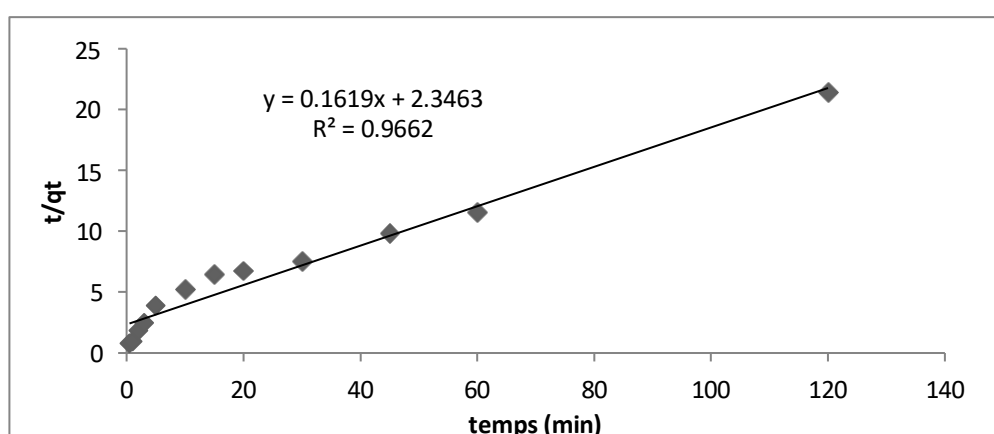


Figure III.20. La cinétique d'adsorption du pseudo second ordre pour le RC.

Le Rouge Congo (RC) affiche le même comportement cinétique performant. La représentation du modèle du **pseudo-second ordre** donne une excellente linéarité et une grande stabilité tout au long des intervalles de temps de l'expérience. Cette forte corrélation, ainsi que l'obtention de valeurs de q_e identiques à l'expérience, prouvent que le processus d'adsorption du Rouge Congo sur la boue brute est contrôlé par la réaction chimique de surface et les forces de liaison ioniques entre les molécules anioniques du RC et les groupements actifs de la boue activée brute.

Tableau III.9. Paramètres de cinétique d'adsorption de BM et RC.

ordre	Pseudo premier ordre			Pseudo second ordre		
paramètres	$K_1(\text{min}^{-1})$	$q_e(\text{mg/g})$	R^2	$K_2(\text{g/mg.min})$	$q_e(\text{mg/g})$	R^2
Bleu de Méthylène	0.02	0.028	0.3744	16	12.5	1
Rouge Congo	0.2599	33.24	0.5938	0.011	6.18	0.9662

Conclusion générale

Ce travail de recherche a été consacré à l'évaluation des capacités de rétention des boues activées en tant que bio-adsorbant à faible coût, appliqué à la décontamination d'effluents hydriques chargés en colorants. L'investigation s'est focalisée sur l'élimination de deux micropolluants organiques modèles : le Bleu de Méthylène (un colorant cationique) et le Rouge Congo (un colorant anionique). La démarche expérimentale a permis de cerner de manière approfondie l'influence des variables opératoires clés telles que la masse de l'adsorbant, le temps de contact et le pH du milieu.

Dans un premier temps, l'exactitude du suivi quantitatif de la concentration résiduelle des deux colorants par spectrophotométrie UV-Visible a été rigoureusement validée à travers l'établissement de courbes d'étalonnage précises.

L'étude systématique des paramètres physico-chimiques a mis en évidence des comportements distincts et des performances optimales propres à chaque système. En effet, l'extraction du Bleu de Méthylène s'est avérée particulièrement rapide et efficace, atteignant son équilibre après seulement 20 minutes de contact pour une masse optimale de 0,2 g de bio-adsorbant. En revanche, la décoloration des solutions du Rouge Congo a nécessité un temps de rétention plus prolongé, se stabilisant à 60 minutes avec une dose optimale fixée à 0,4 g.

Sur le plan cinétique, la modélisation des données expérimentales a révélé un excellent couplage avec le modèle du pseudo-second ordre pour les deux colorants. Ce résultat suggère que l'étape limitante du processus global est régie par une chimisorption, impliquant des forces de liaison chimiques entre les sites actifs de la boue et les molécules de polluants. Quant à l'équilibre d'adsorption, l'analyse des données à travers les modèles mathématiques a montré que le comportement du Bleu de Méthylène s'ajuste de manière idéale au modèle de Langmuir, indiquant une rétention en monocouche sur des sites énergétiquement homogènes. À l'inverse, le système Rouge Congo est mieux décrit par le modèle de Freundlich, ce qui traduit une adsorption multicouche se déroulant sur une surface hétérogène. **Ces profils d'isothermes ont été confirmés par les classifications de l'IUPAC et de Giles, précisant la nature des interactions et l'affinité entre le adsorbant et chaque colorant.**

L'analyse thermodynamique a apporté des éclaircissements fondamentaux sur la nature des interactions énergétiques, révélant un comportement endothermique pour les deux systèmes, bien que leurs mécanismes de spontanéité diffèrent. Pour le cas du Bleu de Méthylène, la positivité de l'enthalpie ($\Delta H^\circ = 10,98 \text{ kJ/mol}$) confirme le caractère endothermique du processus, qui s'avère spontané ($\Delta G^\circ < 0$) et accompagné d'un désordre croissant ($\Delta S^\circ = 0,0565 \text{ kJ/mol.K}$). À l'inverse, pour le Rouge Congo, l'adsorption est également

endothermique ($\Delta H^\circ = 24,73 \text{ kJ/mol}$) et s'accompagne d'un désordre croissant ($\Delta S^\circ = 0,0641 \text{ kJ/mol.K}$), mais elle présente un caractère non spontané ($\Delta G^\circ > 0$) dans les conditions de l'étude, l'élévation de la température favorisant néanmoins la faisabilité de la réaction.

En somme, cette étude confirme que la valorisation des boues activées représente une alternative écologique, performante et hautement économique, s'imposant comme un candidat prometteur pour le développement de procédés durables d'épuration des eaux usées industrielles. Afin d'élargir l'horizon d'application de ce travail, il serait particulièrement intéressant d'approfondir l'investigation structurale de la surface de ce matériau par des analyses avancées telles que la spectroscopie FTIR, ou encore de tester son efficacité en système dynamique en colonne face à des effluents industriels réels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- **Boudraa, I., Bougherara, H., Cheurfi, W., & Kebabi, B. (2017).** Characterization of the sludge of Batna (Algeria) waste water treatment plant for its valorization. *Journal of New Technology and Materials*, 7(1), 64–68.
- **Bouanika, M., & Djedia, S. (2020).** Optimisation du séchage et de la valorisation des boues mixtes des stations d'épuration (Mémoire de Master). Département de Génie des Procédés, Université de Mostaganem, Algérie.
- **Cheurfi, W., Bougherara, H., Bentabet, O., Batouche, K., & Kebabi, B. (2009).** Characterization and valorization of sewage sludge. *Journal of Scientific Study & Research: Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 10(3), 235–242.
- **Cheurfi, W., Bougherara, H., & Kebabi, B. (2016).** Evaluation of the environmental quality of sewage sludge from Batna treatment plant for agricultural use. *Journal of Scientific Study & Research: Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 17(1), 45–54.
- **Giles, C. H., MacEwan, T. H., Nakhwa, S. N., & Smith, D. (1960).** Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 3973–3993.
- **Haouam, A., & Hassaine, F. (2020).** Stabilisation chimique et biologique des boues d'épuration par l'utilisation de la chaux (Mémoire de Master). Université d'Oran, Algérie.
- **Ho, Y. S., & McKay, G. (1999).** Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465.
- **Kardache, L. (2016).** Valorisation énergétique des boues de la station d'épuration de Boumerdes (Mémoire de Master). Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université M'hamed Bougara Boumerdes, Algérie.
- **Ladjel, F., & Abbou, S. (2014, 25 mars).** Perspectives de valorisation agricole et énergétique des boues issues des STEP en Algérie [Présentation de conférence]. SIEE Pollutec, Office National de l'Assainissement (ONA), Oran, Algérie.
- **Laskri, N. (2016).** Dépollution des déchets riches en matière organique (boues de station d'épuration et déchets d'abattoir) par digestion anaérobie: Valorisation énergétique et production du méthane (Thèse de Doctorat en Sciences). Département

- de génie des procédés, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.
- **Mezzou, R., & Naïli, K.** (2017). Gestion des flux et extraction du surplus des boues activées dans les stations d'épuration à faible charge (Projet de fin d'études). Université de Tlemcen, Algérie.
- **Rebbouh, S.** (2024). Étude du métabolisme de la pollution carbonée et caractérisation morphologique des floccs biologiques (Thèse de Doctorat). Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université d'Oran 1, Algérie.
- **Rodier, J.,** Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau (9e éd.). Dunod.
- **Seddiki, M., & Ould Khesal, A.** (2025). Modélisation de la sédimentation gravitaire et déshydratation mécanique des boues de la STEP de Sidi Ali (Mémoire de Master). Département de Génie de l'Environnement, Université de Mostaganem, Algérie.
- **Wankasi, D., John, Tarawou, T., & Horsfall, M.** (2006). Adsorption of toxic dyes (Methylene Blue and Malachite Green) from aqueous solution using activated biomass. African Journal of Biotechnology, 5(22), 2341-2349.