

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر

Faculté des Sciences et Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Science de la matière

قسم علوم المادة

MEMOIRE

Elaboré en vue de l'obtention du diplôme de master en chimie

Spécialité : Chimie Inorganique et environnement

Intitulé :

Étude expérimentale de la rétention des micropolluant par une substance naturelle (le sable) de la région de machria

Présenté par :

- Bouazza Meriem yasmine
- Benissad Amina

Soutenu le 21-06-2025 devant le jury composé de :

Dr : Mme. Mostéfai .A	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Président
Dr : Mme Miloudi.S	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Encadrant
Dr : Mme Chabani.M	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Rapporteur
Dr : Mme. Ouldkada. Z	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Examineur

Année universitaire 2024/2025



Remerciement

Avant tout, je rends grâce à Dieu, source de force, de paix et de patience, qui m'a guidée et soutenue à chaque étape de ce travail

Nos remerciements à nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur présence rassurante et leurs prières silencieuses qui nous ont portée dans les moments les plus difficiles

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadrante Mme Miloud Safia, pour sa disponibilité, sa bienveillance et la richesse de son accompagnement.

Nous remercions chaleureusement madame la présidente mostfai Asma , et les membres de jurys madame Walid kada Zahra et madame chabani Malika pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail.

Une pensée reconnaissante à l'équipe du laboratoire sur tt Mr : Ben Mhamed , Mr : laaradj et Mme : scumia , pour leur précieuse aide technique et leur accueil.

Et enfin, un merci tout particulier à nos amies fidèles, pour leur présence réconfortante, leurs encouragements et leurs sourires partagés

Dédicace

À moi-même, Pour ma persévérance, mon courage et ma foi en ce chemin. Pour chaque nuit blanche, chaque doute surmonté, . Ce travail est le fruit de ma détermination, et je me le dédie avec fierté.

À ma mère, Pour ton amour inconditionnel, ta tendresse, ta patience infinie, et cette force douce que tu m'as transmise à chaque étape de ma vie.

À mon père, Pour ton courage, tes sacrifices silencieux et ta confiance en mes capacités. Ta sagesse a toujours été un phare dans mes moments de doute.

À ma sœur Meriem, Merci d'avoir été ma confidente, mon refuge et mon soutien indéfectible. Ta présence à mes côtés, ton affection ont illuminé ce long parcours.

À mes frères Younes et Ahmed .

À toute ma famille

À Amina mon amie de cœur, merci pour la bonne compagnie ton écoute, ta lumière et ta présence constante Ton soutien tout au long de ces cinq années

À mes amis proches, Pour vos sourires, vos paroles qui relèvent, et votre amitié précieuse dans cette aventure.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à ce chemin. Ce mémoire vous est dédié, avec tout mon respect et ma reconnaissance

Meriem Yasmine.....

Dédicace

À celle qui m'a donné la vie, ma chère maman,

Pour ton amour inconditionnel, tes sacrifices silencieux, et tes prières qui m'ont portée dans les moments les plus durs. Tu es ma lumière, mon pilier.

À mon père, pour sa force tranquille, son soutien discret mais puissant, et

Liste des abréviations

- **BM** : Bleu de méthylène
- **Cr** : Chrome
- **Pb** : Plomb
- **SB** : Sable brut
- **SL** : Sable lavé
- **UV-Vis** : Spectrophotométrie Ultraviolette-Visible
- **IR** : Spectroscopie Infrarouge
- **XRF** : Spectrométrie de Fluorescence X
- **ICP-MS** : Spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif
- **DRX** : Diffraction des rayons X
- **SAA** : Spectrométrie d'absorption atomique
- **HPLC-AA** : Chromatographie liquide à haute performance couplée à l'absorption atomique
- **FTIR** : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
- **MES** : Matières En Suspension
- ΔG° : Variation de l'énergie libre standard
- ΔH° : Variation de l'enthalpie standard
- ΔS° : Variation de l'entropie standard
- **Q_e** : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- **K** : Constante de vitesse ou d'équilibre
- **R²** : Coefficient de corrélation
- **q_m** : Capacité maximale d'adsorption
- **K_L** : Constante de Langmuir
- **K_f** : Constante de Freundlich
- **N** : Intensité d'adsorption dans le modèle de Freundlich
- **T** : Température (K)
- **LnK_c** : Logarithme naturel de la constante d'équilibre

Liste des tableaux

Partie I : d'étude biobibliographique

Tableau 1: Différents types de dégrillage.....	10
Tableau 2 : Fiche technique de bleu de méthylène.....	20
Tableau 3 : Propriété physico-chimiques du bleu de méthylène	21
Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques du plomb	34
Tableau 5 : La différence entre adsorption physique et adsorption chimique	42
Tableau 6 : Principaux minéraux du sable.....	47

Partie II : d'étude expérimentale

Tableau 1 : Récapitulatif des réactifs utilisés	57
Tableau 2 : Evolution du PH du sable au cours du traitement et lavage de SB.....	65
Tableau 3 : Evolution de la masse de matériau SB au cours du séchage:	66
Tableau 4: Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents temps à pH=8 (SB).....	74
Tableau 5: Résultats cinétique de la rétention du (Cr) à différents temps à pH=8 (SL).....	75
Tableau 6: Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents masse à pH=8 (SB):.....	76
Tableau 7 : Résultats cinétique de la rétention du (Cr) à différents masse à pH=8 par le (SL)	77
Tableau 8 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents pH (SB).....	78
Tableau 9 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents pH par le (SL) :	78
Tableau 10 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents température par le (SL) au 10 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents température (SB) :	80
Tableau 12 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents temps à pH=8 par le (SB).....	82
Tableau 13: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents masse à pH=8:	83
Tableau 14 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents masse à pH=8 par le (SL):.....	84
Tableau 15: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents pH par le (SB):	85
Tableau 16 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents pH par le (SL):	85
Tableau 17 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents température par le (SB)	86
Tableau 18: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents température par le (SL)	87
Tableau 19 : Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents temps à pH=8 par le (SB)	88
Tableau 20 : Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents temps à pH=8 par le (SL)	89
Tableau 21: Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents masse à pH=8 par le (SB).....	90
Tableau 22: Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents masse à pH=8 par le (SL)	91
Tableau 23: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents pH par le (SB)	92
Tableau 24: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents pH par le (SL).....	92
Tableau 25 : Résultats cinétique de la rétention du BM à différents température par le (SB)	93

Tableau 26: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents temperature par le (SL)n	94
Tableau 27 :Constantes de Freundlich et Langmuir :	99
Tableau 28 :Les Valeurs des paramètres cinétique du premier et second pseudo ordre :	102
Tableau 29 :Les Paramètres thermodynamiques :	104

Liste des figures

Partie I : d'étude biobibliographique

Figure 1: Le dégrillage.....	9
Figure2 : bleu de méthylène	19
Figure 3 : la Structure moléculaire de bleu de méthylène:	20
Figure 4: Le Plomb à l'état naturel	33
Figure 5: Phénomène d'adsorption.....	40
Figure 6: Différents couleur du sable.	47

Partie II : d'étude expérimentale

Figure1 :Schéma de principe de la spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF)	59
Figure 2: spectrometre infrarouge	59
Figure3 :Schéma des caractéristiques essentielles d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).	60
Figure 4 : Spectrophotomètre UV- Visible modèle :.....	61
Figure 5 : Principe du spectrophotomètre UV-Visible.6. Métal étudié dans cette recherche :	62
Figure 6: Evolution de la masse du SB en fonction du temps.6.1. le plomb.....	66
Figure 7 : Courbe d'étalonnage de Chrome.....	68
Figure 8 : Courbe d'étalonnage de plomb	68
Figure 9 : Courbe d'étalonnage de Bleu de méthylène.:	68
Figure 10 : Spectre infrarouge de SB:	69
Figure 11: Spectre infrarouge de Cr par le SB :	69
Figure 12: Spectre infrarouge de Pb par le SB	70
Figure 13: Spectre infrarouge de BM par le SB	70
Figure 14: Spectre infrarouge de SL.....	70
Figure 15 : Spectre infrarouge de Cr par le SL.....	71
Figure 16: Spectre infrarouge de Pb par le SL	71
Figure 17: Spectre infrarouge de BM par le SL	71
Figure18 : Effet de temps d'agitation du Cr par le (SB).....	75
Figure 19 : Effet de temps d'agitation du Cr par le (SL):.....	75
Figure 20 : Effet de masse du Cr par le (SB).....	76
Figure 21 : Effet de masse du Cr par le (SL).....	77
Figure 22 :Effet de pH du Cr par le (SB).....	78
Figure 23 : Effet de pH du Cr par le (SL))	79
Figure 24: Effet de temperature du Cr par le (SB)	80
Figure 25 : effet de temperature du Cr par le (SL)	81
Figure 25 :Effet de temp dagitation de Pb par le (SB)	82
Figure 26 : Effet de temp dagitation de Pb par le (SL).....	82

Figure 27 :Effet de masse de Pb par le (SB).....	83
Figure 28 : Effet de masse de Pb par le (SL).....	84
Figure 29 : Effet de pH de Pb par le (SB).....	85
Figure 30 : Effet de pH de Pb par le (SL).....	86
Figure 31 : Effet de température de Pb par le (SB).....	87
Figure 32: Effet de température de Pb par le (SL)	88
Figure 33: Effet de temp dagitation de BM par le (SB)	89
Figure 34: Effet de temp dagitation de BM par le (SL).....	89
Figure 35:Effet de masse de BM par le (SB).....	90
Figure 36:Effet de masse de BM par le (SL).....	91
Figure37 :Effet de pH de BM par le (SB).....	92
Figure38 : Effet de pH de BM par le (SL).....	93
Figure 39: Effet de température de BM par le (SB)	94
Figure40 : Effet de température de BM par le (SL).....	94
Figure 41: Isotherme de sorption de Pb par le (SB) est de type L.....	95
Figure42 : Isotherme de sorption de Cr par le (SB) type L	95
Figure 43: Isotherme de sorption de BM par le (SB) de type L	96
Figure 44: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de Pb par le (SB)	97
Figure 45: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de Cr par le (SB)	97
Figure 46: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de BM par le (SB)	98
Figure 47 : Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de Cr par le (SB):.....	98
Figure 48: Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de Pb par le (SB) :	98
Figure 49: Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de BM (SB) :	99
Figure 50: La cinétique du Premier pseudo ordre du Cr (SB)	100
Figure 51 : La cinétique du Premier pseudo ordre du Pb (SB).....	100
Figure 52 : La cinétique du Premier pseudo ordre du BM (SB).....	101
Figure53 : La cinétique du second pseudo ordre du Cr (SB)igure 12: Spectre infrarouge de Pb par le SB	101
Figure54 : La cinétique du second pseudo ordre du Pb (SB)e :	101
Figure55 : La cinétique du second pseudo ordre du BM (SB)	100

Table des matières

<i>Remerciement</i>	2
---------------------------	---

Dédicace	3
Liste des abréviations	4
Liste des tableaux.....	5
Liste des figures	7
Table des matières.....	10
Résumé	Erreur ! Signet non défini.
Introduction Générale	1
Partie I : d'étude biobibliographique	5
I. La pollution hydrique	6
I.1 Introduction	6
I.2 Définition de la pollution hydrique	6
I.3 Sources de pollution :.....	6
I.3.1 Pollution naturelle :	7
I.3.2 Pollution atmosphérique :.....	7
I.3.3. Pollution urbaine :	7
I.3.4. Pollution industrielle :	8
I.3.5. Pollution agricole :	8
I.3.6. Pollution accidentelle :	8
I.4. Types de polluants:.....	9
I.4.1. polluant physique:	9
I.4.2 Polluants biologiques:	9
I.4.3 Polluants chimique:	9
II. Traitement des eaux	10
II.1. Le prétraitement :	10
II.2. Le traitement secondaire :	11
II.3. Traitement tertiaire :.....	12
II.4. La déphosphatation :	12
II.5. La désinfection :.....	12
II.6. Les membranes :	12
II.7. Le lagunage tertiaire :.....	13
II.8. L'infiltration/percolation :.....	13
II.9. Traitement quaternaire:.....	13
II.10. Traitement des boues d'épuration:.....	13
III. Les micropolluants.....	14
III.1. Définition des micropolluants.....	14
III.2. Groupes de micropolluants	14
III.3. Colorants.....	15
III.3.1 Généralités	15

II.3.2 Définition des colorants	16
III.3.3. Origine et classification	16
III.3.4. Applications	17
III.3.4.1. Textile :	17
III.3.4.2. Agroalimentaire :	17
III.3.4.3. Cosmétique :	17
III.3.4.4. Impression :	17
III.3.4.5. Plastique :	18
III.3.5. Propriétés	18
III.3.5.1. Solubilité :	18
III.3.5.2. Stabilité :	18
III.3.5.3. Affinité :	18
III.3.5.4. Sélectivité :	18
III.3.6. Effets des colorants	18
III.3.6.1. Toxicité directe :	18
III.3.6.2. Cancérogénicité :	19
III.3.6.3. Perturbation endocrinienne :	19
III.3.6.4. Bioaccumulation :	19
III.3.7. Colorant étudié	19
III.3.7.1. Structure chimique:	20
III.3.7.2. Propriétés physiques du BM:	21
III.3.7.3 Usages :	21
III.3.7.4. Toxicité :	22
III.3.7.5. Détection et analyse :	22
III.3.7.6. Dégradation et persistance :	22
III.4. Métaux Lourds	23
III.4.1. Généralités sur les métaux lourds	23
III.4.2. Les sources naturelles	24
III.4.3. Les sources anthropiques	27
III.4.4. Voies de contamination des métaux lourds	30
III.4.5. Effets sur la santé humaine :	32
III.4.6. Métal étudié dans cette recherche :	33
III.4.6.1. le plomb	33
III.4.6.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du plomb :	33
III.4.6.1.2. Effets sur la santé :	34
III.4.6.1.3. Formes de plomb :	35
III.4.6.1.4. Détection et analyse du plomb :	36
III.4.6.1.5. Dégradation et persistance du plomb :	36

III.4.6. Le Nitrate de chrome (III).....	37
III.4.6.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du nitrate de chrome (III) :.....	37
III.4.6.2.2. Effets sur la santé :.....	37
III.4.6.2.3. Formes et applications :.....	38
III.4.6.2.4. Détection et analyse du nitrate de chrome (III) :	38
III.4.6.2.5. Stabilité et dégradation :	39
IV. Généralités sur l'adsorption	39
IV.1. Introduction :	39
IV.2. Définition de l'adsorption	39
IV.3. Types d'adsorption.....	40
IV.3.1. Adsorption physique (physisorption)	40
IV.3.2 . Adsorption chimique (chimisorption)	41
IV.4. Mécanisme d'adsorption	42
IV.5. Isothermes d'adsorption	42
IV.5.1. Classification des isothermes d'adsorption	42
IV.6. Modèles d'isothermes d'adsorption	44
IV.6.1. Modèle de Langmuir	44
IV.6.2. Isotherme de Freundlich	45
IV.7. Matériau naturel (SB).....	45
IV.7.1. Définition du sable :	45
IV.7.2. Composition du sable	46
IV.7.3. Caractéristiques physico-chimiques	48
IV.7.4. Utilisation	49
IV.7.5. Différents types de sable	49
IV.7.5.1. Sables naturels	49
IV.7.5.2. Sables artificiels.....	50
IV.7.5.3. Différents types de sable disponibles sur le marché.....	50
IV.7.6. Utilisation du sable dans la purification de l'eau	51
IV.7.6.1. Filtres à sable lent.....	51
IV.7.6.2. Puits de sable	51
IV.7.6.3. Bassins de décantation avec du sable	52
IV.7.6.4. Filtres à sable multiples	52
IV.7.6.5. Purification de l'eau avec des récipients en sable.....	52
IV.7.6.6. Filtre à sable pour piscine.....	53
IV.7.7. Avantages du sable comme un filtrant naturel	53
Partie II : d'étude expérimentale.....	55
Introduction :	56
1.Appareils et instruments utilisés:	57

1.1. Verreries:	58
1.2. Technique d'analyse utilisée:	58
1.2.1. Spectroscopie Infrarouge (IR)	58
1.2.2. Spectrophotométrie UV-Visible	59
2. Protocol de traitement du matériau utilisé:	60
2.1. Préparation de matériau (SB):	62
2.2. Détermination du temps nécessaire pour le séchage du SB :	64
3. Protocole expérimentale d'adsorption des métaux lourds et colorant :	64
3.1. Préparation des solutions :	64
3.2. Courbes d'étalonnages :	65
4. Etude Spectroscopique par IR de l'adsorption du sable	67
4.1. Les spectres de l'infrarouge :	67
4.2. Les spectres infrarouges du sable lavée :	68
4.3. Interprétation générale des spectres :	70
4.4. Les spectres de sable lavé :	70
5. Méthode de l'adsorption des micropolluants (inorganique Pb ,Cr et organique BM).	71
5.1. Calcul du rendements (R%) et quantités adsorbées :	72
6. Etude cinétique de l'adsorption du chrome (Cr) pour le sable brute et lavée :	72
6.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:	72
6.2. Effet de masse :	74
6.3. Effet de pH :	75
7. Etude cinétique de l'adsorption du plomb (Pb) pour le (SB) et le (SL)	79
7.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:	79
7.2. Effet de masse :	81
7.3. Effet de pH :	82
8. Etude cinétique de l'adsorption du bleu de méthylène (BM) pour le (SB) et (SL)	86
8.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:	86
8.2. Effet de masse :	88
9. Modélisation d'isotherme d'adsorption :	94
9.1. Modèle de Langmuir :	95
9.2. Modèle de Freundlich :	96
Conclusion générale.....	104
Liste des références.....	Erreur ! Signet non défini.

Résumé

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux naturels pour le traitement des eaux usées. Il se divise en deux grandes parties : la première est une étude bibliographique approfondie sur la pollution hydrique, les types de micropolluants (colorants et métaux lourds), ainsi que les techniques classiques de traitement et le mécanisme d'adsorption. La seconde partie, expérimentale, porte sur l'étude comparative de l'efficacité d'un matériau naturel – le sable, sous ses formes brute (SB) et lavée (SL) – pour adsorber trois micropolluants : le Bleu de Méthylène (BM), le Plomb (Pb) et le Chrome (Cr). À travers une série d'expériences en laboratoire, les résultats ont montré que le sable lavé présente de meilleures performances d'adsorption, notamment dans les conditions acides. Les études isothermiques, cinétiques et thermodynamiques ont confirmé que le processus est spontané, endothermique et suit principalement le modèle de Freundlich et le pseudo-second ordre. Cette recherche souligne le potentiel des matériaux simples et écologiques dans le traitement des eaux contaminées, apportant une alternative prometteuse aux méthodes industrielles coûteuses.

Mots-clés : Adsorption ; Micropolluants ; Sable Naturel

Abstract

This research work falls within the framework of enhancing natural materials for the treatment of wastewater. It is divided into two main parts: the first is an in-depth bibliographic study on water pollution, types of micropollutants (dyes and heavy metals), as well as classical treatment techniques and the adsorption mechanism. The second, experimental part focuses on a comparative study of the effectiveness of a natural material – sand, in its raw (SB) and washed (SL) forms – in adsorbing three micropollutants: Methylene Blue (MB), Lead (Pb), and Chromium (Cr). Through a series of laboratory experiments, the results showed that washed sand has better adsorption performance, especially under acidic conditions. Isothermal, kinetic, and thermodynamic studies confirmed that the process is spontaneous, endothermic, and mainly follows the Freundlich model and the pseudo-second-order kinetics. This research highlights the potential of simple and eco-friendly materials in treating contaminated water, offering a promising alternative to expensive industrial methods.

Keywords: Adsorption; Micropollutants; Natural Sand

المخلص

يندرج هذا العمل البحثي ضمن إطار تثمين المواد الطبيعية في معالجة المياه المستعملة. وهو مقسم إلى جزأين رئيسيين: يتناول الجزء الأول دراسة ببليوغرافية معمقة حول التلوث المائي، وأنواع الملوثات الدقيقة (كالملونات والمعادن الثقيلة)، بالإضافة إلى تقنيات المعالجة التقليدية وآلية الامتزاز. أما الجزء الثاني، التجريبي، فيتمحور حول دراسة مقارنة لفعالية مادة طبيعية – الرمل، بصيغته الخام (SB) والمغسول (SL) – في امتزاز ثلاثة ملوثات دقيقة: الميثيلين الأزرق (BM)، الرصاص (Pb)، والكروم (Cr). ومن خلال سلسلة من التجارب المخبرية، أظهرت النتائج أن الرمل المغسول يتميز بأداء امتزازي أفضل، خصوصاً في الظروف الحمضية. كما أكدت الدراسات الإيزوثرمية والحركية والحرارية أن العملية تلقائية، ماصة للحرارة، وتتبع بشكل رئيسي نموذج فروندليخ ونموذج الرتبة الثانية الزائفة. تبرز هذه الدراسة الإمكانيات الواعدة للمواد البسيطة والصديقة للبيئة في معالجة المياه الملوثة، باعتبارها بديلاً اقتصادياً للتقنيات الصناعية المكلفة.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز؛ الملوثات الدقيقة؛ الرمل الطبيعي

Introduction Générale

La pollution de l'eau est devenue l'un des problèmes les plus préoccupants auxquels le monde actuel est confronté. Cette situation résulte de l'augmentation des activités humaines entraînant ainsi la contamination de l'eau par divers polluants. Cette pollution entraîne des modifications qui touchent la composition fondamentale de l'eau telles que ses propriétés chimiques, physiques et biologiques, ce qui la rend impropre à l'utilisation.

Parmi les sources qui contribuent à la pollution de l'eau, on trouve les déchets industriels, les pesticides agricoles ainsi que la pollution atmosphérique. Ces facteurs combinés augmentent la charge polluante des ressources hydriques, affectant non seulement la qualité de l'eau mais aussi la santé des écosystèmes aquatiques.

Les eaux usées représentent des risques et des menaces pour la santé publique et l'environnement. C'est pourquoi leur traitement est indispensable et essentiel. Ce traitement se déroule en plusieurs étapes afin d'éliminer le maximum de polluants qu'elles contiennent, ce qui permet de réduire l'impact négatif de ces rejets sur les milieux naturels et humains.

Les micropolluants sont des substances chimiques présentes dans les eaux usées et qui proviennent généralement de sources industrielles, agricoles ou domestiques. Ils se caractérisent par leur toxicité même à de très faibles concentrations, et représentent donc un danger pour la santé humaine et pour l'environnement. Ces micropolluants se divisent en deux grandes catégories : d'une part, les colorants, qui sont issus notamment des industries textiles, des médicaments et des produits cosmétiques ; d'autre part, les métaux lourds, qui proviennent principalement des déchets urbains, des activités minières et industrielles, et qui constituent une source importante de pollution des eaux usées.

L'adsorption est considérée comme l'une des méthodes privilégiées pour éliminer les micropolluants dans les eaux, grâce à sa capacité élevée à capter une grande quantité de ces micropolluants, quelle que soit leur nature. De plus, elle se distingue par son caractère économique, contribuant ainsi à réduire les coûts d'exploitation et à protéger les ressources naturelles. En outre, elle permet de réduire les risques sanitaires et environnementaux liés à la présence des micropolluants, ce qui en fait une option efficace et durable pour le traitement des eaux.

Cette étude vise à évaluer l'efficacité du sable dans l'élimination des micropolluants présents dans l'eau, précisément les colorants (Bleu de méthylène) et les métaux lourds (le plomb et le chrome).

Introduction générale

Le sable, en tant que matériau naturel, présente l'avantage d'être abondant, peu coûteux et écologique, ce qui en fait un candidat idéal pour les procédés d'adsorption visant la dépollution de l'eau.

Notre travail se devise en trois parties principales :

Dans la première partie, nous avons abordé la partie bibliographique en nous intéressant à la pollution de l'eau et à ses différentes sources, puis nous avons examiné le traitement des eaux et ses diverses étapes. Par la suite, nous avons mis l'accent sur les micropolluants, notamment le plomb, le chrome et le bleu de méthylène. Nous avons également défini la technique d'adsorption et expliqué ses modes d'utilisation dans la dépollution des eaux. Enfin, nous avons étudié les caractéristiques du sable, ses différents types et les raisons pour lesquelles il a été choisi comme matériau naturel adsorbant.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'étude des substances chimiques et des techniques expérimentales utilisées. Nous avons commencé par la préparation et la purification minutieuse du sable afin de garantir l'absence d'impuretés et d'assurer sa pureté chimique, condition essentielle pour évaluer son efficacité en tant que matériau adsorbant naturel. Ensuite, nous avons expliqué les protocoles expérimentaux adoptés dans les essais en laboratoire, et nous avons discuté les résultats obtenus concernant l'adsorption des micropolluants étudiés, tel que le plomb, le chrome, et le bleu de méthylène.

En troisième partie nous avons rédigé une conclusion et résumé les résultats obtenus au cours de l'étude.

Partie I : d'étude biobibliographique

I. La pollution hydrique

I.1 Introduction

La pollution de l'eau est devenue l'une des préoccupations environnementales majeures de notre époque. Elle résulte principalement des activités humaines intensives, telles que l'industrialisation, l'agriculture intensive, l'urbanisation croissante, ainsi que la mauvaise gestion des déchets domestiques et industriels. Ces pollutions affectent la qualité des eaux de surface et souterraines, mettant en péril la santé humaine, les écosystèmes aquatiques et l'équilibre environnemental global. D'où l'urgence d'agir à travers des politiques publiques, des actions de sensibilisation, et des traitements appropriés des eaux usées.

I.2 Définition de la pollution hydrique

La pollution hydrique désigne l'altération des propriétés physiques, chimiques ou biologiques de l'eau, par l'introduction de substances polluantes, de microorganismes pathogènes, ou encore d'énergies (chaleur, radioactivité), rendant l'eau impropre à ses usages naturels (consommation humaine, vie aquatique, usage agricole ou industriel). Cette pollution peut être ponctuelle, lorsqu'elle provient d'une source identifiable (ex. : déversement industriel), ou diffuse, lorsqu'elle est dispersée (ex. : ruissellement agricole contenant des nitrates ou des pesticides).

La pollution de l'eau peut être définie comme :¹ « Toute modification de la composition de l'eau naturelle, provoquée par l'activité humaine ou non, susceptible de porter atteinte à sa potabilité, à ses utilisations industrielles, agricoles ou domestiques, ou à l'équilibre des milieux aquatiques »

I.3 Sources de pollution :

Les sources de pollution sont classées selon leur origine. Cette classification permet de comprendre les différentes façons dont la pollution affecte les écosystèmes et l'environnement, et d'adapter les stratégies pour réduire ses impacts. Parmi les principales sources de pollution, on distingue la pollution naturelle, atmosphérique, urbaine, industrielle, agricole et accidentelle.

¹ Rodier, J. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9^e édition. Paris : Dunod, 2009, p. 45.

I.3.1 Pollution naturelle :

La pollution naturelle résulte de phénomènes géologiques, biologiques ou atmosphériques qui se produisent sans intervention humaine. Ces phénomènes naturels comprennent des éruptions volcaniques, des déversements d'hydrocarbures sous-marins ou encore des processus de dégradation biologique. Par exemple, les volcans peuvent libérer des gaz tels que le dioxyde de soufre qui, lorsqu'ils interagissent avec l'humidité atmosphérique, peuvent provoquer des pluies acides.² Ce phénomène naturel peut également entraîner une altération de la qualité de l'eau et avoir un impact sur les écosystèmes aquatiques. Les fuites naturelles de pétrole et d'hydrocarbures sous-marins peuvent également contribuer à la pollution des mers et océans.

I.3.2 Pollution atmosphérique :

La pollution atmosphérique fait référence aux polluants qui sont émis dans l'air, puis transportés vers le sol et l'eau, souvent par la pluie. Les principales sources de pollution atmosphérique comprennent les gaz et solides en suspension qui proviennent des véhicules, des usines, et des centrales thermiques. Lorsque l'eau de pluie entre en contact avec ces polluants, elle peut devenir contaminée. Par exemple, les gaz tels que (CO), (SO₂), ainsi que les poussières fines, sont rejetés dans l'air par les activités humaines. Ces particules sont ensuite envoyées au sol lors des pluies, ce qui entraîne une contamination de l'eau de surface et du sol.

Les conséquences peuvent être graves pour les écosystèmes aquatiques, car ces polluants peuvent modifier le pH de l'eau et affecte la biodiversité.³

I.3.3. Pollution urbaine :

La pollution urbaine est principalement causée par les rejets domestiques et industriels dans les zones urbaines. Ces polluants proviennent de diverses activités humaines telles que les activités résidentielles (eaux usées, déchets ménagers), les nettoyages collectifs, et les produits chimiques rejetés par certains habitants. Les polluants urbains peuvent inclure des produits chimiques industriels, des métaux lourds, des plastiques et des produits de nettoyage⁴. Les zones urbaines sont souvent confrontées à des problèmes de gestion des déchets et des eaux usées, qui augmentent la concentration de polluants dans les plans d'eau locaux, affectant ainsi la qualité de l'eau et de l'air.

² Bourcier, Philippe. La pollution naturelle et ses impacts sur l'environnement. Éditions Techniques, Paris, 2015, pp. 45-52.

³ Duval, Jean-Claude. La pollution de l'air et ses conséquences. Presses Universitaires de France, 2018, pp. 110-125.

⁴ Lefèvre, Marie. Pollution urbaine: causes et solutions. Dunod, Paris, 2019, pp. 78-90.

I.3.4. Pollution industrielle :

La pollution industrielle est l'une des formes de pollution les plus courantes et les plus nuisibles. Elle résulte de l'utilisation intensive des ressources naturelles et de la production de biens dans des usines et des sites industriels. Les effluents industriels, tels que les eaux usées, les gaz d'échappement, les produits chimiques, et les résidus solides, sont souvent déversés directement dans l'environnement, sans traitement adéquat. Ce manque de traitement des effluents industriels entraîne des changements significatifs dans la composition chimique de l'eau, du sol et de l'air⁵. En outre, certaines industries utilisent des produits chimiques dangereux qui peuvent contaminer les nappes phréatiques et affecter les populations locales.

I.3.5. Pollution agricole :

La pollution agricole est causée par l'utilisation excessive et non réglementée de produits chimiques dans l'agriculture, tels que des engrais, des pesticides, des herbicides et des fongicides. Ces substances chimiques sont utilisées pour améliorer la productivité des cultures, mais elles peuvent également contaminer l'eau et les sols lorsqu'elles sont mal utilisées. L'infiltration directe de ces produits chimiques dans les nappes phréatiques est favorisée par des pratiques agricoles modernes, telles que les labours profonds et l'utilisation excessive d'irrigation. (NO_3), (NO_2), (SO_4), (PO_4), et (Cl) sont des éléments courants présents dans les produits chimiques agricoles. Ces substances peuvent se retrouver dans les eaux souterraines et de surface, affectant la qualité de l'eau potable et créant des conditions propices à l'eutrophisation, un phénomène qui peut étouffer la vie aquatique.

I.3.6. Pollution accidentelle :

La pollution accidentelle résulte généralement de déversements ou d'accidents imprévus qui libèrent des substances polluantes dans l'environnement. Ces déversements peuvent être causés par des accidents de transport, comme les fuites de produits chimiques ou de carburants dans les camions citernes, ou encore des fuites dans les pipelines. Les installations industrielles, comme les usines ou les centrales, peuvent également connaître des défaillances techniques qui entraînent la libération de gaz toxiques ou de liquides polluants.⁶ Ces accidents peuvent avoir un impact immédiat et catastrophique sur l'environnement, en dispersant rapidement des polluants dans l'air, l'eau, ou le sol.

⁵ Morel, Alain. Les pollutions industrielles: diagnostic et gestion. Lavoisier, Paris, 2017, pp. 150-170.

⁶ Annonime: https://fac.ume.edu.dz/snv/faculte/becol/Pollutiondes_eaux. Dr-HDR-TOUATI Laid/(2020)

I.4. Types de polluants:

I.4.1. polluant physique:

La pollution physique se réfère aux substances qui modifient les propriétés physiques de l'eau et des sols. L'un des exemples les plus courants de pollution physique est l'érosion du sol, où des particules sont transportées dans les cours d'eau lors de fortes pluies. De plus, l'élévation de la température des eaux en raison des rejets thermiques, souvent issus des centrales électriques ou des industries, perturbe l'équilibre écologique de ces milieux aquatiques. Ces changements peuvent affecter la capacité des organismes aquatiques à respirer, se reproduire et survivre.⁷

I.4.2 Polluants biologiques:

Les polluants biologiques sont constitués de microorganismes vivants, tels que les bactéries, les virus, et les parasites, qui peuvent causer des infections lorsqu'ils sont présents en grande quantité dans l'eau.. Par exemple, des bactéries comme *Escherichia coli* et *Salmonella* peuvent provoquer des maladies graves comme la dysenterie, la gastro-entérite et d'autres infections intestinales.⁸

I.4.3 Polluants chimique:

La pollution chimique résulte de l'introduction de substances chimiques dans l'environnement, principalement les eaux, qui sont souvent causées par des activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et les transports. Les produits chimiques qui contribuent à la pollution comprennent les métaux lourds comme le plomb, le mercure et l'arsenic, qui peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire et poser des risques pour la santé humaine et animale. D'autres polluants chimiques incluent les pesticides, les herbicides, et les solvants organiques qui sont utilisés en grande quantité dans l'agriculture et l'industrie.⁹ Les effets de cette pollution sont souvent à long terme,

⁷ Reed, H. S., & Thomas, A. S. *Environmental Pollution and its Control*. Springer, 2014 p. 45-46.

⁸ Baig, S. G., & Khan, M. M. *Water Pollution and Pathogens*. Elsevier, 2016. p. 58-59.

⁹ Jackson, L. M., & Cole, J. R. *Chemicals in the Environment: Impacts and Management*. Wiley, 2015. p. 102-103.

II. Traitement des eaux

Les eaux constituent une source majeure de pollution, présentant des risques considérables pour l'environnement et la santé publique. Afin de remédier à ce problème, l'épuration des eaux usées s'impose comme une solution incontournable. Ce processus regroupe un ensemble de techniques – mécaniques, physiques, chimiques et biologiques – visant à réduire la concentration des substances polluantes contenues dans ces eaux.

La chaîne de traitement s'adapte selon le niveau de pollution initial et la qualité finale souhaitée, et comprend généralement les étapes suivantes :

II.1. Le prétraitement : Les prétraitements constituent l'ensemble des opérations physiques et mécaniques : dégrillage¹⁰, dessablage, dégraissage-déshuilage et tamisage. Ils dépendent de la nature et des caractéristiques des rejets.

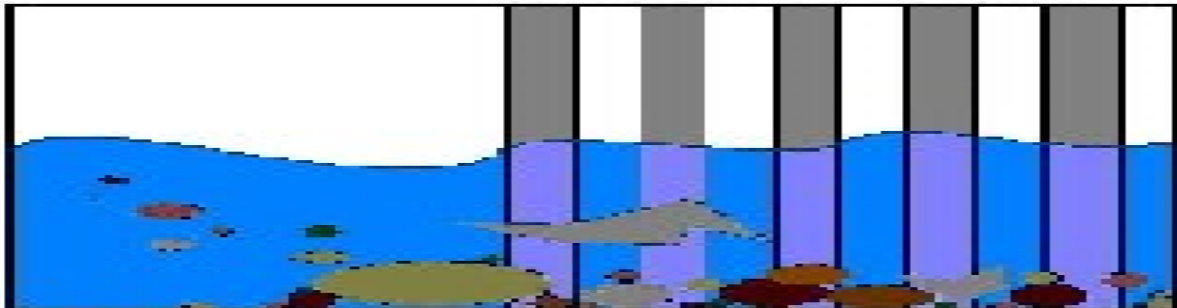


Figure 1: Le dégrillage.

Le tableau montre les différents types de dégrillage sont définis selon l'espacement des barreaux.

Tableau 1: Différents types de dégrillage. ¹¹

¹⁰ Besson, Jean-Paul. *Techniques de traitement des eaux usées*. Dunod, Paris, 2017, pp. 65-75.

¹¹ BESSEDIK. M, "traitement de l'eau". mabessedik@yahoo.fr m_bessedik@mail.univ- tlemcen.dz,369p.

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Dégrillage fin	< 10 mm
Dégrillage moyen	10 – 30 mm
Pré-dégrillage	30 – 100 mm

Plusieurs dégrillages peuvent être associés en série. Pour les eaux de ruissellement, il s'agira en pratique dans la grande majorité des cas de pré-dégrillage suivi parfois de dégrillage moyen.¹²

II.2. Le traitement secondaire :

Les traitements secondaires des eaux sont des traitements de types biologiques, c'est-à-dire la décomposition des polluants organiques dans l'eau par les micro-organismes. Les micro-organismes ont la faculté de métaboliser de nombreux composés organiques et aussi des composés minéraux non oxydés (H_2S , NH_3 , NO_2)

Matière organique + O_2 $\longrightarrow$ CO_2 + H_2O + NH_3 + énergie + matière vivante

Il consiste à utiliser les bactéries pour éliminer les polluants restants. Cette étape est accomplie en forçant le mélange entre les eaux usées, les bactéries et l'oxygène, l'oxygène aide les bactéries à éliminer plus rapidement les polluants. L'eau est ensuite acheminée dans d'autres réservoirs où les particules solides se déposent à nouveau dans le fond, le traitement secondaire élimine entre 90 et 95 % des polluants, soit un abattement de 85 à 90 % de la DBO_5 et 90 à 99 % des bactéries coliformes selon la réaction suivantes

Eau usée + biomasse + oxygène $\longrightarrow$ Eau épurée + accroissement de la biomasse + gaz

Ces techniques peuvent être anaérobies, c'est-à-dire se déroulant en absence d'oxygène, ou aérobies c'est-à-dire nécessitant un apport oxygène. Parmi les traitements biologiques, on distingue les procédés biologiques extensifs et les procédés biologiques intensifs¹³.

¹² BESEDIK. M, "traitement de l'eau". mabessedik@yahoo.fr m_bessedik@mail.univ-tlemcen.dz,369p.

¹³ Tchobanoglous, George, Burton, Franklin L., and Stensel, Howard D. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education, New York, 2014, pp. 262

II.3. Traitement tertiaire :

Les traitements tertiaires ont pour but d'améliorer les caractéristiques d'une eau résiduaire après un traitement biologique ¹⁴

En général, les techniques d'épuration, même les plus sévères performantes, laissent passer dans l'eau épurée des matières organiques difficilement biodégradables et échappent à la décantation. En outre même après un traitement secondaire l'eau véhicule presque toujours des micro-organismes et des micropolluants

La principale méthode utilisée est la désinfection par le chlore, qui doit être appliquée avec des doses très fortes et des temps de contact longs. Mais il convient de signaler suite à cette opération que des toxiques pour la vie aquatique peuvent être formés, il faut donc procéder à une opération de décoloration avant le rejet

II.4. La déphosphatation : ¹⁵

L'élimination du phosphore concerne le traitement de déphosphatation, soit physico-chimique soit biologique. La déphosphatation biologique, de développe récent, est basée sur la succession de phases anaérobies et aérobies au cours du traitement biologique mais son rendement est en générale moins bon que celui de la déphosphatation physico-chimique. La déphosphatation peut aussi être réalisée par précipitation physico-chimique en présence de sels minéraux comme le sulfate d'ammonium ou le chlorure ferrique

II.5. La désinfection :

La désinfection vise à réduire la concentration des gammes pathogènes dans les effluents avant rejet dans l'environnement. Contrairement aux normes de désinfection pour la production d'eau potable qui spécifie l'absence totale de coliformes, les normes de rejets pour les eaux résiduaires urbaines varient suivant la nature du milieu récepteur

II.6. Les membranes : ¹⁶

Les membranes permettent de filtrer et d'éliminer toutes les MES, tous les micro-organismes et toutes les substances qui s'y adsorbent. Seules subsistent les matières dissoutes. L'efficacité épuratrice d'une membrane dépend de son (seuil de coupure). Selon Lazarova et al (2003), un seuil de coupure de 0.035 μm permet de désinfecter de manière quasi-totale.

Les autres avantages d'un traitement par membranes sont une réduction considérable de la

¹⁴ Lazarova, V., Choo, K.H., and Cornet, P. Water - Energy Interactions in Water Reuse. IWA Publishing, London, 2012, pp. 185-195.

¹⁵ Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2003, pp. 431

¹⁶ Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2003, pp. 432

surface nécessaire pour le site de traitement (moins 50 % de surface totale au sol et moins 40 % du volume d'un bassin biologique, toujours selon Lazarova al (2003) et une automatisation poussée de l'usine.

Par contre, les membranes nécessitent d'être nettoyées régulièrement pour continuer à être efficaces. De plus, le traitement par membranes est un procédé dont le cout est élevé. La filtration est très efficace pour l'élimination des micro-organismes, d'autant plus que ceux-ci sont gros. L'osmose inverse, qui est une technique de filtration encore plus fine, et qui permet de séparer également les substances dissoutes, est tout aussi efficace.

II.7. Le lagunage tertiaire :

Le lagunage tertiaire est un procédé extensif de désinfection similaire au lagunage secondaire, si ce n'est qu'il est procédé d'un traitement d'épuration comme par exemple un traitement par boues activées. Il permet d'éliminer les micro-organismes d'affiner l'épuration, de faire face aux variations de flux et de protéger le milieu récepteur ¹⁷

II.8. L'infiltration/percolation :

L'infiltration ou percolation consiste à traiter l'eau par l'intermédiaire du sol ou d'un massif filtrant. On infiltre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluent par mètre carré de massif filtrant et par jour. Trois mécanismes entrent en jeu :

La filtration des MES : plus le sable est grossier, plus la fixation des MES se fera en profondeur. Les MES finissent par colmater le filtre. Pour lutter contre le bouchage du massif filtrant, il faut donc alterner phase d'infiltration et phase de séchage.

Les techniques d'infiltration/percolation permettent l'élimination des (gros) micro-organismes (protozoaires et helminthes) par filtration/adsorption au début du massif filtrant. L'élimination des virus et des bactéries est fonction du milieu poreux, de la vitesse de percolation, de l'épaisseur du massif filtrant et du niveau d'oxydation de l'eau filtrée

II.9. Traitement quaternaire:

Si nécessaire, des traitements supplémentaires peuvent être effectués pour éliminer des contaminants spécifiques, comme les métaux lourds ou les produits chimiques.

II.10. Traitement des boues d'épuration:

Les boues résiduelles issues du traitement sont également gérées. Elles peuvent être

¹⁷ Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2003, pp. 433

compostées, incinérées ou utilisées comme engrais.¹⁸

Ces techniques, dans leur ensemble, pour être plus efficaces, ont besoin de leur associer une autre méthode à laquelle nous nous sommes intéressés particulièrement: l'adsorption.

III. Les micropolluants

III.1. Définition des micropolluants

Les micropolluants sont des substances chimiques présentes en faibles concentrations dans les milieux aquatiques, mais qui peuvent avoir des effets délétères sur la santé humaine, les écosystèmes aquatiques et la biodiversité. Ces polluants, souvent d'origine industrielle, agricole ou domestique, sont capables de persister dans l'environnement pendant des périodes prolongées et d'accumuler dans les organismes vivants. La particularité des micropolluants réside dans leur toxicité même à de très faibles concentrations, rendant leur surveillance et leur gestion particulièrement complexes. Ils incluent des métaux lourds, des produits pharmaceutiques, des pesticides, des produits cosmétiques, et des produits chimiques de divers types.¹⁹

Les micropolluants sont souvent classés en fonction de leur comportement dans l'environnement, de leur toxicité et de leur capacité à se bioaccumuler. De plus, leur présence dans les milieux aquatiques est un défi majeur pour les systèmes de traitement des eaux, car leur élimination nécessite des techniques avancées de purification. Il est donc crucial de mettre en place une gestion efficace pour éviter la propagation de ces substances dans les ressources en eau potable.

III.2. Groupes de micropolluants

Les micropolluants se divisent en plusieurs groupes selon leur nature chimique et leur origine. Parmi les principaux groupes, on trouve :²⁰

- **Produits pharmaceutiques et les hormones** : Les médicaments, y compris les antibiotiques et les hormones de croissance utilisées dans l'agriculture, sont souvent

¹⁸ Annonime: https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_primaire_de_l'eau

¹⁹ Baranger, P., & Lefevre, S. Pollution de l'eau par les micropolluants : risques et traitements. Paris : Éditions scientifiques, 2013.p. 132.

²⁰ Rodier, J. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9^e édition). Paris : Dunod, 2009, p. 45.

retrouvés dans les eaux usées. Ces produits peuvent avoir des effets hormonaux sur la faune aquatique et sont parfois responsables de la perturbation des équilibres écologiques.

- **Pesticides** : Utilisés massivement en agriculture, les pesticides, notamment les herbicides et les fongicides, se retrouvent fréquemment dans les eaux de surface et les nappes phréatiques. Ils sont souvent responsables de la dégradation des écosystèmes aquatiques et de la perte de biodiversité.
- **Produits chimiques industriels** : Ce groupe comprend une large gamme de substances chimiques utilisées dans l'industrie, telles que les solvants, les plastifiants, et les retardateurs de flamme. Ces produits sont souvent persistants et peuvent avoir des effets toxiques sur les organismes aquatiques et humains.
- **Colorants** : Utilisés principalement dans les industries textile, alimentaire, pharmaceutique et cosmétique, les colorants sont des substances capables de teinter durablement un support. Certains colorants synthétiques, en particulier les colorants azoïques, sont reconnus pour leur stabilité chimique et leur résistance à la biodégradation. Une fois rejetés dans les milieux aquatiques, ils peuvent altérer la transparence de l'eau, perturber la photosynthèse et nuire aux écosystèmes aquatiques. Certains sont également suspectés d'être toxiques, mutagènes ou cancérigènes, représentant ainsi un risque pour la faune, la flore et potentiellement la santé humaine.
- **Métaux lourds** : Ce groupe inclut des éléments comme le plomb, le mercure, le cadmium, le zinc et l'arsenic. Ces métaux sont très toxiques même à de faibles concentrations et peuvent s'accumuler dans les organismes aquatiques, ce qui entraîne une contamination des chaînes alimentaires. Ils proviennent généralement des industries, des activités minières et des rejets urbains.

III.3. Colorants

III.3.1 Généralités

Les colorants sont des substances chimiques utilisées pour donner de la couleur à divers matériaux. Ils sont largement utilisés dans l'industrie textile, alimentaire, cosmétique, pharmaceutique, ainsi que dans la fabrication de peintures et de plastiques. Bien que les colorants aient une grande importance dans l'industrie et les produits de consommation, ils peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine si leur gestion et leur élimination ne sont pas appropriées. En effet, de nombreux colorants sont persistants dans les

milieux aquatiques et peuvent provoquer des nuisances esthétiques, voire des toxicités à long terme pour les organismes aquatiques.²¹

Les colorants se retrouvent principalement dans les eaux usées des industries qui les utilisent dans leurs processus de fabrication, en particulier dans les industries textile et alimentaire. Une fois rejetés dans les milieux aquatiques, ces colorants peuvent altérer la qualité de l'eau, affecter la photosynthèse des plantes aquatiques et perturber les écosystèmes locaux. Ils sont également difficiles à éliminer lors des traitements des eaux usées en raison de leur stabilité chimique et de leur faible dégradabilité.

II.3.2 Définition des colorants

Les colorants sont des substances organiques ou inorganiques capables de modifier la couleur d'un matériau en fonction de leur interaction avec la lumière. Ils agissent en absorbant certaines longueurs d'onde du spectre lumineux et en réfléchissant d'autres, ce qui modifie l'apparence visuelle du matériau. Les colorants peuvent être solubles dans l'eau ou dans des solvants organiques, ce qui détermine leur application dans différentes industries. Leur utilisation s'étend des teintures de tissus aux additifs alimentaires, en passant par les cosmétiques et les encres d'impression.²²

La structure chimique des colorants détermine leur capacité à se fixer sur les matériaux, leur stabilité, et leurs propriétés d'absorption lumineuse. Certains colorants, tels que les colorants azoïques, sont largement utilisés pour leur coût faible et leur large gamme de couleurs, tandis que d'autres colorants, comme les colorants naturels, sont plus chers et utilisés dans des applications spécifiques en raison de leurs propriétés uniques.

III.3.3. Origine et classification

Les colorants peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur origine : les colorants naturels et les colorants synthétiques.²³

- **Colorants naturels :** Ces colorants sont extraits de matières naturelles telles que les plantes, les insectes ou les minéraux. Les colorants à base de plantes, comme le curcuma et l'indigo, sont utilisés depuis des siècles dans le textile et la nourriture. Les colorants

²¹ Bishop, P., & Thompson, G. Les colorants et leur impact environnemental. Paris : Éditions Technip, 2010 ;p. 78.

²² Rodier, J. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9^e édition). Paris : Dunod, 2009.p. 102.

²³ O'Neill, C., & Klink, F. Chemical applications of synthetic dyes in the environment. New York : John Wiley & Sons, 2011; p. 134.

naturels sont souvent moins stables et plus coûteux à produire que les colorants synthétiques, mais ils sont souvent considérés comme plus sûrs pour la santé et l'environnement.

- **Colorants synthétiques :** Ces colorants sont fabriqués chimiquement à partir de produits dérivés du pétrole ou d'autres matières premières synthétiques. Ils sont largement utilisés en raison de leur faible coût, de leur stabilité et de la variété de couleurs qu'ils peuvent produire. Cependant, certains colorants synthétiques, notamment les colorants azoïques et les colorants à base de métaux lourds, sont connus pour être toxiques et persistants dans l'environnement, ce qui pose des risques pour la santé humaine et animale.

III.3.4. Applications

III.3.4.1. Textile :

Les colorants jouent un rôle essentiel dans l'industrie textile, où ils sont employés pour teindre aussi bien les fibres naturelles telles que le coton, la laine et la soie, que les fibres synthétiques comme le polyester et le nylon. Divers procédés de teinture sont mis en œuvre, notamment la teinture en solution, la teinture par dispersion ainsi que la teinture de réserve. ²⁴

III.3.4.2. Agroalimentaire :

Dans l'industrie alimentaire, les colorants sont utilisés pour rehausser l'aspect visuel des produits, en imitant les couleurs naturelles, en améliorant l'attrait esthétique et en facilitant l'identification des saveurs. ²⁵

III.3.4.3. Cosmétique :

Les produits cosmétiques, tels que les rouges à lèvres, les fards à paupières, les fonds de teint et les vernis à ongles, contiennent fréquemment des colorants. Ceux-ci permettent de proposer une vaste palette de teintes, répondant aux préférences variées des consommateurs. ²⁶

III.3.4.4. Impression :

Les encres d'impression, qu'elles soient utilisées sur papier, plastique, textile ou d'autres supports, contiennent généralement des colorants afin de produire des textes lisibles et des images en couleur. ²⁷

²⁴ Warshaw, Leon J., Crompton, D. S., Et Kay, D. J. Chapitre 89-L'industrie textile. Encyclopédie de Sécurité et de Santé au Travail du BIT (3ème édit, p. 1-64). (2019)

²⁵ Boulocher, Véronique Et Ruaud, Sabine. La Couleur, Variable Stratégique En Marketing: Une Illustration De Sa Mise En Œuvre. La couleur au cœur de la stratégie marketing, livre, ED, 2016 p. 183.

²⁶ Christie, Robert M. Colour Chemistry. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2001, pp. 80

²⁷ Shore, John. Colorants and Auxiliaries: Organic Chemistry and Application Properties. Vol. 1, Society of Dyers and Colourists, Bradford, 2002, pp. 135.

III.3.4.5. Plastique :

Les matières plastiques sont colorées à l'aide de colorants ajoutés lors de leur fabrication, dans le but d'améliorer leur aspect visuel. Ces colorants sont très répandus dans la fabrication d'emballages, de jouets, de produits domestiques, entre autres.²⁸

III.3.5. Propriétés

III.3.5.1. Solubilité :

La solubilité des colorants dans des solvants spécifiques est un critère crucial pour leur usage en teinture ou en impression. Certains colorants sont solubles dans l'eau, tandis que d'autres nécessitent des solvants organiques²⁹

III.3.5.2. Stabilité :

Les colorants doivent présenter une certaine stabilité face à la lumière, à la chaleur, aux produits chimiques et aux agents de blanchiment pour conserver leur couleur et leur intensité dans le temps. Cette stabilité dépend de leur structure chimique ainsi que des conditions d'utilisation.³⁰

III.3.5.3. Affinité :

Pour qu'un colorant soit efficace, il doit avoir une bonne affinité avec le matériau à colorer, permettant ainsi une fixation durable. Cette affinité est influencée par la nature chimique du colorant et du support, ainsi que par les conditions du processus de teinture ou d'impression.

³¹

III.3.5.4. Sélectivité :

Certains colorants se montrent sélectifs, ne colorant que des types particuliers de substrats. Par exemple, certains sont exclusivement conçus pour les textiles, tandis que d'autres sont adaptés aux plastiques ou aux denrées alimentaires.³²

III.3.6. Effets des colorants

Les colorants rejetés dans le milieu aquatique peuvent avoir de nombreux effets sur la santé humaine, en fonction de leur nature, de leur concentration, de la durée d'exposition et de la sensibilité des individus. Parmi les effets potentiels :

III.3.6.1. Toxicité directe :

Certains colorants synthétiques peuvent être toxiques s'ils sont ingérés, inhalés ou absorbés

²⁸ Freeman, Harry S., and Fox, Martin A. Toxicity and Carcinogenicity of Dyes. Wiley-Interscience, New York, 1991, pp. 55.

²⁹ Al-Gheethi, Adel et al. "Endocrine-Disrupting Compounds and Dyes in Wastewater: Occurrence, Effects, and Removal Technologies." Environmental Science and Pollution Research, vol. 26, no. 32, 2019, pp. 32966–32989.

³⁰ Harlekas, Farida. Couplage des procédés membranaires aux techniques physico- chimiques ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie de textile. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de doctorat. (2008).

³¹ Freeman, Harry S., and Fox, Martin A. Toxicity and Carcinogenicity of Dyes. Wiley-Interscience, New York, 1991, pp. 58

³² Christie, Robert M. Colour Chemistry. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2001, pp. 89

par la peau, provoquant divers troubles : irritations cutanées, réactions allergiques, problèmes respiratoires, troubles digestifs, voire atteintes aux organes internes lors d'expositions prolongées à fortes concentrations.³³

III.3.6.2. Cancérogénicité :

Certains colorants sont suspectés d'avoir des effets cancérogènes, notamment lorsqu'ils contaminent l'eau potable ou entrent en contact prolongé avec la peau.³⁴

III.3.6.3. Perturbation endocrinienne :

Il a été démontré que certains colorants peuvent perturber le système endocrinien en imitant ou en inhibant les hormones naturelles, ce qui entraîne des déséquilibres hormonaux et des effets négatifs sur la reproduction et la santé générale.³⁵

III.3.6.4. Bioaccumulation :

Certains colorants ont la capacité de s'accumuler dans les tissus d'organismes vivants, notamment les poissons et fruits de mer consommés par l'homme, exposant ainsi les consommateurs à une toxicité chronique.³⁶

III.3.7. Colorant étudié

Les colorants représentent une menace significative pour la qualité de l'eau en raison de leur persistance et de leur toxicité. Parmi ceux-ci, le bleu de méthylène est particulièrement préoccupant du fait de son usage étendu dans les secteurs industriels et médicaux.

- **Le bleu de méthylène :**

Le bleu de méthylène, également connu sous le nom de chlorure de méthylthioninium, est un dérivé de la phénothiazine. Ce composé chimique est utilisé aussi bien en tant que médicament qu'en tant que colorant, notamment en biochimie et en bactériologie, en raison de ses propriétés d'oxydoréduction. Il se présente sous forme de cristaux inodores, solubles dans l'eau et, dans une moindre mesure, dans l'éthanol. À l'état pur, il apparaît comme une poudre vert foncé ou brunâtre. En solution, il peut être trouvé sous forme oxydée (bleue) ou réduite (incolore), le changement d'état entraînant une variation de couleur, ce qui permet d'indiquer les caractéristiques du milieu environnant.³⁷

³³ anonyme, Avantages et inconvénients des colorants synthétiques, site: [acapro.fr](https://acapro.fr/cuisine-et-gastronomie/avantages-et-inconvénients-des-colorants-synthétiques), consulté en 2024, disponible sur: <https://acapro.fr/cuisine-et-gastronomie/avantages-et-inconvénients-des-colorants-synthétiques>

³⁴ anonyme, *La prévention des risques chimiques des colorants et pigments*, site: [officiel-prevention.com](https://www.officiel-prevention.com), consulté en 2024, disponible sur: <https://www.officiel-prevention.com>

³⁵ anonyme, *Perturbateurs endocriniens et plastiques: alerte pour la santé*, site: [reseau-environnement-sante.fr](https://www.reseau-environnement-sante.fr), consulté en 2024, disponible sur: <https://www.reseau-environnement-sante.fr>

³⁶ anonyme, *Perch accumulation of pollutants in fish and shellfish*, University of West Florida, 2009, document PDF, consulté en 2024, disponible sur: https://pages.uwf.edu/cedb/perch_accumulation_of_pollutants_in_fish_and_shellfish.pdf

³⁷ Laura Fonteneau, Docteur En Pharmacie, journal volume D.O. I Bleu de méthylène: indication, utilisation, dangereux. Mis à jour le 29/03/22



Figure2 : bleu de méthylène

III.3.7.1. Structure chimique:

Le bleu de méthylène, également connu sous le nom de chlorhydrate de tétraméthylène diamine, a une formule chimique $C_{16}H_{18}ClN_3S$ et une masse moléculaire d'environ 319,85 g/mol. Sa structure comprend un noyau hétérocyclique tricyclique contenant des atomes d'azote et de soufre.

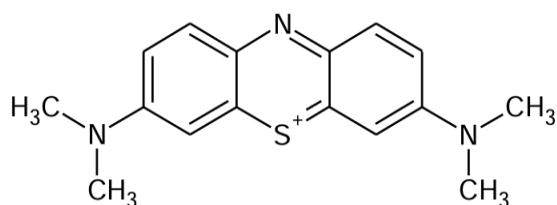


Figure 3 : la Structure moléculaire de bleu de méthylène

Tableau 2 : Fiche technique de bleu de méthylène ³⁸

Nom et indexation	Nom IUPAC : Chlorure de bis-(diméthylamino)-3,7 phénazathionium Color index : Basic bleu 9 EINECS No : 200-515-2
Propriétés physico-chimiques	Formule brute : $C_{16}H_{18}N_3S$ masse molaire : 319,86g/mol Température de fusion : $180^{\circ}C$ Solubilité à $20^{\circ}C$: 50g/L (eau) et 10g/L (éthanol)

³⁸ Bennani Karim A., Mounir B., Rev. SC. de l'Eau, 23(2010), 375-388

Tableau 3 : Propriété physico-chimiques du bleu de méthylène

Propriété	Valeur
Dénomination	Bleu de méthylène ou chlorure de tétraméthylthionine, Basic blue 9
Appellation chimique	Chlorure de 3,7-bis(diméthylamino)
Famille	Colorant basique
Formule brute	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S
Masse molaire (mg·L ⁻¹)	319,85
Solubilité dans l'eau (g·L ⁻¹ à 20 °C)	40
pH	5,9
pK _a	3,8
λ _{max} (nm)	665

III.3.7.2. Propriétés physiques du BM:

À température ambiante, le bleu de méthylène se présente sous forme de cristaux de couleur verte ou bleue. Il est soluble dans l'eau et légèrement soluble dans l'alcool. Il est généralement utilisé sous sa forme cristalline, le chlorhydrate de bleu de méthylène, qui offre une meilleure solubilité dans l'eau que sa forme libre.³⁹

III.3.7.3 Usages :

Outre son rôle de colorant, le bleu de méthylène est largement utilisé pour la visualisation des bactéries, la coloration des tissus et l'identification des acides nucléiques (ADN et ARN). Il trouve également des applications dans divers domaines :

- **Agroalimentaire** : utilisé pour colorer certaines viandes.
- **Hydrologie** : permet l'évaluation de la dureté de l'eau.
- **Paysagisme** : sert de traceur pour les traitements et comme agent de bleuissement des hortensias.
- **Textile** : utilisé comme teinture.
- **BTP** : employé pour le test à la tâche sur le béton.

³⁹ Laura Fonteneau, Docteur En Pharmacie, Bleu De Méthylène: Indication, utilisation, dangereux. journal volume D.O.I Mis à jour le (29/03/22)

- **Géologie** : permet de déterminer l'argilosité des sols.

En médecine, le bleu de méthylène figure sur la liste des médicaments essentiels de l'OMS. Il est utilisé comme antidote pour traiter la méthémoglobinémie, un trouble du sang qui nuit au transport de l'oxygène. Il est aussi utilisé pour caractériser des structures organiques et pour prévenir certaines neurotoxicités liées à la prise de médicaments.⁴⁰

III.3.7.4. Toxicité :

La toxicité des colorants dépend de leur structure chimique, de leur concentration et de leur durée d'exposition. Voici quelques risques potentiels :⁴¹

- **Colorants azoïques** : peuvent libérer des amines aromatiques cancérigènes après métabolisation, certains étant associés à des cancers de la vessie.
- **Colorants synthétiques** : peuvent contenir des impuretés toxiques telles que les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium) ou des solvants organiques, représentant un danger en cas d'exposition chronique.
- **Colorants alimentaires** : des additifs comme la tartrazine (E102) ou le rouge allura (E129) peuvent provoquer des réactions allergiques ou des troubles comportementaux chez les enfants

III.3.7.5. Détection et analyse :

Le bleu de méthylène est couramment utilisé comme colorant en biologie, médecine et chimie. Son analyse repose sur différentes méthodes analytiques :⁴²

- Spectroscopie UV-Visible
- Chromatographie liquide haute performance (HPLC)
- Chromatographie sur couche mince (CCM)

III.3.7.6. Dégradation et persistance :

⁴⁰ Fonteneau, Laura, Docteur En Pharmacie Bleu de méthylène: indication, utilisation, dangereux, journal volume D.O.I. Mis à jour (2022)

⁴¹ Annonime: Mccann, D., Barrett, A., Cooper, A., Crumpler, D., Dalen, L., Grimshaw, K., ... & Stevenson, J. Food additives and hyperactive behaviour in 3-year-old and 8/9-year-old children in the community: a randomised, double-blinded, placebo-controlled trial. The Lancet, 370(9598), 1560-1567. Article, (2007).

⁴² Analytical Methods for Methylene Blue: A Review. Vijay R. Bommakanti, Ajit S. Narang, Sunil Kumar Dubey, and Vivekanand P. Pathak. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. Volume 12, Issue 1, January (2020)

La stabilité du bleu de méthylène varie selon les conditions environnementales : lumière, température, pH, présence d'agents oxydants ou réducteurs. Sa dégradation peut se produire par :

- **Photodégradation** : la lumière solaire, en particulier les UV, décompose le colorant en composés moins toxiques comme le leuco bleu de méthylène.
- **Dégradation chimique** : des agents oxydants (ex. : peroxyde d'hydrogène) peuvent oxyder le bleu de méthylène en produits de dégradation.
- **Dégradation biologique** : certaines bactéries possèdent des enzymes capables de le dégrader dans les milieux naturels comme l'eau ou le sol.

III.4. Métaux Lourds

III.4.1. Généralités sur les métaux lourds

Définition des métaux lourds :

Les métaux lourds sont définis comme des éléments métalliques ayant une densité supérieure à 5 g/cm³. Ils sont naturellement présents dans la croûte terrestre, mais leur accumulation excessive est souvent due aux activités humaines telles que l'industrie, l'agriculture ou l'exploitation minière. Les métalloïdes comme l'arsenic, bien qu'ils ne soient pas des métaux à proprement parler, sont inclus en raison de leur toxicité et de leur comportement similaire ⁴³

Caractéristiques chimiques et physiques :

Ces métaux présentent :

- une densité > 5 g/cm³,
- une forte stabilité chimique,
- une faible biodégradabilité,
- une tendance à la bioaccumulation,
- une toxicité même à de faibles concentrations ⁴⁴

Exemples courants de métaux lourds :

Parmi les plus fréquents, on retrouve :

plomb (Pb), mercure (Hg), cadmium (Cd), arsenic (As), chrome (Cr), zinc (Zn), cuivre (Cu),

⁴³ Jensen, R.E. Heavy Metals in the Environment. CRC Press.2009. p. 5

⁴⁴ Alloway, B.J. Heavy Metals in Soils. Springer.2013. pp. 4–6

nickel (Ni), et fer (Fe). Ces éléments sont largement détectés dans les sols, les sédiments et les milieux aquatiques à cause de leurs usages industriels et agricoles ⁴⁵

Présence naturelle dans la croûte terrestre :

Ils existent sous forme de minerais naturels comme la galène (PbS), sphalérite (ZnS), ou chalcoppyrite (CuFeS₂). Leur libération naturelle est lente, mais les activités humaines accélèrent leur mobilisation dans l'environnement ⁴⁶

Effets toxiques à faibles concentrations chez les organismes aquatiques :

Même à très faibles doses, ils peuvent :⁴⁷

- inhiber la croissance,
- provoquer des malformations,
- altérer la reproduction,
- entraîner des décès progressifs.

Ils s'accumulent dans les tissus (bioaccumulation) et se concentrent le long de la chaîne alimentaire (biomagnification), affectant ainsi les grands prédateurs, y compris l'Homme

III.4.2. Les sources naturelles

1. Volcanisme

Le volcanisme constitue une source naturelle importante de libération de métaux lourds dans l'environnement. Lors d'une éruption, le volcan émet de grandes quantités de gaz et de particules, tels que des cendres et des roches en fusion, renfermant des éléments toxiques comme le mercure (Hg), (Pb), (As) et (Cd). Ces substances se propagent dans l'atmosphère et peuvent se disperser sur de vastes distances, atteignant les sols, les écosystèmes aquatiques et marins. Les émissions peuvent prendre la forme de gaz ou de particules fines, transportées par les courants aériens. Par condensation, les gaz peuvent se transformer en particules solides retombant sur la surface terrestre ou dans l'eau, tandis que le refroidissement rapide des roches volcaniques peut libérer des métaux lourds sous forme dissoute ou particulaire dans les milieux aquatiques environnants.⁴⁸

⁴⁵ Kabata-Pendias, A. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press.2010. pp. 89–93

⁴⁶ Adriano, D.C. Trace Elements in Terrestrial Environments. Springer.2001. p. 25

⁴⁷ Wang, W.X. & Rainbow, P.S. Comparative Toxicology of Metals in Aquatic Systems. Cambridge University Press.2010. pp. 15–18

⁴⁸ UNEP. Global Environment Outlook - GEO-5: Environment for the Future We Want. United Nations Environment Programme, 2014 pp.

2. Érosion des roches

L'érosion des roches représente un processus géologique naturel jouant un rôle notable dans la libération des métaux lourds dans l'environnement. Sous l'effet des agents atmosphériques tels que les variations de température, les précipitations, le vent ou encore l'altération chimique, les roches riches en minéraux métalliques se dégradent progressivement. Ce phénomène lent mais constant permet la libération d'éléments tels que (Zn), (Cu) et (Ni) dans les sols et les eaux de surface.

Concernant le mécanisme de diffusion, l'érosion génère des sédiments qui servent de vecteurs de transport pour ces métaux vers les rivières, les fleuves puis les océans. L'écoulement des eaux de ruissellement, particulièrement intense dans les zones à forte pluviosité, accentue ce phénomène. Les métaux ainsi libérés ont tendance à se déposer dans les sédiments aquatiques, entraînant potentiellement une contamination significative des écosystèmes aquatiques..⁴⁹

3. Aérosols atmosphériques

Les aérosols atmosphériques constituent une source naturelle significative de pollution par les métaux lourds. Il s'agit de particules microscopiques en suspension dans l'air, générées par divers phénomènes naturels tels que les feux de forêts, les tempêtes de poussière désertique et les éruptions volcaniques. Ces particules peuvent renfermer des métaux comme (Fe), (Cu) et (Al), qui sont ensuite transportés sur de longues distances par les courants aériens, avant de se déposer dans les sols ou les milieux aquatiques.

En ce qui concerne le mécanisme de diffusion, les aérosols agissent comme vecteurs aériens permettant aux métaux lourds de se déplacer à grande échelle — parfois même au niveau continental — avant de retomber sous forme de poussières sèches ou de précipitations humides. Cette forme de contamination est particulièrement préoccupante dans les zones situées à proximité des déserts ou des volcans actifs, où la concentration d'aérosols dans l'atmosphère peut atteindre des niveaux élevés.

4. Activité sismique

L'activité sismique, y compris les tremblements de terre, peut également jouer un rôle dans la libération de métaux lourds dans l'environnement. Les mouvements des plaques

45-47.

⁴⁹ S. L. S. V. Environmental Toxicology: Biological and Health Effects of Metals. Wiley, 2002 pp. 115-118.

tectoniques entraînent des ruptures dans les roches et les sols, favorisant ainsi la remontée et la libération de métaux lourds auparavant piégés dans les couches géologiques profondes. Bien que ce phénomène soit généralement localisé, ses impacts sur l'environnement immédiat peuvent être significatifs.

Concernant le mécanisme de diffusion, les séismes provoquent l'apparition de fractures dans les strates rocheuses, facilitant la migration de métaux tels que (Pb) et (Cd) vers les sols et les eaux de surface avoisinantes. Ainsi, les secousses sismiques peuvent modifier la dynamique géochimique d'une région en exposant des éléments toxiques autrefois confinés dans les profondeurs de la croûte terrestre.

5. Circulation hydrogéologique⁵⁰

La circulation hydrogéologique, qui désigne le déplacement de l'eau à travers les sols et les formations rocheuses, constitue un vecteur naturel de transport des métaux lourds dans l'environnement. Lorsque les eaux souterraines traversent des roches contenant des minéraux métalliques, elles peuvent dissoudre ces éléments et les acheminer vers les nappes phréatiques ou les exutoires de surface, entraînant une contamination potentielle des milieux aquatiques. Du point de vue du mécanisme de diffusion, les eaux souterraines agissent comme un solvant naturel en dissolvant les métaux lourds présents dans les formations géologiques riches en minéraux. Ces métaux dissous peuvent ensuite émerger dans les rivières, les lacs ou autres écosystèmes aquatiques, compromettant la qualité de l'eau. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les zones où les aquifères sont en contact direct avec des roches porteuses de métaux lourds.

6. Diffusion lente mais constante des métaux dans l'environnement

La diffusion des métaux lourds dans l'environnement via les processus naturels se caractérise par un rythme lent mais constant. Bien que ces émissions soient d'origine naturelle et, dans une certaine mesure, inévitables, elles demeurent généralement moins importantes en quantité que celles issues des activités humaines. Toutefois, leur persistance dans les milieux naturels peut engendrer une accumulation progressive dans les sols, les sédiments et les ressources en eau, compromettant à long terme la santé des écosystèmes.

Quant au mécanisme de diffusion, les phénomènes naturels susmentionnés génèrent des

⁵⁰ Smith, R., & Smith, T. Metals in the Environment: Sources, Health Impacts, and Regulation. *Environmental Science & Technology*, 33(4), 2011. 219-225.

quantités relativement faibles de métaux lourds, mais leur dispersion progressive permet une accumulation durable. Cette lenteur dans le processus de dissémination confère aux métaux lourds un potentiel de contamination environnementale sur le long terme, même si les effets immédiats sont souvent moins perceptibles que ceux liés aux sources anthropiques.

III.4.3. Les sources anthropiques

Les sources anthropiques de pollution par les métaux lourds sont directement liées aux activités humaines. Contrairement aux sources naturelles qui libèrent des métaux dans l'environnement de manière lente et graduelle, les activités humaines entraînent des émissions massives de métaux lourds, ce qui a un impact significatif sur la qualité de l'environnement, en particulier sur les milieux aquatiques. Voici un aperçu détaillé des principales sources anthropiques :

1. Sources industrielles

Les industries sont parmi les principales sources de pollution par les métaux lourds. Plusieurs secteurs industriels émettent ces éléments dans l'air, l'eau et le sol. Ces rejets sont souvent le résultat de processus de fabrication et de transformation des métaux, des produits chimiques, et d'autres substances.

a) Rejets d'usines métallurgiques, chimiques, textiles

Les usines métallurgiques, chimiques et textiles constituent des sources majeures de pollution anthropique par les métaux lourds. Celles impliquées dans la fabrication d'alliages, de fer, d'acier ou de produits chimiques industriels emploient fréquemment des éléments tels que (Pb), (Cd), (Ni) et (As) au cours de leurs processus de production. Ces métaux sont ensuite libérés dans l'environnement sous forme de gaz, de particules fines ou d'effluents, contaminant ainsi l'air, l'eau et les sols.⁵¹

Concernant le mécanisme de pollution, les émissions surviennent principalement lors des opérations de fusion, de traitement ou de nettoyage des métaux, générant des rejets gazeux et particulaires susceptibles d'être transportés par l'air ou de se déposer sur les sols avoisinants. Dans le cas des industries chimiques, des rejets liquides contenant des métaux lourds peuvent être directement déversés dans les cours d'eau, provoquant une contamination des milieux

⁵¹ UNEP. Global Environment Outlook - GEO-5: Environment for the Future We Want. United Nations Environment Programme, 2014. pp. 45-47.

aquatiques. Ces substances toxiques ont tendance à s'accumuler dans les sédiments, affectant durablement les écosystèmes, notamment la faune et la flore aquatiques.

b) Activités minières et de traitement du minerai

L'exploitation minière et le traitement des minerais représentent une autre source majeure de pollution par les métaux lourds. Les mines extraient souvent des minerais contenant des métaux tels que (Hg), (Pb), (Cd) et l (As). Ces métaux sont libérés dans l'environnement à travers divers rejets, notamment les eaux acides de drainage minier, la poussière de minerai et les résidus issus du traitement des minerais.

Concernant le mécanisme de pollution, l'extraction minière entraîne le déplacement de grandes quantités de matériaux rocheux, ce qui libère les métaux lourds dissous dans les minerais dans les eaux souterraines ou de surface. L'eau de drainage des sites miniers est souvent acide et contient une concentration élevée de métaux lourds, ce qui conduit à la contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques environnantes. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les régions minières où les réglementations de gestion des déchets sont insuffisamment appliquées.

2. Pollution urbaine

Les zones urbaines sont également des sources importantes de pollution par les métaux lourds. La croissance rapide de la population urbaine et l'augmentation des activités industrielles contribuent à une pollution accrue, affectant la qualité de l'air, du sol et de l'eau.⁵²

a) Circulation automobile (combustion d'essence plombée)

L'une des principales sources de pollution par les métaux lourds dans les zones urbaines est la circulation automobile. Avant l'interdiction progressive de l'essence plombée entre les années 1980 et 2000, les véhicules utilisaient de l'essence contenant du (Pb) comme additif pour améliorer les performances des moteurs. Bien que cette pratique ait été largement abandonnée, des résidus de plomb subsistent encore dans les sols et les milieux aquatiques des zones urbaines en raison de sa persistance dans l'environnement. Concernant le mécanisme de pollution, les résidus de plomb issus de l'essence plombée se déposent sur le sol et peuvent être entraînés vers les cours d'eau et les lacs par les pluies. En outre, les émissions des gaz d'échappement

⁵² S. L. S. V. Environmental Toxicology: Biological and Health Effects of Metals. Wiley, 2002. pp. 115-118.

des véhicules continuent de libérer de petites quantités de métaux lourds tels que (Ni) et (Cu), qui peuvent se retrouver dans l'air, les sols et les eaux de pluie.

b) Décharges et incinérateurs

Les décharges et les incinérateurs constituent des sources majeures de pollution par les métaux lourds dans les zones urbaines. Les déchets solides urbains contiennent souvent des objets renfermant des métaux lourds, tels que des batteries, des appareils électroniques et des équipements métalliques, qui peuvent libérer ces substances toxiques lors de leur stockage ou de leur incinération.

Quant au mécanisme de pollution, lors de l'incinération des déchets, des métaux lourds tels que (Cd), (Pb) et (Hg) peuvent être émis dans l'air sous forme de gaz ou de cendres. D'autre part, les décharges peuvent entraîner la lixiviation de ces métaux lourds dans le sol et les nappes phréatiques, provoquant ainsi la contamination des eaux souterraines et des cours d'eau voisins.

3. Utilisation agricole

L'agriculture, bien qu'essentielle pour la production alimentaire, est également une source importante de pollution par les métaux lourds. L'utilisation de certains produits chimiques, comme les engrais phosphatés et les pesticides, peut entraîner l'accumulation de métaux lourds dans les sols et les eaux de surface.⁵³

a) Engrais phosphatés

Les engrais phosphatés sont couramment utilisés pour améliorer la qualité des sols et stimuler la production agricole. Toutefois, certains types d'engrais, en particulier ceux importés de certaines régions, peuvent contenir des métaux lourds tels que (Cd), (Pb) et (As), qui sont naturellement présents dans les roches phosphatées utilisées pour leur fabrication.

Concernant le mécanisme de pollution, les métaux lourds présents dans ces engrais peuvent s'accumuler dans les sols au fil du temps. Lors des pratiques agricoles, ces métaux peuvent être lessivés par les eaux de pluie et s'infiltrer dans les nappes phréatiques ou les cours d'eau, contribuant ainsi à la contamination des milieux aquatiques.

⁵³ Smith, R., & Smith, T. Metals in the Environment: Sources, Health Impacts, and Regulation. *Environmental Science & Technology*, 33(4), 2011.219-225.

b) Pesticides contenant des métaux

De nombreux pesticides utilisés en agriculture contiennent des métaux lourds, tels que (Cu) et (Zn), en raison de leurs propriétés fongicides et insecticides. L'utilisation excessive de ces produits chimiques peut entraîner une accumulation de métaux dans les sols, ce qui affecte la qualité des terres agricoles ainsi que les écosystèmes voisins.

Concernant le mécanisme de pollution, lors des applications agricoles, ces métaux peuvent s'accumuler dans les sols et, par le biais du lessivage, se retrouver dans les eaux souterraines et superficielles. Cette contamination peut avoir des effets néfastes sur la faune aquatique, en particulier sur les organismes marins qui absorbent ces éléments toxiques.

4. Impact de ces sources sur les milieux aquatiques

Ces sources anthropiques contribuent à l'enrichissement rapide et souvent dangereux des milieux aquatiques en métaux lourds. Les métaux lourds, une fois dans l'eau, sont difficiles à éliminer et peuvent s'accumuler dans les organismes aquatiques au fil du temps, un phénomène appelé bioaccumulation. Ces éléments peuvent entraîner des effets toxiques sur les poissons, les invertébrés et d'autres espèces aquatiques, perturbant ainsi l'équilibre des écosystèmes aquatiques et affectant la santé humaine par la consommation de ces organismes contaminés.

III.4.4. Voies de contamination des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent pénétrer dans les milieux aquatiques et terrestres par plusieurs voies de contamination, chacune ayant un impact différent sur l'écosystème et la santé humaine. Les principales voies de contamination des métaux lourds sont les suivantes :

Infiltration dans les sols et sédiments

L'infiltration des métaux lourds dans les sols et les sédiments est l'une des voies de contamination les plus courantes. Les métaux lourds peuvent être apportés aux sols par des sources naturelles ou anthropiques telles que les rejets industriels, les dépôts atmosphériques ou les produits chimiques utilisés dans l'agriculture. Une fois présents dans le sol, ces métaux peuvent se lier aux particules organiques et inorganiques, créant une contamination persistante qui peut durer des années. Les métaux lourds comme (Pb), (Cd), et (Hg) ont une forte capacité

à se fixer aux particules du sol, ce qui peut entraîner leur accumulation dans la zone racinaire des plantes et affecter la croissance des végétaux ⁵⁴

Les sols contaminés peuvent également devenir une source secondaire de pollution, notamment lorsqu'ils sont perturbés par des pratiques agricoles ou des activités humaines comme l'extraction minière. L'infiltration dans les sédiments des rivières et des lacs est particulièrement problématique, car ces métaux peuvent s'accumuler dans les couches profondes, rendant difficile leur élimination.

Transport via les eaux de ruissellement

Le transport des métaux lourds par les eaux de ruissellement est un processus dynamique où ces métaux se déplacent des sols contaminés vers les milieux aquatiques. Les métaux lourds dissous ou adsorbés sur les particules de sol peuvent être transportés par les eaux de ruissellement lors des épisodes de pluie. Cela se produit généralement après des activités industrielles, agricoles ou urbaines qui génèrent des déversements ou des fuites de substances contenant des métaux lourds dans les eaux de surface ⁵⁵

Les eaux de ruissellement peuvent transporter ces contaminants vers les rivières, les lacs et les océans, où ils sont capables de se concentrer et de perturber les écosystèmes aquatiques. Par exemple, les métaux lourds comme (Cd) et (Zn) peuvent affecter la faune aquatique en modifiant leur métabolisme et leur comportement (Cunningham et al., 2013). De plus, le transport des métaux lourds via les eaux de ruissellement peut également entraîner leur dispersion dans de nouvelles zones, augmentant ainsi leur empreinte écologique.

Dépôt atmosphérique

Le dépôt atmosphérique est une autre voie importante par laquelle les métaux lourds contaminent l'environnement. Les émissions industrielles, les gaz d'échappement des véhicules et les activités de combustion (comme la combustion de charbon ou de biomasse) peuvent libérer des particules fines et des gaz contenant des métaux lourds dans l'atmosphère ⁵⁶Ces

⁵⁴ Zhang, X., Liu, J., & Wang, J. (2014). Accumulation of heavy metals in soil and its influence on the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(10), 6570-6578. doi:10.1007/s11356-014-2727-0

⁵⁵ Pelfrène, P., Jullien, A., & Dupuy, R. (2017). Heavy metal transport in river basins: A case study of runoff in an agricultural watershed. *Environmental Pollution*, 220, 1132-1142. doi:10.1016/j.envpol.2016.11.078

⁵⁶ Maher, B. A., & Chau, K. (2013). Atmospheric deposition of heavy metals: Influence of urbanization and combustion processes. *Atmospheric Environment*, 73, 120-130. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.006

métaux se déposent ensuite sur les surfaces terrestres et aquatiques sous forme de poussières ou de précipitations (pluies acides).

Les métaux comme (Hg) sont particulièrement sujets à cette forme de contamination en raison de leur volatilité. Une fois dans l'atmosphère, ces métaux peuvent parcourir de longues distances avant de se déposer sur des zones éloignées de leur source d'émission, impactant ainsi des écosystèmes distants. Ce processus contribue à l'accumulation de métaux lourds dans des zones non directement liées à l'activité industrielle ou à l'urbanisation.

Accumulation dans les chaînes alimentaires (bioaccumulation et biomagnification)

Les métaux lourds, une fois introduits dans l'environnement, peuvent s'accumuler dans les organismes vivants, un processus connu sous le nom de bioaccumulation. Ce phénomène se produit lorsque les métaux lourds sont absorbés par les organismes aquatiques ou terrestres plus rapidement qu'ils ne peuvent être éliminés. Les métaux lourds comme le mercure, le cadmium, et le plomb se bioaccumulent principalement dans les tissus graisseux des organismes vivants, en particulier dans les poissons, les crustacés et les mollusques ⁵⁷

La biomagnification fait référence à l'augmentation de la concentration de ces métaux lourds à chaque niveau trophique de la chaîne alimentaire. Cette concentration accrue de métaux lourds peut entraîner des effets toxiques graves, affectant la santé des espèces et, par extension, celle des humains qui consomment ces organismes contaminés ⁵⁸

III.4.5. Effets sur la santé humaine :

Les métaux lourds ont une capacité d'accumulation élevée dans l'organisme, s'accumulant notamment au niveau des reins, des os, du foie et du cerveau. L'exposition humaine aux métaux lourds se fait principalement par inhalation et ingestion, bien que la voie cutanée existe également, mais elle est moins significative. Une exposition prolongée à des concentrations élevées ou faibles de ces métaux peut nuire à plusieurs systèmes corporels, notamment le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires, auto-immunes, inflammatoires et digestives.

⁵⁷ Fisher, N. S., & Cossa, D. (2007). Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in marine organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 54(5), 803-809. doi:10.1016/j.marpolbul.2007.03.017

⁵⁸ Lavoie, R. A., et al. (2016). Mercury bioaccumulation and biomagnification in the food web of the Great Lakes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(7), 1744-1754. doi:10.1002/etc.3360

Ces métaux sont également associés à des pathologies graves telles que la sclérose en plaques, les cancers pulmonaires, l'autisme, ainsi que les maladies neurodégénératives comme Alzheimer et Parkinson ⁵⁹

III.4.6. Métal étudié dans cette recherche :

Cette étude porte sur deux composés chimiques importants dans les domaines environnementaux et industriels : le plomb et le nitrate de chrome (III). Le plomb est un métal lourd, de couleur gris bleuté, appartenant au groupe 14 du tableau périodique, avec le symbole Pb et le numéro atomique 82. Utilisé depuis l'Antiquité pour ses propriétés physiques telles que la malléabilité et la résistance à la corrosion, il a été largement employé dans la fabrication de tuyaux, batteries, peintures et cosmétiques. Toutefois, sa toxicité soulève des préoccupations sanitaires majeures. Par ailleurs, le nitrate de chrome (III), composé cristallin avec la formule $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, est un sel inorganique du chrome en état d'oxydation +3. Il est utilisé comme catalyseur, agent de tannage dans l'industrie du cuir, et dans le traitement des déchets. Ce composé se distingue par sa forte solubilité dans l'eau et sa stabilité, bien que sa toxicité nécessite des précautions strictes lors de son manipulation.

III.4.6.1. le plomb



Figure 4: Le Plomb à l'état naturel ⁶⁰

III.4.6.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du plomb :

Le plomb se présente principalement sous l'état d'oxydation (+II) dans l'environnement, bien que les états (+0) et (+IV) existent également, ce dernier étant rare et seulement dans des conditions fortement oxydantes. L'état (+II) est stable dans presque toutes les conditions

⁵⁹ Salvarredy-Aranguren, Matias Miguel, Probst, Anne, Roulet, Marc, Et Al. Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia): Mineralogical and hydrological influences. *Applied Geochemistry, Journal*, vol. 23, no 5, p. 1299-1324. (2008)

⁶⁰ Annonime: [https://www.asef-asso.fr/production/les-metaux-lourds-la-synthese-de-lasef/\(2017\)](https://www.asef-asso.fr/production/les-metaux-lourds-la-synthese-de-lasef/(2017))

environnementales ⁶¹Les principales caractéristiques physico-chimiques du plomb sont résumées dans le tableau suivant

Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques du plomb. ⁶²

Propriété	Valeur
Masse atomique	207 g/mol
Numéro atomique	82
Aspect	Gris terne, mou, fragile, faible conductivité électrique
Solubilité	Non négligeable dans l'eau, se dissout lentement dans les acides forts (HCl, H ₂ SO ₄), facilement attaqué par les acides faibles (acétique, citrique, tartrique)
Etat à 20°C	Solide
Volatilité	À partir de 550°C
Densité	11,34
Point de fusion	327°C
Point d'ébullition	1525°C - 1740°C

III.4.6.1.2. Effets sur la santé :

L'exposition au plomb chez l'homme se produit principalement par ingestion de poussières ou de particules contaminées, ou par inhalation de peintures, d'eau ou d'aliments pollués par ce métal. Les groupes les plus vulnérables aux effets toxiques du plomb sont les jeunes enfants, les femmes enceintes et les travailleurs dans des environnements contaminés. Le plomb peut altérer divers systèmes du corps humain, notamment :⁶³

⁶¹ Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for Lead*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, 2007, pp. 32–40.

⁶² Annonime: [https://facmed.univconstantine3.dz/wp_content/uploads/02/saturnismeDr.Boud emaghK.pdf](https://facmed.univconstantine3.dz/wp_content/uploads/02/saturnismeDr.Boud%20emaghK.pdf)/(2022)

⁶³ Lead Toxicity: Current Concerns." Indian Journal of Medical Specialities, vol. 5, no. 2, 2014, pp. 78-83. DOI: 10.1016/j.injms.2014.01.001.

- **Système nerveux** : Il peut causer des dommages nerveux entraînant des troubles du comportement, des problèmes d'apprentissage, des déficits cognitifs, des convulsions, ainsi que des lésions cérébrales irréversibles, surtout chez les enfants en développement.
- **Système hématopoïétique** : Le plomb perturbe la production des globules rouges, causant de l'anémie, et affecte le système immunitaire, augmentant la susceptibilité aux infections.
- **Système rénal** : Le plomb peut endommager les reins, entraînant des troubles rénaux, une insuffisance rénale et de l'hypertension.
- **Système cardiovasculaire** : Il augmente le risque de maladies cardiovasculaires, telles que l'hypertension, les maladies coronariennes et les accidents vasculaires cérébraux.
- **Système reproducteur** : Il peut nuire à la fertilité et au développement embryonnaire, affectant la santé reproductive des hommes et des femmes

III.4.6.1.3. Formes de plomb :

Le plomb existe sous différentes formes : métallique, inorganique et organique. Dans sa forme inorganique, il se lie à divers composés pour former des sels de plomb, tels que les chlorures, chromates, nitrates, phosphates et sulfates. En forme organique, il est fréquemment trouvé sous forme de plomb tétraméthyle ou plomb tétraéthyle. Cette étude a utilisé du plomb sous forme d'acétate de plomb trihydraté.

Le plomb dans l'acétate de plomb trihydraté :

L'acétate de plomb trihydraté, aussi appelé sucre de plomb en raison de sa douceur, est un composé chimique de formule $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Il se présente sous forme de cristaux incolores ou blancs, solubles dans l'eau. Historiquement, ce composé a été utilisé dans des applications variées, notamment comme adoucissant dans les produits alimentaires, dans les médicaments et cosmétiques. Cependant, son usage est désormais strictement réglementé en raison de sa toxicité, et des alternatives plus sûres ont été développées ⁶⁴

⁶⁴ Annonime: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/programmes/consultation-plomb-eau-potable/document.html>

III.4.6.1.4. Détection et analyse du plomb :

Plusieurs techniques analytiques permettent de détecter et d'analyser le plomb de manière sensible et spécifique. Parmi celles-ci :⁶⁵

- **Spectrométrie UV-visible** : Utilisée pour détecter les ions plomb dans des échantillons aqueux. Cette technique est efficace pour analyser la qualité de l'eau et détecter les impuretés.
- **Spectrométrie d'absorption atomique (SAA)** : Méthode courante pour l'analyse du plomb dans divers échantillons, mesurant l'absorption de lumière par des atomes de plomb.
- **Spectrométrie de fluorescence de rayons X (XRF)** : Technique non destructive pour analyser qualitativement et quantitativement le plomb dans des matériaux solides.
- **Chromatographie avec détection par absorption atomique (HPLC-AA)** : Technique combinant séparation chromatographique et détection sélective du plomb.
- **Spectrométrie de masse avec plasma d'argon (ICP-MS)** : Méthode sensible pour quantifier le plomb dans divers échantillons.
- **Méthodes colorimétriques** : Utilisent des réactifs spécifiques pour former des complexes colorés avec le plomb

III.4.6.1.5. Dégradation et persistance du plomb :⁶⁶

Le plomb est un métal lourd qui persiste longtemps dans l'environnement. Bien qu'il puisse subir des transformations physico-chimiques et biologiques, il reste stable pendant de longues périodes en raison de sa faible biodégradabilité. Les principaux processus impliqués dans sa transformation incluent :

- **Processus physico-chimiques** : Tels que la sorption, la précipitation, et la volatilisation, influencés par des facteurs comme le pH et la température.
- **Processus biologiques** : Certains micro-organismes peuvent métaboliser le plomb dans des conditions anaérobies, réduisant sa concentration.
- **Transport et transfert** : Le plomb peut être déplacé dans l'environnement par érosion, ruissellement et diffusion

⁶⁵ "Determination Of Lead By Colorimetric Methods: A Review." *Microchemical Journal*, Vol. 87, NO. 1, PP. 1-7. DOI: 10.1016/J.MICROC.2007.02.009. (2007)

⁶⁶ **Klaassen, C.D., & Watkins, J.B.** *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons*. 9th Edition. McGraw-Hill Education. 2015. Pp 511- 520

III.4.6. Le Nitrate de chrome (III)

Cette étude se concentre sur le nitrate de chrome (III), un composé chimique important dans les domaines industriels et environnementaux. Le nitrate de chrome (III) est un sel inorganique du chrome, où le chrome est dans l'état d'oxydation +3, ayant la formule chimique $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$. C'est un composé cristallin, souvent utilisé comme catalyseur, agent de tannage dans l'industrie du cuir, et dans le traitement des déchets. Le nitrate de chrome (III) est reconnu pour sa forte solubilité dans l'eau et sa stabilité sous certaines conditions, mais aussi pour sa toxicité qui nécessite des précautions d'usage strictes.

III.4.6.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du nitrate de chrome (III) :

Le nitrate de chrome (III) est généralement présenté sous forme de cristaux verts à bleu-vert. Les caractéristiques principales sont :⁶⁷

Propriété	Valeur
Formule chimique	$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$
Masse molaire	238.01 g/mol
Aspect	Cristaux verts ou bleu-vert
Solubilité	Très soluble dans l'eau
Point de fusion	Environ 56°C (décompose avant fusion)
Densité	~2.6 g/cm ³
États d'oxydation	Chrome à +3

Le nitrate de chrome (III) se décompose à la chaleur libérant des oxydes d'azote et des oxydes de chrome, plutôt que de fondre proprement.

III.4.6.2.2. Effets sur la santé :⁶⁸

L'exposition au nitrate de chrome (III) peut entraîner plusieurs effets toxiques, notamment par inhalation de poussières ou contact cutané. Les effets principaux comprennent :

- **Irritation cutanée et oculaire** : Peut causer des brûlures et des réactions allergiques.

⁶⁷ Sharma, B. K. Industrial Chemistry, 12th Edition, Krishna Prakashan Media, 2015, pp. 438-442.

⁶⁸ Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Chromium, U.S. Department of Health and Human Services, 2012, pp. 45-55.

- **Toxicité respiratoire** : Inhalation prolongée peut causer des troubles respiratoires, inflammation pulmonaire.
- **Effets systémiques** : À fortes doses, peut affecter le foie et les reins, ainsi que le système immunitaire.
- **Possibilité cancérigène** : Bien que le chrome (VI) soit plus toxique, une exposition chronique au chrome (III) peut aussi comporter des risques.

Les travailleurs dans l'industrie du tannage et la fabrication chimique sont les plus exposés.

III.4.6.2.3. Formes et applications :

Le nitrate de chrome (III) est utilisé principalement dans :

- Le tannage du cuir : Il fixe les protéines pour rendre le cuir durable.
- La synthèse organique et la catalyse : Agent oxydant dans certaines réactions chimiques.
- Traitement des eaux usées : Pour la précipitation de certains contaminants.

Il existe aussi des formes hydratées du nitrate de chrome (III), telles que $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, qui sont les plus courantes en laboratoire.

III.4.6.2.4. Détection et analyse du nitrate de chrome (III) :⁶⁹

Plusieurs méthodes analytiques permettent de détecter et quantifier le nitrate de chrome (III), parmi lesquelles :

- **Spectrométrie d'absorption atomique (SAA)** : Technique sensible pour mesurer le chrome dans les solutions aqueuses.
- **Spectrométrie UV-Visible** : Permet l'identification qualitative grâce aux bandes d'absorption caractéristiques.
- **Chromatographie ionique** : Pour séparer et quantifier les nitrates.
- **Méthodes électrochimiques** : Capables de détecter les ions chrome avec haute précision.

⁶⁹ IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 49, Chromium, Nickel and Welding, WHO, 1990, pp. 90-110.

III.4.6.2.5. Stabilité et dégradation :

Le nitrate de chrome (III) est relativement stable en conditions normales, mais il se décompose sous l'effet de la chaleur ou en présence de substances réductrices ou oxydantes fortes. Sa solubilité dans l'eau favorise son transport dans l'environnement, où il peut subir des transformations chimiques en chrome (III) ou (VI), ce dernier étant beaucoup plus toxique et mobile.

IV. Généralités sur l'adsorption

IV.1. Introduction :

L'adsorption est un phénomène de fixation d'un soluté (molécule ou atome) sur la surface d'un solide à l'interface avec un liquide ou un gaz. Ce processus est réversible dans certains cas, et peut se produire soit par des forces physiques (comme les forces de Van der Waals), soit par des interactions chimiques (comme les liaisons covalentes). L'adsorption joue un rôle clé dans de nombreux processus industriels, tels que la purification de l'air et de l'eau, le contrôle de la pollution et la fabrication de produits chimiques.

Le concept d'adsorption a été introduit pour la première fois en 1881 pour différencier entre condensation et adsorption, et a depuis été largement étudié dans divers contextes scientifiques. Ce phénomène est crucial pour l'amélioration de la qualité de l'environnement et pour la séparation des substances indésirables d'un fluide (gaz ou liquide) ⁷⁰

IV.2. Définition de l'adsorption

L'adsorption est définie comme l'attachement de molécules ou d'ions d'un fluide (gaz ou liquide) à la surface d'un solide. Ce phénomène peut être observé à l'interface entre un solide et un fluide, et il est principalement dû à des interactions de surface. La quantité de matière adsorbée dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature chimique et physique de l'adsorbant, la température, et la pression du système.

⁷⁰ Guillet, J. Introduction à l'adsorption et ses applications industrielles. Paris : Éditions Techniques et Pratiques. 2010.p. 153.

Il existe une différence importante entre l'adsorption et l'absorption : dans l'adsorption, le soluté reste à la surface du solide, tandis que dans l'absorption, il pénètre dans le volume du solide. L'adsorption est souvent utilisée pour purifier des solutions, éliminer des impuretés, ou capter des gaz indésirables ⁷¹

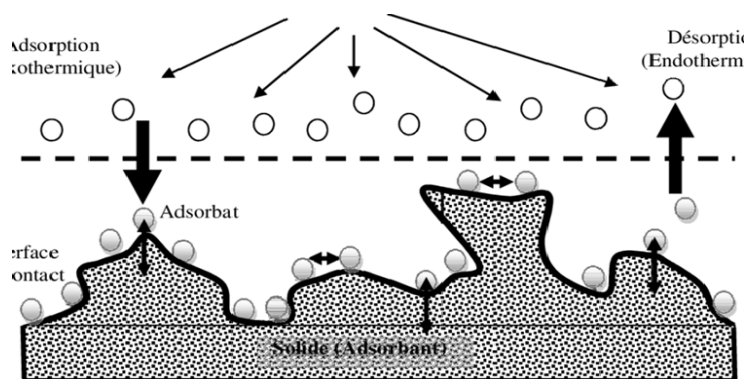


Figure 5: Phénomène d'adsorption ⁷²

IV.3. Types d'adsorption

L'adsorption peut être classée en deux types principaux, en fonction de la nature des interactions entre les molécules adsorbées et la surface de l'adsorbant.

IV.3.1. Adsorption physique (physisorption)

L'adsorption physique, ou physisorption, se caractérise par l'établissement de forces de faible énergie entre les molécules de l'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Ces forces incluent principalement les interactions de Van der Waals. Ce type d'adsorption est réversible, ce qui signifie que les molécules adsorbées peuvent être libérées sous certaines conditions (par exemple, une augmentation de la température ou une diminution de la pression).

La physisorption est typiquement observée à des températures basses et à faible pression. Elle est souvent associée à des adsorbants à surface spécifique élevée, tels que les charbons actifs et les zéolithes, qui offrent une grande surface de contact avec les molécules à adsorber. La

⁷¹ Banerjee, S., Shukla, D., & Gupta, R. (2014). Adsorption processes in water treatment. Springer. 2014, p. 105.

⁷² Anonyme: https://www.researchgate.net/figure/Phenomene-dadsorption-27-124_fig10_339213550 Mohammed Ali Hadj Ammar Doctoral Dissertation - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [accessed 2 May, 2024]

quantité d'adsorption est généralement plus faible et ne modifie pas la structure chimique des molécules adsorbées ⁷³

IV.3.2 . Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique, ou chimisorption, est un phénomène plus énergétiquement intense, qui implique la formation de liaisons chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Ce type d'adsorption est généralement irréversible, car il implique des forces chimiques fortes, telles que les liaisons covalentes.

Contrairement à la physisorption, où les molécules adsorbées restent mobiles à la surface, la chimisorption forme une couche plus stable et plus fixe de molécules adsorbées. Ce processus est favorisé à des températures élevées et se caractérise par une adsorption spécifique qui peut être très forte, comme c'est le cas pour les métaux et certains catalyseurs. La chimisorption est souvent utilisée dans des applications industrielles où une fixation forte et stable des molécules est nécessaire, par exemple dans les catalyseurs hétérogènes et les systèmes de stockage d'énergie ⁷⁴

Physisorption	Chimisorption
• interactions faibles (Van der Waals) • T basse • $\Delta H < 40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ • adsorption multicouches • E_a faible $\rightarrow$ rapide • Processus non spécifique • Réversible	• interactions fortes (liaisons chimiques) • T élevée • $40 \text{ kJ.mol}^{-1} < \Delta H < 800 \text{ kJ.mol}^{-1}$ • adsorption monocouche • E_a élevée $\rightarrow$ lente • Processus spécifique • Réversible à haute T seulement

Tableau 5 : La différence entre adsorption physique et adsorption chimique ⁷⁵

⁷³ Horsfall, M., & Spiff, A. I. Adsorption of heavy metals by activated carbon. Journal of Environmental Science, 8(4),2003. p. 67.

⁷⁴ Weber, T., Kummer, R., & Dahlmann, S. Adsorption in environmental protection and energy systems. Environmental Journal, 12(2),2012. p. 78.

⁷⁵ <https://www.univ-tissemsilt.dz/fst/wp-content/uploads/Phénomènes de Surface et Catalyse Hétérogène 2021-2022>

IV.4. Mécanisme d'adsorption

Le mécanisme d'adsorption est un processus complexe qui implique plusieurs étapes de transfert de masse, depuis la phase fluide jusqu'aux sites actifs de l'adsorbant. Ce processus peut être résumé comme suit :⁷⁶

- **Diffusion du soluté de la phase liquide vers l'interface adsorbant/solution** : il s'agit de la diffusion externe (ou extra-particulaire).
- **Transfert à travers la couche limite (film liquide)** entourant la particule d'adsorbant.
- **Diffusion intra-particulaire** : déplacement des molécules à l'intérieur des pores de l'adsorbant.
- **Adsorption sur les sites actifs** présents à la surface interne ou externe de l'adsorbant.
- **Interaction adsorbant/adsorbat**, qui peut être de type physique (forces de Van der Waals) ou chimique (liaisons covalentes ou ioniques).

Ce processus est influencé par divers paramètres, notamment :

- La **surface spécifique** de l'adsorbant.
- La **taille des pores** et leur distribution.
- La **température, le pH, et la concentration initiale** de l'adsorbat.

IV.5. Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption décrivent la relation entre la quantité de soluté adsorbé à l'équilibre et sa concentration dans la phase liquide à température constante.

IV.5.1. Classification des isothermes d'adsorption

En 1940, Brunauer, Deming, Deming et Teller (BDDT) ont proposé une classification des isothermes d'adsorption en cinq types distincts (I à V). Cette classification a été ultérieurement adoptée par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) comme référence pour décrire les différents comportements d'adsorption en fonction des caractéristiques des surfaces solides et des interactions adsorbat/adsorbant.⁷⁷

⁷⁶ Atkins, P., & de Paula, J. Physical Chemistry. Oxford University Press, 10e éd., 2014, p. 990

⁷⁷ Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W. (1999). Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. Academic Press.

Chaque type d'isotherme correspond à un mécanisme d'adsorption particulier et peut être modélisé par des équations spécifiques.

IV.5.1.1. Isotherme de type I : Adsorption en monocouche (monolayer adsorption)

L'isotherme de type I est caractéristique d'un remplissage en monocouche, correspondant à une saturation rapide des sites d'adsorption lorsque tous les micropores disponibles sont occupés. Ce type est typique des matériaux microporeux tels que les charbons activés ou les zéolithes, ainsi que des surfaces comme le mica ou le tungstène.

On rencontre ce comportement aussi bien en physisorption (adsorption physique) qu'en chimisorption (adsorption chimique). L'isotherme de type I est fréquemment décrite par les modèles de Langmuir et de Freundlich, où l'adsorption est limitée par l'encombrement stérique à une ou deux couches moléculaires, parfois jusqu'à quatre.

IV.5.1.2. Isothermes de types II et III : Adsorption sur surface non poreuse

Les isothermes de types II et III sont généralement modélisées par l'équation BET (Brunauer, Emmett et Teller), utilisée pour décrire l'adsorption en multicouche.

IV.5.1.3. Isotherme de type II : Adsorption en multicouches progressives

Ce type d'isotherme correspond à une adsorption progressive sur une surface non poreuse. Dans un premier temps, une monocouche moléculaire se forme, suivie par la formation successive de multicouches à mesure que la pression relative augmente. Ce phénomène reflète un processus d'adsorption plus complexe que le simple remplissage d'une couche unique.

IV.5.1.4. Isotherme de type III : Adsorption sur surface faiblement attractive

Les isothermes de type III sont rares. Elles indiquent que l'adsorption multicouche commence dès les premiers stades de l'adsorption, avant même que la surface soit complètement couverte d'une monocouche. Ce comportement se manifeste généralement lorsque la surface du solide est hétérogène, présentant des sites d'adsorption préférentiels avec des forces d'attraction plus élevées.

IV.5.1.5. Isothermes de types IV et V : Adsorption avec condensation capillaire

Ces types sont typiquement observés lorsque l'adsorbant possède une structure poreuse, notamment mésoporeuse (pores de taille moyenne).

- Au début, les courbes d'adsorption ressemblent à celles des types II et III.
- Lorsque la pression relative augmente, un phénomène de condensation capillaire se produit à l'intérieur des pores, ce qui provoque une hystérésis dans l'isotherme.
- L'isotherme de type IV implique généralement des interactions plus fortes que celle du type V, où l'adsorption initiale est plus faible.

IV.6. Modèles d'isothermes d'adsorption

IV.6.1. Modèle de Langmuir⁷⁸

Le modèle de Langmuir suppose une adsorption sur une surface homogène, avec formation d'une monocouche sans interaction entre les molécules adsorbées. Les hypothèses sont :

- Les sites sont identiques et équivalents.
- Une molécule ne peut se fixer que sur un seul site.
- Il n'y a pas de migration des molécules adsorbées.
- L'adsorption est réversible et atteint un équilibre.

L'équation de Langmuir est :

$$\frac{e q_{\max} K_L C}{e K_L C + 1} = e q$$

Où :

- q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- C_e : concentration de l'adsorbat en solution à l'équilibre (mg/L)
- $q_{\max}$: capacité maximale d'adsorption (mg/g)

⁷⁸ Langmuir, I. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. Journal of the American Chemical Society, vol. 38, 1916, p. 2221

- KL: constante de Langmuir (L/mg)

IV.6.2. Isotherme de Freundlich⁷⁹

L'isotherme de Freundlich est un modèle empirique adapté aux surfaces hétérogènes. Elle suppose une adsorption sur des sites de différentes énergies :

$$q_e^{n/1} K_f C = q$$

Où :

- q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- C_e : concentration de l'adsorbat à l'équilibre (mg/L)
- $K_f n/1$: constantes de Freundlich caractéristiques du système

Ce modèle est souvent utilisé pour représenter des processus d'adsorption sur des charbons actifs, des argiles, et d'autres matériaux poreux naturels.

IV.7. Matériau naturel (SB)

IV.7.1. Définition du sable :

Le sable, également appelé arène, est une roche sédimentaire meuble composée de petites particules provenant de la dégradation d'autres roches. Les dimensions des particules de sable varient entre 0,063 mm et 2 mm. Chaque particule individuelle est appelée un grain de sable. Les sables sont classés selon leur granulométrie, c'est-à-dire la taille des grains. Ces grains, suffisamment légers, peuvent être transportés par les agents naturels tels que le vent et l'eau, ce qui mène à leur accumulation pour former des plages ou des dunes. Un vent fort chargé de sable est communément désigné comme une "tempête de sable".

⁷⁹ Freundlich, H. Über die Adsorption in Lösungen. Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 57, 1906, p. 385

Le sable peut présenter une grande variété de couleurs en fonction des types de minéraux présents dans les particules, lesquels proviennent de la roche-mère. Parmi ces couleurs, on retrouve :⁸⁰

- **Noir** : comme le sable provenant de roches volcaniques ;
- **Blanc** : comme le sable de White Sands, formé de dunes de gypse pur, ou le sable coquillier, enrichi de débris de coquillages et de quartz ;
- **Grenat** : exemple de la plage de Groix, constituée principalement de grenats, minéraux riches présents dans la roche-mère de l'île ;
- **Rose** : comme les plages de la côte de granit rose.



Figure 6: Différents couleur du sable.

Cette diversité provient de l'existence d'environ 180 minéraux différents découverts dans les sables, sur les 4 900 espèces identifiées par les minéralogistes. Selon le type et la quantité de pigments, tels que les oxydes de fer, qui recouvrent les grains de sable, la couleur du sable peut prendre des teintes jaunâtres ou rouillées.

IV.7.2. Composition du sable

Le sable est constitué principalement de grains de silice (SiO_2), qui proviennent de la dégradation mécanique des roches. Sa composition peut varier en fonction de la source et des conditions géologiques, mais il contient généralement des minéraux tels que le quartz, le feldspath, la mica, et d'autres minéraux moins courants. Les particules de sable sont souvent de forme angulaire ou arrondie, selon leur mode de formation et leur transport.⁸¹

⁸⁰ Leroy, J. – Matériaux de construction : propriétés et utilisations, Éditions Eyrolles, 2015, p. 92

⁸¹ "Le sable : composition et propriétés" (M. Dupont, 2012, p. 45

En outre, la taille des particules de sable varie généralement entre 0,0625 mm et 2 mm. Le sable peut être classé en fonction de la couleur, qui dépend des minéraux qu'il contient (par exemple, du sable blanc, noir, ou rouge).

Tableau 6 : Principaux minéraux du sable.⁸²

Constituant	Couleur	Transparence	Densité	Caractères distinctifs
Quartz (tectosilicate)	la couleur est variable, souvent plusieurs couleurs sur un même grain.	opaque ou translucide	2,5 - 3	Polyminéral, un même grain est généralement formé de plusieurs couleurs
Feldspaths (groupe de tectosilicates)	blanc, rose, gris jaunâtre, brunâtre.	translucide à opaque	2,5 - 2,7	Cassures contrôlées par 2 plans de clivage presque orthogonaux, éclat rappelant la porcelaine
Muscovite (mica blanc) (phyllosilicate)	incolore, brun à reflet bronzé lorsque altéré	transparent à translucide	2,8 - 2,9	Grains en forme de feuillets, reluisants sous la lumière
Calcite (carbonate)	blanc, jaunâtre	translucide	2,7	3 plans de clivage, fréquemment en grains rhomboédriques blanc, forte effervescence avec HCl
Olivine (nésosilicate)	vert	Transparent à translucide	3,3 - 3,4	Pas de clivage, comme de minéral s'altère très rapidement, se retrouve uniquement dans le sable provenant de la désagrégation mécanique d'une roche-mère riche en olivine

⁸² Anonyme: https://cours.polymtl.ca/PBedard/glq1100/Sables/identification_sable.html

Pyrite (sulfure)	jaune doré à éclat métallique	opaque	5	Grains à reflets métallique jaune doré
Zircon (nésosilicate)	incolore, jaune, brun	transparent à translucide	4,7	Pas de clivage, indice de réfraction élevé
Amphiboles (groupe d'inosilicates)	noir, brun foncé	opaque à translucide	3,1– 3,3	Grains noir brun ou vert, de forme allongée, 2 clivages (60° 120°), la principale variété noire est la hornblende

IV.7.3. Caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques du sable sont déterminées par sa composition minérale, sa granulométrie, ainsi que par ses propriétés chimiques.⁸³

- **Granulométrie** : La taille des particules de sable est un critère important qui affecte sa perméabilité et sa réactivité chimique. Le sable grossier a une perméabilité plus élevée, tandis que le sable fin peut contenir plus d'eau.
- **Densité et porosité** : La densité du sable varie entre 1,5 et 2,7 g/cm³, en fonction de sa composition et de son taux d'humidité. La porosité est également un facteur clé qui influence l'infiltration de l'eau.
- **Réaction chimique** : Le sable pur (principalement du quartz) est chimiquement inerte, mais il peut contenir des oxydes métalliques qui peuvent réagir sous certaines conditions. Par exemple, les sables riches en fer peuvent se colorer en rouge ou en jaune.
- **pH** : Le sable pur a un pH neutre, mais certains types de sable, comme le sable d'origine volcanique, peuvent être légèrement acides ou alcalins.

⁸³ "Les propriétés physico-chimiques du sable" (B. Lefèvre, 2015, p. 67)

IV.7.4. Utilisation ⁸⁴

Le sable a de nombreuses applications industrielles et commerciales, grâce à ses caractéristiques uniques.

- **Construction** : Le sable est utilisé dans la fabrication de béton, de mortier et de pavés. Il est également essentiel dans la production de verre, de briques, et de céramique.
- **Filtration** : Le sable est couramment utilisé dans les systèmes de filtration d'eau, grâce à sa capacité à retenir les particules solides.
- **Industrie pétrolière** : Le sable est également utilisé dans le processus de fracturation hydraulique pour extraire le pétrole et le gaz naturel. Il sert de support pour maintenir les fissures ouvertes dans les formations rocheuses.
- **Paysagisme et loisirs** : Le sable est utilisé dans les plages artificielles, dans les terrains de golf et pour les jeux de sable.

IV.7.5. Différents types de sable

IV.7.5.1. Sables naturels

Les sables naturels proviennent de diverses sources, notamment les rivières, les carrières et les plages marines, chacun ayant des caractéristiques uniques en fonction de son origine et de sa composition.

- **Sable de rivière** (également appelé « sable alluvionnaire ») : Ce sable est issu de l'action de l'eau sur les roches au fil du temps, ce qui lui donne une forme arrondie et une dureté accrue. Il est couramment utilisé dans la construction et l'aménagement, notamment pour les travaux de bétonnage et de filtration.⁸⁵
- **Sable de carrière** : Ce type de sable est extrait des sablonnières et présente des particules angulaires, contrairement au sable de rivière. Il est obtenu par excavation ou par concassage de roches extraites de carrières. Le sable de carrière est largement utilisé dans la fabrication de béton et comme matériau de remblai.
- **Sable de mer** : Provenant des roches sous-marines, le sable de mer est souvent riche en sel. Il nécessite généralement un rinçage minutieux pour éliminer l'excès de sel, qui

⁸⁴ "Applications industrielles du sable" (J. Martin, 2017, p. 103).

⁸⁵ Rath, R. & Sharma, S. Types of natural sands and their applications. International Journal of Construction Materials, 15(3), 2018. 242-256.

pourrait entraîner des efflorescences sur les surfaces traitées. Ce sable est utilisé principalement pour des applications industrielles ou dans la fabrication de béton, mais il doit être traité avant toute utilisation en raison de son contenu en sel.

- **Sable de feuilles** : Ce sable fin est caractérisé par de nombreux vides d'air et est récupéré sur les reliefs montagneux. En raison de sa texture légère et de sa porosité, il doit être mélangé avec d'autres types de sable pour être utilisé efficacement dans les constructions.⁸⁶

IV.7.5.2. Sables artificiels

Les sables artificiels sont créés par des procédés industriels tels que le concassage de roches ou de matériaux spécifiques. Ces sables sont souvent utilisés dans des applications où les sables naturels sont insuffisants ou où des propriétés particulières sont requises.

- **Sable concassé** : Ce sable est produit par le concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux ou de roches extraites. Il est particulièrement utile dans les situations où une texture plus homogène est nécessaire, comme dans les mélanges de béton.
- **Laitier granulé** : Après un refroidissement rapide, le laitier granulé est broyé pour produire un sable artificiel. Ce type de sable est souvent utilisé dans la construction et dans des applications spécifiques nécessitant un matériau plus dur et résistant.
- **Sable de laitier broyé** : Ce sable est obtenu en broyant le laitier granulé, offrant des particules de sable dur et stable. Il est utilisé dans la fabrication de béton haute performance et dans d'autres applications industrielles.⁸⁷

IV.7.5.3. Différents types de sable disponibles sur le marché

Sur le marché, on trouve une grande variété de sables, chacun ayant des caractéristiques distinctes qui le rendent adapté à des usages spécifiques. Voici quelques exemples des types de sable les plus couramment disponibles :⁸⁸

⁸⁶ Benaïssia, M. & Amara, S. Caractéristiques du sable naturel et son rôle dans la construction. *Journal of Construction Materials Science*, 12(2), 2020. 56-67.

⁸⁷ Gupta, A., & Joshi, N. Sables artificiels et leur utilisation dans les applications industrielles. *Journal of Materials Engineering*, 45(4), 2019 .233-245.

⁸⁸ Farah, S. & Akhtar, S. Types de sable et leur rôle dans les applications industrielles et environnementales. *Journal of Industrial Materials*, 22(1), 2020. 133-145.

- **Sable de rivière** : Il est extrait des lits des rivières et est largement utilisé dans la construction, ainsi que dans l'aménagement paysager pour les travaux de terrassement et de décoration.
- **Sable de carrière** : Ce sable est extrait des carrières et est utilisé dans la fabrication de béton, ainsi que comme matériau de remblai ou dans la production de mortier.
- **Sable siliceux** : Ce sable est principalement composé de silice (SiO_2) et est utilisé dans l'industrie du verre, dans la production de céramiques et pour la filtration de l'eau.
- **Sable marin** : Il provient des plages marines et est parfois utilisé pour des travaux d'assainissement ou comme matériau décoratif dans l'aménagement paysager. Cependant, son contenu en sel nécessite un traitement préalable.

IV.7.6. Utilisation du sable dans la purification de l'eau

Depuis des siècles, les civilisations humaines ont compris l'importance du sable pour purifier l'eau. Diverses méthodes ont été développées pour tirer parti de ses propriétés filtrantes naturelles, contribuant ainsi à améliorer la qualité de l'eau et à la rendre plus sûre à consommer.

IV.7.6.1. Filtres à sable lent

Les filtres à sable lent ont été utilisés par des civilisations anciennes, telles que les Égyptiens et les Indiens, pour purifier l'eau. Ces filtres étaient construits en superposant plusieurs couches de sable, où le sable fin était placé en haut et le sable plus grossier et le gravier en bas. L'eau passait lentement à travers ces couches, et le sable éliminait les impuretés et les particules solides présentes dans l'eau. Ce système de filtration simple mais efficace était utilisé pour rendre l'eau plus propre et plus sûre. Cette méthode est documentée dans les anciennes pratiques de purification de l'eau.

IV.7.6.2. Puits de sable

Les anciens creusaient des puits dans des zones riches en couches de sable et de limon. Lorsque l'eau s'infiltrait à travers ces couches, le sable agissait comme un filtre naturel, éliminant les impuretés et les particules suspendues. Cette méthode permettait d'obtenir de l'eau plus propre.

en utilisant la filtration naturelle du sable, et elle est encore utilisée dans certaines régions pour purifier l'eau à faible coût.⁸⁹

IV.7.6.3. Bassins de décantation avec du sable

Une autre méthode utilisée par nos ancêtres était l'utilisation de bassins de décantation. Dans cette méthode, l'eau était laissée dans un bassin pendant un certain temps pour permettre aux particules lourdes de se déposer au fond. Après cette période, l'eau était filtrée à travers des couches de sable pour éliminer les particules fines restantes et autres impuretés. Cette technique permettait d'améliorer la qualité de l'eau en éliminant progressivement les contaminants plus gros et plus petits.

IV.7.6.4. Filtres à sable multiples

Certaines cultures anciennes, notamment les Romains et les Grecs, utilisaient des systèmes de filtres à sable multiples. Ces systèmes consistaient en plusieurs filtres successifs contenant différentes couches de sable et de gravier. Chaque couche filtrante avait une fonction spécifique et augmentait l'efficacité de la purification de l'eau. Ces systèmes étaient relativement avancés pour leur époque et sont considérés comme des ancêtres des systèmes modernes de filtration de l'eau⁹⁰

IV.7.6.5. Purification de l'eau avec des récipients en sable

Une autre méthode utilisée par nos ancêtres consistait à purifier l'eau en la plaçant dans des récipients faits de sable compacté. Ces récipients permettaient à l'eau de passer très lentement à travers le sable, aidant ainsi à filtrer les impuretés et contaminants. Ce type de purification, bien que simple, était efficace pour améliorer la qualité de l'eau dans les communautés anciennes.⁹¹

Ces différentes méthodes de filtration, qui utilisent des matériaux simples comme le sable et le gravier, étaient couramment employées pour purifier l'eau et la rendre plus sûre à la consommation. Même si aujourd'hui, nous avons des technologies plus avancées, de nombreuses techniques anciennes de filtration continuent d'influencer les systèmes de

⁸⁹ Shamsi, A. & Azad, M. Ancient Water Filtration Techniques: The Role of Sand and Gravel. *Journal of Historical Engineering Practices*, 17(2), 2020. 45-59.

⁹⁰ Hodge, A. Trevor, *Aqueducts -- Rome -- History, Water-supply -- Rome -- History, Rome -- Antiquities*, livre, 1992

⁹¹ Singh, R. & Patel, S. Traditional Water Purification Methods in Ancient Civilizations. *Water Treatment Journal*, 28(3), 2018. 220-233.

purification modernes, notamment dans les pays en développement où les ressources sont limitées.

IV.7.6.6. Filtre à sable pour piscine

Les filtres à sable, qui ont été utilisés depuis l'Antiquité pour purifier l'eau, sont également largement utilisés aujourd'hui pour la filtration de l'eau des piscines. Ils sont connus pour leur efficacité et leur simplicité technique, et ils offrent plusieurs avantages importants.⁹²

- **Efficacité de filtration** : Les filtres à sable sont particulièrement efficaces pour éliminer les particules fines, les débris et même les micro-organismes de l'eau de la piscine, garantissant ainsi une eau cristalline et propre.
- **Simplicité d'utilisation** : Une fois installés, les filtres à sable nécessitent peu d'entretien et sont faciles à utiliser. Cela les rend très populaires parmi les propriétaires de piscines.
- **Coût abordable** : Comparés à d'autres systèmes de filtration plus complexes, les filtres à sable sont souvent plus abordables à l'achat et à l'entretien, ce qui en fait une option économique pour maintenir la qualité de l'eau dans les piscines.

IV.7.7. Avantages du sable comme un filtrant naturel

L'utilisation du sable comme matériau de filtration présente plusieurs avantages notables qui en font un choix idéal pour le traitement de l'eau à différentes échelles, des installations domestiques aux grandes usines de traitement des eaux usées.

- **Abondance et coût faible** : Le sable est un matériau largement disponible et peu coûteux, ce qui le rend accessible pour une utilisation à grande échelle dans la purification de l'eau.
- **Grande surface spécifique** : La structure granulaire du sable offre une grande surface pour l'adsorption des micropolluants, ce qui améliore son efficacité en tant que filtre naturel pour éliminer les contaminants de l'eau.⁹³
- **Simplicité et faible entretien** : Les filtres à sable sont simples à concevoir et nécessitent peu de ressources pour leur fonctionnement, ce qui les rend accessibles et économiquement viables pour diverses applications.

⁹² Smith, A. & Turner, L. The Efficiency of Sand Filters in Pool Water Treatment. *Pool Maintenance Journal*, 9(1), 2021. 112-124.

⁹³ Mehta, R. & Shankar, V. The Benefits of Sand as a Natural Filtration Material for Water Treatment. *Water Purification and Sustainability*, 33(4), 2020. 147-160.

- **Durabilité et réutilisation** : Le sable peut être facilement régénéré et réutilisé après nettoyage, par exemple par lavage à contre-courant, ce qui en fait une solution durable pour le traitement de l'eau ⁹⁴

⁹⁴ Kumar, A., & Yadav, S. Natural Filtration Materials for Water Treatment: The Role of Sand. Environmental Engineering Review, 17(3), 2022. 105-118.

Partie II : d'étude expérimentale

Introduction :

Cette partie décrit la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour répondre aux objectifs de cette étude. Nous présentons les protocoles suivis, les réactifs et matériaux utilisés, ainsi que les techniques d'analyse employées pour caractériser les produits obtenus. Notre approche s'appuie sur des méthodes validées en chimie, analyses spectroscopiques (RX, IR, UV-Vis) tout en justifiant les choix opérés en fonction des contraintes expérimentales et des résultats attendus. Les conditions opératoires ont été optimisées pour maximiser le rendement. Les limites éventuelles liées aux techniques ou aux manipulations seront discutées afin d'éclairer l'interprétation des données.

Les paramètres étudiés incluent :

- La granulométrie et la composition du sable (analyse par DRX).
- Les conditions opératoires (temps de contact , masse , concentration ,pH ,température).
- La cinétique d'adsorption (modèles de Langmuir/Freundlich).
- Etude thermodynamique

. Réactifs et appareils utilisés :**. Réactifs utilisés :**

Les produits et réactifs utilisés dans les différentes étapes de nos recherches sont dans le tableau suivant :

Tableau1 : Récapitulatif des réactifs utilisés

Réactifs	Formule brute	Fournisseurs	Masse molaire
Hydroxyde de sodium	NaOH	Riedel- de Haein	40 g/mol
Arsenazo	C ₂₂ H ₁₈ As ₂ N ₄ O ₁₄ S ₂	Fluka	776.4 g/mol
Tampon 4	/	/	/
Acid- chloridrique	HCl (35-38%)	Biochem	36.46g/mol
Sulfate de plomb (II)	Pb(SO ₄)	Riedel- de Haein	303.27g/mol
Chromium(III) nitrate nonahydrate	Cr(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	SIGMA-ALDRICH	400.15 g/mol
Bleu de méthylène	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S	/	319.85g/mol

1. Appareils et instruments utilisés:

- Spectrophotomètre UV- Visible modèle: « UVmini-1240 »
- Spectrophotomètre IR modèle « FTIR »
- Agitateur magnétique type « DAIHAN Labtech COLTD »
- Balance analytique électronique type « Denver. Instrument »
- PH-mètre « Type HANNA pH 210 ; Instruments Microprocessor pH Meter
- Centrifugeuse type « -EBA20-HEttich ZenTRIFUGEN »
- Etuve (Memmert)
- Colorimetre (JENWAY 6051 Colorimetre)

1.1.Verreries:

Cristallisoirs.

Bécher :100ml,50ml.1000ml

barreaux.

Erlenmeyer.

Fioles jaugées :1000ml, 50ml. 250 ml

Verre de montre.

Spatule.

Cuvee.

Micropipette 1000 μ l.

Pissette.

Tubes à essais.

1.2.Technique d'analyse utilisée:**1.2.1. Spectroscopie Infrarouge (IR)**

Figure 2: spectrometre infrarouge

Définition :

La spectroscopie infrarouge est une technique analytique qui permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans une molécule organique en étudiant les absorptions de rayonnement infrarouge correspondant aux vibrations des liaisons chimiques.⁹⁵

⁹⁵ Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S., Introduction à la spectroscopie, De Boeck Université, 2014, p. 45

Principe :

Chaque liaison chimique vibre à une fréquence particulière. Lorsqu'un rayonnement infrarouge traverse une molécule, certaines longueurs d'onde sont absorbées selon la nature des liaisons. L'enregistrement de ces absorptions génère un spectre IR, véritable empreinte digitale de la molécule.⁹⁶

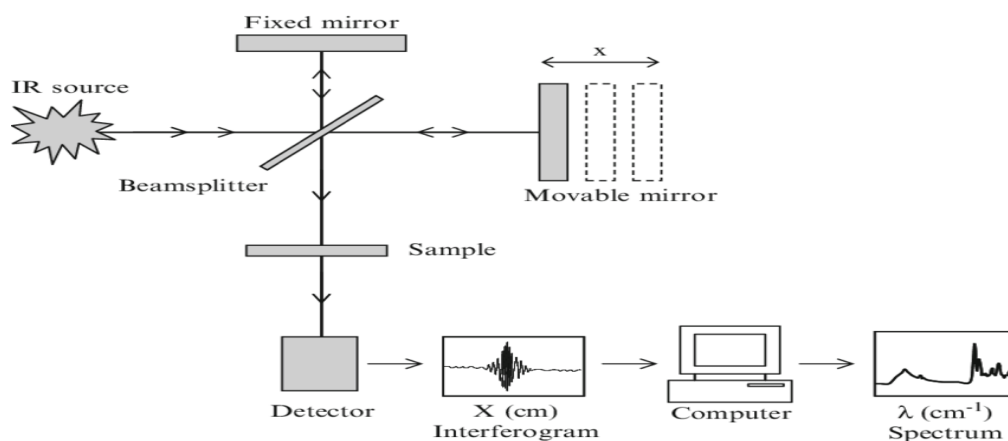


Figure3 :Schéma des caractéristiques essentielles d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). (Ojeda & Dittrich, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy...*, avril 2012)

1.2.1. Spectrophotométrie UV-Visible

Figure 4 : Spectrophotomètre UV- Visible modèle: « UVmini-1240 »

⁹⁶ Skoog, D.A., Holler, F.J., Crouch, S.R., Principes d'analyse instrumentale, De Boeck Supérieur, 2017, p. 383

Définition :

La spectrophotométrie UV-Visible est une méthode qui permet de mesurer l'absorbance de composés chimiques en solution dans les domaines de l'ultraviolet (200-400 nm) et du visible (400-800 nm), selon la loi de Beer-Lambert.⁹⁷

Principe :

Un faisceau lumineux monochromatique traverse une cuve contenant l'échantillon. L'intensité de la lumière absorbée dépend de la concentration du composé absorbant. L'absorbance est proportionnelle à la concentration :⁹⁸

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

où A = absorbance, ε = coefficient d'extinction molaire, c = concentration, l = longueur de la cuve.

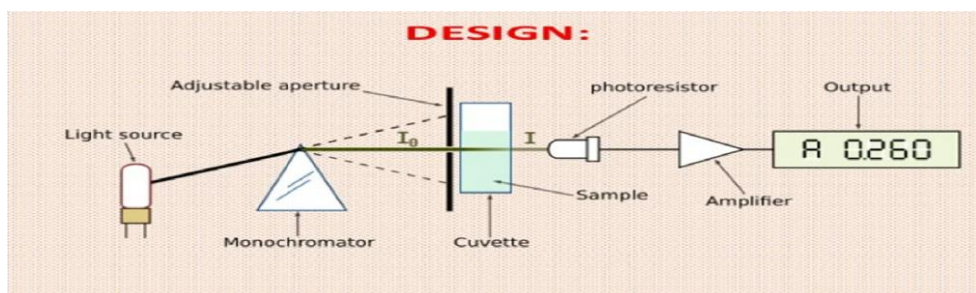


Figure 5 : Principe du spectrophotomètre UV-Visible

2. Protocol de traitement du matériau utilisé:

⁹⁷Skoog, D.A., Holler, F.J., Crouch, S.R., Principes d'analyse instrumentale, De Boeck Supérieur, 2017, p. 320

⁹⁸ Rouessac, F., Rouessac, A., Analyse chimique, Dunod, 2010, p. 135

Séchage à 100 C° jusqu'à fixation de la masse



-SB avant le séchage



-SB après le séchage



Tamissage (avec un tamis de 500 μm)



SB avant le tamissage



SB après le tamissage



Lavage à l'eau distillée jusqu'à la stabilisation de PH



SB avant lavage**SB apres lavage****2.1. Préparation de matériau (SB):****-Séchage :**

Nous avons mis une masse de 20 g de SB dans l'étuve pendant 24 h à 100°C Jusqu'à la fixation de la masse.

-tamissage :

Nous avons pris la masse seche de SB et nous lavons tamisé avec un tamis de 500µm pour eliminer les gros grains ,les cailloux et toute autre impureté

- Lavage:

Pour le traitement initial, réalisé dans des conditions connus , nous avons mis 10 g de SB en contact avec 2 L d'eau distillée dans un Erlenmeyer . nous avons ensuite agité le melange a une vitesse moyenne pendant 4 heures à température ambiante afin d'assurer un contact optimal et une homogénéisation complète de la solution. Après la période d'agitation, nous avons effectué une filtration , suivie d'un lavage intensif à l'eau distillée (en utilisant un volume total de 300 mL) jusqu'à stabilisation du pH du filtrat.

Tableau 2 : Evolution du PH du sable au cours du traitement et lavage de SB.

/	Temp	Volume de leau distillee	agitation	pH	Couleur des solutions	Couleur de sable
1	t_0	2L d'eau distillée	moyenne	8	Transparent	Marron
	$t = 4h$	//	//	8	Trouble	Marron
2	$t = 2h$	300 ml	//	7.9	Marron	Marron clair
3	$t = 2h$	300 ml d'eau distillée	//	7.75	Marron clair que avant	Marron clair
4	$t = 30m$	300 ml d'eau distillée	//	7.60	Rouge brique	Beige foncé
5	$t = 30m$	300 ml d'eau distillée	//	7.55	Beige	Beige foncé
6	$t = 30m$	300 ml d'eau distillée	//	7.48	Blanc trouble	Beige clair
7	$t=30m$	300 ml d'eau distillée	//	7.44	Presque transparant	Biege tres clair
8	$t=30m$	300 ml deau distillee	//	7.44	Presque transparant	Beige tres tres clair
9	$t = 30m$	300 ml d'eau distillée	//	7.44	Incolore	Blanc casse

2.2. Détermination du temps nécessaire pour le séchage du SB :

Nous avons mis une masse de 10 g de SB, après un lavage, dans l'étuve à 100°C Jusqu'à fixation de la masse.

Tableau 3 : Evolution de la masse de matériau SB au cours du séchage

Temp (mn)	0	25	30	35	40	45	50	55	60	65
masse (g)	10	9.80	9,65	9,52	9.44	9.30	9.11	9	9	9

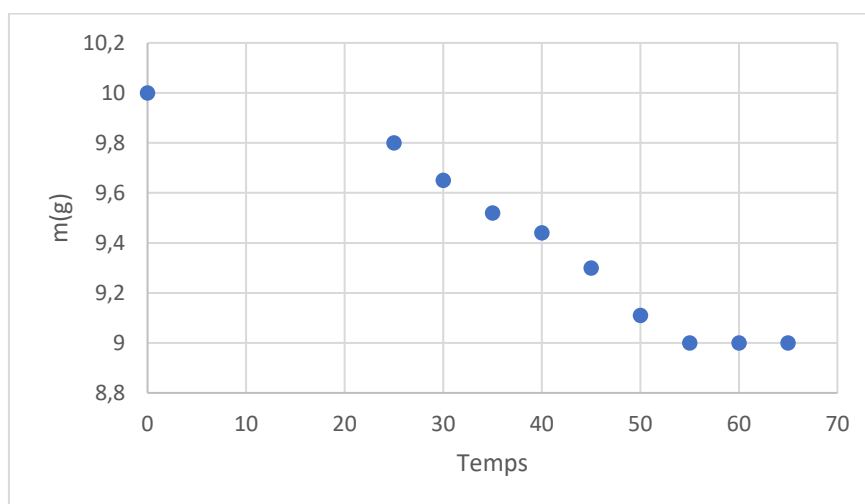


Figure 6: Evolution de la masse du SB en fonction du temps

Comme l'indique le **tableau** et la **figure.**, le temps nécessaire pour sécher cette masse de SB est de l'ordre de 55mn, donc nous avons obtenu 9 g du sable après l'avoir lavé, c'est-à-dire 90 %, ou en d'autres termes, nous avons perdu 10 %.

3. Protocole expérimentale d'adsorption des métaux lourds et colorant :

3.1.Préparation des solutions :

Préparation de solution du chrome dans Chromium(III) nitrate nonahydrate

Une solution mère contenant 10^{-3} mol/l de Chromium(III) nitrate nonahydrate $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ a été préparée en utilisant 100 ml d'eau distillée.

Préparation de solution du plomb dans sulfate de plomb

Une solution mère contenant 10^{-3} mol/l de sulfate de plomb $\text{Pb}(\text{SO}_4)$ a été préparée en utilisant 100 ml d'eau distillée.

Préparation de solutions du colorant BM :

Nous avons préparé une solution mère contenant 10^{-3} du bleu méthylène dans 100 ml de l'eau distillée.

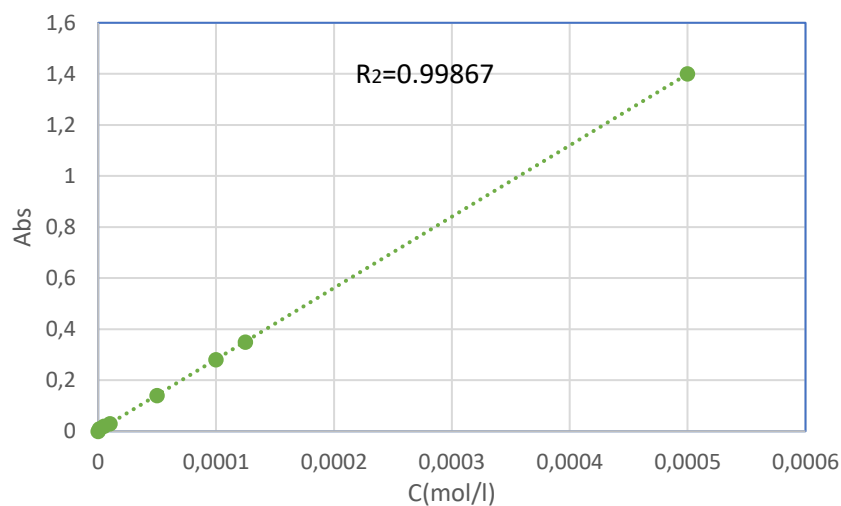
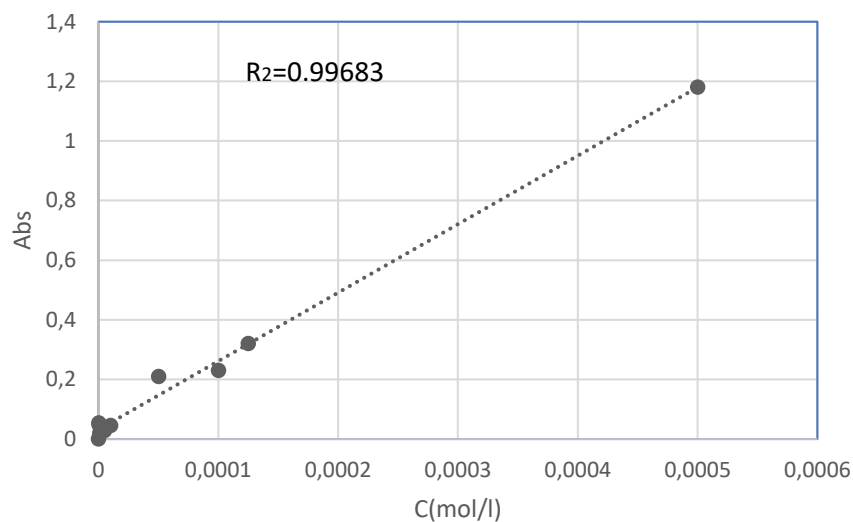
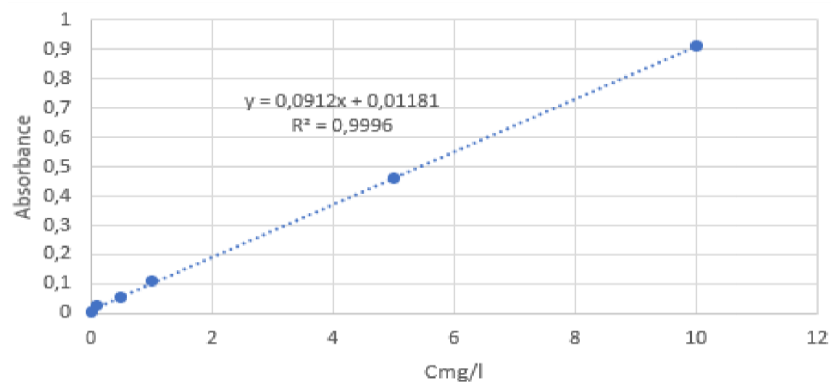
Préparation des solution diluees :

Une fois la préparation des solutions terminée, nous avons préparé des solutions diluées à partir de celles-ci pour tracer les courbes d'étalonnage du Pb, du Cr et du BM."*

C (mol/l)	5×10^{-4}	1.25×10^{-4}	10^{-4}	5×10^{-5}	10^{-5}	5×10^{-6}	10^{-6}	5×10^{-7}	10^{-7}
V (ml)	50	12.5	10	5	1	0.5	0.1	0.05	0.01

3.2.Courbes d'étalonnages :

Pour déterminer la concentration optimale des polluants utilisés dans cette étude, nous avons dosé avec précision différentes concentrations connues de métal Cr .Pb et de colorant BM la courbe d'étalonnage générée permet de déterminer la concentration de polluant, par Colorimètre

**Figure 7 : Courbe d'étalonnage de Chrome****Figure 8 : Courbe d'étalonnage de plomb****Figure 9 : Courbe d'étalonnage de Bleu de méthylène.**

Les courbes de calonnages est linéaire sur l'intervalle de concentration choisi, donc la loi de Beer Lambert ($A=\xi l c$) est vérifiée.

4. Etude Spectroscopique par IR de l'adsorption du sable

Les spectres de IR :

4.1. Les spectres de l'infrarouge du sable brute :

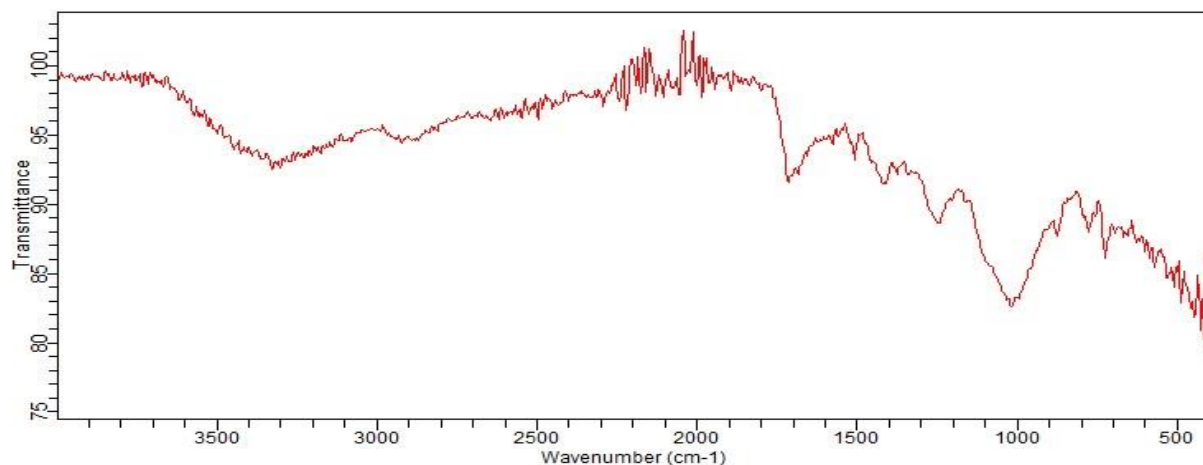


Figure 10 : Spectre infrarouge de SB

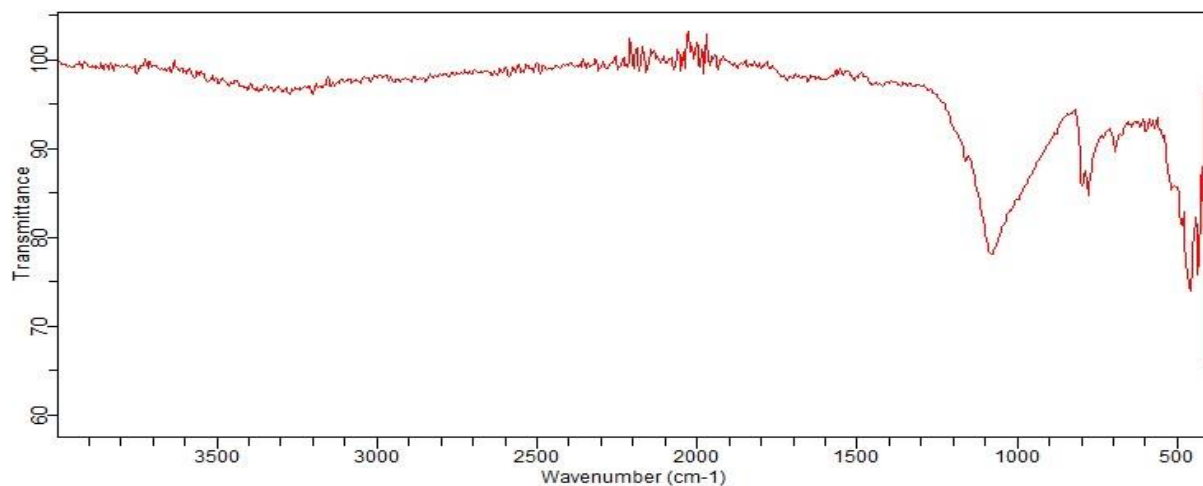


Figure 11: Spectre infrarouge de Cr par le SB

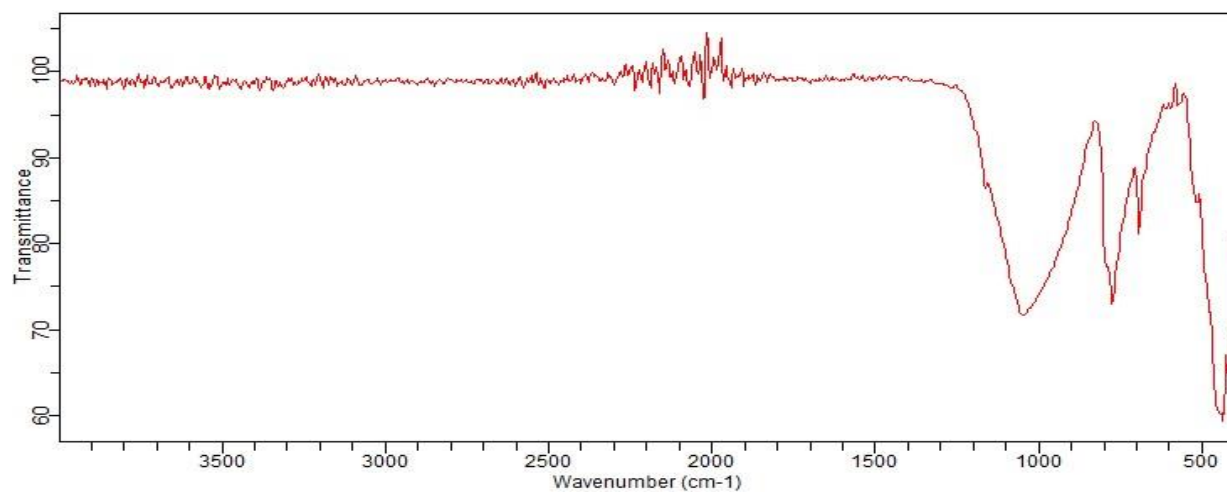


Figure 12: Spectre infrarouge de Pb par le SB

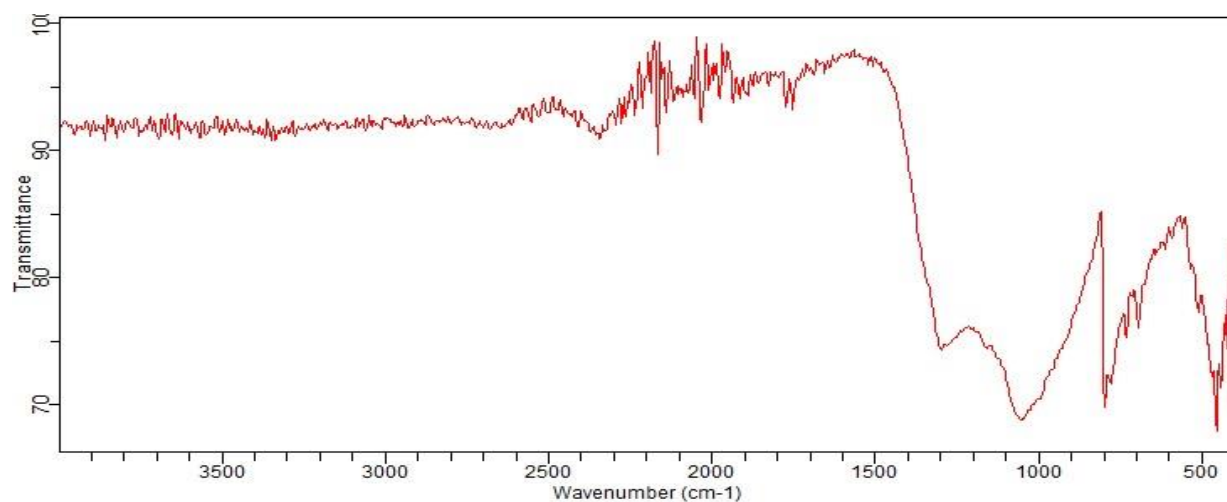


Figure 13: Spectre infrarouge de BM par le SB

4.2. Les spectres infrarouges du sable lavée :

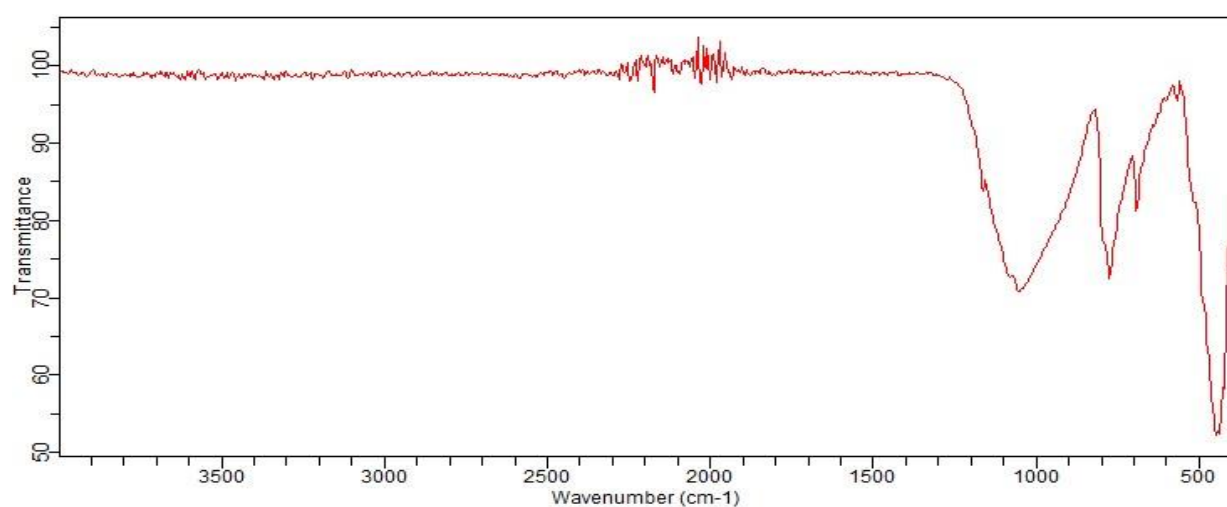


Figure 14: Spectre infrarouge de SL

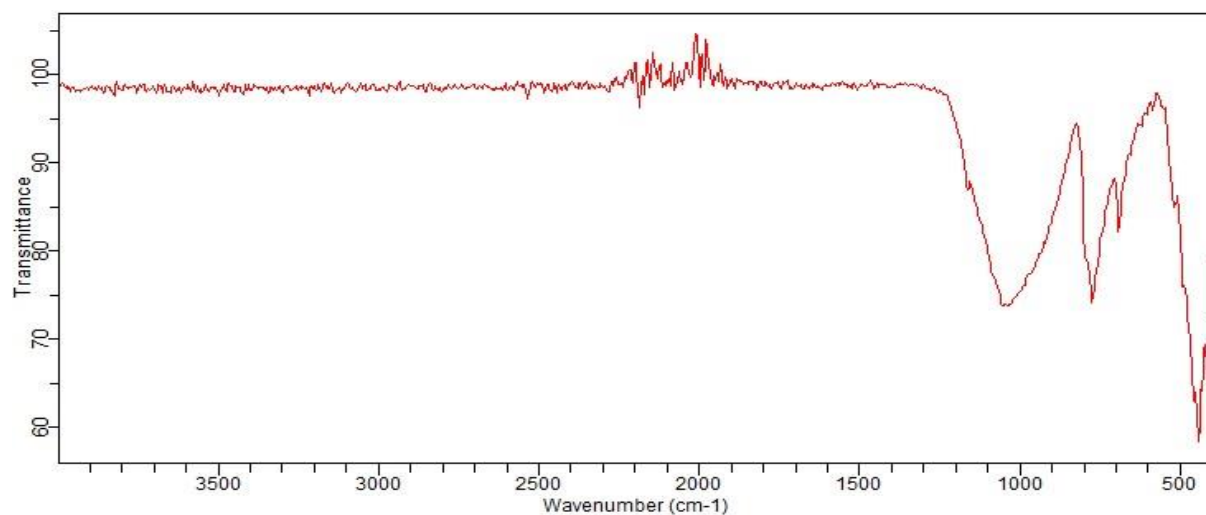


Figure 15 : Spectre infrarouge de Cr par le SL

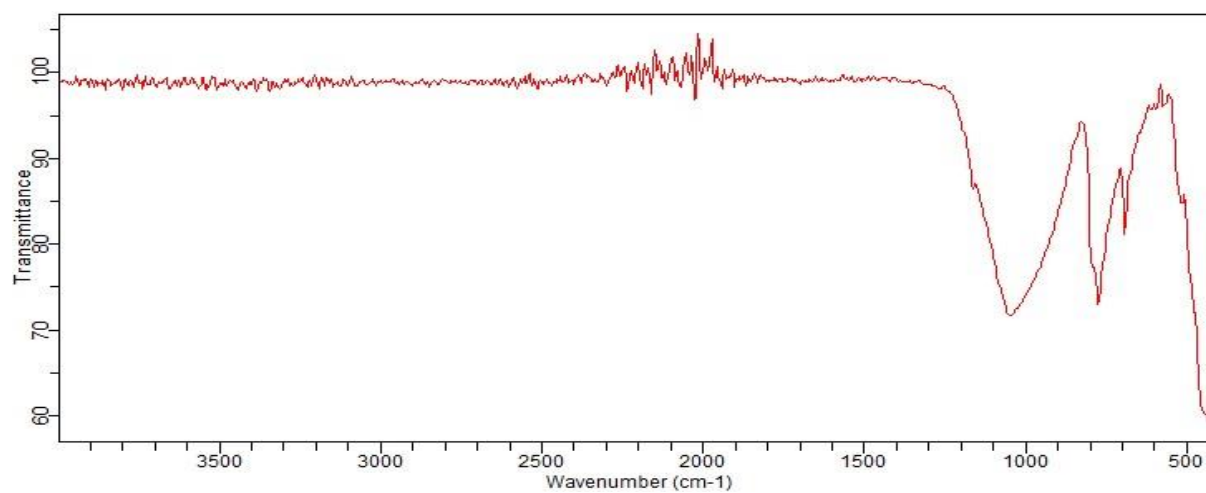


Figure 16: Spectre infrarouge de Pb par le SL

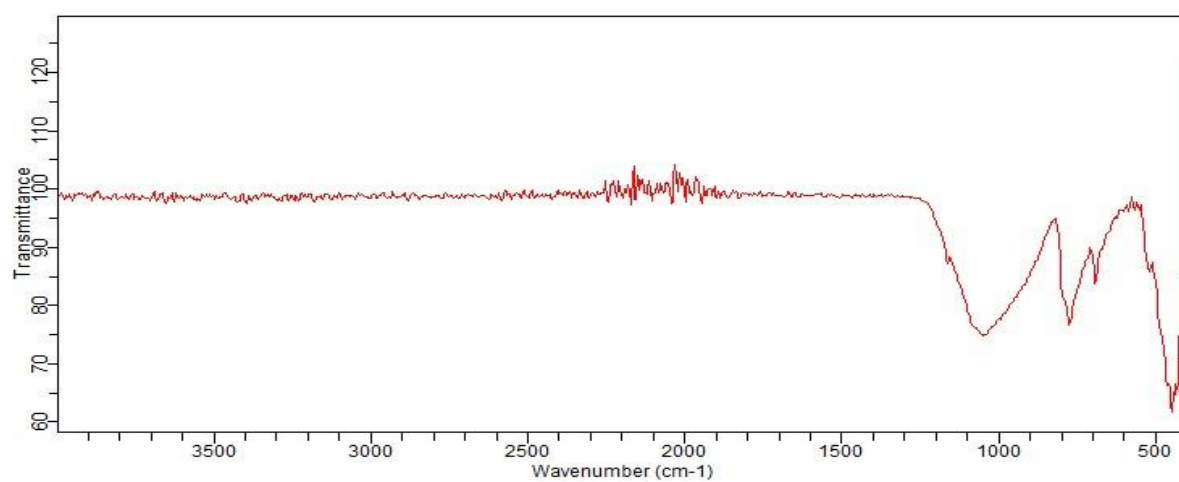


Figure 17: Spectre infrarouge de BM par le SL

4.3. Interprétation générale des spectres :

Le spectre infrarouge du sable brut montre la présence de plusieurs groupes fonctionnels actifs, ce qui reflète une surface chimiquement riche et réactive. On distingue principalement :

Une large bande O–H entre 3000 et 3600 cm^{-1} , correspondant aux vibrations d'élongation des liaisons hydroxyles ou de l'eau adsorbée.

Une bande C=O entre 1600 et 1800 cm^{-1} , liée aux vibrations des groupes carbonyles.

Une bande C–O située entre 1000 et 1200 cm^{-1} , caractéristique des liaisons présentes dans les alcools, esters ou acides.

5. Pb (SB) : les trois bandes (O–H, C=O, C–O) restent visibles, faible interaction, adsorption plutôt physique.
6. BM (SB) : seules les bandes C–O (1000–1200 cm^{-1}) persistent, disparition des O–H et C=O (3000–3600 et 1600–1800 cm^{-1}), ce qui reflète une interaction plus forte.
7. Cr (SB) : même observation, présence uniquement de la bande C–O, modification de la surface suite à une interaction chimique probable.

Les spectres de sable lavé :

8. . Le spectre du sable lavé montre la disparition de certaines bandes caractéristiques, notamment :

La bande O–H (habituellement entre 3200–3500 cm^{-1}), Et la bande C=O (autour de 1700 cm^{-1}), ce qui traduit une modification de surface due au lavage.

Cependant, la bande C–O reste visible entre 1000 et 1200 cm^{-1} , ce qui indique que cette fonction est toujours présente.

9. Cr lavé :

Le spectre montre la présence de deux bandes :

Une entre 1000 et 1300 cm^{-1} , correspondant à la liaison C–O,

Et une autre entre 600 et 800 cm^{-1} , assignée aux vibrations C–H.

10. Pb lavé :

On observe une seule bande claire autour de 1000 cm^{-1} , caractéristique de la liaison C–O.

Les bandes dans les zones de C=O (vers 1700 cm^{-1}) et O–H (3200–3500 cm^{-1}) sont absentes
→ ce qui reflète une surface plus pauvre en groupes fonctionnels.

11. BM lavé :

Le spectre présente :

Des bandes faibles entre 600 et 900 cm^{-1} , correspondant à C–H,

Et une bande C–O entre 1000 et 1100 cm^{-1} .

Cela confirme la présence réduite de groupes fonctionnels après lavage, avec dominance des fonctions C–O et C–H.

Après comparaison des spectres infrarouges avant et après lavage, on observe que certaines fonctions comme O–H et C=O ont disparu, ce qui reflète une purification effective de la surface du sable. En revanche, la fonction C–O reste présente dans tous les échantillons, indiquant sa stabilité chimique. De plus, l'apparition de bandes C–H dans quelques cas suggère la présence résiduelle de composés organiques légers. Ces résultats confirment que le lavage réduit les impuretés tout en maintenant une certaine activité de surface utile pour l'adsorption.

5. Les paramètres influencent l'adsorption(inorganique Pb ,Cr et organique BM)

Effet de nombres d'agitation : nous ajoutons 0,1 g de sable à 10ml d'une solution de(Cr,Pb et BM) à concentration 10^{-5} mol/l, et on agite à différents vitesses (faible, moyenne et fort).

Effet de temps d'agitation : à 10 ml d'une solution (Cr,Pb et BM) à concentration 10^{-5} mol/l, nous ajoutons 0,1 g de sable et agitons à une vitesse moyenne, en changeant le temps de contact (5min, 15min, 30min, 60min, 120min) à une température de 25°C.

Effets de concentration : à 10 ml d'une solution (Cr,Pb et BM) à une concentration différente, nous ajoutons 0,1g de sable, et nous agitons pendant le temp de contact qui on a obtenu à une vitesse moyenne et à une température de 25°C.

Effets de masse : On ajoute le sable à différentes masses (0,025g, 0,05g, 0,1g ,0.15g ,0,2g) à 10ml d'une solution de (Cr,Pb et BM) de concentration 10^{-5} mol/l et agitons à vitesse moyenne pendant le temp de contact à une température de 25°C.

Effets de pH : lors de cette étape, on change le pH (1,2,3,4,5,6,7,8) en utilisant les solutions de NaOH(0,1N) et HCl(0,1N), et on fixe la masse , la concentration 10^{-5} mol/L, une vitesse d'agitation moyenne et le temps de contact a température 25°C

Effets de température : à 10 ml d'une solution (Cr,Pb et BM) de concentration 10^{-5} mol/l, on ajoute une masse et on fixe le PH apres on agite pendant le temp de contact à vitesse moyenne avec un changement de température (5°C, 15°C,25°C,35°C,55°C).

5.1. Calcul du rendements (R%) et quantités adsorbées :

La loi utilisée pour calculer le rendement est :

$$R\% = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100$$

La loi utilisée pour calculer la quantité :

$$Q = (C_0 - C) \times \frac{v}{m} \times M$$

6. Etude cinétique de l'adsorption du chrome (Cr) pour le sable brute et lavé :

6.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux. suivants

Tableau 4: Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents temps à pH=8 (SB)

C_i (mol/L)	10-5				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	80.72	82.61	82 .57	82.36	82.02

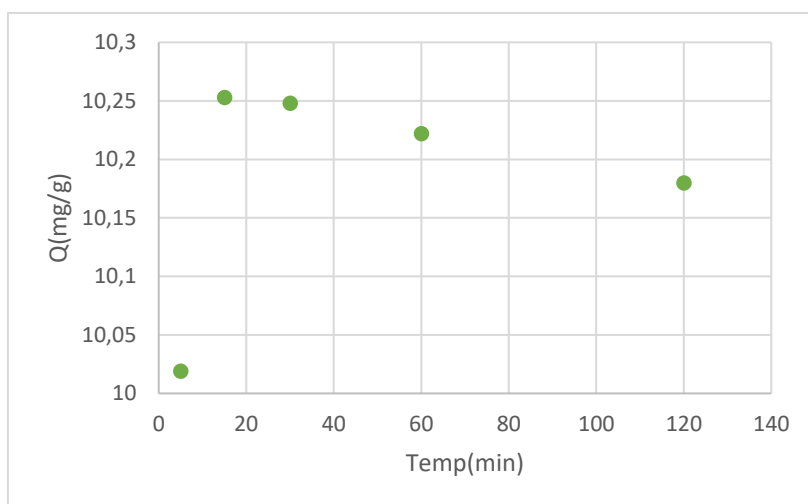


Figure18 : Effet de temps d'agitation du Cr par le (SB)

Tableau 5: Résultats cinétique de la rétention du (Cr) à différents temps à pH=8 (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	88.68	87.85	89.56	87.80	90.01

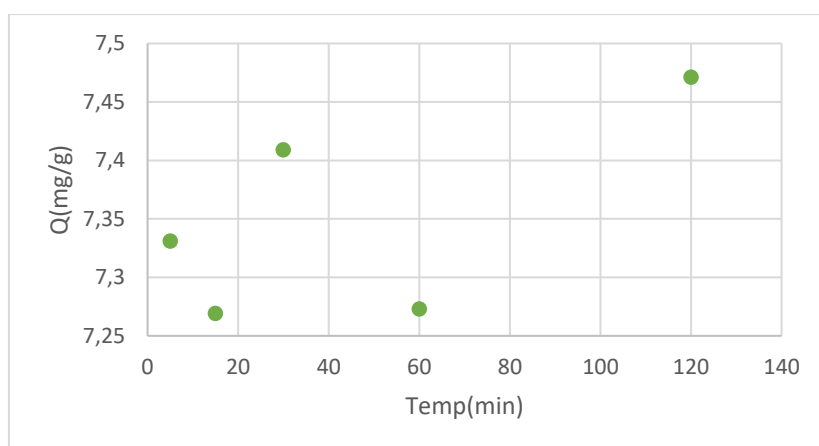


Figure 19 : Effet de temps d'agitation du Cr par le (SL)

- Pour les deux types de sable, l'adsorption du chrome augmente rapidement pendant les 15 premières minutes, indiquant une adsorption rapide initiale, puis se stabilise, signe d'un équilibre atteint. Le sable lavé (SL) montre une adsorption légèrement inférieure à celle du sable brut (SB).

6.2. Effet de masse :

Tableau 6: Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents masse à pH=8 (SB)

C_i (mol/L)	10-5				
Temp	15min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	91.03	91.07	87.59	91.91	91.16

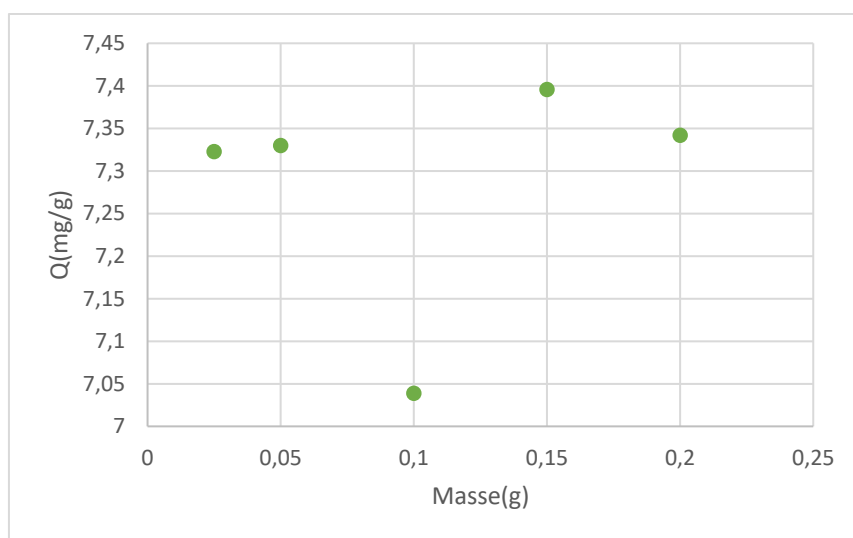


Figure 20 : Effet de masse du Cr par le (SB)

Tableau 7 : Résultats cinétique de la rétention du (Cr) à différents masse à pH=8 par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
Temp(min)	30min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	86.84	85.75	94.30	82.94	85.58

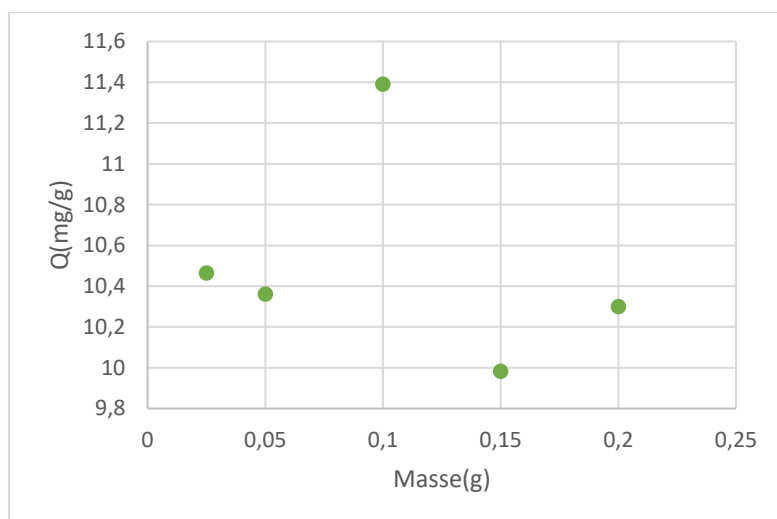


Figure 21 : Effet de masse du Cr par le (SL)

- L'augmentation de la masse entraîne une légère baisse de la quantité adsorbée par gramme (Q), mais une meilleure efficacité globale (R%). Les valeurs restent relativement stables avec une efficacité maximale autour de 0.15 g.

6.3. Effet de pH :

Tableau 8 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents pH (SB)

C_i (mol/L)	10-5						
Temp	15min						
Vitesse d'agitation	moyenne						
Masse(g)	0.15						
pH	1	2	3	4	5	6	8
R (%)	90.98	87.93	91.57	91.15	91.52	90.32	91.70

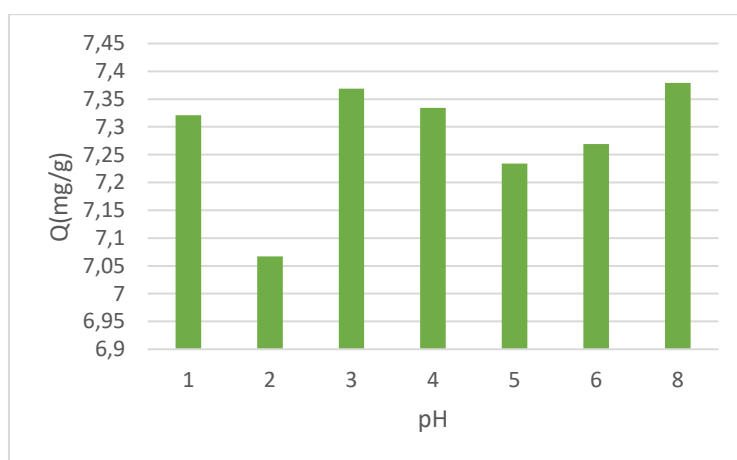


Figure 22 :Effet de pH du Cr par le (SB)

Tableau 9 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents pH par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5						
Temp	30min						
Vitesse d'agitation	Moyenne						
Masse(g)	0.1						
pH	1	2	3	4	5	6	8
R (%)	90.19	86.63	85.46	86.30	77.83	83.36	86.56

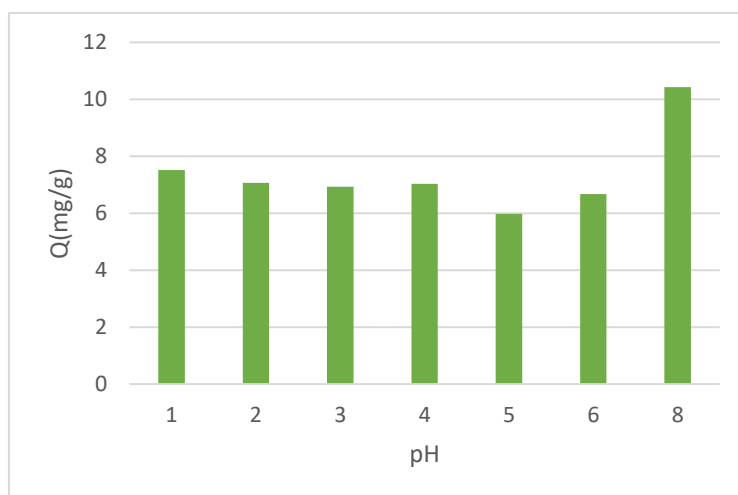


Figure 23 : Effet de pH du Cr par le (SL)

- L'adsorption est optimale à pH 8, indiquant que le milieu basique favorise la rétention du Cr. Les pH très acides (pH 1-2) réduisent l'efficacité d'adsorption.

6.4. Effet de température :

Tableau 10 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents température (SB)

C _i (mol/L)	10-5				
Temp (min)	15min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.15				
Temperature (°)	5	10	25	35	55
R (%)	92.91	95.18	98.57	97.31	91.45

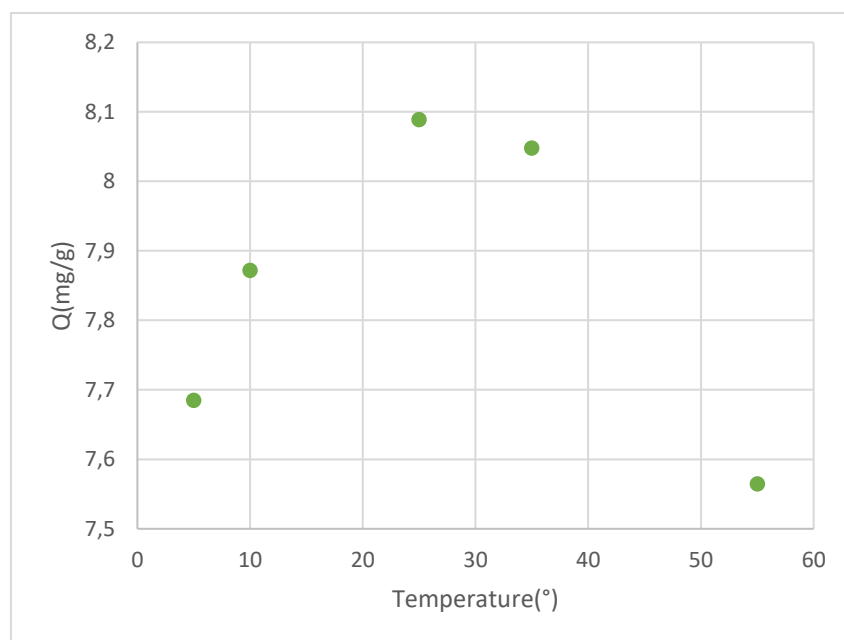


Figure 24: Effet de temperature du Cr par le (SB)

Tableau 11 : Résultats cinétique de la rétention du Cr à différents temperature par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
Temp (min)	30min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.1				
Temperature (°)	5	15	25	35	55
R (%)	82.73	83 .41	84.33	82.94	81.82

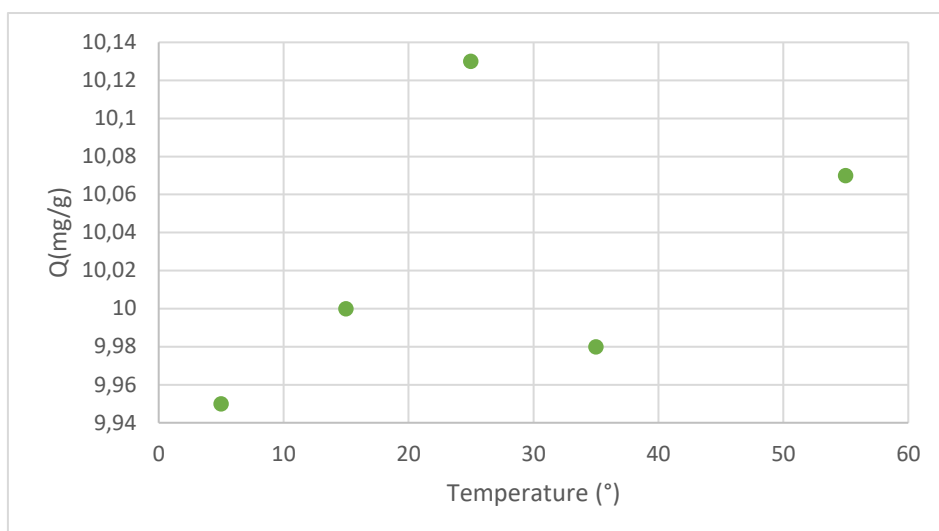


Figure 25 : effet de temperature du Cr par le (SL)

- L'adsorption du Cr est favorisée par l'augmentation de la température jusqu'à 25-35 °C, au-delà une légère baisse peut être observée, ce qui suggère une saturation des sites actifs.

7. Etude cinétique de l'adsorption du plomb (Pb) pour le (SB) et le (SL)

7.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:

Tableau 12 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents temps à pH=8 par le (SB)

C_i (mol/L)	10-5				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	74.34	77.55	75.35	76.25	76.07

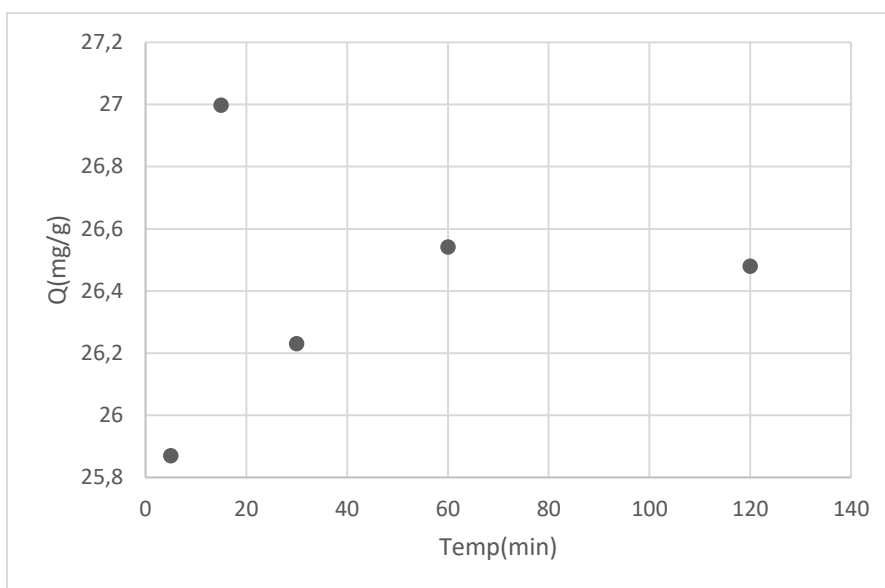


Figure 25 :Effet de temp dagitation de Pb par le (SB)

Tableau 12 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents temps à pH=8 par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	83.39	83.27	92.44	86.25	84.46

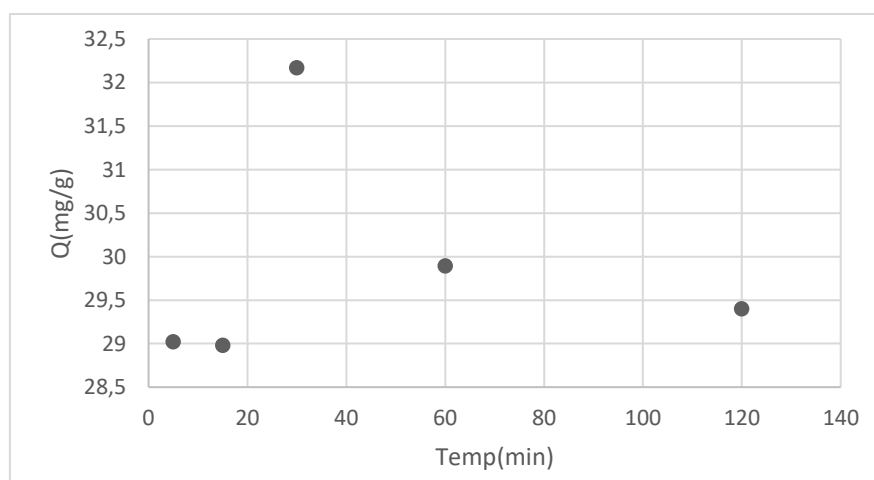


Figure 26 : Effet de temp dagitation de Pb par le (SL)

- L'adsorption atteint un maximum autour de 30 min pour SL.
- SL montre une capacité d'adsorption plus élevée que SB, avec des valeurs de Q supérieures et R% plus stables.

7.2. Effet de masse :

Tableau 13: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents masse à pH=8

C_i (mol/L)	10-5				
temp	15min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	81.84	80.89	82.26	88.80	83.69

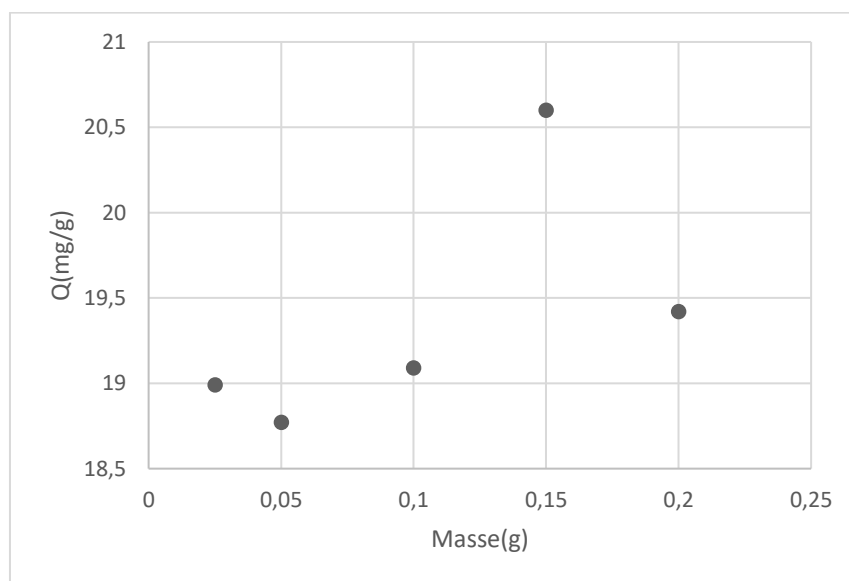


Figure 27 :Effet de masse de Pb par le (SB)

Tableau 14 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents masse à pH=8 par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
temp	15min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	82.91	89.28	81.84	83.15	85.47

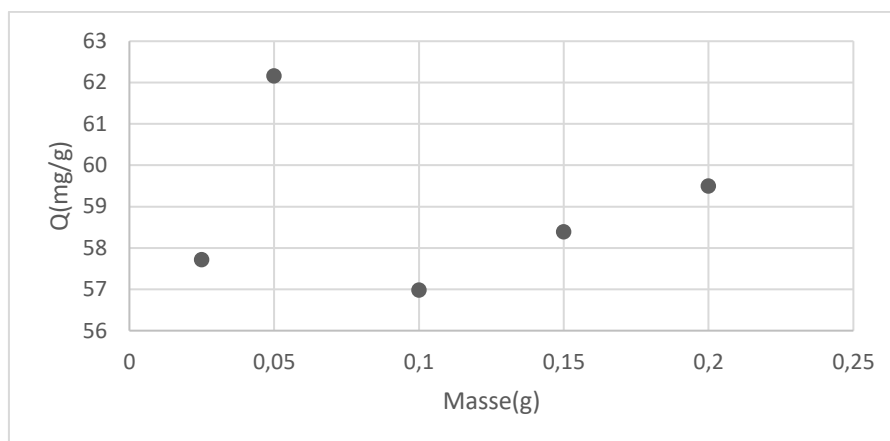


Figure 28 : Effet de masse de Pb par le (SL)

- L'efficacité d'adsorption augmente avec la masse, avec une efficacité maximale à 0.15-0.2 g. Le SL présente des valeurs de Q nettement supérieures, indiquant une meilleure affinité avec le Pb.

7.3. Effet de pH :

Tableau 15: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents pH par le (SB)

C_i (mol/L)	10-5								
temp	15min								
Vitesse d'agitation	moyenne								
Masse(g)	0.15								
pH	1	2	3	4	5	6	7	8	10
R (%)	92.20	89.52	93.39	92.73	88.98	92.02	88.39	89.10	88.63

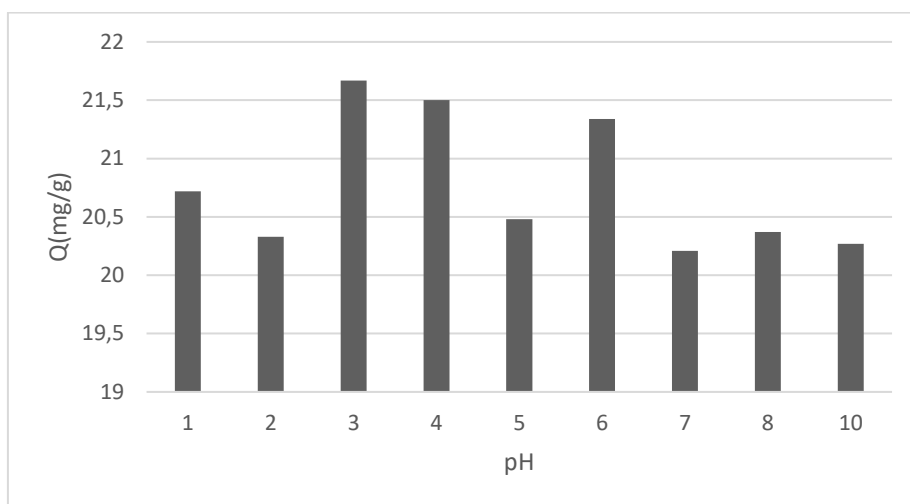


Figure 29 : Effet de pH de Pb par le (SB)

Tableau 16 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents pH par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5							
temp	30min							
Vitesse d'agitation	moyenne							
Masse(g)	0.05							
pH	1	2	3	4	5	6	7	8
R (%)	86.06	84.34	69.34	77.02	81.42	79.88	75.29	70.89

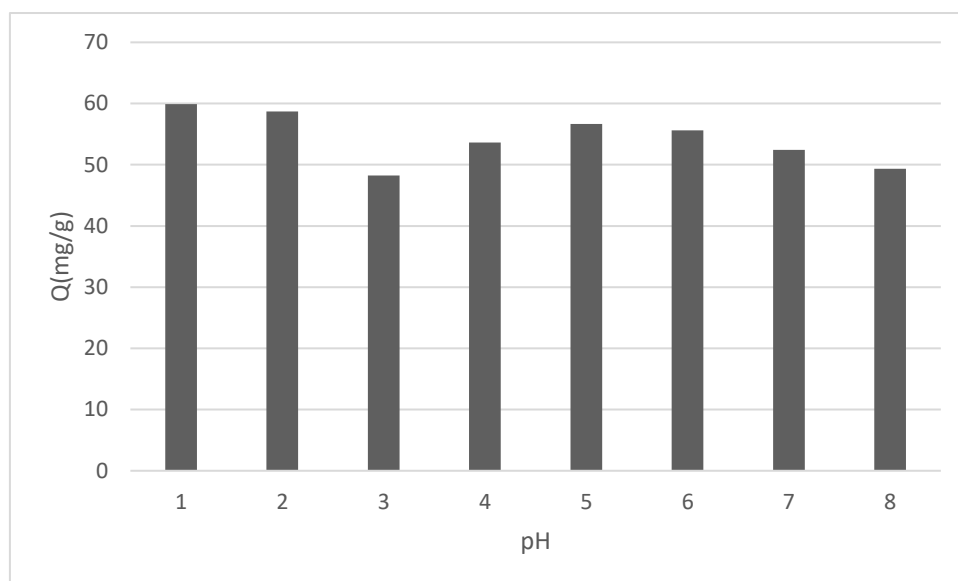


Figure 30 : Effet de pH de Pb par le (SL)

- L'adsorption du Pb est optimale autour de pH 3-5. Pour SL, l'adsorption diminue nettement au-delà de pH 6, suggérant que des espèces hydroxylées gênent l'adsorption.

7.4. Effet de température :

Tableau 17 : Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents température par le (SB)

C_i (mol/L)	10-5				
Temp (min)	15min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.15				
Temperature (°)	10	15	25	35	55
R (%)	88.57	89.58	90.47	91.30	97.5

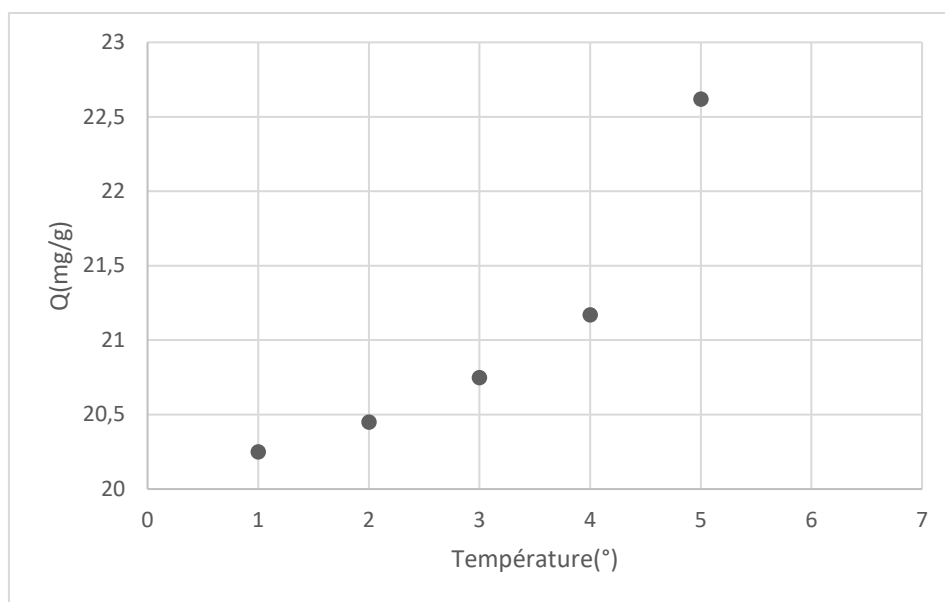


Figure 31 : Effet de température de Pb par le (SB)

Tableau 18: Résultats cinétique de la rétention du Pb à différents temperature par le (SL)

C_i (mol/L)	10-5				
Temp (min)	30min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.05				
Temperature (°)	5	15	25	35	55
R (%)	75.23	76.42	77.73	76.07	75.59

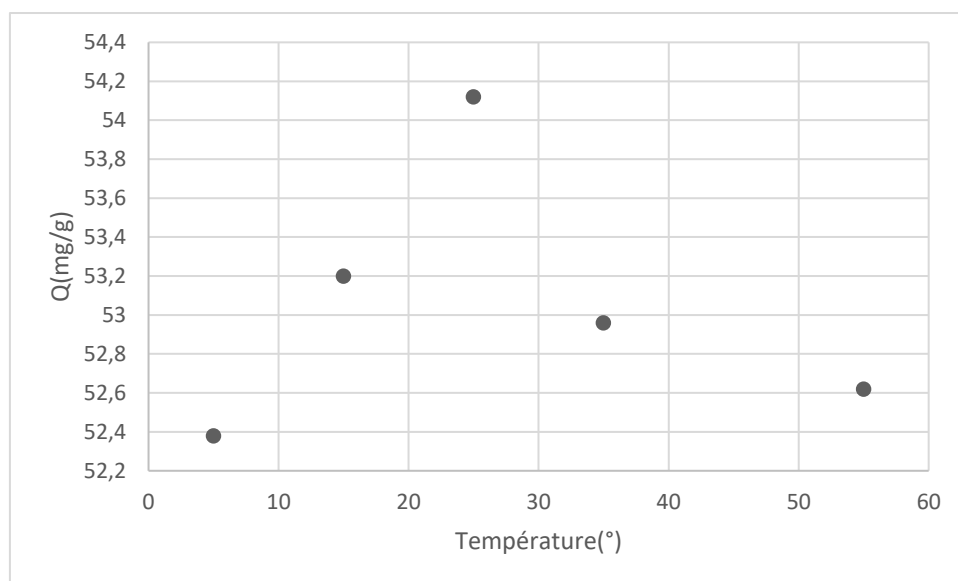


Figure 32: Effet de température de Pb par le (SL)

- L'adsorption augmente globalement avec la température. Le SB montre une réponse plus marquée que le SL, avec une augmentation nette de Q et R% jusqu'à 55 °C.

8. Etude cinétique de l'adsorption du bleu de methylene (BM) pour le (SB) et (SL)

8.1. Effet du temps de contact et le nombre d'agitation:

Tableau 19 : Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents temps à pH=8 par le (SB)

C_i (mol/L)	10-4				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	94.36	92.95	93.66	90.14	89.43

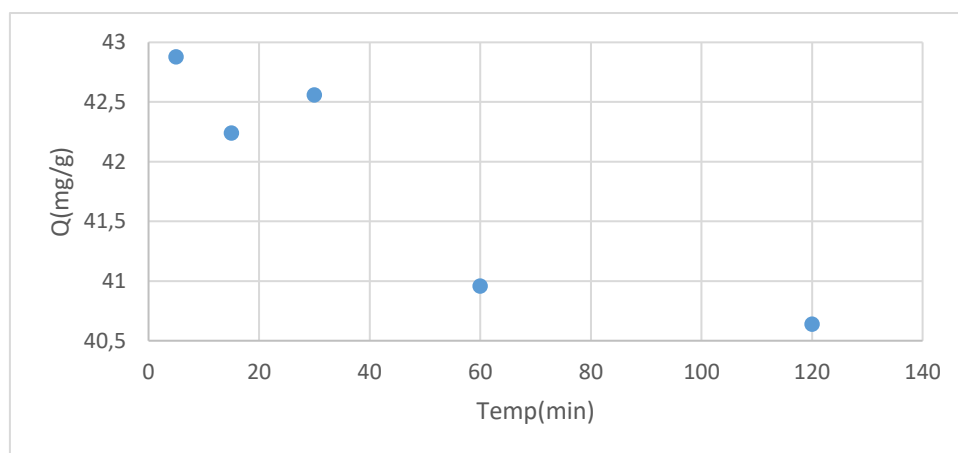


Figure 33: Effet de temps dagitation de BM par le (SB)

Tableau 20 : Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents temps à pH=8 par le (SL)

C_i (mol/L)	10-4				
m (g)	0.1				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Temp (min)	5	15	30	60	120
R (%)	90.14	88.02	80.98	88.07	87.32

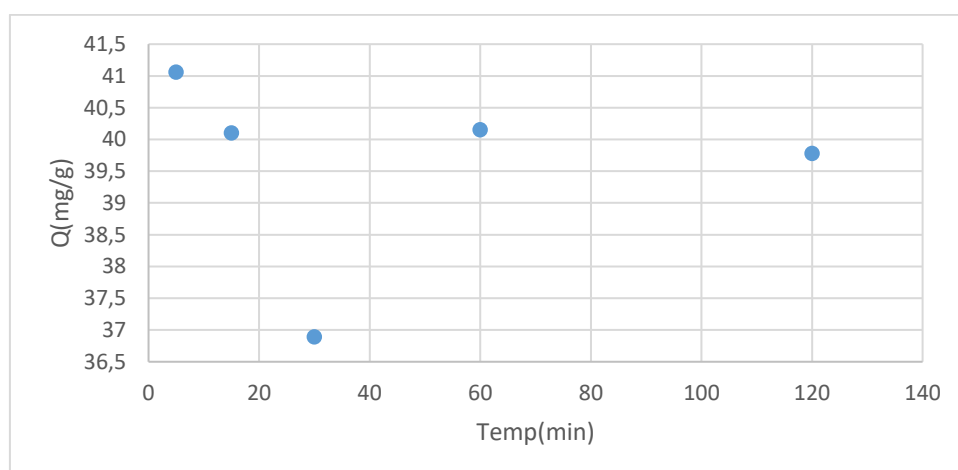


Figure 34: Effet de temps dagitation de BM par le (SL)

- Pour SB, Q diminue légèrement avec le temps, ce qui peut indiquer une désorption ou redistribution. SL montre une adsorption plus stable. L'équilibre semble atteint dès 15 min.

8.2. Effet de masse :

Tableau 21: Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents masse à pH=8 par le (SB)

C_i (mol/L)	10-4				
temp	5min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	61.97	63.38	76.76	81.01	80.28

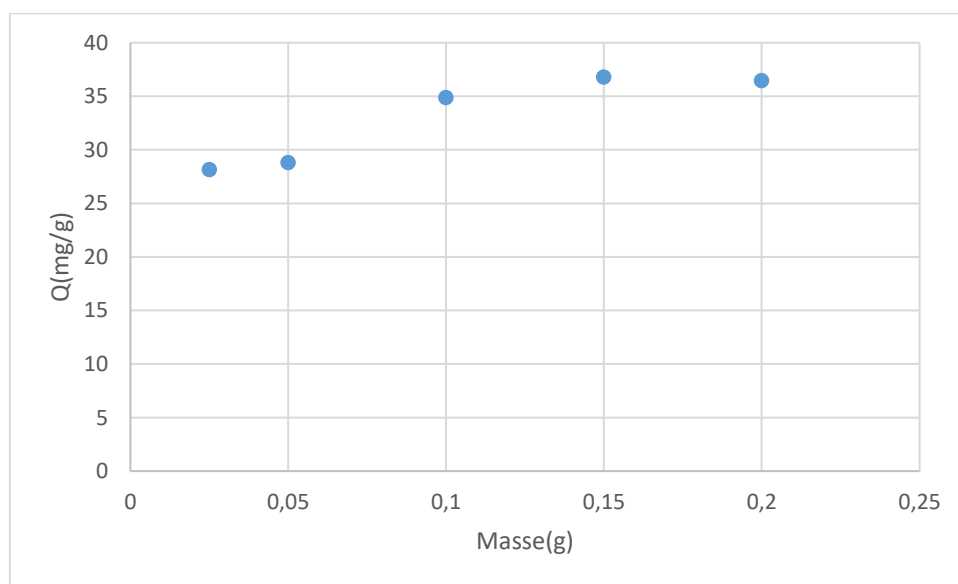


Figure 35: Effet de masse de BM par le (SB)

Tableau 22: Résultats cinétique de la rétention du (BM) à différents masse à pH=8 par le (SL)

C_i (mol/L)	10⁻⁴				
temp	5min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse (g)	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2
R (%)	92.95	75.35	98.59	89.43	94.36

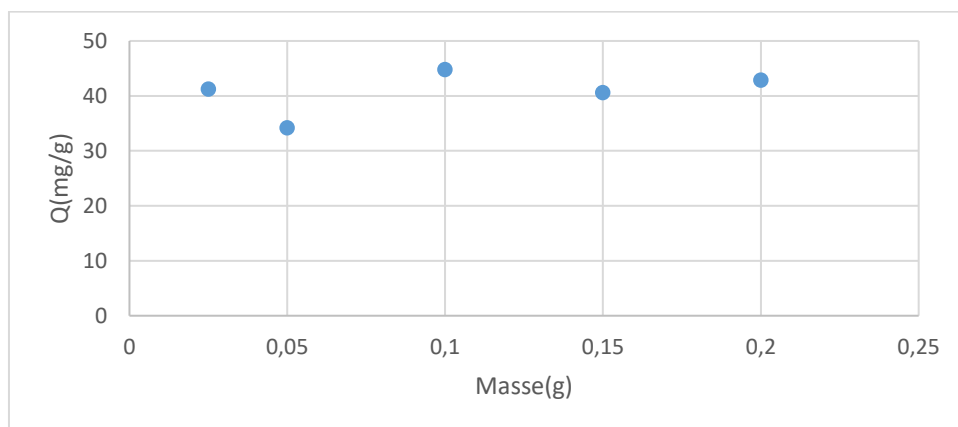


Figure 36: Effet de masse de BM par le (SL)

- La capacité d'adsorption (Q) augmente avec la masse jusqu'à 0.15 g, puis se stabilise. SL montre une meilleure efficacité (jusqu'à 98.59% de R) avec des Q plus élevés.

8.3. Effet de pH :

Tableau 23: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents pH par le (SB)

C _i (mol/L)	10 ⁻⁴							
temp	5min							
Vitesse d'agitation	moyenne							
Masse(g)	0.15							
pH	1	2	3	4	5	6	7	8
R (%)	67.60	92.95	91.54	88.02	74.64	73.23	82.39	87.32

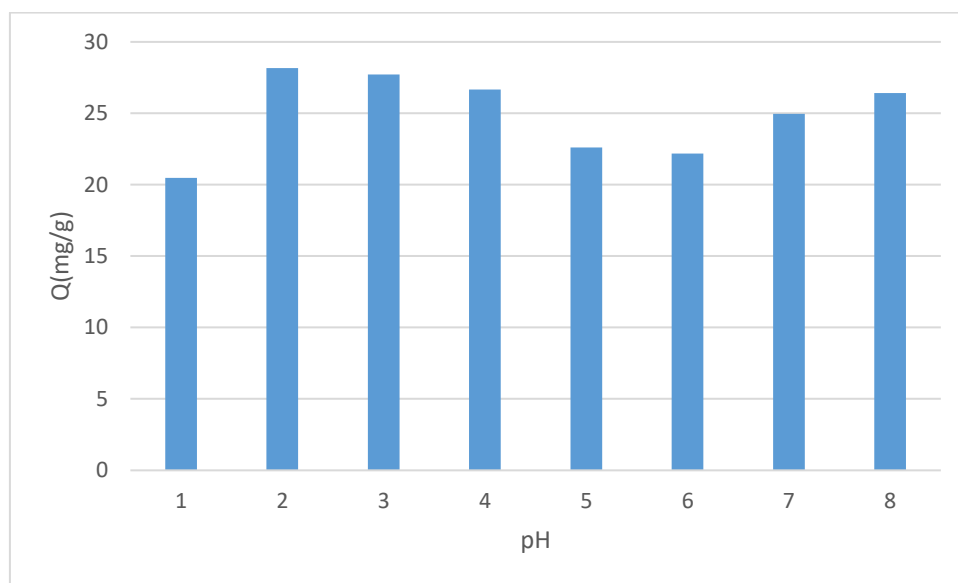


Figure 37 : Effet de pH de BM par le (SB)

Tableau 24: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents pH par le (SL)

0C_i (mol/L)	10⁻⁴					
temp	5min					
Vitesse d'agitation	moyenne					
Masse(g)	0.1					
pH	1	2	3	4	5	7
R (%)	57.74	83.09	75.35	82.39	74.64	87.32

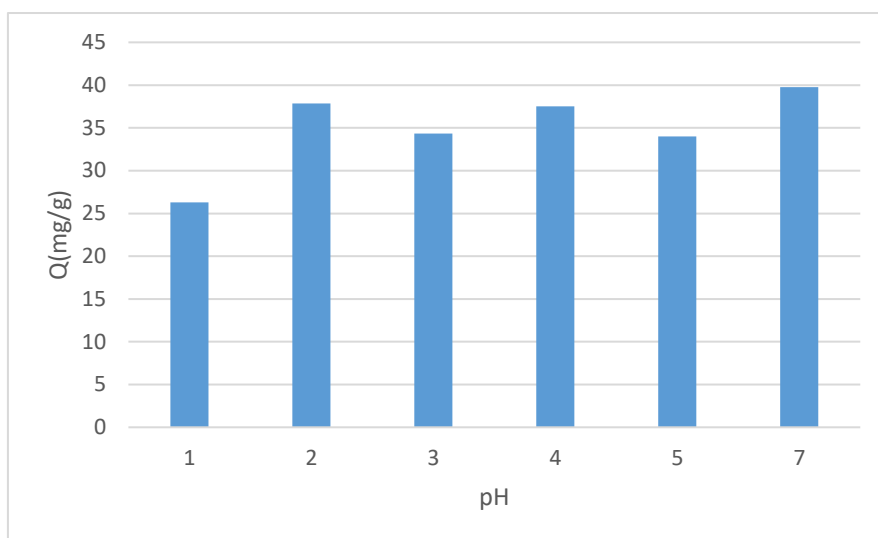


Figure38 : Effet de pH de BM par le (SL)

L'adsorption du BM est maximale à pH modéré (autour de 6-7). Des pH trop acides ou trop basiques réduisent l'adsorption, en raison de la concurrence avec les ions H^+ ou OH^- .

8.4. Effet de température :

Tableau25 : Résultats cinétique de la rétention du BM à différents temperature par le (SB)

C_i (mol/L)	10-4				
Temp (min)					
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.15				
Temperature (°)	5	15	25	35	55
R (%)	93.66	95.77	87.32	96.47	84.50

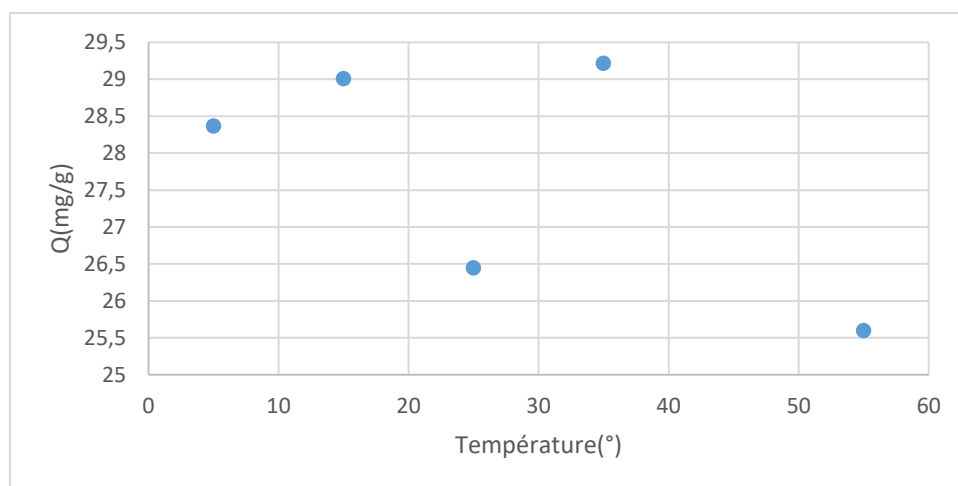


Figure 39: Effet de température de BM par le (SB)

Tableau 26: Résultats cinétique de la rétention du BM à différents temperature par le (SL)

C_i (mol/L)	10⁻⁶				
Temp (min)	5min				
Vitesse d'agitation	Moyenne				
Masse(g)	0.1				
Temperature (°)	10	15	25	35	55
R (%)	77.46	87.32	90.14	85.91	73.23

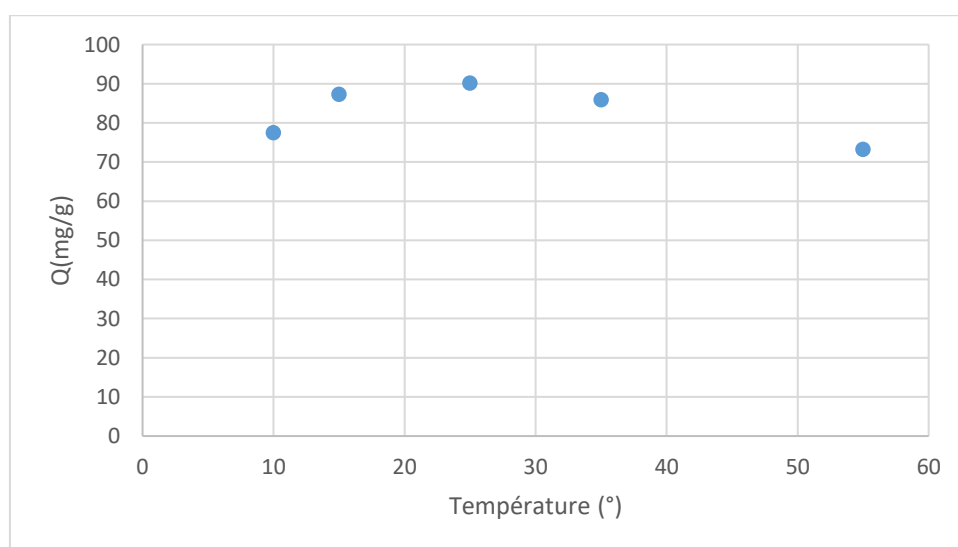


Figure40 : Effet de température de BM par le (SL)

- La température a un effet positif jusqu'à 35 °C. Les valeurs de Q et R augmentent puis diminuent légèrement à 55 °C, suggérant l'atteinte d'une limite d'adsorption.

9. Modélisation d'isotherme d'adsorption

Isotherme de sorption :

Les isothermes d'adsorption sont obtenues par la représentation graphique de la relation entre Q_e (la quantité adsorbée par gramme d'adsorbant) et C_e (la concentration de l'adsorbat à l'équilibre). Elles permettent d'analyser le comportement du système d'adsorption

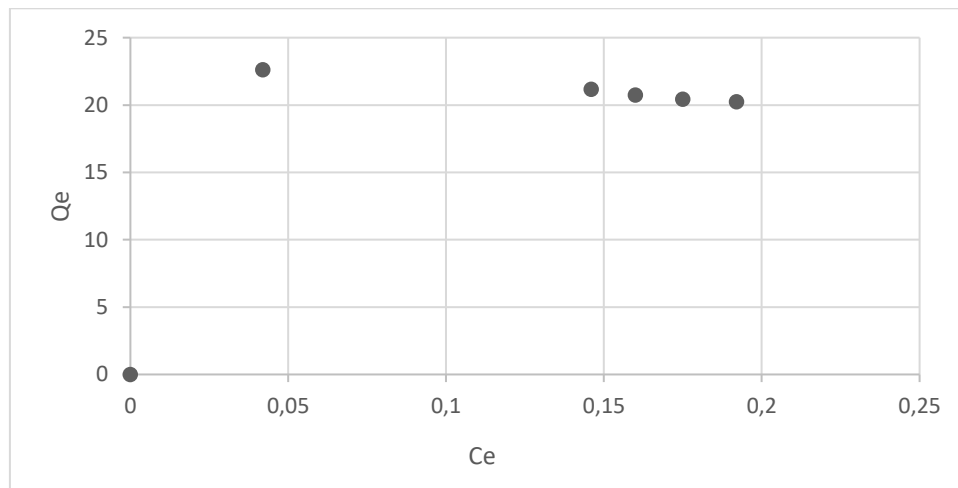


Figure 41: Isotherme de sorption de Pb par le (SB) est de type L

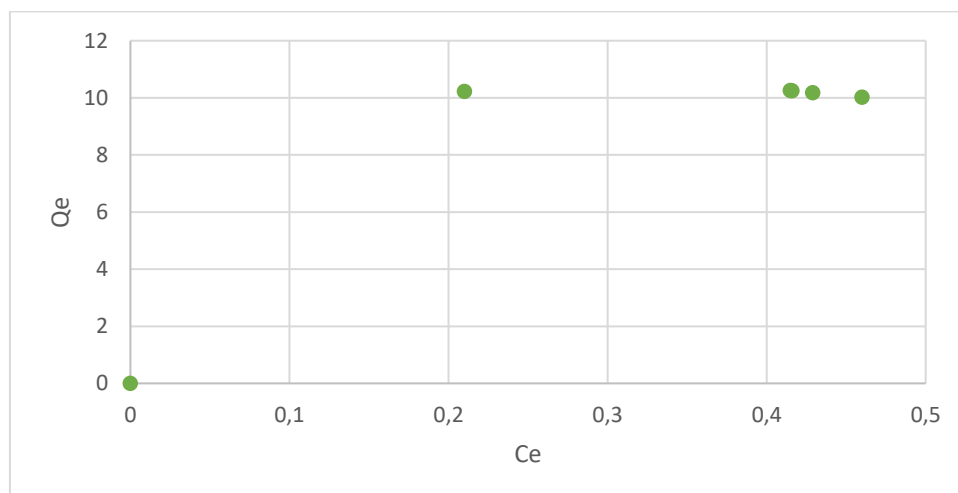


Figure 42 : Isotherme de sorption de Cr par le (SB) type L

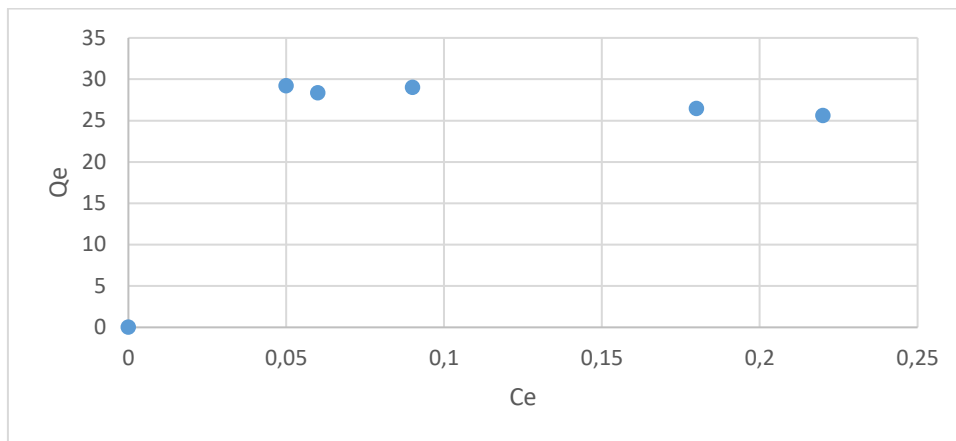


Figure 43: Isotherme de sorption de BM par le (SB) de type L

L'isotherme obtenue dans cette étude présente une forme caractéristique du type L, selon la classification de Giles.

Ce type d'isotherme indique une forte affinité entre l'adsorbant et l'adsorbat, ainsi qu'une adsorption en monocouche sur une surface homogène.

Ce comportement est généralement observé lorsque les sites actifs sont facilement accessibles, que l'énergie d'interaction est homogène à la surface, et qu'il n'existe pas ou peu de compétition entre les molécules adsorbées.

Ces conditions favorisent une adsorption progressive et efficace, en particulier à faibles concentrations, ce qui est souvent cohérent avec les matériaux naturels utilisés dans le traitement des micropolluants.

Modélisation d'isotherme d'adsorption :

Cette partie présente les modèles d'isothermes d'adsorption les plus couramment utilisés, à savoir ceux de Langmuir et de Freundlich. L'objectif de cette modélisation est de représenter de manière précise les résultats expérimentaux d'adsorption du Pb, Cr et BM.

Equation de Langmuir :

$$Q_e = \frac{aC_e Q_m}{1 + aC_e}$$

Equation de Freundlich :

$$Q_e = K C_e^n$$

Pour utiliser ces deux dernières équations, on recourt à leur forme linéarisée respective :

$$\frac{1}{Q_e} = f\left(\frac{1}{C_e}\right) \quad \text{ou} \quad \frac{C_e}{Q_e} = f(C_e) \quad \text{et} \quad \ln Q_e = f(\ln C_e)$$

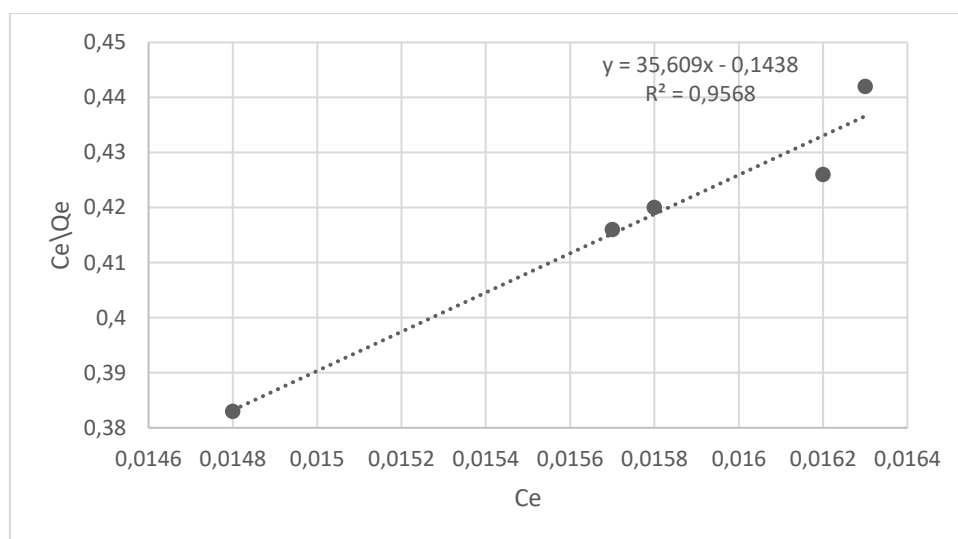
9.1. Modèle de Langmuir :

Figure 44: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de Pb par le (SB)

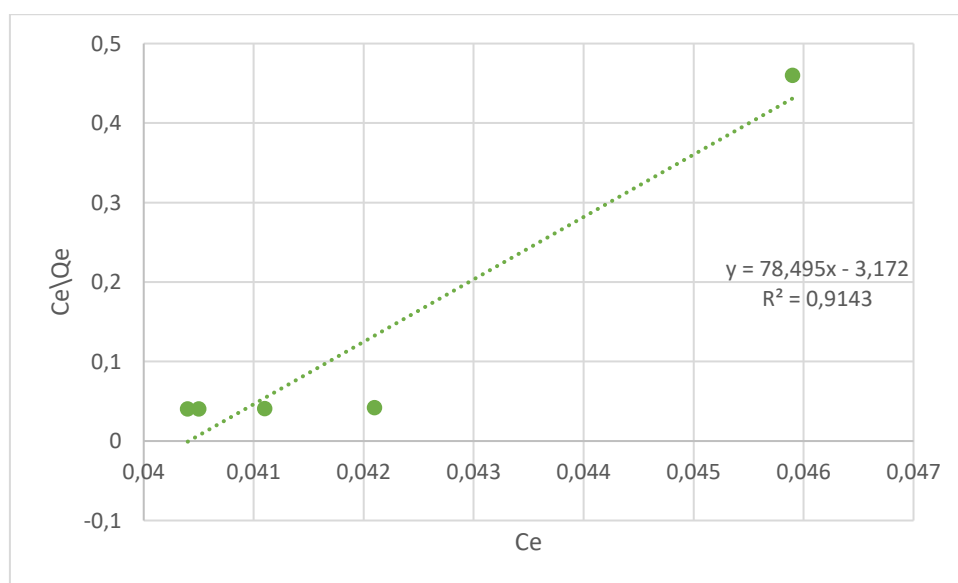


Figure 45: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de Cr par le (SB)

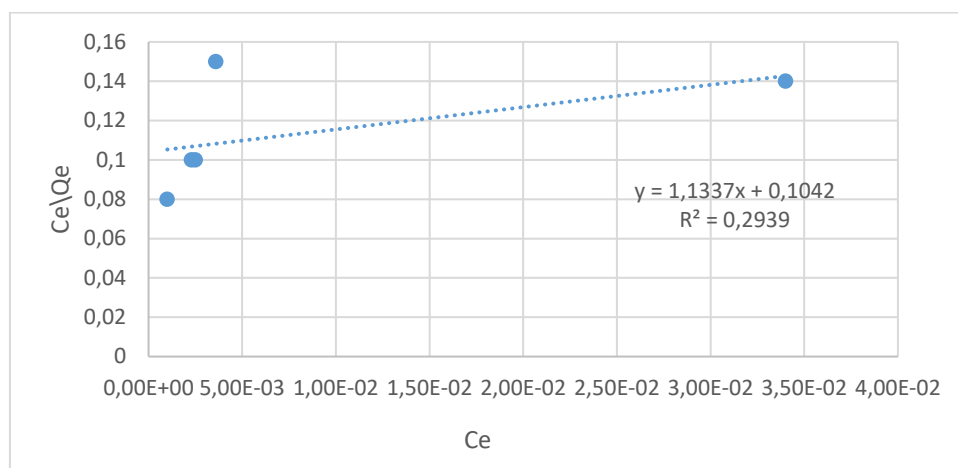


Figure 46: Transformées linéaire des isothermes de Langmuir de BM par le (SB)

9.2. Modèle de Freundlich :

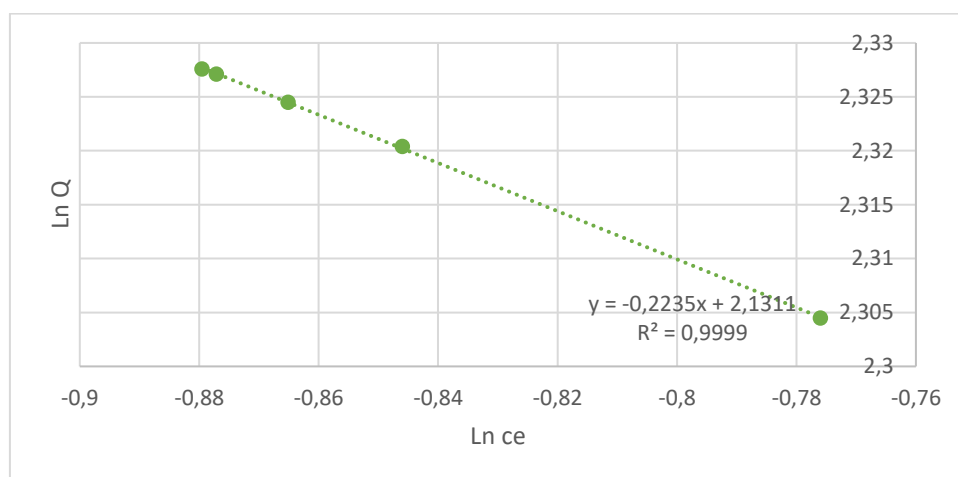


Figure 47 : Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de Cr par le (SB)

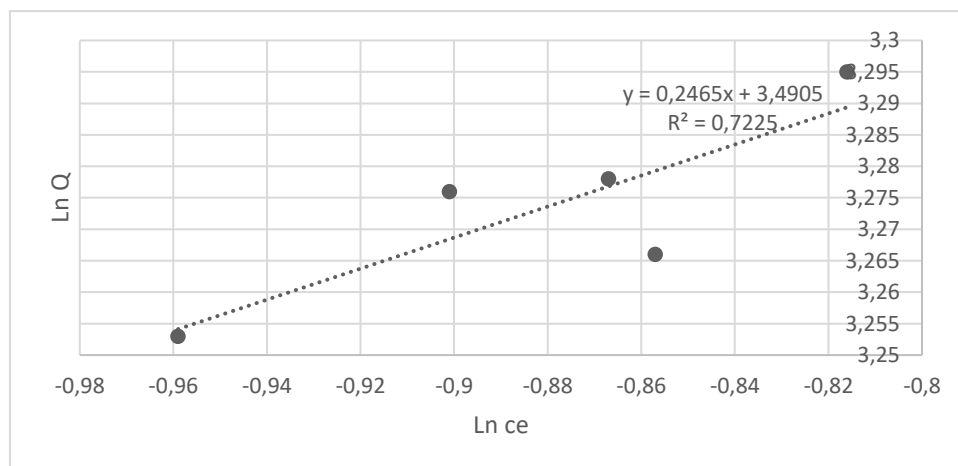


Figure 48: Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de Pb par le (SB)

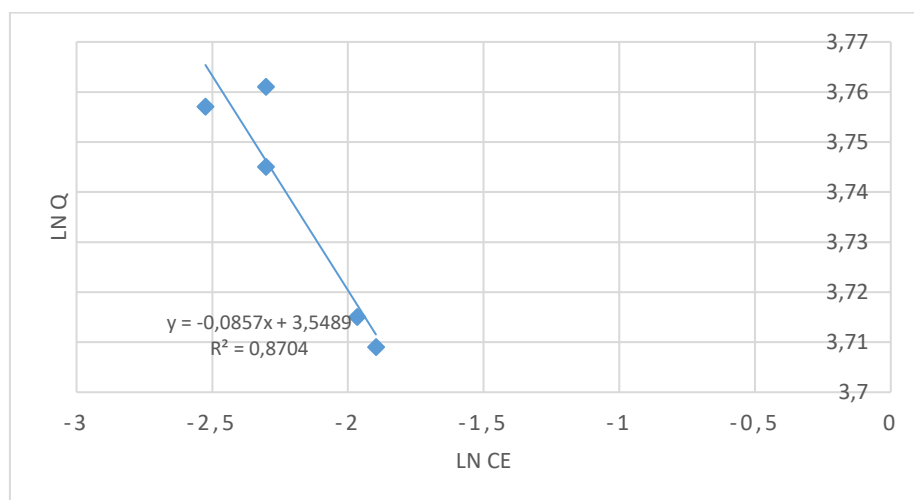


Figure 49: Transformées linéaire des isothermes de Freundlich de BM (SB)

Tableau 27 : Constantes de Freundlich et Langmuir :

/	Langmuir			Freundlich		
	q_m (mg/g)	K_l (L/g)	R^2	N	K_f (L/g)	R^2
Cr	0.0127	24.75	0.9143	-4.474	8.423	0.9999
Pb	0.281	247.5	0.9568	4.06	32.82	0.7225
BM	0.882	10.88	0.2939	-11.67	34.8	0.8704

Dans cette étude, le comportement d'adsorption du (Cr), (Pb) et du composé BM a été analysé à l'aide des modèles de Langmuir et de Freundlich. Les résultats montrent que le modèle de Freundlich décrit le mieux l'adsorption du chrome ($R^2 = 0.9999$) ce qui suggère une adsorption sur une surface hétérogène. Cependant, la valeur négative du paramètre N est physiquement incohérente et pourrait indiquer une erreur expérimentale ou une mauvaise modélisation. Pour le plomb, le modèle de Langmuir s'est révélé plus approprié ($R^2 = 0.9568$) indiquant une adsorption en monocouche sur une surface homogène. En ce qui concerne le composé BM, l'ajustement est meilleur avec le modèle de Freundlich ($R^2 = 0.8704$), traduisant une adsorption en multicouche, tandis que le modèle de Langmuir présente un très faible coefficient de corrélation ($R^2 = 0.2939$) suggérant qu'il ne convient pas pour ce composé.

10. Etude cinétique de l'adsorption :

L'étude cinétique de la rétention a été réalisée en appliquant deux modèles cinétiques fréquemment utilisés : le pseudo-premier ordre et le pseudo-deuxième ordre, afin d'interpréter les données expérimentales et mieux comprendre le mécanisme d'adsorption

10.1. Premier Pseudo ordre:

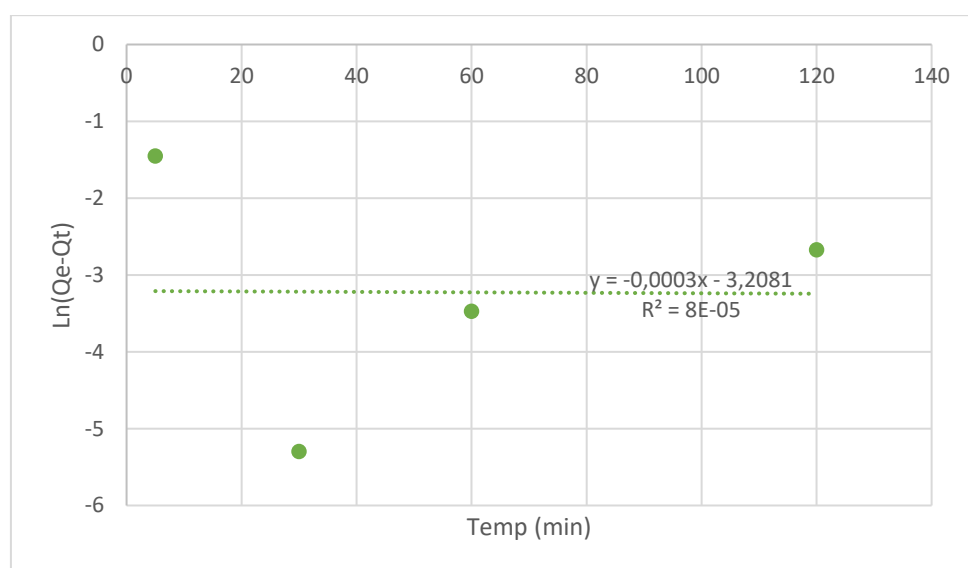


Figure 50: La cinétique du Premier pseudo ordre du Cr (SB)

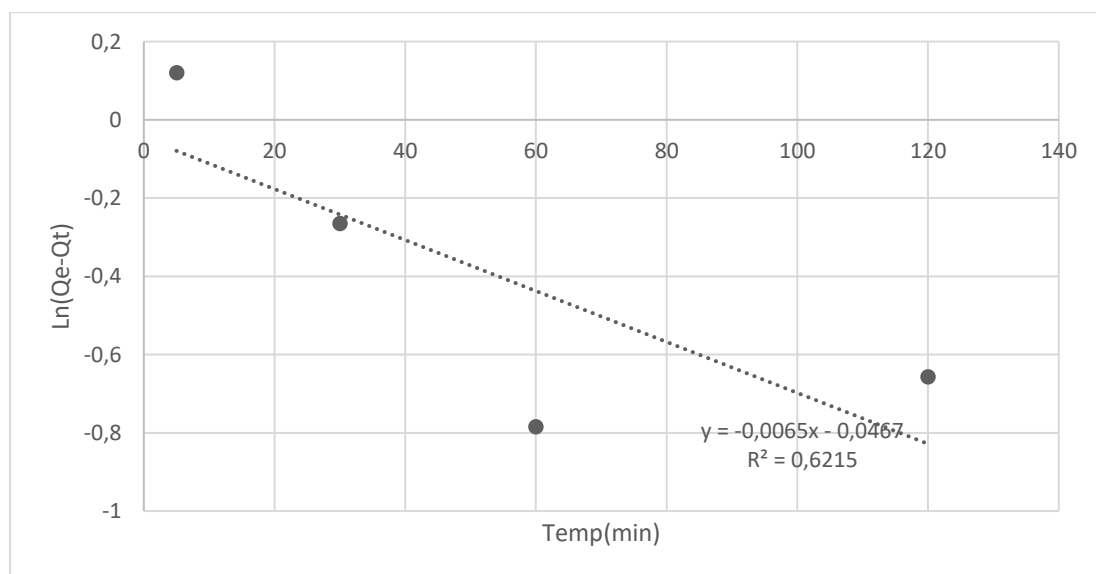
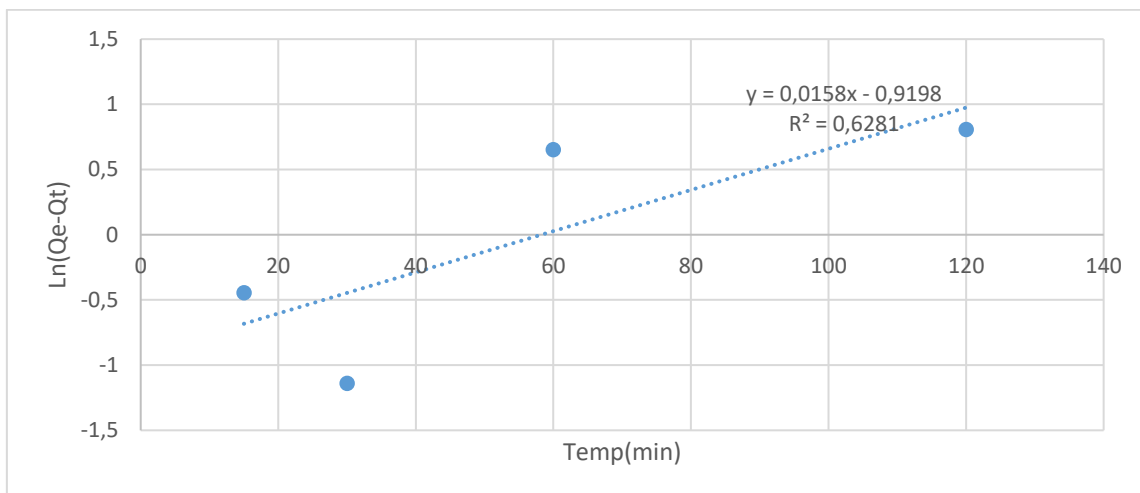
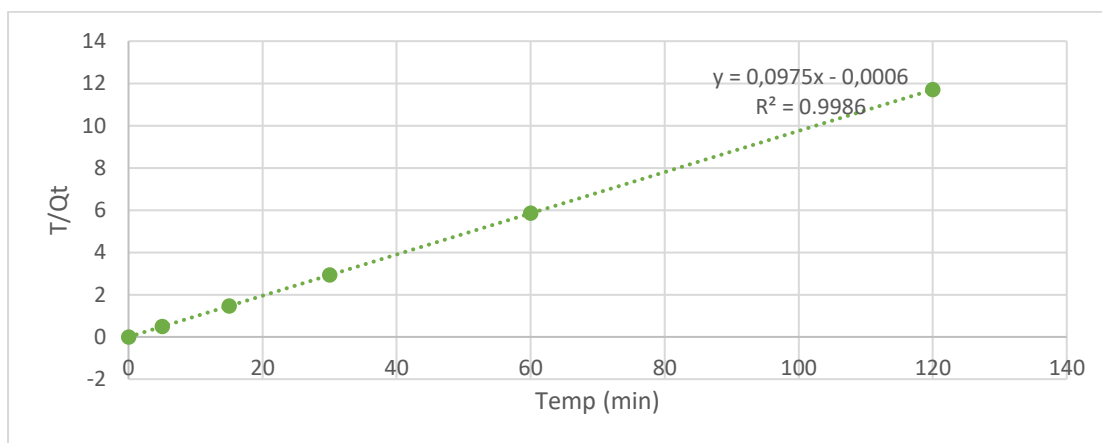
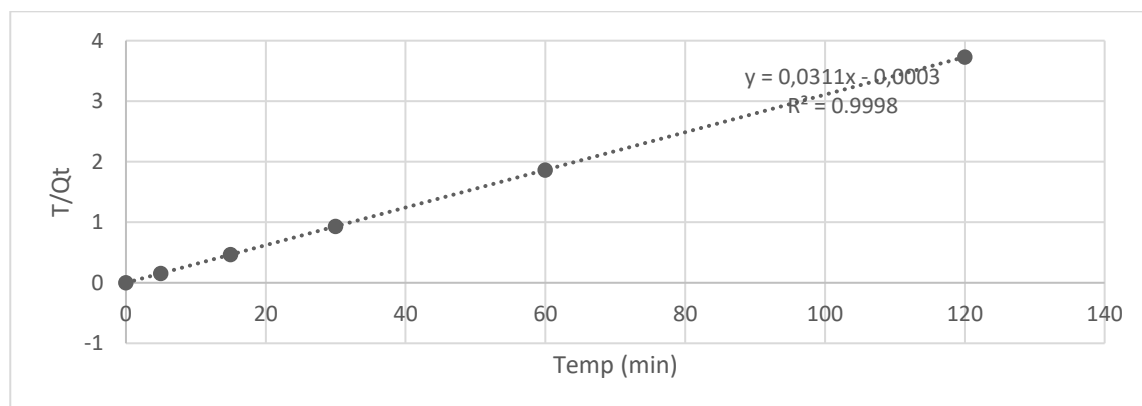


Figure 51 : La cinétique du Premier pseudo ordre du Pb (SB)**Figure 52 : La cinétique du Premier pseudo ordre du BM (SB)****10.2. Second pseudo ordre :****Figure53 : La cinétique du second pseudo ordre du Cr (SB)****Figure54 : La cinétique du second pseudo ordre du Pb (SB)**

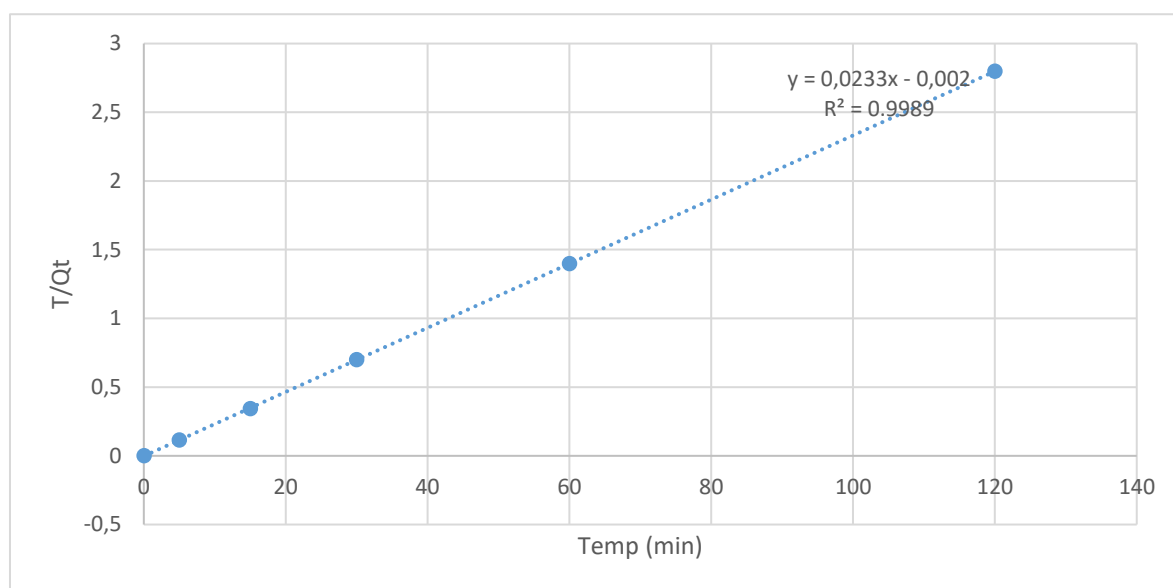


Figure55 : La cinétique du second pseudo ordre du BM (SB)

Tableau 28 :Les Valeurs des paramètres cinétique du premier et second pseudo ordre :

/	Premier pseudo ordre			Second pseudo ordre		
	Q_e (mg/g)	K	R^2	Q_e (mg/g)	K	R^2
Cr	0.0403	0.0003	0.00008	10.256	-48.751	0.9986
Pb	0.9544	0.0065	0.6215	32.154	-1.00001	0,9998
BM	0.3985	0.0158	0.6281	42.918	-21.459	0.9989

Les résultats obtenus indiquent que le modèle cinétique du second pseudo-ordre offre un ajustement nettement meilleur aux données expérimentales par rapport au premier pseudo-ordre, pour les trois substances étudiées: le chrome (Cr), le plomb (Pb) et le matériau BM.

En effet, les valeurs du coefficient de corrélation R^2 sont très proches de 1 ($\geq 0,998$) dans le cas du second ordre, ce qui traduit une excellente correspondance entre le modèle théorique et les données expérimentales.

Cette forte corrélation suggère que le processus d'adsorption suit principalement un mécanisme de type chimisorption, impliquant probablement des interactions chimiques entre l'adsorbant et les ions métalliques.

11. Etude thermodynamique :

La thermodynamique de l'adsorption permet d'évaluer l'effet de la température sur le processus et de mieux comprendre la nature des interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat. Pour cela, les paramètres thermodynamiques tels que l'enthalpie libre standard (ΔG°), l'enthalpie standard (ΔH°) et l'entropie standard (ΔS°) ont été calculés à partir des données expérimentales, en utilisant les équations appropriées.

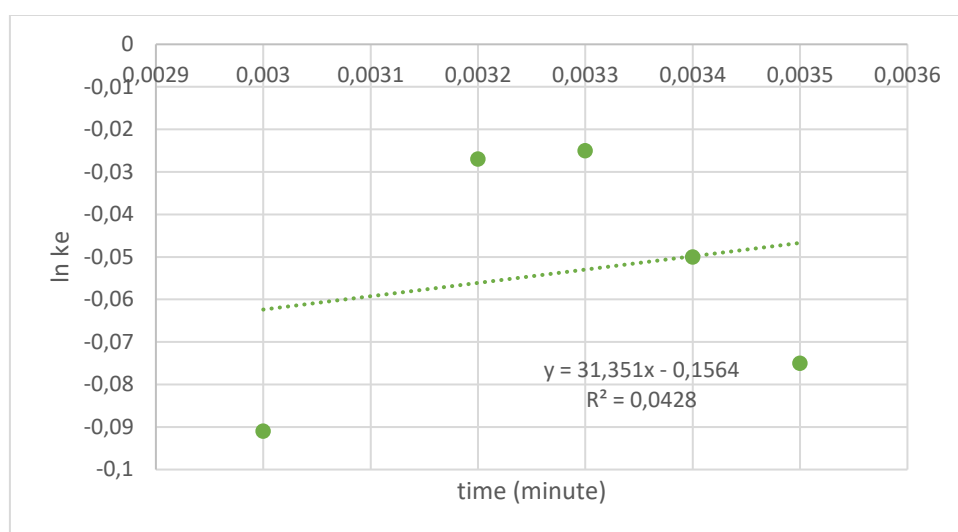


Figure 56: LnKc en fonction de l'inverse de la température du Cr (SB)

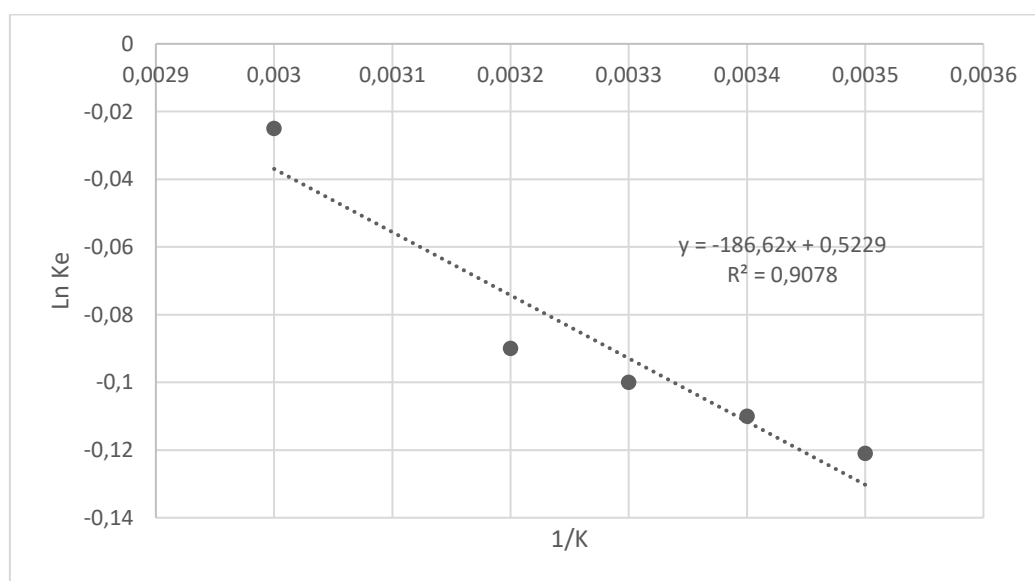


Figure 57: LnKc en fonction de l'inverse de la température du Pb (SB)

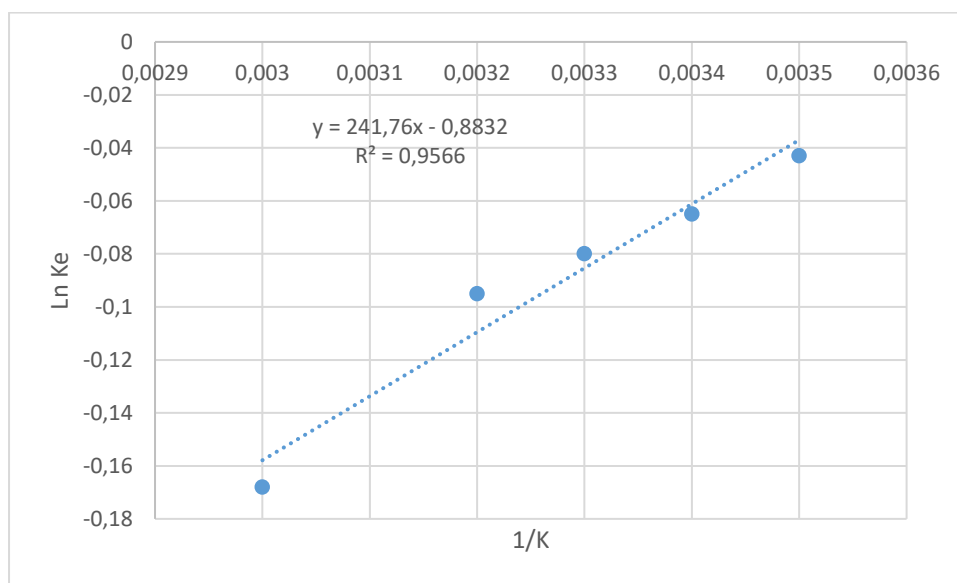


Figure 58: LnKc en fonction de l'inverse de la température du BM (SB)

Tableau 29 :Les Paramètres thermodynamiques :

/	ΔH° (Kj/mol)	ΔS° (Kj/mol)	ΔG° (Kj/mol)				
T(K)	/	/	278.15	288.15	298.15	308.15	328.15
Cr	0.260	1.29	-358.68	-371.45	-384.35	-397.25	-423.05
Pb	-0.0035	1.55	-431.13	-446.63	-462.15	-477.63	-508.63
BM	-2,011	-0.0073	-4.041	-4.114	-4.187	-4.260	-4.406

Résultat et discussion :

"L'analyse des paramètres thermodynamiques a permis de mieux comprendre la nature des interactions entre les micropolluants (Cr, Pb, BM) et le sable. Les valeurs de ΔG° sont négatives pour les trois cas, ce qui confirme que le processus d'adsorption est spontané, et que cette spontanéité augmente avec la température, notamment pour le chrome et le plomb.

Concernant l'enthalpie, l'adsorption du chrome est de nature endothermique ($\Delta H^\circ > 0$), indiquant que l'élévation de la température favorise le processus. À l'inverse, l'adsorption du bleu de méthylène est exothermique ($\Delta H^\circ < 0$), donc plus efficace à basse température. Le

plomb, quant à lui, présente une enthalpie très faible et légèrement négative, traduisant une adsorption physique, peu influencée par la température.

Pour l'entropie, une augmentation ($\Delta S^\circ > 0$) est observée avec le chrome et le plomb, traduisant une désorganisation du système et une bonne affinité entre les espèces adsorbées et la surface. En revanche, le bleu de méth

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, cette étude a permis de mettre en lumière le fort potentiel du sable en tant que matériau naturel pour l'élimination des micropolluants présents dans les solutions aqueuses.

À travers les expériences réalisées, nous avons pu démontrer que les propriétés physiques et chimiques particulières du sable, telles que sa porosité, sa surface spécifique et la nature de ses composants minéraux, jouent un rôle essentiel dans le processus d'adsorption.

Les résultats obtenus confirment que le sable peut représenter une alternative efficace, économique et respectueuse de l'environnement face aux matériaux conventionnels souvent coûteux ou synthétiques utilisés dans le traitement des eaux. Les expériences menées ont démontré que le sable a la capacité d'adsorber efficacement le bleu de méthylène et le plomb et chrome, avec une efficacité variable selon plusieurs paramètres tels que le temps de contact, la température, la masse d'adsorbant et le pH.

L'effet du temps de contact a montré que l'adsorption est rapide durant les premières minutes, en particulier entre 15 et 30 minutes, indiquant une cinétique initiale favorable. Un équilibre est ensuite atteint pour les trois polluants. À ce stade, les rendements enregistrés sont élevés : 90,01 % pour le Cr avec le sable lavé, 92,44 % pour le Pb, et environ 91 % pour le BM, selon les conditions optimales.

Concernant l'effet de la masse, l'augmentation de la quantité de sable utilisée a conduit à une amélioration du rendement global (R%), avec une efficacité maximale observée autour de 0,15 à 0,2 g. Toutefois, la quantité adsorbée par gramme (Q) diminue légèrement, ce qui s'explique par la saturation progressive des sites actifs.

Le pH du milieu a également eu une influence importante. L'adsorption du chrome est optimale en milieu basique, avec un rendement maximal à $\text{pH} \approx 8$. Le plomb, en revanche, présente une meilleure affinité en milieu acide, notamment entre pH 3 et 5. Pour le bleu de méthylène, un pH modéré, compris entre 6 et 7, favorise l'adsorption, tandis que des pH extrêmes entraînent une baisse d'efficacité due à la compétition ionique (H^+ ou OH^-).

La température s'est révélée être un facteur favorable jusqu'à 35 °C. À cette température, les rendements sont optimaux : 91,12 % pour Cr, plus de 95 % pour Pb avec le SB, et environ 94 % pour BM. Au-delà de cette valeur, une légère baisse de l'adsorption a été observée, traduisant une saturation des sites actifs ou un début de désorption.

L'analyse FTIR a mis en évidence la présence de groupes fonctionnels actifs sur la surface du sable (O–H, C=O, C–O). Après adsorption, la disparition partielle ou totale de certaines bandes, notamment pour

Conclusion générale

Cr et BM, reflète une interaction chimique entre les polluants et le matériau. Dans le cas du plomb, les bandes sont restées visibles, ce qui suggère une adsorption de nature plutôt physique. Le sable lavé conserve certaines bandes comme C–O, ce qui confirme une stabilité chimique propice à l'adsorption.

Par ailleurs, la comparaison entre les deux types de sable a révélé une meilleure performance du sable lavé, notamment pour le plomb et le bleu de méthylène, avec des valeurs de Q et R% supérieures. Le lavage semble améliorer la propreté de la surface et l'accessibilité des sites actifs.

Enfin, la modélisation des isothermes d'adsorption a montré que la plupart des courbes obtenues suivent un comportement de type L, selon la classification de Giles. Le chrome s'ajuste mieux au modèle de Freundlich ($R^2 = 0,9999$), bien qu'une incohérence au niveau du paramètre N ait été notée. Le plomb correspond davantage au modèle de Langmuir ($R^2 = 0,9568$), traduisant une adsorption en monocouche. Quant au bleu de méthylène, il est mieux décrit par le modèle de Freundlich ($R^2 = 0,8704$), ce qui indique une adsorption en multicouche sur une surface hétérogène.

Ces résultats confirment que le sable, en particulier après traitement, représente une solution locale, naturelle et économique pour le traitement des eaux contaminées par les métaux lourds et les colorants. Ses rendements élevés, sa disponibilité et sa simplicité d'usage en font un matériau prometteur dans une approche durable et accessible.