



RREPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DEL'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

MEMOIRE

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Techniques

Filière: Génie des Procédés

Spécialité: Génie des procédés de l'environnement

Présenté Par: LAMOURI ISMAIL et YASSER BOUNACEUR

Thème :

***Synthèse de graphène composite de sable des
dunes de la région d'Ouargla pour
l'élimination des métaux lourds***

Devant le jury :

Dr. Mokhbi Yasmine

MCA

Université d'Ouargla

Présidente

Dr. Kateb Lamia

MAA

Université d'Ouargla

Examinatrice

Dr. Akchiche Zineb

MAA

Université d'Ouargla

Encadreuse

2024/2025



Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant qui nous a accordé la force, le courage et la patience pour mener à bien cette tâche avec succès. L'exécution de ce message n'aurait pas été possible sans la contribution de nombreuses personnes, et nous souhaitons exprimer notre reconnaissance et notre profonde gratitude envers elles. Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre reconnaissance à **Dr. Akchiche Zineb**, qui a accepté de superviser et de guider ce travail scientifique et technique, et qui l'a surveillé attentivement jusqu'à la fin. Nous la remercions également pour sa patience et sa disponibilité, notamment pour ses précieux conseils qui ont contribué à orienter nos idées. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude au **Dr. Mokhbi Yasmina** qui a accepté de présider le comité de discussion de ce travail, ainsi qu'au **Dr. Kateb Lamia** qui a accepté de participer à la discussion.*

Nous sommes reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué, soutenu et encouragé ce travail, et nous leur souhaitons à tous le meilleur et beaucoup de succès dans leur vie future.



Résumé :

Cette étude aborde le problème de la pollution de l'environnement par les métaux lourds, en mettant l'accent sur son traitement à l'aide de la technologie d'adsorption. A cet effet, la préparation et la caractérisation d'un nouvel adsorbant, un hybride de graphène et de sable de dune disponible dans la région d'Ouargla, ont été proposées. La recherche vise à tester son efficacité dans l'extraction des ions nickel à partir de solutions aqueuses.

Cette étude consistait à préparer un extrait de graphène à partir d'huiles moteur et d'huiles de cuisson usagées, en plus de le combiner avec du sable de dune. Ensuite, l'effet des variables d'adsorption clés telles que la concentration initiale de polluants, la masse d'adsorbant et le pH a été analysé.

Les résultats ont montré que le composite fabriqué à partir d'huile moteur usagée (GHV) avait un meilleur taux d'adsorption et que les données d'adsorption correspondaient bien au modèle de Langmuir. Les résultats de cette recherche confirment le potentiel prometteur de l'utilisation des ressources locales pour développer des solutions efficaces pour lutter contre la pollution de l'eau.

Mots-clés : Adsorption, Environnement, Métaux lourds, Graphène, Huile usagée

ملخص :

تتناول هذه الدراسة مشكلة تلوث البيئة بالمعادن الثقيلة، مع التركيز على معالجتها بتقنية الامتزاز. ولهذا الغرض، تم اقتراح تحضير وتوصيف مركب ممتز جديد، وهو هجين من الجرافين ورمل الكثبان المتوفر في منطقة ورقلة. يهدف البحث إلى اختبار فعاليته في استخلاص أيونات النيكل من المحاليل المائية.

تضمنت هذه الدراسة تحضير مستخلص الجرافين من زيوت المحركات والزيوت المستعملة (المستعملة في الطهي)، بالإضافة إلى دمجه مع رمل الكثبان. تم تحليل تأثير المتغيرات الرئيسية للامتزاز مثل التركيز الأولي للملوثات، وكتلة المادة الممتزة، والرقم الهيدروجيني (pH).

أظهرت النتائج أن المركب المصنوع من زيوت المحركات المستعملة (Ghv) يتمتع بمعدل امتصاص أفضل، وقد تلاءمت بيانات الامتزاز بشكل جيد مع نموذج لانغمير. تؤكد نتائج هذا البحث القدرة الواعدة على استخدام الموارد المحلية لتطوير حلول فعالة لمعالجة تلوث المياه.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز - البيئة - المعادن الثقيلة - الجرافين - نفايات الزيوت

Abstract:

This study addresses the problem of environmental pollution by heavy metals, focusing on their treatment using adsorption techniques. To this end, the preparation and characterization of a new adsorbent composite, a hybrid of graphene and dune sand, available in the Ouargla region, was proposed. The research aimed to test its effectiveness in extracting nickel ions from aqueous solutions. This study involved preparing a graphene extract from motor oils and used cooking oils, as well as integrating it with dune sand. Then, the effect of key adsorption variables, such as the initial concentration of contaminants, adsorbent mass, and pH, was analyzed. The results showed that the composite made from used motor oils (GHV) had a better adsorption rate, and the adsorption data were well-fitted with the Langmuir model. The results of this research confirm the promising potential of using local resources to develop effective solutions for water pollution treatment.

Keywords: Adsorption, Environment, Heavy Metals, Graphene, Waste Oil

Sommaire

REMERCIEMENTS	
RÉSUMÉ	
INTRODUCTION GENERALE	
<i>LISTE DES Tableau</i>	7
Liste de Figure	8
Liste des abréviations	9
<i>Chapitre I : Généralités sur le graphène et le sable de dune</i>	13
Introduction	14
I.1 Le graphene	14
I.1.1 Définition	14
I.1.2. Structure du graphène	15
I.1.3.1. Propriétés chimiques	16
I.1.3.2. Propriétés thermiques	16
I.1.3.3. Propriétés mécaniques	16
I.1.4. Les applications de graphene	16
I.2. Sable de dunes	17
I.2.1. Définition	17
I.2.2. L'origine de sable	17
I.2.3. Mécanismes de formation des dunes	18
I.2.4. Les types des sables	18
<i>Chapitre II : La pollution de l'eau par les métaux lourds</i>	20
Introduction	21
II.1.1. Définition	21
II.1.2. Les sources de la pollution	22
II.1.2.1. Source urbaine	22
II.1.2.2. Source industrielle	22
II.1.2.3. Source agricole	23
II.1.2.4. Source naturelle	23
II.1.3. Les types de polluants	23
II.1.3.1. Polluants organiques	23
II.1.3.2. Polluants inorganiques	24

II.2.1.Définition	24
II.2.2.Sources démission des métaux lourds	25
II.2.2.1.Source naturelle	25
II.2.2.2.Source anthropogène	25
II.2.3.Toxicité des métaux lourds	26
II.2.4.Effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé	26
II.2.4.1.Effets sur l'environnement.....	26
II.2.4.2.Effets sur la santé humaine	26
II.2.5.Nickel	27
II.2.5.1.Généralités sur le nickel.....	27
II.2.5.2.Sources du nickel	27
II.2.5.3.Effets du nickel sur l'environnement.....	27
II.2.5.4.Procédés d'élimination des métaux lourds.....	28
II.3.l'adsorption.....	28
II.3.1.Définition	28
II.3.2.Type d'adsorption.....	29
II.3.2.1.Adsorption physique (ou physisorption)	29
II.3.2.2.Adsorption chimique (ou chimisorption).....	29
II.3.3.Description du mécanisme d'adsorption	30
II.3.4.Facteurs influençant l'adsorption	31
II.3.4.1.La nature de l'adsorbant.....	31
II.3.4.2.Surface spécifique	31
II.3.4.3 Le pH.....	32
II.3.4.4.La concentration initiale d'adsorbat	32
II.3.4.5.La Température	32
II.3.5.Equilibre d'adsorption	32
II.3.6.Modèle d'adsorption.....	32
II.3.6.1.Modèle de Langmuir.....	32
II.3.6.2.Modèle de Freundlich	33
<i>Chapitre III : Matériels et Méthodes.....</i>	<i>35</i>
III.1.Introduction	36
III.2.1.Matériels	36
III.2.2.Produits utilisée	38

III.3.Mode opératoire	39
III.3.1.Préparation d'adsorbant	39
III.3.1.1.Préparation du sable.....	39
III.3.1.2.Préparation du graphène.....	40
III.4.Techniques de caractérisation	41
III.4.1.Analyse minéralogique (DRX)	41
III.4.2.Microscope électronique à balayage (MEB)	41
Préparation de solution mère de sulfate de nickel.....	41
<i>Chapitre IV:Résultats et discussion</i>	<i>43</i>
IV.1.Introduction.....	44
IV.2.Caractérisation Physico-chimique	44
2.1.Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	44
2.2.Microanalyse au microscope électronique à balayage MEB	45
IV.3.L'étude de l'adsorption	48
3.1.La courbe d'étalonnage	48
3.2.Etude de l'effet du temps de contact.....	49
3.3 .Etude de l'effet de la concentration	50
3.4 .Effet de la masse de l'adsorbant.....	51
3.5 .Effet de pH	52
IV.4.Etude de l'isotherme d'adsorption	53
4.2.Isotherme de Freundlich.....	54
IV.5.Etude de la cinétique d'adsorption	56
5.1.Modèle de la cinétique de pseudo premier ordre	56
5.2. Modèle de la cinétique de pseudo deuxième ordre	57
<i>Conclusion générale</i>	<i>60</i>
<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>62</i>

LISTE DES Tableau

Chapitre I : Généralités sur le graphène et le sable de dune

Tableau I.13. : Les propriétés principales d'un nano-feuillet de graphène.....	14
---	-----------

Chapitre II : La pollution de l'eau par les métaux lourds

Tableau II. 1: Classification périodique des éléments	25
--	-----------

Tableau II. 2. Les différences entre l'Adsorption physique et chimique	
---	--

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Tableau III.1 : Matériels utilisée.....	37
--	-----------

Tableau III.2 : Produit chimique utilisée.....	39
---	-----------

Chapitre IV: Résultats et discussion

Tableau IV.1 : Résultats d'analyse EDX des Ghc.....	47
--	-----------

Tableau IV.2 : Résultats d'analyse EDX des Ghv.....	47
--	-----------

Tableau IV.3 : Valeurs des constantes de l'isotherme de Langmuir et Freundlich	55
---	-----------

Tableau IV.4 : Valeurs des constantes cinétiques du pseudo premier ordre.....	57
--	-----------

Tableau IV.5 : Valeurs des constantes cinétiques du pseudo-second ordre.....	58
---	-----------

Liste de Figure

Chapitre I : Généralités sur le graphène et le sable de dune

Figure I.1 : Structure du graphene.....14

Figure I.2 : sable des dunes de la région d'Ouargla.....16

Chapitre II : La pollution de l'eau par les métaux lourds

Figure II.1 : la pollution de l'eau 21

Figure II.2: Termes de base pour l'adsorption 29

Figure II.3: Étapes de transfert d'un soluté lors de son adsorption 32

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Figure III.1 : Multi paramètre (HI98194) 38

Figure III.2 : Spectrophotomètre UV- Visible.....38

Chapitre IV: Résultats et discussion

Figure IV.1 : Diffractogrammes montrant les pics de Ghc.....40

Figure IV.2 : Images MEB montrant la morphologie des Ghc et Ghv.....46

Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage de nickel.....47

Figure IV.4 : l'effet du temps de contact sur le rendement.....48

Figure IV.5 : l'effet de la concentration.....49

Figure IV.6 : l'effet de la masse de l'adsorbant.....50

Figure IV.7 : l'effet de pH.....51

Figure IV.8 : Isothermes expérimentales d'adsorption simulée par à le modèle de Langmuir du nickel sur les **Ghc** et **Ghv**.....53

Figure IV.9 : Isothermes expérimentales d'adsorption simulée par à le modèle de Freundlich du nickel sur les **Ghc** et **Ghv**.....54

Figure IV.10: Cinétique du pseudo-premier ordre pour **Ghc**.....55

Figure IV.11: Cinétique du pseudo-premier ordre pour **Ghv**.....57

Figure IV.12 : Cinétique du pseudo-second ordre pour **Ghc**.....58

Figure IV.13 : Cinétique du pseudo-second ordre pour **Ghv**.....58

Liste des abréviations

G_{hc} : huile de cuisson

G_{hv} : huile de vidan

q_e : Quantité de soluté adsorbé par unité de masse de l'adsorbant à l'équilibre (mg/g).

q_m : Capacité maximale d'adsorption (mg/g).

b : Constante de Langmuir relative à l'énergie d'adsorption (l/mg)

C_e : la concentration du soluté à l'équilibre (mg/l).

K_F : ((mg/g)/(mg/L)^{1/n}) est la constante de Freundlich associée à la capacité d'adsorption

n : (sans dimension) est le facteur d'hétérogénéité

q : Quantité adsorbée à l'instant t (mg. g^{-1}).

k_1 : Constante de vitesse d'adsorption de pseudo-second ordre (min^{-1}).

k_2 : Constante de vitesse d'adsorption de pseudo-second ordre (g/mg.min).

C_1 : C'est une concentration initiale

V_1 : C'est un volume initial

C_2 : C'est une concentration finale

V_2 : C'est un volume final

Introduction générale

La pollution par les métaux lourds est un problème environnemental et sanitaire mondial urgent. Leur forte toxicité et leur capacité à s'accumuler dans les écosystèmes et les chaînes alimentaires constituent une menace sérieuse. Ce problème est grandement exacerbé par les activités humaines multiples et croissantes, notamment dans les zones urbaines où les populations sont en constante expansion. Bien que les villes ne représentent qu'une petite partie de la surface de la planète, elles abritent la majorité de la population, ce qui entraîne de fortes concentrations de polluants.

Plusieurs facteurs majeurs contribuent à l'aggravation de cette pollution. Outre le développement continu des transports aériens, terrestres et ferroviaires, les activités industrielles, agricoles et minières jouent un rôle essentiel dans le rejet de ces polluants. Les eaux usées, qui manquent souvent de traitement adéquat ou sont rejetées sans traitement dans les zones urbaines, constituent également une source importante de ces polluants. De plus, certains sols peuvent naturellement contenir des niveaux élevés de métaux lourds (tels que le nickel, le cadmium, le zinc et le plomb) en raison de leur composition géologique et de l'érosion des roches. Dans les pires cas, ces polluants métalliques se propagent dans les eaux de pluie, contaminant les rivières et les eaux souterraines, puis pénètrent dans la chaîne alimentaire, provoquant de graves effets néfastes sur la santé humaine et les organismes vivants.

Pour relever ce défi environnemental, une large gamme de technologies a été développée pour éliminer les métaux lourds de l'eau, notamment l'échange d'ions, l'osmose inverse, l'extraction par solvant, la précipitation, la coprécipitation et les procédés membranaires. Cependant, ces techniques, bien qu'efficaces, sont souvent limitées en termes d'efficacité d'élimination dans certains cas et présentent des coûts d'exploitation élevés.

En revanche, des recherches récentes ont montré que la technologie d'adsorption, notamment l'utilisation d'adsorbants à faible coût, est l'une des méthodes commerciales les plus efficaces et les plus efficaces dans ce domaine.

Les adsorbants sont des matériaux en constante évolution dans le domaine de la protection de l'environnement, caractérisés par leur grande disponibilité, leur faible coût et leur grande capacité à éliminer les métaux lourds. La nature dispose d'une grande variété de matériaux qui se distinguent par leur capacité à absorber les polluants, y compris les métaux lourds,

sur leur surface. Parmi ces matériaux naturels disponibles en grande quantité et pouvant être exploités efficacement, se distinguent les dunes de sable. Dans des régions comme Ouargla, le sable des dunes est une matière première naturelle abondante, ce qui en fait un candidat idéal pour une utilisation dans des applications d'adsorption. Dans le contexte des technologies modernes, le graphène et ses dérivés ont montré un énorme potentiel en tant que matériaux absorbants, grâce à leurs propriétés uniques et distinctives.

Cette recherche vise à synthétiser et caractériser un nouveau composé adsorbant combinant les propriétés du graphène et du sable de dune extrait de la région de Ouargla, dans le but d'étudier sa capacité à adsorber les métaux lourds. Dans la première phase, nos travaux se concentreront sur la préparation de cet absorbant à base de graphène et sur l'utilisation de deux types de huiles (huile de voiture et huile de cuisson) comme tampon de carbone et de sable de dune comme support de graphène. Ensuite, l'adsorbant préparé sera testé sur un type de métal lourd (nickel), en mettant l'accent sur la détermination de l'effet de différents facteurs (tels que le pH, la masse de l'adsorbant et la concentration en contaminants) sur le processus d'adsorption.

Ce mémoire comprend quatre chapitres principaux :

- * Chapitre I : Généralités sur le graphène et le sable de dune.
- * Chapitre II : La pollution de l'eau par les métaux lourds
- * Chapitre III : Matériels et Méthodes
- * Chapitre IV : Résultats et discussion.

Le manuscrit est achevé par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur
le graphène et le sable de
dune

Introduction :

Le graphène représente le sommet de l'évolution dans le monde des nanomatériaux. Il incarne une couche monoatomique de carbone arrangée en un réseau cristallin hexagonal, offrant ainsi un ensemble exceptionnel de propriétés physiques et chimiques. Ces propriétés uniques, allant d'une résistance mécanique immense à une conductivité électrique et thermique supérieure et une transparence optique, ont fait du graphène un matériau central dans la recherche scientifique et le développement technologique, avec des prévisions d'applications révolutionnaires dans divers domaines.

En revanche, le sable dunaire témoigne des forces de la nature et de son ancienneté, s'étendant largement dans les environnements désertiques, y compris la région de Ouargla. Cette ressource naturelle est principalement constituée de grains de silice et a joué un rôle traditionnel important dans de nombreuses industries de base, telles que la construction et la fabrication du verre, en s'appuyant sur son abondance et son faible coût.

I.1 Le graphene :

I.1.1 Définition :

En 2004, le graphène a été isolé par les chercheurs Konstantin Novoselov et Andre Geim à l'Université de Manchester. En 2010, les deux scientifiques ont reçu le prix Nobel de physique pour leurs expériences sur la structure du graphène, où ils ont pu enregistrer des propriétés qui distinguent le graphène des autres métaux tels que le diamant, le cuivre, etc.

Le graphène est le nom donné à une monocouche plane ayant une hybridation de type SP^2 . Il s'agit d'un cristal bidimensionnel ($D2$: bidimensionnel) composé uniquement d'atomes de carbone, disposés en un réseau hexagonal régulier semblable à des cellules de abeilles. Le graphène est l'unité de base de la matière graphite, qui possède une hybridation SP^3 , mais sa structure électronique est différente de celle du graphite. Le graphène est l'un des matériaux nanocarbonés[1].

I.1.2. Structure du graphène :

Le graphène est un arrangement bidimensionnel d'atomes de carbone d'épaisseur monoatomique disposés suivant un réseau en nid d'abeilles, la configuration électronique du carbone est $1s^2 2s^2 2p^2$,

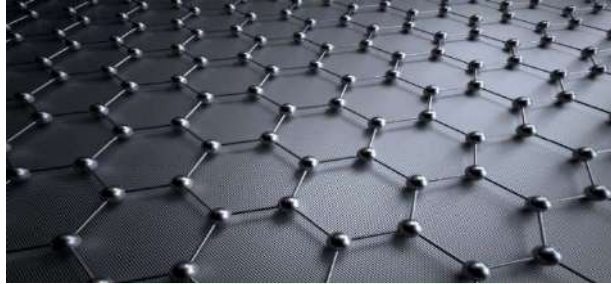


Figure I.2 : Structure du graphène

Le carbone possède donc quatre électrons de valence. Dans le graphène, l'orbitale s et deux orbitales p d'un atome de C présentent une hybridation et forment trois orbitales sp^2 . Ces orbitales sp^2 sont orientées à 120° dans le plan du graphène et pointent vers les trois plus proches voisins. Elles forment des liaisons fortes σ et σ^* responsables de la cohésion du réseau en nid d'abeille. Le quatrième électron, de l'orbitale $2p_z$ perpendiculaire au plan du graphène, forme les liaisons π et π^* . Ce sont ces électrons impliqués dans les liaisons π qui sont responsables des propriétés particulières du graphène [2].

I.1.3. Propriétés du graphènes :

Le graphène est un matériau qui possède des propriétés intéressantes résumées dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Les propriétés principales d'un nano-feuillet de graphène

Propriétés	Valeurs
Dimension	2D
Module de Young	~ 1 (TPa)
Résistance mécanique	~ 130 (MPa)
Conductivité thermique	$5 \cdot 10^3$ W/(m.K)
Conductivité électrique	$6 \cdot 10^3$ (S/cm)
Surface spécifique	2600 (m^2/g)

I.1.3.1. Propriétés chimiques :

Le graphène possède une surface spécifique de 2630 m².g⁻¹, supérieure à d'autres allotropes du carbone et pourrait donc adsorber des molécules, ou faire de la catalyse hétérogène, il est considéré comme chimiquement stable en raison de son système π -conjugué « infini ». La formation d'une liaison covalente dans le plan de graphène conduit à la rupture d'une double liaison **sp²** et la création d'une simple liaison **sp³**[2]

I.1.3.2. Propriétés thermiques :

Le graphène suspendu est un cas exceptionnel. En effet, l'absence d'interaction avec les autres couches augmente considérablement la conductivité thermique jusqu'à 5000 W/mK. Ainsi, le graphène suspendu est le matériau avec la conductivité thermique la plus élevée jamais mesurée. e [3].

I.1.3.3. Propriétés mécaniques :

Les caractéristiques physiques du graphène sont particulièrement remarquables. Le graphène possède une exceptionnelle résistance à la traction, c'est-à-dire qu'il peut être soumis à des forces extrêmement élevées sans se rompre. Cela en fait presque 200 fois plus résistant que de l'acier. Cette résistance découle de la puissance des liaisons covalentes entre les atomes de carbone qui composent le graphène.

I.1.4. Les applications de graphene :

Le graphène est un matériau de haute qualité et peu coûteux, il est le plus résistant (200 fois plus résistant que l'acier), le plus mince (un gramme de ce matériau, on peut couvrir la surface d'un terrain de football) au monde, il est aussi le meilleur conducteur de l'électricité et de la chaleur. En outre, Il est à la fois le matériau le plus dur du monde, et le plus malléable. Le graphène est à la fois transparent, conducteur et flexible, des qualités qui sont rarement associées dans un seul matériau[4]

I.2.Sable de dunes

I.2.1.Définition :

Le sable des dunes résulte de l'érosion de diverses roches, du transport fluvial et parfois éolien. Principalement composé de quartz, il se distingue par une granulométrie fine et très serrée [5].

Abondant dans des régions comme le Sahara, son extraction est pratiquement gratuite, faisant de lui une solution face à l'épuisement des ressources naturelles et un matériau d'avenir [6]. le sable des dunes suscite l'intérêt de chercheurs dans divers domaines scientifiques en raison de sa propreté, de son abondance et de ses avantages économiques et environnementaux [7].



Figure I.3 : sable des dunes de la région d'Ouargla [42]

I.2.2.L'origine de sable :

Le sable provient principalement de la désagrégation et de l'érosion naturelles des roches sous l'effet de l'eau, de la température et du vent .il existe trois grands types de roches à l'origine du sable :

- **Les roches magmatique** (granites,basaltes) qui se forment lors du refroidissement d'un magma ou d'une lave.
- **Les roches sédimentaires** (grés,calcaire) qui se forment par l'accumulation de couches de matériaux à la surface de la terre ou dans les océans.

- **Les roches métamorphiques** qui résultent de la transformation de roches préexistantes sous l'effet de la chaleur et de la pression. Le sable est ensuite transporté par les fleuves les vents ou les glaciers et peut s'accumuler dans des dunes ou des plages fossiles.

Certains sables d'origine organique sont aussi composés de fragments de coraux de coquillages et de squelettes d'organismes [8]

I.2.3.Mécanismes de formation des dunes :

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer. Une dune est une accumulation de sable formée par le vent, et l'action des vagues qui est recouverte de végétation. Les dunes sont des structures dynamiques qui changent de formes constamment. Pour la formation d'une dune es il faut y avoir d'obstacles, tels que les rochers ou les arbres, qui réduisent la vitesse du vent et permet le dépôt du sable transporté selon les étapes suivantes :

- chute des particules de sable devant l'obstacle après le choc, ou on assiste en deuxième étape à l'accumulation de ces particules.
- courant d'air se divise en deux bras passant prochain obstacle où Athrip sable autour de cet obstacle.
- augmente la taille des bras jusqu'à ce qu'ils rencontrent deux composantes de teinte de sable.

I.2.4Les types des sables :

Les sables peuvent être classés en plusieurs types en fonction de leur origine, de leur composition et de leurs utilisations. Voici quelques-uns des types de sables couramment rencontrés :

- **Sable naturels** (sable des rivières, sable vierge).
- **Sable artificiels** (sable concassé).

- **Sable spécifique** (sable fin, sable grossier, sable de mer, sable de quartz) [8]

Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, il apparaît clairement que le graphène et le sable de dune possèdent chacun des propriétés uniques qui les rendent particulièrement adaptés aux applications de traitement de l'eau, notamment pour l'élimination des polluants tels que les métaux lourds. Le graphène se distingue par sa structure nanométrique et ses propriétés physiques et chimiques exceptionnelles, tandis que le sable de dune constitue une ressource naturelle abondante et peu coûteuse. La combinaison de ces deux matériaux ouvre des perspectives prometteuses pour le développement d'adsorbants efficaces et économiques, contribuant ainsi à des solutions innovantes et durables face aux défis croissants de la pollution environnementale.

Chapitre II : La pollution de l'eau par les métaux lourds

Introduction :

Depuis l'apparition de l'eau sur la terre, sa quantité évaluée au total à 1 400 millions de km³, inchangée. C'est le même volume qui ne cesse de se transformer, passant par les différents états de vapeur, eau liquide et glace, pour poursuivre son cycle éternel. La demande de l'eau potable est devenue un gros problème, non seulement à cause de l'augmentation des besoins humaines vu l'énorme croissance démographique, mais aussi à cause de la pollution de cette matière précieuse. En effet, Les multiples rejets liquides industriels et urbains en plus la présence des éléments chimiques dans l'air et dans les terres agricoles qui peuvent arriver dans les eaux par différents procédés, vont changer la nature de l'eau [9].

II.1.La pollution de l'eau

II.1.1.Définition :

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques ; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu naturel.

La pollution des eaux est provoquée par le rejet d'eau salie par nos activités domestiques (lavages et nettoyages divers, etc.) mais également par les diverses activités industrielles et agricoles, nécessaires pour nous fournir les aliments et biens dont nous avons besoin. [10]



Figure II.1 : la pollution de l'eau [41]

II.1.2. Les sources de la pollution :

Les ressources en eau sont soumises à une forte pression exercée par l'activité anthropique (agriculture, industrie, élevage, pêche, domestique, hôpitaux, etc.). Les activités anthropiques à caractère socioéconomique couplées à celles des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation, ruissellement des eaux fluviales) accélèrent la dégradation des ressources en eau de surface [11]. Cette pollution peut avoir des origines diverses :

II.1.2.1. Source urbaine :

Avec les déchets liquides et solides issus des activités domestiques (les produits d'entretien ou cosmétiques, les peintures, solvants, huiles, &), constituent une grande source de pollution des eaux de surface [12].

II.1.2.2. Source industrielle :

Elle constitue les déchets liquides obtenus lors de l'extraction et de la transformation de matières premières en produits industriels. Les eaux résiduaires proviennent principalement de l'eau consommée dans de nombreuses opérations de fabrication par voie humide, comme par exemple: la précipitation, le lavage, le nettoyage des appareils, les ateliers, les filtrations, les distillations, etc .

Les effluents industriels peuvent causer des pollutions organiques (industries agroalimentaires, papeteries), chimiques (tanneries, usines textiles...), physiques (réchauffement par les centrales thermiques, matières en suspension des mines ou de la Sidérurgie). Ils sont responsables de l'altération des conditions de clarté et d'oxygénation de l'eau, pouvant aussi causer l'accumulation de certains éléments dans la chaîne alimentaire (métaux, pesticide, radioactivité). La pollution peut aussi être due à l'infiltration de produits toxiques mal entreposés, à des fuites dans les réservoirs ou à des accidents lors du transport de matières dangereuses menant à des concentrations dans les eaux qui peuvent aisément atteindre 1g/l [13].

II.1.2.3.Source agricole :

La pollution d'origine agricole provient surtout des engrais et pesticides épandus dans le sol sur de très grandes surfaces à proximité ou pas de cours d'eau.

Ce type de pollution s'est intensifié depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation assez avancé. La concentration des élevages entraîne un excédent de déjections animales qui finissent par enrichir les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés, encourageant ainsi une source de pollution bactériologique. L'utilisation massive des engrais chimiques (nitrates et phosphates) altèrent aussi la qualité des nappes souterraines vers lesquelles ils sont entraînés [13].

II.1.2.4.Source naturelle :

Ce phénomène se retrouve pour toute eau en contact avec l'atmosphère car celle-ci contient du gaz carbonique CO_2 qui est soluble dans l'eau pour donner de l'acide carbonique de formule H_2CO_3 . On comprend ainsi qu'une concentration de CO_2 dans l'atmosphère conduit à une acidification de l'eau à son contact. Ainsi, même avant l'existence des pluies acides d'origine anthropique, les pluies naturelles étaient légèrement acides, ceci étant toujours le cas dans des zones protégées telles que les forêts Amazoniennes [14].

II.1.3.Les types de polluants

II.1.3.1.Polluants organiques :

Les polluants organiques sont les plus nombreux et les plus dangereux. Certaines de ces substances sont même cancérogènes ou mutagènes, d'où l'importance de les éliminer. Ils peuvent être classés en phénols, hydrocarbures, colorants, détergents et pesticides, formant de loin, la première cause de pollution des ressources en eaux. Ces matières organiques sont notamment issues des effluents domestiques (déjections animales et humaines, graisses, etc.) mais également des rejets industriels. Elles provoquent l'appauvrissement en oxygène des milieux aquatiques, avec des effets bien évidents sur la survie de la faune. Ce sont aussi tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre ou le lactosérum des industries agro-alimentaires. À l'inverse des matières en suspension (MES), elles constituent une nourriture de choix pour les microorganismes de l'eau et provoquent leur prolifération[15].

II.1.3.2. Polluants inorganiques :

Les éléments sous forme de traces, présents à l'état solide dans les sols, sont mis en circulation par l'érosion qui les met en solution ou suspension. Le ruissellement sur les surfaces imperméables (sols, chaussée) ainsi que les sources anthropiques s'ajoutent à ces sources naturelles liées à l'érosion. Les métaux lourds sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces: mercure, plomb, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure. De nombreuses activités industrielles telles l'électronique, les traitements de surface, l'industrie chimique, utilisent des métaux d'où la possibilité de rejets dans l'environnement [9]

II.2. Les métaux lourds

II.2.1. Définition :

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser. D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être définis comme :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5 [16],
- Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du sodium ($Z = 11$),
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques.

Certains chercheurs utilisent des définitions plus spécifiques. Le géologue, par exemple, considérera comme métal lourd tout métal réagissant avec la pyrimidine (C_6H_5N). Dans le traitement des déchets liquides, les métaux lourds indésirables auxquels on s'intéresse principalement sont : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se), le zinc (Zn). [9]

Tableau II. 1: Classification périodique des éléments [12].

Bloc S			Métaux lourds de densité > 5										Bloc p					
H																He		
Li	Be	B											C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Ti	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Bloc f															
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	P _m	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	F _m	Md	No	Lr		

II.2.2. Sources d'émission des métaux lourds :

Les origines ou les sources des métaux lourds peuvent être naturelles, mais elles sont pour la plupart anthropiques :

II.2.2.1. Source naturelle :

L'activité des volcans est une des sources naturelles les plus importantes mentionnées parmi d'autres telles que l'altération des continents et les incendies de forêt. Le volcanisme peut se manifester par l'émission d'importants volumes d'éruptions explosives ou encore par de faibles volumes en émission continue, en particulier dans le cadre de l'activité géothermique et du dégazage magmatique.

II.2.2.2. Source anthropogène :

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes [17]. Les sources anthropogènes sont les suivantes :

- Activités pétrochimiques.
- Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment).

- Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations).
- Incinération de déchets.
- Produits (électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents).
- Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles. [18].

II.2.3.Toxicité des métaux lourds :

Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule.

[19]

II.2.4.Effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé :

Les métaux lourds sont des éléments chimiques naturellement présents dans l'environnement, mais dont les concentrations peuvent augmenter considérablement en raison des activités humaines. Ils peuvent avoir des effets néfastes importants sur l'environnement et la santé humaine :

II.2.4.1.Effets sur l'environnement :

Les métaux ont des effets toxiques plus ou moins importants sur les êtres vivants, en fonction de leur nature et de leur quantité. Certains métaux sont essentiels à faible dose pour les êtres vivants comme le cuivre ou le zinc. D'autres, en revanche, sont toxiques même à très faible dose comme le plomb et le mercure.

Les métaux lourds sont d'importants contaminants des écosystèmes et des chaînes alimentaires. Ils ne sont pas biodégradables et se retrouvent donc accumulés en grande quantité dans les animaux au sommet de la chaîne alimentaire comme les cétacés, les humains et les prédateurs divers. C'est le phénomène de bioaccumulation, c'est à dire l'absorption et la concentration de certaines substances chimiques, présentes dans un environnement, par un organisme

II.2.4.2.Effets sur la santé humaine :

Le corps humain est comparable à un grand laboratoire chimique. Chaque seconde, il y a des milliers de processus chimiques dans nos organes et cellules. Les métaux ou

minéraux essentiels jouent un rôle primordial dans ces processus biochimiques (le processus enzymatique) la présence des métaux lourds dérange profondément l'équilibre biochimique de nos cellules. L'organisation mondiale de la santé, (OMS) déclarait qu'environ 80% des maladies chroniques comme l'arthrite, le diabète, l'asthme, le cancer pouvaient être causés directement ou indirectement par la pollution environnementale. Au niveau de la toxicité, nous pouvons résumer les principaux dangers des métaux lourds [20].

- Ils remplacent ou substituent les minéraux essentiels.
- Ils changent notre code génétique.
- Ils neutralisent les acides aminés utilisés pour la détoxification.
- Ils causent des allergies.
- Ils endommagent les cellules nerveuses. [21].

II.2.5.Nickel :

II.2.5.1.Généralités sur le nickel :

Le nickel est une substance que l'on retrouve dans le milieu naturel, essentiellement dans les minerais sulfurés extraits des sous-sols et dans les minéraux silicatés se trouvant en surface. Dans l'environnement, le nickel est surtout combiné {l'oxygène (oxydes) et au soufre (sulfures). La croûte terrestre contient environ 0,009% de nickel dans les minerais sulfurés, arséniurés, antimoniurés, oxydés et silicatés. De plus, le nickel est présent dans l'air, dans les particules en suspension, après avoir été rejeté par des activités humaines ou des phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques, les incendies de forêts et les météorites provenant de la haute atmosphère [22].

II.2.5.2.Sources du nickel :

-Naturelle : présence naturelle de 0,8 à 0,9%, activités volcaniques, météorites, minerais.
-Anthropique : activités industrielles, rejets agricoles, engrais phosphatés, batteries de véhicule [23].

II.2.5.3.Effets du nickel sur l'environnement :

Le Nickel est relâché dans l'air par les centrales et les incinérateurs de déchets. Ensuite, il se dépose sur les sols ou retombe après réaction avec l'eau de pluie. Il faut en

général un certain temps pour éliminer le Nickel de l'air. Il peut aussi finir dans les eaux usées.

Les sédiments et les particules du sol adsorbent la part la plus importante du Nickel rejetée dans l'environnement qui devient par conséquent immobile. Cependant, dans les sols acides, le Nickel devient plus mobile et il peut rejoindre les eaux souterraines.

Pour les animaux, le Nickel est un aliment essentiel en petite quantité mais peut être dangereux si on dépasse les quantités maximales

II.2.5.4.Procédés d'élimination des métaux lourds :

Le problème de l'élimination des métaux lourds est rendu délicat par le fait de leur activité à des doses souvent très basse. Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'élimination de ces métaux, les plus utilisées sont :

- Adsorption
- Filtration par membrane
- Echange d'ions
- Electrocoagulation-floculation
- Fixation biologique
- Précipitation chimique [24].

II.3.l'adsorption

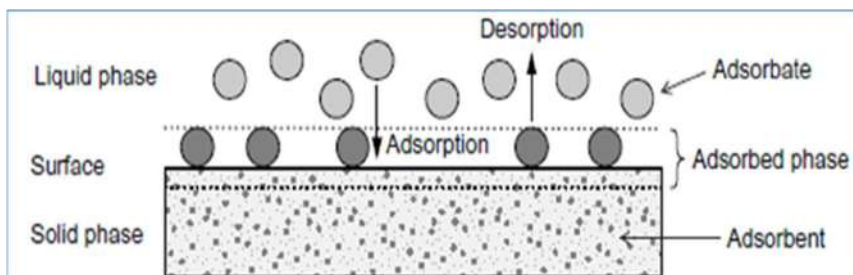
II.3.1.Définition :

L'adsorption est un phénomène d'interface, pouvant se manifester entre un solide et un gaz ou un liquide. Le phénomène est général pour toutes les surfaces.

Ce phénomène dépend à la fois de cette interface et des propriétés physicochimiques de l'adsorbât. Ce phénomène résulte de l'existence, des forces à la

surface du solide, qui sont de nature physique ou chimique. Ces forces conduisent respectivement à deux types d'adsorption : la chimisorption et la physisorption [25].

Figure II.2 : Termes de base pour l'adsorption [40]



II.3.2.Type d'adsorption :

La nature des liens entre l'adsorbant et la substance adsorbée, et la grandeur de l'énergie mise en jeu ont permis de distinguer deux types d'adsorption. [26]

II.3.2.1.Adsorption physique (ou physisorption) :

La physisorption est causée par la force intermoléculaire qui existe entre les adsorbats et les adsorbants. L'adsorption est connue sous le nom de physisorption de van der Waals et la force s'appelle van der Waals force. Puisque la force de van der Waals existe entre deux molécules quelconques, l'adsorption physique peut se produire sur n'importe quelle surface solide. La physisorption étant causée par des forces intermoléculaires, la force de liaison est faible avec moins de chaleur d'adsorption, et le taux d'adsorption et la désorption est rapide [27].

La physisorption se caractérise par

- La rapidité dans l'établissement de l'équilibre entre la phase adsorbée et la phase fluide.
- Une chaleur d'adsorption sensiblement du même ordre que la chaleur de liquéfaction du gaz adsorbé.
- Une réversibilité relativement facile et une absence de spécificité [28].

II.3.2.2.Adsorption chimique (ou chimisorption) :

C'est une adsorption de type chimique, qui résulte des forces de liaison de nature chimique (nettement supérieures aux forces de Van der Waals) avec mise en commun ou

transfert d'électrons; il y a donc des ruptures et des créations de liaisons chimiques en surface entre le réactif et les sites actifs de l'adsorbant.

La chimisorption se caractérise par

- Un équilibre long à atteindre entre la phase adsorbée et le milieu fluide
- Une augmentation de la quantité de matière adsorbée avec la température
- Une chaleur dégagée durant l'adsorption comparable aux chaleurs de réaction (de 40 à 100 kJ/mol), environ 10 fois supérieure à l'adsorption physique
- La non-réversibilité
- Une spécificité marquée, dans le sens que sur un adsorbant déterminé se fixent certains adsorbats.

Quand les conditions s'y prêtent, l'adsorption chimique peut assez souvent se superposer à l'adsorption physique [28].

Tableau II. 2. Les différences entre l'Adsorption physique et chimique [29]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Température du processus	Relativement basse à la température d'ébullition de l'adsorbât	Plus élevée
Chaleur d'adsorption	1 à 10 kcal/mol	Supérieur à 10 kcal/mol
Liaison	Physique de Van Der Waals	Chimique
Spécificité	Processus non spécifique	Processus spécifique
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide	Lente
Formation de couches	Formation multicouches	Formation de monocouche

II.3.3.Description du mécanisme d'adsorption :

A chaque fois qu'un gaz ou un liquide est en contact avec un solide ; celui-ci est retenu par les atomes superficiels du solide et ce concentre à sa surface. Ce processus se déroule en trois étapes [50]

- ✓ Diffusion externe : elle correspond au transfert du soluté (molécules de la phase liquide) de sein de la solution à la surface externe des particules. le transfert de matière externe dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement d'un fluide dans un lit d'adsorbant.
- ✓ Diffusion interne : les particules de fluide pénètrent à l'intérieur des pores. elle dépend du gradient de concentration du soluté.
- ✓ Diffusion de surface : elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores [30].

Le mécanisme du transport d'un adsorbat au sein du solide est donné par la (figure IV.2)

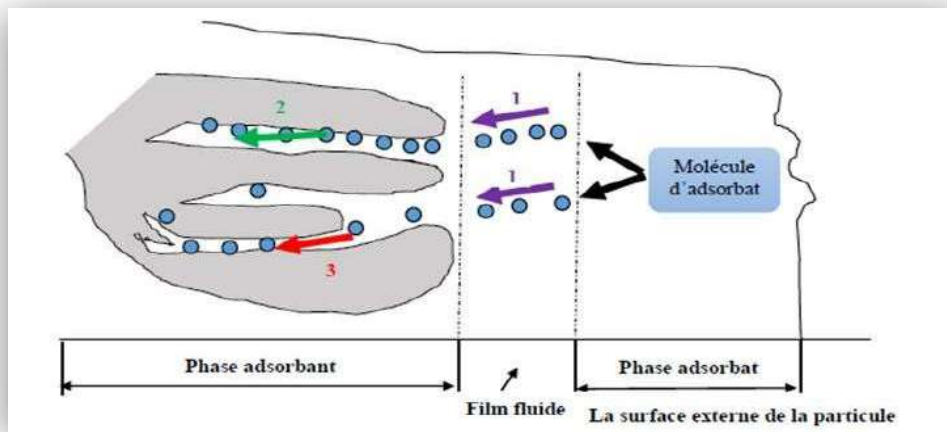


Figure II.3 : Étapes de transfert d'un soluté lors de son adsorption [30].

II.3.4.Facteurs influençant l'adsorption

II.3.4.1.La nature de l'adsorbant :

La capacité de chaque adsorbant dépend essentiellement de la nature de la matière première qui entre dans sa fabrication [31].

II.3.4.2.Surface spécifique :

La Quantité de substance adsorbée augmente avec l'accroissement de la surface adsorbant, pour atteindre un effet d'adsorption important, il est nécessaire que la Surface de l'adsorbant soit la plus grande possible [32].

II.3.4.3 Le pH :

Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption du fait qu'il peut influencer à la fois la structure de l'adsorbant et de l'adsorbât ainsi que le mécanisme d'adsorption [33].

II.3.4.4. La concentration initiale d'adsorbat :

La concentration initiale de polluant est un paramètre qui influe sur la capacité d'adsorption [34].

II.3.4.5. La Température :

L'adsorption est un processus exothermique et son déroulement doit être favorisé par l'abaissement de la température avec quelques cas très rares d'endothermicité ont été reportés [35]

II.3.5 Equilibre d'adsorption :

Pour décrire les performances d'un système adsorbât/adsorbant, des modèles théoriques et empiriques ont été développés, décrivant la relation entre la masse d'adsorbât fixée à l'équilibre et la concentration sous laquelle elle a lieu, à température constante. Il s'agit d'isotherme d'adsorption. Une isotherme est donc une courbe qui représente la variation de la quantité de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant en fonction de la concentration à l'équilibre C_e . Les trois isothermes les plus connues sont celles de Langmuir, de Freundlich et de Brunauer- Emmett-Teller (BET). [36]

II.3.6. Modèle d'adsorption :

Nombreux travaux ont été réalisés sur des modèles théoriques ou empiriques pour décrire la relation entre la masse d'adsorbat fixée à l'équilibre et la concentration sous laquelle elle a lieu. Ces modèles peuvent décrire des adsorptions en mode statique ou dynamique.

II.3.6.1. Modèle de Langmuir :

Le modèle d'adsorption de Langmuir a été proposé par Irving Langmuir, et appliqué pour des surfaces homogènes. Il suppose que l'adsorption a lieu sur les sites de même

énergie et que l'interaction moléculaire est négligeable. Les principales hypothèses sont les suivantes :

- L'adsorption se produit au niveau de sites de liaison spécifiques localisés à la surface de l'adsorbant.
- Tous les sites d'adsorption à la surface de l'adsorbant sont identiques.
- La surface de l'adsorbant est recouverte d'une monocouche de molécules adsorbées[18].
- Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées sur la surface de l'adsorbant. Ce modèle est décrit par l'équation ci-dessous :

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e}$$

q_e : Quantité de soluté adsorbé par unité de masse de l'adsorbant à l'équilibre (mg/g).

q_m : Capacité maximale d'adsorption (mg/g).

b : Constante de Langmuir relative à l'énergie d'adsorption (l/mg)

C_e : la concentration du soluté à l'équilibre (mg/l).

II.3.6.2.Modèle de Freundlich :

Ce modèle postule que différents sites interviennent dans l'adsorption avec des énergies différentes, l'entropie restant constante. Ces sites obéissent à une distribution exponentielle, fonction de la chaleur d'adsorption. La densité des sites varie également exponentiellement. Le modèle s'adapte le plus souvent à une adsorption de type physique. Ce modèle est décrit par la formule empirique suivante[25] :

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

Où

q_e : est la capacité d'adsorption de l'adsorbant (mg/g) à l'équilibre,

C_e : est la concentration d'adsorbat (mg/L) en solution à l'équilibre,

K_F : ((mg/g)/ (mg/L) $^{1/n}$) est la constante de Freundlich associée à la capacité d'adsorption

n: (sans dimension) est le facteur d'hétérogénéité.

Conclusion :

Le deuxième chapitre porte sur la pollution de l'eau par les métaux lourds, une altération des propriétés de l'eau causée par des activités humaines et naturelles, entraînant des dommages sanitaires et environnementaux graves. Il souligne la dangerosité des métaux lourds comme le nickel, en raison de leur toxicité et de leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants. Le chapitre indique également que l'adsorption, utilisant des matériaux adsorbants naturels ou peu coûteux, est l'une des méthodes les plus efficaces et économiques pour traiter ce problème

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.1.Introduction :

Ce travail applicatif vise à explorer la possibilité d'intégrer les propriétés distinctives du graphène avec l'abondance naturelle du sable dunaire pour synthétiser un matériau hybride rentable et capable d'éliminer les ions nickel des solutions aqueuses. Le travail comprendra

- ✓ la préparation du composite graphène-sable dunaire,
- ✓ la caractérisation de propriétés physico-chimiques
- ✓ l'étude de son efficacité dans l'adsorption des ions nickel dans différentes conditions expérimentales.

III.2.Matériels et produit :

III.2.1.Matériels :

Tableau III.1 : Matériels utilisée

Matériels
-Béchers
-Entonnoir (Buchner)
-Agitateurs magnétiques
-Agitateur mécanique
-Barreau magnétiques
-bain-marie
-Eprouvette (100ml)
-Fioles 10ml ou 100ml
-Papiers filtre
-Balance électrique
-Etuve
-Multi paramètres (pour mesure le pH et la conductivité)
- Spectrophotomètre UV- Visible

III.2.1.1. Multi paramètres :

Le Multi paramètre (HI98194) est un multi paramètre portable étanche qui surveille jusqu'à 12 paramètres de qualité de l'eau différents, dont 6 mesurés et 6 calculés. La sonde multi capteur basée sur un microprocesseur permet la mesure de paramètres clés, notamment le pH, l'ORP, la conductivité, l'oxygène dissous et la température. La sonde transmet les lectures numériquement au compteur, où les points de données peuvent être affichés et enregistrés [37].



Figure III.1 : Multi paramètre (HI98194) [27].

III.2.1.2. Spectrophotomètre UV- Visible :

Le spectrophotomètre utilisé est de type **DR 6000**. Cet appareil mesure l'intensité de la lumière (I) traversant un échantillon et la compare à l'intensité de la lumière traversant un échantillon de référence (I_0) contenant le même solvant que l'échantillon, et ce, dans une cellule identique. Le rapport (I/I_0) est appelé transmission (T), et il est généralement exprimé en pourcentage (%). Quant à l'absorbance (A), c'est la valeur qui est dérivée de la transmission, et elle est couramment utilisée dans les analyses quantitatives des matériaux [38].



Figure III.2 : Spectrophotomètre UV- Visible

III.2.2. Produits utilisée :

Tableau III.2 : Produit chimique utilisée

Produit utilisée	Propriétés chimiques et physiques
Acide sulfurique	Formule : H_2SO_4 Masse molaire : 98.08 g/mol T° fusion : 10.31 °C T° ébullition : 337 °C Masse volumique : 1.83 g/cm ³
Ethylenediaminetetraacetic acid	Formule : $C_{10}H_{16}N_2O_8$ Masse molaire : 292.244 g/mol Form : solid pH : 4.0-6.0 (25 °C) solubility : H ₂ O: 100 g/L at 20 °C
Chlorure d'hydrogène	Formule : HCl Masse molaire : 36.461 g/mol T° fusion : -114°C T° ébullition : à 101.3 kPa : -85°C Masse volumique : 1.49 kg/m ³ (gaz)
Sodium Hydroxide	Formule : NaOH Masse molaire : 39.997 g/mol T° fusion : 318 °C T° ébullition : 1390 °C Masse volumique : 2.1 g.l-
Sulfate de nickel(II)	Formule : $NiSO_4$ Masse molaire : 262,85 g/mol T° fusion : 53.0°C
l'eau distillée	Formule : H_2O Masse molaire : 18.0153 g/mol T° fusion : 0°C T° ébullition : 100°C Masse volumique : 0.99705 g/cm ³ (25°C)

III.3.Mode opératoire :

III.3.1.Préparation d'adsorbant :

III.3.1.1.Préparation du sable :

Nous avons prélevé une quantité suffisante de sable dunaire de la région d'Ouargla. L'échantillon est représentatif de la zone (Aïn El Beïda).



Figure III.3 :la zone (Aïn El Beïda).

Nettoyage

Ensuite, nous avons placé le sable dans un récipient approprié et ajouté une quantité suffisante de l'eau de robinet puis par d'eau distillée. Tout en agitant bien pour éliminer les saletés et les grosses impuretés. L'opération de lavage à l'eau distillée a été répétée plusieurs fois jusqu'à ce que l'eau devienne claire.

Séchage

Le sable lavé a été transféré dans un plateau de séchage propre ou un béccher en verre. Le sable a été séché dans un l'étuve à une température comprise entre 80 et 100 °C pendant une durée de 24 à 48 heures pour garantir l'élimination complète de l'humidité. Après le séchage, nous avons laissé le sable refroidir à température ambiante.

III.3.1.2. Préparation du graphène :

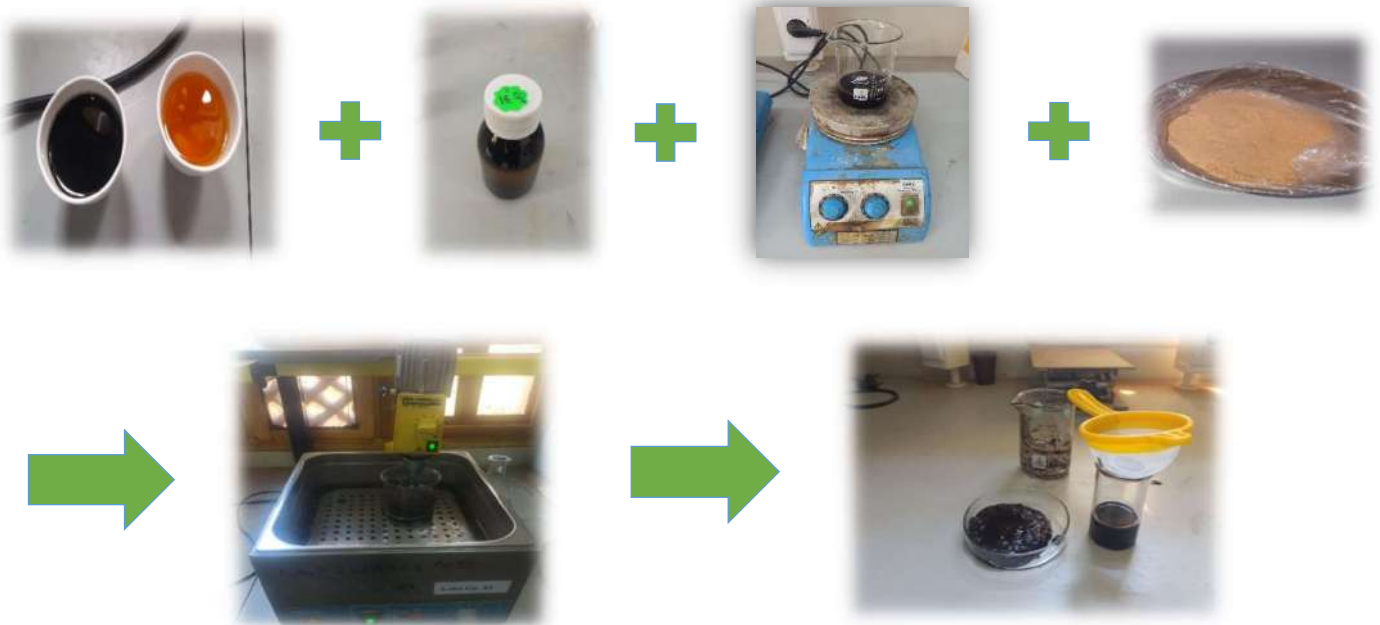
Pour préparé du graphene à partir des résidus de huil (huile de cuisson) et (huile de vidange)

G_{hc} : huile de cuisson

G_{hv} : huile de vidange



- + Dans un bécher, on mit 50 ml d'huile
- + On a ajouté 2 ml d'acide sulfurique concentré puis on a porté à agitation à 85c° pendant (30min)
- + Après 30min de l'agitation on a ajouté 60g grammes de sable.
- + Le bécher a été placé dans un bain-marie pendant 6 heures avec agitation continue
- + à l'aide d'un agitateur mécanique. Ce processus, effectué à la température du bain marie (environ 100 °C).
- + on a suivi la même procédure pour les deux type de l'huile.



La carbonisation :

La carbonisation de **Ghc** et **Ghv** a été effectuée à l'aide d'un creuset en porcelaine couvert dans un four à moufle sous la température $T \approx 750^{\circ}\text{C}$ pendant 1 heure

III.4. Techniques de caractérisation :

Pour caractériser les dépôts réalisés, nous avons utilisé les techniques suivantes :

III.4.1. Analyse minéralogique (DRX) :

L'analyse minéralogique s'effectue généralement grâce à la diffraction des rayons X (DRX). Celle-ci permet, non seulement, d'identifier les phases minérales qui la constituent, mais aussi, de déterminer la distance basale interfoliaire notée $d(001)$. Cette méthode est basée sur le phénomène de diffusion cohérente des rayons X par les couches électroniques des atomes. Ainsi donc, chaque espèce cristalline donne un diagramme de rayon X spécifique. La longueur d'onde de ces rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angströms), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire un flux très faible ; ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction X [39].

III.4.2. Microscope électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (MEB) ou Scanning Electron Microscopy (SEM) en anglais est une technique puissante d'observation de la topographie des surfaces des matériaux. Cette technique est capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Elle est principalement basée sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin pinceau d'électrons primaires qui balaye la surface observée et permet d'obtenir des images avec un pouvoir séparateur souvent inférieur à 5nm.

Préparation de solution mère de sulfate de nickel :

Nous avons pesé 2,62 grammes de sulfate de nickel, puis nous les avons dissous dans 100 ml d'eau distillée pour préparer la solution mère. Ensuite, nous avons préparé six solutions d'essai en prélevant 10 ml de la solution mère et en ajoutant 90 ml d'eau distillée

à chaque bécher, ce qui a entraîné une dilution de la concentration initiale de nickel dans chaque échantillon

grâce à la relation suivante :

$$C_1.V_1=C_2.V_2$$

C_1 : C'est une concentration initiale

V_1 : C'est un volume initial

C_2 : C'est une concentration finale

V_2 : C'est un volume final

Conclusion :

Ce chapitre a présenté les matériaux, les outils et les méthodes expérimentales utilisés pour la préparation et l'analyse du nouvel adsorbant, en insistant sur la rigueur de la conception expérimentale et l'importance d'utiliser des matières premières locales telles que le sable de dune et les déchets pétroliers pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts. Cela établit une base scientifique et technique solide pour poursuivre l'étude et appliquer cet adsorbant dans le traitement des eaux contaminées par les métaux lourds.

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1.Introduction:

Dans ce chapitre, on présente la caractérisation et les résultats d'une étude qui a pour le but de l'évaluation la capacité de matériau préparé.

On a examiné l'effet de plusieurs paramètres à savoir : le temps de contact, la concentration initiale de l'adsorbat et la masse d'adsorbant. Et le pH

IV.2.Caractérisation Physico-chimique :

2.1.Analyse par diffraction des rayons X (DRX) :

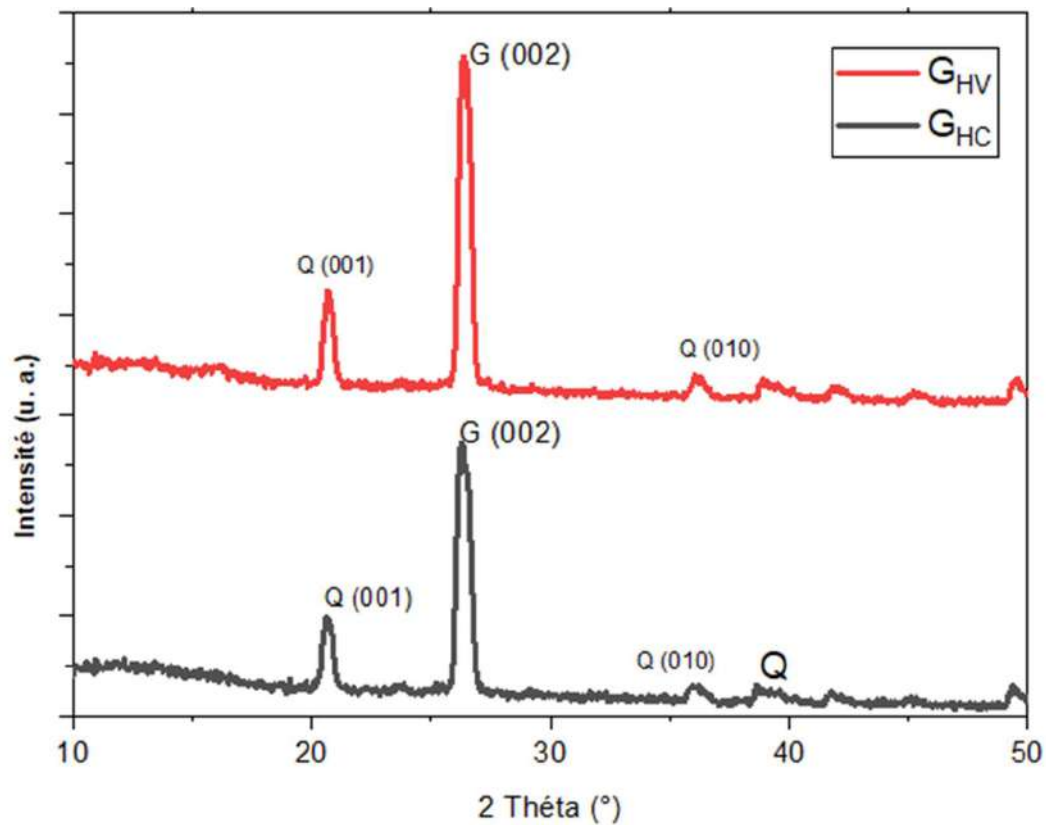


Figure IV.1 : Diffractogrammes montrant les pics de G_{hc} et G_{hv}

Le spectre DRX montre que les échantillons G_{hv} (rouge) et G_{hc} (bleu) ont les mêmes phases cristallines majeures, comme l'indiquent les pics nets à des angles similaires (par exemple, $G(002)$ à ~26-27°). Cependant, l'échantillon G_{hv} montre une intensité plus élevée des pics, en particulier $G(002)$, indiquant une meilleure cristallinité ou une

orientation plus préférentielle des cristaux par rapport au GHC. Cette différence peut être due aux conditions de préparation des échantillons ou à leur nanostructure.

2.2 .Microanalyse au microscope électronique à balayage MEB

Les caractéristiques morphologiques des surfaces de G_{hc} et G_{hv} X200 revêtues ont été caractérisées par microscopie électronique à balayage (MEB) comme la montre la figure

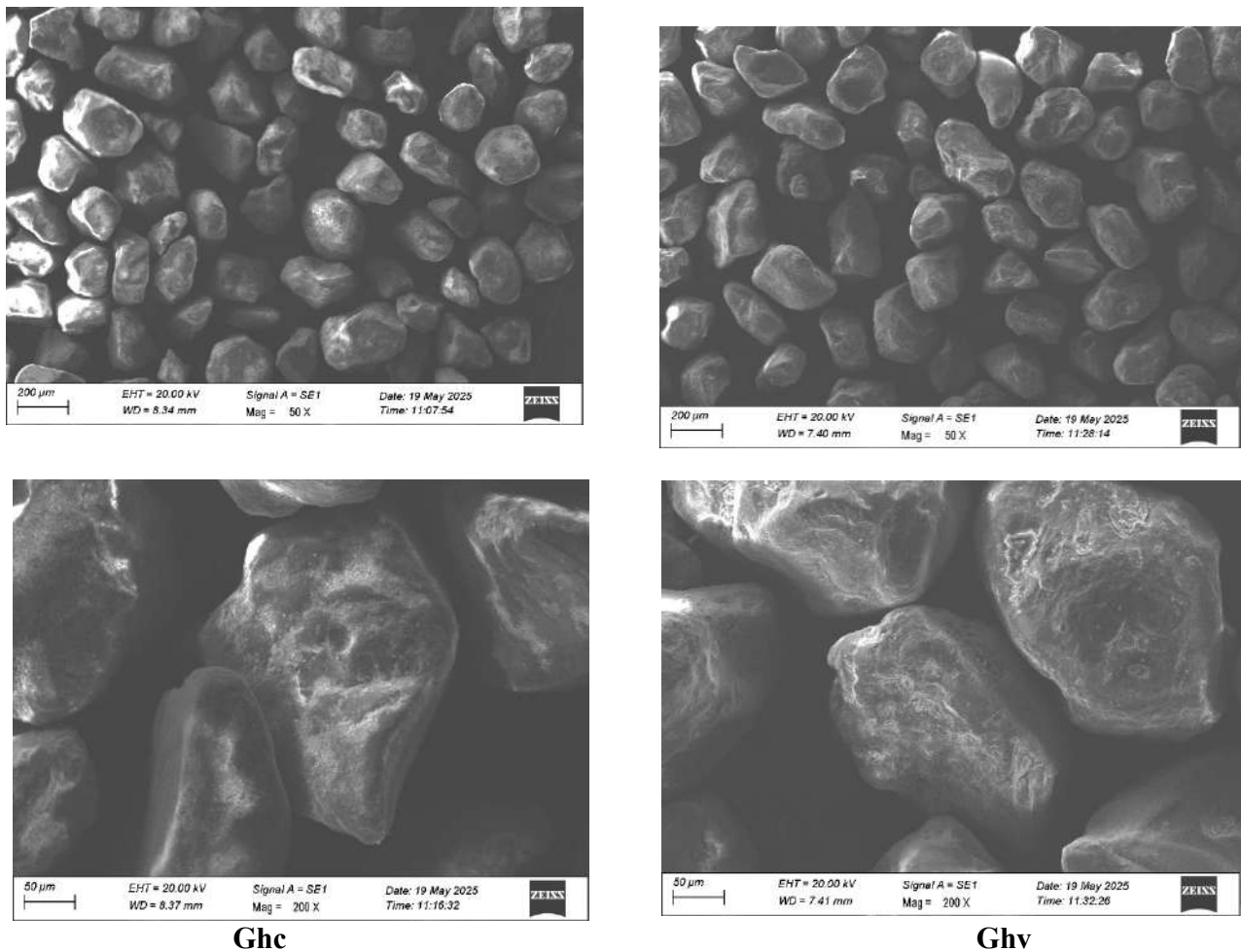
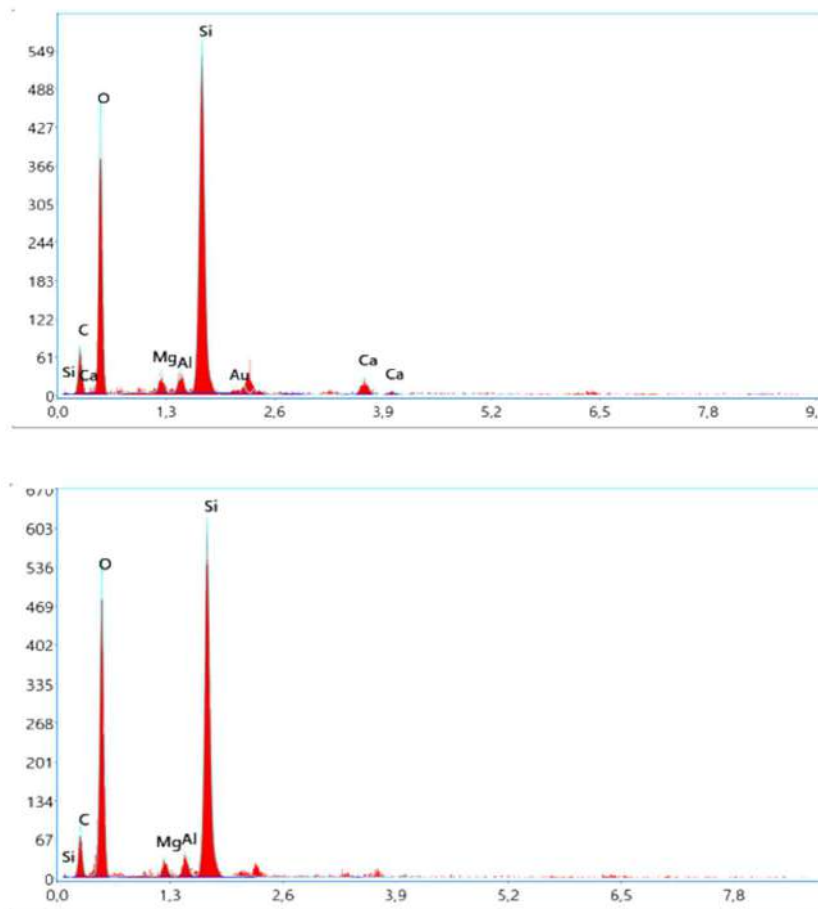


Figure IV.2 : Images MEB montrant la morphologie des G_{hc} et G_{hv}



La courbe montre le spectre des rayons X à dispersion d'énergie (MEB) enregistré par un microscope électronique à balayage (MEB), qui révèle la composition élémentaire de l'échantillon. Les pics majeurs de silicium (Si) et d'oxygène (O) mettent en évidence la silice (sous forme d'oxyde de silicium SiO_2) comme composant principal, tandis que les pics mineurs de carbone (C), de magnésium (Mg), d'aluminium (Al) et de calcium (Ca) indiquent la présence d'impuretés ou de composants supplémentaires.

Tableau IV.1 :résultats d'analyse EDX des Ghc

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	20.38	29.63	0,0487	1.0798	0.2212	1.0000
O K	52.89	57.72	0,1311	1.0347	0.2394	1.0000
MgK	1.36	0.98	0,0058	0.9574	0.4425	1.0012
AlK	1.19	0.77	0,0064	0.9223	0.5842	1.0023
SiK	15.50	9.63	0,1036	0.9428	0.7080	1.0017
CaK	1.45	0.63	0,0122	0.8913	0.9231	1.0217
AuL	7.23	0.64	0,0413	0.5320	1.0608	1.0117

Tableau IV.2 :résultats d'analyse EDX des Ghv

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	24.14	32.11	0,0564	1.0499	0.2225	1.0000
O K	57.26	57.18	0,1461	1.0042	0.2541	1.0000
MgK	1.20	0.79	0,0051	0.9269	0.4561	1.0047
AlK	1.26	0.74	0,0069	0.8925	0.6073	1.0080
SiK	16.15	9.19	0,1082	0.9119	0.7334	1.0017

IV.3.L'étude de l'adsorption :

3.1.La courbe d'étalonnage :

Après avoir prélevé un échantillon de la solution diluée, on a mesuré son absorbance par le spectrophotomètre UV. Les lectures d'absorbances à $\lambda_{max} = 540 \text{ nm}$ sont présentées sur la figure suivante.

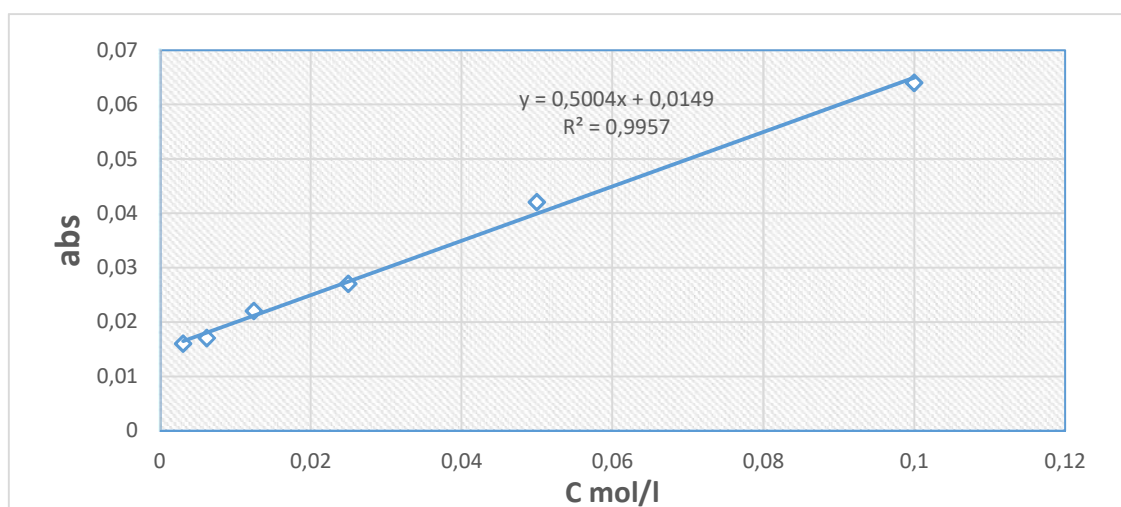


Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage de nickel

3.2 Etude de l'effet du temps de contact:

L'étude de l'adsorption du nickel sur G_{hc} et G_{hv} nous permet d'examiner l'effet du temps de contact. Les échantillons sont prélevés à des intervalles de temps bien définis.

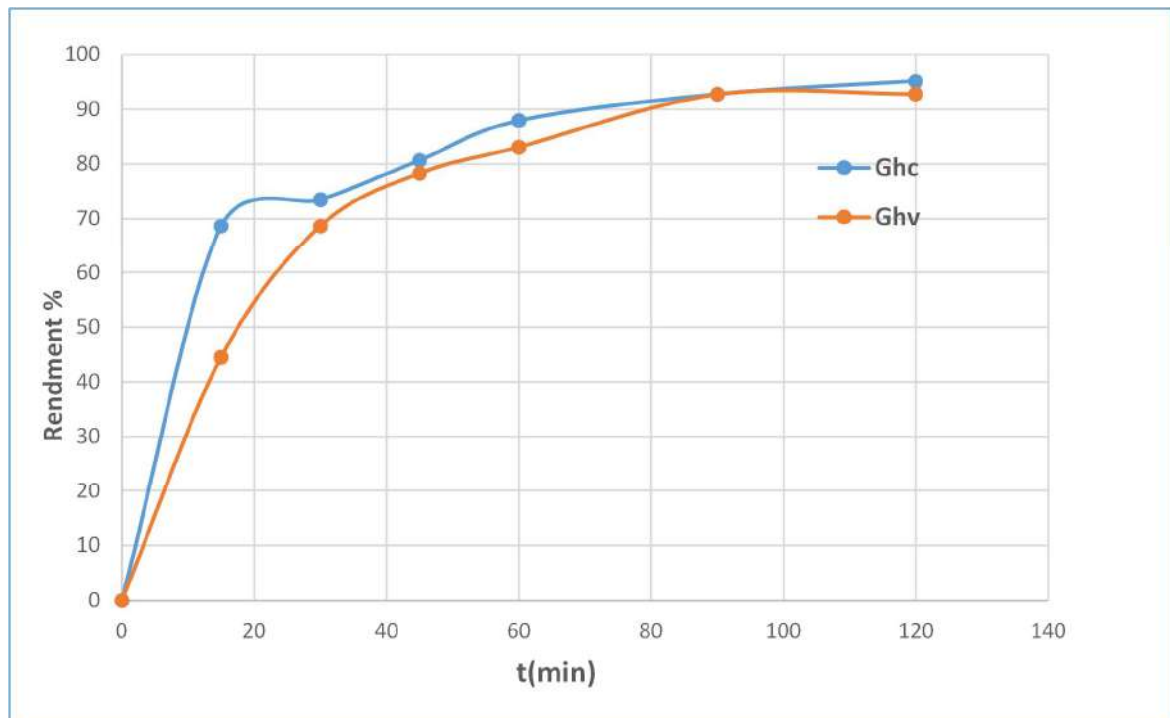


Figure IV.4 : l'effet du temps de contact sur le rendement

La courbe pour les deux matériaux montre une augmentation du rendement d'élimination du nickel avec l'augmentation du temps de contact. Cela confirme l'efficacité des deux matériaux pour absorber le nickel de la solution. Le G_{hc} montre un taux d'absorption significativement plus rapide dans les premières minutes (environ 0 à 40 minutes).

Après un certain temps, les deux courbes ont tendance à devenir presque horizontales, indiquant que le processus d'absorption a atteint l'équilibre.

Au bout d'environ 90 à 100 minutes, les courbes convergent presque, indiquant que les deux matériaux ont atteint des efficacités d'élimination très similaires et proches du rendement maximal possible. Le temps de contact optimal pour le G_{hc} varie de 60 à 80

minutes, Il faut un peu plus de temps au G_{hv} pour atteindre un rendement élevé. On peut considérer qu'environ 90 à 100 minutes constituent le temps de contact.

3.3 .Etude de l'effet de la concentration :

Le graphique est un diagramme à barres comparant le rendement d'élimination du nickel de G_{hc} et G_{hv} à trois concentrations initiales différentes (0,1, 0,05 et 0,025).

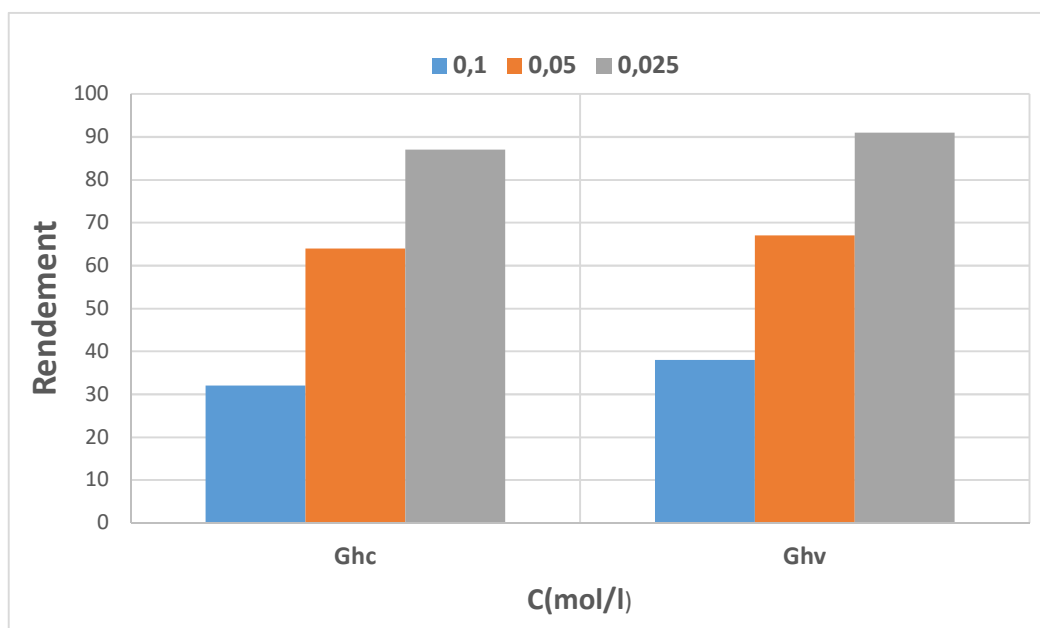


Figure IV.5 : l'effet de la concentration

Pour G_{hc} et G_{hv} , nous observons que le rendement augmente avec la diminution de la concentration initiale en nickel.

- Le rendement le plus faible est à une concentration de 0,01
- Le rendement le plus élevé est obtenu à une concentration de 0,025.

Cette tendance est tout à fait attendue dans les processus d'absorption. À de faibles concentrations initiales, les sites actifs du sorbant sont suffisants pour adsorber une proportion significative des contaminants. Alors qu'à des concentrations initiales élevées, les sites actifs deviennent saturés et le adsorbant ne peut pas éliminer le même pourcentage de la quantité totale plus importante de polluant.

3.4 .Effet de la masse de l'adsorbant :

Ce graphique représente un diagramme à barres comparant l'efficacité d'élimination (rendement en pourcentage) du nickel pour le Ghc et le Ghv à trois masses de sorbant différentes : 1,5g, 1g et 0,5g.

- Conditions constantes : Cette étude a été menée à une concentration initiale de nickel constante (0,01 mol/L), un volume de solution constant, un temps de contact idéal

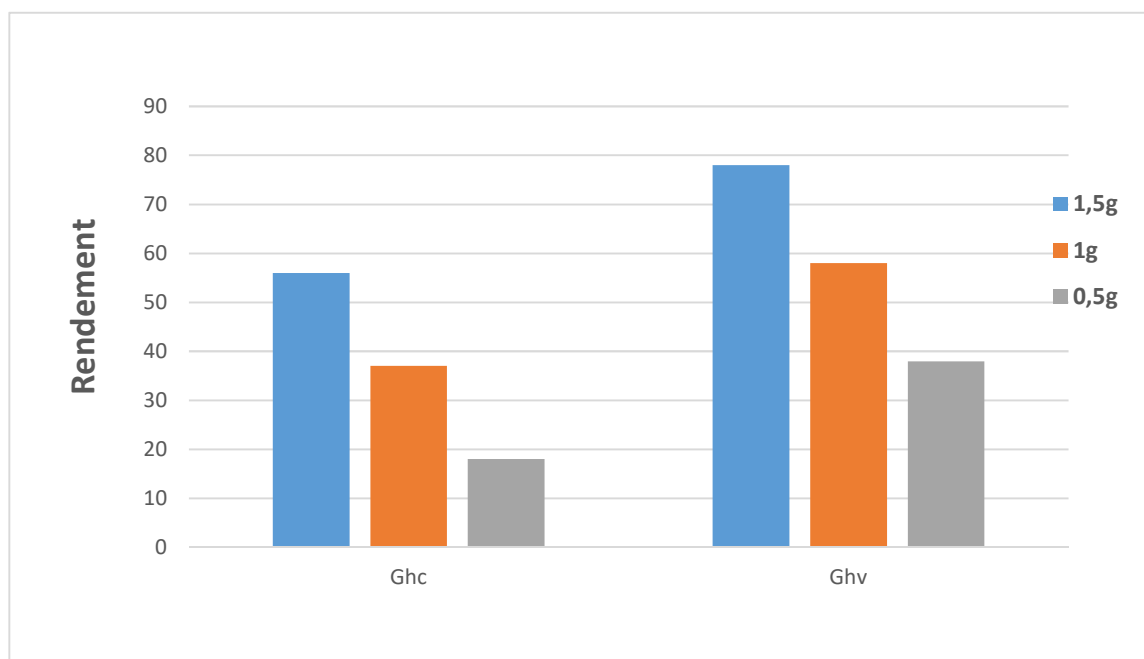


Figure IV.6 : l'effet de la masse de l'adsorbant

Effet de la masse sur le rendement : Pour les deux adsorbant, le graphique montre que le rendement augmente avec l'augmentation de la masse de l'absorbant.

* Le rendement le plus élevé (environ 55-78 %) est enregistré à la masse la plus élevée de 1,5 g.

* Le rendement diminue à mesure que la masse diminue (1 g puis 0,5 g).

* L'augmentation de la masse de l'adsorbant fournit un plus grand nombre de sites actifs disponibles pour l'adsorption.

3.5 .Effet de pH :

Ce graphique représente un diagramme à barres comparant le rendement de G_{hc} et G_{hv} à des valeurs de pH : 3,5 et 10,9

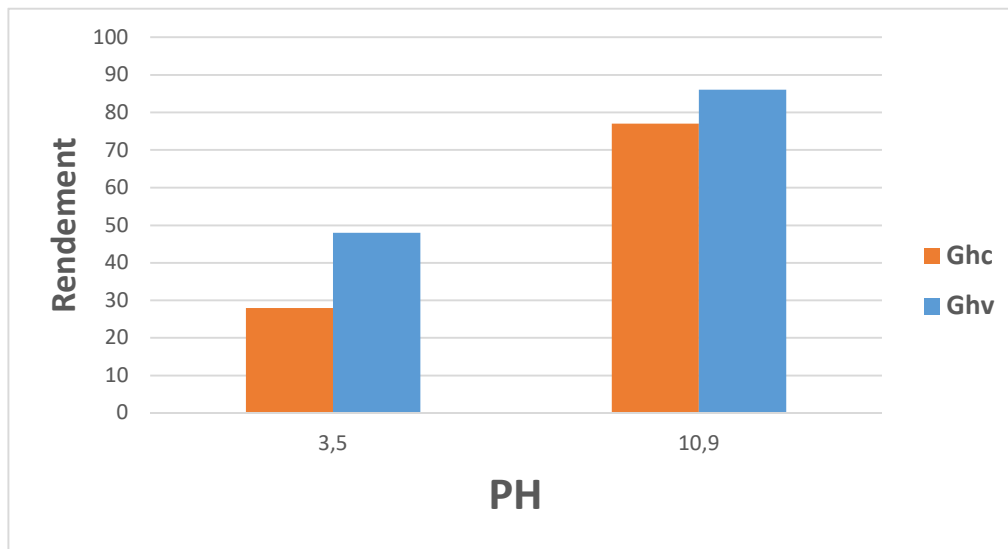


Figure IV.7 : l'effet de pH

Le graphique montre que le rendement augmente considérablement lorsque l'on passe d'un pH à un pH acide (3,5) à un pH basique (10,9).

* À pH 3.5 : Le rendement est faible pour les deux adsorbant, environ 28 % pour G_{hc} et environ 48 % pour G_{hv} .

* À pH 10.9 : Le rendement est très élevé pour les deux adsorbant, environ 77 % pour G_{hc} et environ 86 % pour G_{hv} .

➤ Aux deux valeurs de pH, G_{hv} montre une rendement supérieure à celle de G_{hc} .

IV.4. Etude de l'isotherme d'adsorption :

Dans le but de clarifier le phénomène d'adsorption des ions de Ni(II) sur le graphène composite préparé, une étude des isothermes d'adsorption a été réalisée. Pour étudier l'isotherme, nous appliquons les modèles de Langmuir, Freundlich, où la relation linéaire pour chaque modèle est donnée respectivement comme suit :

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$$

$$\text{Log}(q_e) = \frac{1}{n} \cdot \text{Log}C_e + \text{Log}K_f$$

q_e : La quantité adsorbée par unité de masse de l'adsorbant (mg. g^{-1}).

q_m : La quantité nécessaire pour couvrir la surface entière avec une monocouche de substance adsorbée (mg. g^{-1}).

C_e : La concentration à l'équilibre (mg. L^{-1}).

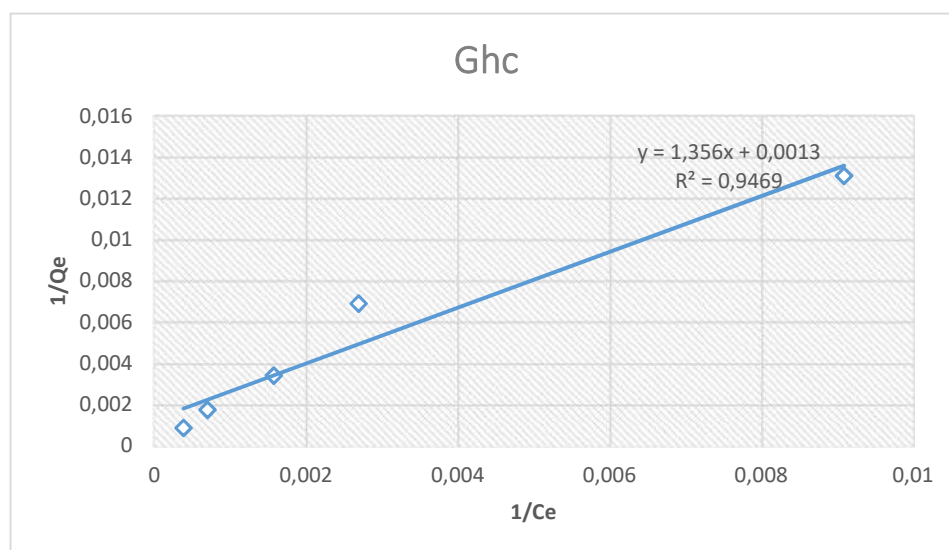
K_L : Constante d'énergie d'adsorption ($L. mg^{-1}$)

$1/n$: Intensité d'adsorption

K_f : Constante de Freundlich

4.1 Modèle de Langmuir :

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous :



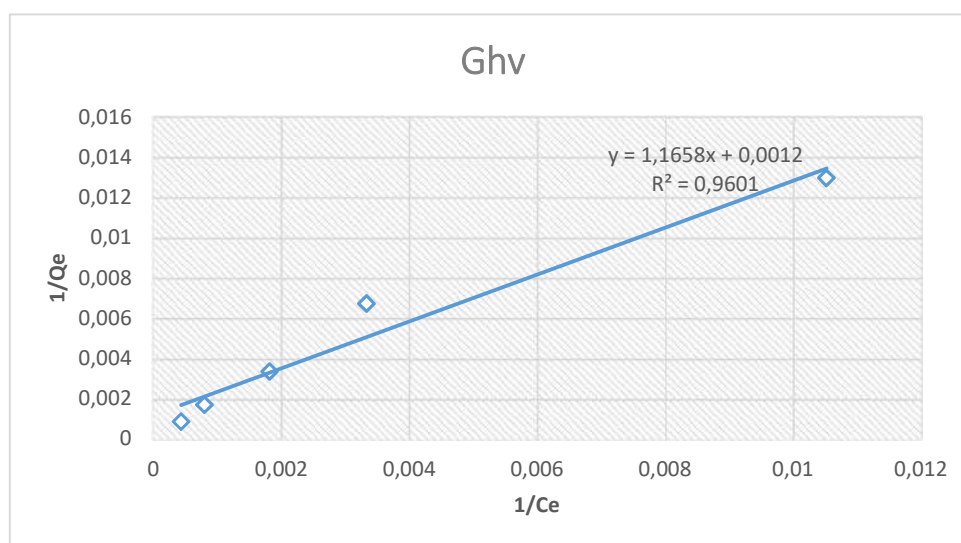
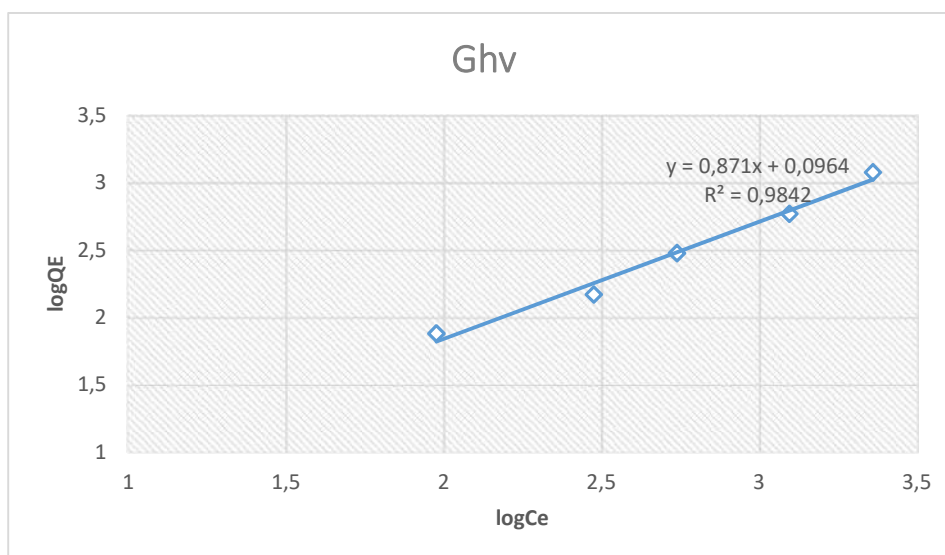


Figure IV.8 : Isothermes expérimentales d'adsorption simulées par le modèle de Langmuir du nickel sur les **Ghe** et **Ghv**

4.2 Isotherme de Freundlich :

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous :



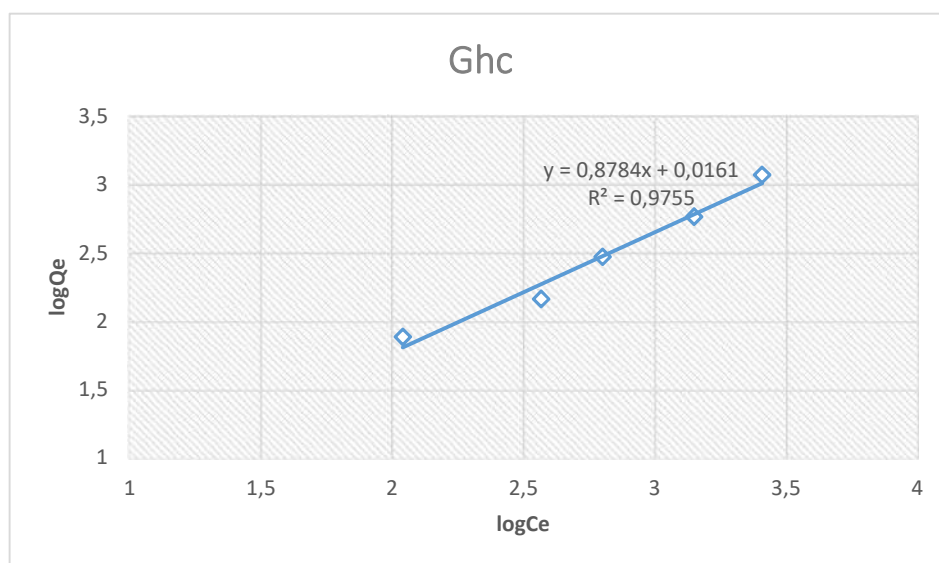


Figure IV.9 : Isothermes expérimentales d'adsorption simulées par le modèle de Freundlich du nickel sur les **G_{hc}** et **G_{hv}**

A partir des figures (IV.8) et (IV.9), nous pouvons remarquer que les modèles d'adsorption sont concordants avec les données expérimentales selon l'ordre suivant : Freundlich > Langmuir. Les paramètres d'adsorption ont été évalués à partir des isothermes et les valeurs du coefficient de corrélation (R^2) pour les deux modèles sont listées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Valeurs des constantes de l'isotherme de Langmuir et Freundlich

ADSORBANT	Isothermes					
	Langmuir			Freundlich		
	Q _{max} (mg/g)	K _L	R ²	K _F	n	R ²
G_{hc}	769.23	0.000959	0.9469	1.034	1.138	0.9755
G_{hv}	1428.57	0.00056	0.9601	4.46	1.428	0.9842

D'après les résultats, nous pouvons observer que le modèle de Freundlich possède la plus grande valeur du coefficient de détermination ce qui suggère que l'adsorption des ions de Ni(II) sur la surface l'adsorbant préparé est une adsorption multicouche.

IV.5. Etude de la cinétique d'adsorption:

Pour l'étude de la cinétique d'adsorption, nous appliquons les modèles du premier et du second ordre dont la relation linéaire est donnée respectivement comme suit :

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log} q_e - K/2.303 \cdot t$$

$$t/q_t = 1/q_e \cdot t + 1/K \cdot q_e^2$$

Avec :

q_t : Quantité adsorbée à l'instant t (mg. g^{-1}).

q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg. g^{-1}).

k_1 : Constante de vitesse d'adsorption de pseudo-second ordre (min^{-1}).

k_2 : Constante de vitesse d'adsorption de pseudo-second ordre (g/mg.min).

5.1. Modèle de la cinétique de pseudo premier ordre:

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous :

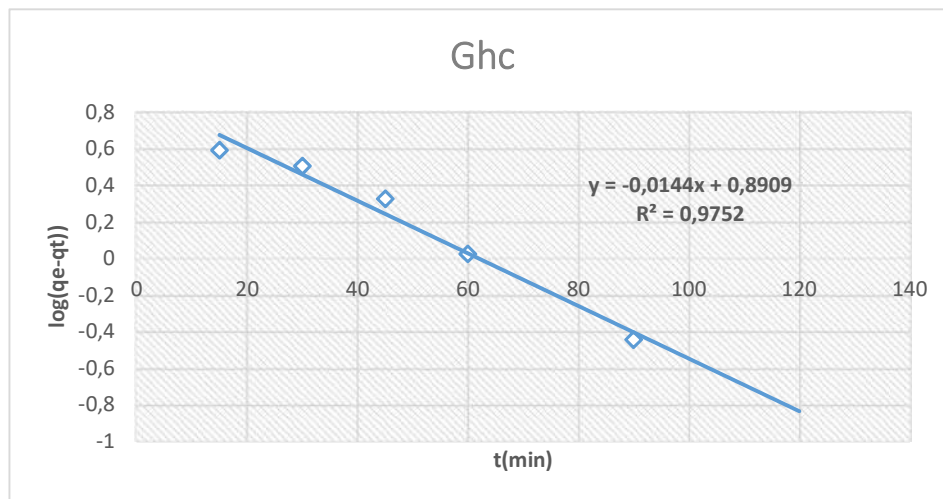


Figure IV.10: Cinétique du pseudo-premier ordre pour Ghc

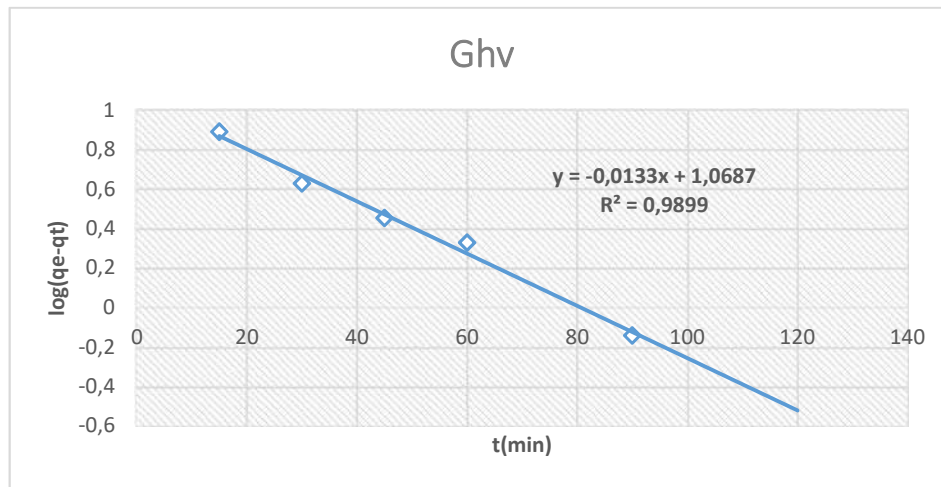


Figure IV.11: Cinétique du pseudo-premier ordre pour Ghv

Tableau IV.4: Valeurs des constantes cinétiques du pseudo premier ordre

Adsorbant	q_{e1}	K_1	R^2
Ghc	5.37	0.0214	0.975
Ghv	10.99	0.0216	0.989

Les deux échantillons Ghc et Ghv suivent un modèle pseudo-premier ordre ($R^2 = 0,9752$ et $0,9899$), Ghv ayant une vitesse d'adsorption supérieure (pente = $-0,0334$ contre $-0,0104$ pour Ghc), reflétant son efficacité cinétique supérieure.

5.2. Modèle de la cinétique de pseudo deuxième ordre :

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux et les figures ci-dessous :

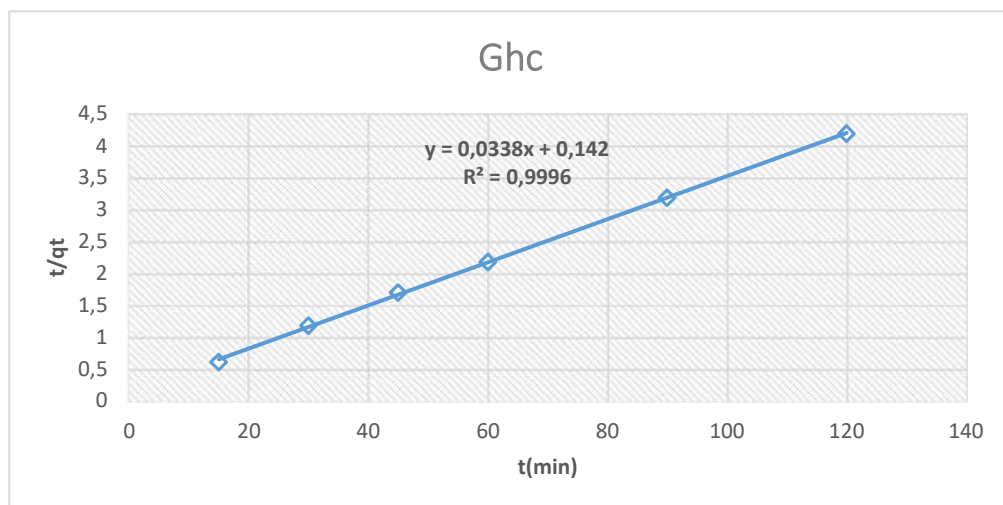


Figure IV.12 : Cinétique du pseudo-second ordre pour Ghc

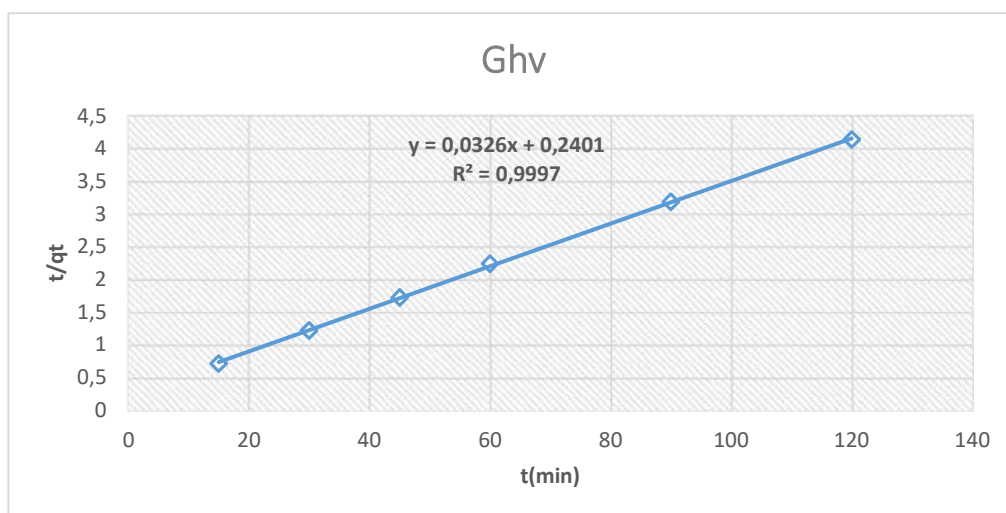


Figure IV.13 : Cinétique du pseudo-second ordre pour Ghv

Tableau IV.5 : Valeurs des constantes cinétiques du pseudo-second ordre

Adsorbant	q_{e2}	K_2	R^2
Ghc	32.79	0.1348	0.9996
Ghv	33.56	0.0034	0.9998

Les courbes montrent l'application du modèle cinétique chimique pseudo-second ordre², où les deux échantillons (Ghc et Ghv) montrent une excellente relation linéaire ($R^2 \approx 1$), confirmant que le modèle décrit les données avec une grande précision. Cela indique que le mécanisme d'adsorption suit le quasi-second ordre pour les deux échantillons.

Conclusion :

L'étude a comparé deux adsorbants préparés à partir d'huiles usagées, l'huile de cuisson (**Ghc**) et l'huile moteur (**Ghv**), pour l'élimination du nickel des eaux contaminées. Les résultats montrent que les deux matériaux ont une bonne capacité d'adsorption, mais que le **Ghv** présente une efficacité supérieure en termes de quantité de nickel adsorbée et de performance globale d'élimination dans des conditions optimales. Cette supériorité est attribuée aux différences dans les propriétés de surface et la composition chimique liées au type d'huile utilisé pour la préparation. Ainsi, le **Ghv** est considéré comme un adsorbant prometteur et efficace pour le traitement des eaux polluées par les métaux lourds.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les déchets pétroliers, en particulier les huiles usagées, constituent des ressources abondantes et peu coûteuses dans la région d'Ouargla. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation de ces déchets locaux en les transformant en matériaux adsorbants pour l'élimination des ions nickel dans l'eau. Avant d'étudier l'efficacité de l'adsorption, les matériaux adsorbants à base de graphène et de sable de dune ont été préparés selon des conditions spécifiques :

- utilisation de deux types d'huiles usagées (huile de cuisson et huile moteur) comme source de carbone,
- traitement thermique à différentes températures,
- activation et caractérisation physico-chimique.

Les paramètres opératoires influençant l'adsorption des ions nickel, tels que le temps de contact, la quantité d'adsorbant, la concentration initiale et le pH, ont été étudiés de manière systématique. La modélisation des isothermes d'adsorption a montré que le modèle de Freundlich et Modèle de la cinétique de pseudo deuxième ordre est le plus adapté pour décrire le comportement des matériaux adsorbants préparés.

La comparaison des résultats indique que le matériau adsorbant préparé à partir d'huile moteur usagée (GHV) a montré une meilleure performance dans l'élimination des ions nickel par rapport à celui préparé à partir d'huile de cuisson usagée (GHC). Il a également été démontré que l'optimisation des conditions opératoires est essentielle pour améliorer la capacité d'adsorption. Ainsi, ce travail confirme le potentiel d'exploitation des matériaux locaux comme sources peu coûteuses et efficaces pour le traitement des eaux contaminées par les métaux lourds.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] بوحجة. ي. مايو. ع. إمتزاز بعض المعادن الثقيلة على رمل السيليكا المغلف بالغرافين. شهادة ماستر أكاديمي في الكيمياء. 2018
- [2] Haddad Yousra et Souilah Abir . synthese chimique et electrochimique de composites mixtes : composes azotes- nickel - graphene . Université 8 Mai 1945 Guelma .(2021)
- [3] Balandin, A. A., S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F.Miao and C. N. Lau. "Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene." Nano Letters. 8(3), 902-907.(2008)
- [4] Andrea C. Ferrari et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid sytems, jurnal 12th september (2014).
- [5] Mekhermeche A [Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes]. (mémoire de magister.). université de Ouargla. (2012)
- [6] Belkhiri H ; Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses. (. Mémoire de Fin d'Etudes.). université de Djelfa.(2016)
- [7] Belferrag A.. ; Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates, (Construction and Building Materials. (2016).
- [8] KORICHI R.. , Production de sable de frein local. Mémoire de Master, Université kasdi merbah ouargla. (2024)
- [9] Louaar Dalal . Elimination Des Ions Ferrique En Solution Aqueuse Par Adsorption Sur Une Argile Naturelle , Universite Larbi Ben M'hidi Oum Elbouaghi .(2017)
- [10] <https://www.aide.be/epuration/pollution-des-eaux>
- [11] Aw SE., N'goran BZ., Siaka S., Parinet B. « Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)». J. Appl. Biosc.(2011), 38: 2573 3 2585
- [12] BOURNANE Th .HAROUNE. K , Elimination des métaux lourds en solution aqueuse par un biosorbant : Cladodes du figuier de barbarie Opuntia ficus-indica .Memoire De Fin D'étude.(2020)
- [13] BOUMESRANE Amir.BOUNOUR Omar .L'élimination des polluants industriels par l'adsorption sur charbon actif et par la dégradation photocatalytique (TiO2/UV) .Mémoire Master Academique.(2015)

Références bibliographiques

- [14] bu.umc.edu.dz/theses/ch-ind/DER6195
- [15] Guy Pierre Martineau « Maladies d'élevage des porcs » France agricole éditions, (1997)
- [16] M. Gérard Miquel et al, Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, Rapport d'information N° 261 (2000-2001), fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scient. Tech, déposé le 5 avril (2001).
- [17] Weiss, D., Shotyk, W., Kempf, O. Archives of Atmospheric Lead Pollution. Natur Wissenchaften. (1999)
- [18] Bouktah H. « Etude comparative d'adsorption du plomb sur différents adsorbant » Mémoire de magister en chimie de l'université de Skikda-Algérie. (2008)
- [19] S. Kadouche, Utilisations des biomatériaux dans le traitement des eaux, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2013).
- [20] Bekaert E. , Gestion des chlorures des métaux lourds stabilisation d'un phosphate d'étain dans un vitrifiat silicate ; Thèse de doctorat de l'université de Lille- France. (2004)
- [21] BRAIECH I. BOUSNINA Mohamed Bachir. Elimination des métaux lourds, des effluents industriels, par des zéolites de types FAU. (2019)
- [22] Duke J. Nickel in Rocks and Ores. Nickel in environnement. J.O. Nragu. John Wiley & Sons, New York; (1980)
- [23] LANSARI I. Absorption des metaux lourds en solution aqueuse par chitine et le chitosane. Memoire diplome de master. (2017)
- [24] Daoud. Y. Evaluation du piegeage des metaux lourds des eaux usees de la region de tlemcen par absorption atomique. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master. (2017)
- [25] SERRAH. KH. KHEDIM . Traitement des eaux usées sur un biomatériau. Mémoire de master. (2016)
- [26] N. BOUDRIES, « Biosorption des métaux lourds sur une biomasse Mycelienne », Thèse de magistère, ENP, (1997)
- [27] DENG, F., LUO, X.-B., DING, L., & LUO, S.-L. « Application of Nanomaterials and Nanotechnology in the Reutilization of Metal Ion From Wastewater ». Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization. (2019)

Références bibliographiques

- [28] BÉRIALA BAHRIA. BELHANI SOUMIA.Élimination des métaux lourds par l'utilisation d'un nano-adsorbant à base de la biomasse. Mémoire Master Académique.(2021)
- [29] R. DESJADINS, « le traitement des eaux », Edition de l'école polytechnique de Montréal, (1997).
- [30] ABBANI .HADDA TRYA., ASMA. Préparation des biomatériaux à base de chitosane et des déchets de palmiers dattiers : Application à la dépollution des effluents piscicoles. Mémoire de Fin d'Etudes. (2020)
- [31] BABAKHOUYA N. Récupération des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels, mémoire de magistère en génie de l'environnement, option : traitement des effluents industriels, université de Boumerdès, Algérie, (2010), p 1-130.
- [32] L.MING SUN, F.MEUNIER, Adsorption,aspectthéorique,Edition technique de l'ingénieur, J2730.(2003).
- [33] NAIT MERZOUG N. Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques. Mémoire de magister en chimie physique et analytique, option traitement des eaux et environnement, université de SOUK AHRAS, (2014)
- [34] HAMDOUN Amira et SALHI Abir.Etude bibliographique sur l'adsorption de quelques colorants par des bio-adsorbant. MASTER ACADEMIQUE. (2020)
- [35] ABDEL HAKIM BOUTALBI -ABDELFETTAH SAKER, " Préparation De Charbon Actif A Base De Résidus Agricole Et Leur Application A L'élimination Des Colorants", Mémoire De Fin D'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar. (2018)
- [36] A. HELLAL. A. NAMANE. Etude de la Biosorption du phénol dans un lit de charbon actifensemencé par Pseudomonas aeruginosa en système continu. MEMOIRE DE MAGISTER.(2005)
- [37] LEBSSISSE LAHCEN,AICHAOUI SENDES. Modélisation d'expérience et étude du phénomène d'adsorption des métaux lourds par l'utilisation d'un adsorbant à base de la biomasse[mémoire de master].Ouargla:université Kasdi Merbah;(2022).
- [38] M. BAUDU ; G. GUIBAUD « caractéristiques physico-chimiques de charbons actifs». Water Qual. Res. J.Canada. Vol 36, No 4, 631–657. (2001).
- [39] MLLE BEN AOUAK CHAIMA. MLLE KARAOUI SAMIRA. Synthèse et caractérisation des adsorbants à base d'oxyhydroxyde de fer. Application à l'adsorption. (2016).

Références bibliographiques

[40] https://www.researchgate.net/figure/Termes-de-base-pour-ladsorption-Worch-2012_fig6_326942343

[41] <https://www.europaz.fr/post/comment-leau-est-polluee>

[42] <https://stock.adobe.com/fr/search?k=ouargla>