

République Algérienne Démocratique et Populaire.

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi –BBA.

Faculté des Sciences et de la Technologies.

Département des Sciences de la Matière.



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

Projet de fin d'études

Mémoire Présenté en vue de l'Obtention du Diplôme de Master

FILIERE : Chimie

Spécialité : Chimie analytique

Intitulé :

**Elimination de quelques métaux lourds d'un effluent
industriel simulé par coagulation-floculation**

Présenté par :

BELMANA IKRAM

Soutenu le 10 juin 2025

Devant le jury

| | | | |
|--------------------|-------------------|-----|----------------------------------|
| Président : | Mekhalif Tahar | MCA | Université de Bordj Bou Arréridj |
| Encadrant : | Mustapha Boubatra | MCB | Université de Bordj Bou Arréridj |
| Examineur : | Dilmi Abdelkader | MCB | Université de Bordj Bou Arréridj |

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Louanges et remerciements à Dieu, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui nous a donné le courage, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce modeste travail de recherche. J'adresse mes remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrant de mémoire, Dr. Mustapha Boubatra, pour sa compréhension, son talent et son engagement dans l'encadrement de ce travail. Je le remercie sincèrement pour la confiance qu'il m'a accordé. Mes vifs remerciements vont à monsieur Dr. Tahar Mekhalif pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie vivement Dr. Abdelkader Dilmi d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation, sans exception. Mes remerciements vont aussi aux ingénieurs des laboratoires pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté durant les manipulations.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Merci à tous.

Dédicaces

Tout d'abord je rends grâce à Dieu, pour la santé qu'il

M'a accordée lors de ces cinq années de travail

Je dédie cet humble mémoire aux êtres les plus chers :

A ma famille

A ma grand-mère

A mon père et ma mère

A mes frères

A Mes camarades de promotion de chimie analytique

A tous ceux que j'aime

Belmana Ikram

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Références bibliographiques

Chapitre I *Revue bibliographique*

I.1. Les eaux usées 5

I.1.1. Définition des eaux usées..... 5

I.1.2. Les eaux usées domestiques 5

I.1.3. Les eaux usées industrielles..... 5

I.2. Les métaux lourds..... 6

I.2.1. Définition 6

I.2.2. Les sources des métaux lourds..... 7

1. Les sources naturelles 7

2. Les sources anthropiques..... 7

I.2.3. Toxicité des métaux lourds 8

I.2.4. Effets des métaux lourds 9

1. Sur l'environnement 9

2. Sur l'homme..... 9

I.2.5. Caractérisation générale des métaux lourds 9

1. Le plomb..... 9

2. Nickel..... 10

3. Cadmium..... 12

I.3.Procédés d'élimination des métaux lourds 13

I.3.1. Electrolyse 13

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| I.3.2. Echange d'ion | 13 |
| I.3.3. Précipitation chimique | 14 |
| I.3.4. Adsorption | 14 |
| I.3.5. Coagulation-floculation | 14 |
| I.3.6. Choix de la coagulation-floculation : | 14 |
| I.4.Coagulation-floculation | 15 |
| I.4.1. Matières en suspension et colloïde | 15 |
| I.4.1.1. Les suspensions colloïdales | 15 |
| I.4.1.2.Décantation des suspensions colloïdales | 16 |
| I.4.2. Théorie de la double couche | 16 |
| I.4.3. Phénomène de coagulation | 17 |
| I.4.5. Étapes du procédé de coagulation-floculation | 17 |
| I.4.5.1. Coagulation | 17 |
| I.4.5.2. Floculation | 17 |
| I.4.5.3. Coagulation-floculation (interaction des deux étapes) | 18 |
| I.4.6. Les coagulants | 19 |
| I.4.6.1. Les argiles | 19 |
| 1. Définition | 19 |
| 2. Choix des argiles | 19 |
| 3. Méthodes de traitement des argiles | 21 |
| 3.1. Concassage | 21 |
| 3.2. Broyage | 21 |
| 3.3. Traitement chimique | 22 |
| 3.4. Traitement thermique | 22 |
| 3.5. Tamisage | 23 |
| I.4.7. Le flocculant | 24 |
| I.4.7.1 La gomme arabique | 24 |
| 1. Définition la gomme arabique | 24 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 2. Composition et Propriétés de la Gomme Arabique | 25 |
| Références bibliographiques | |
| Chapitre II Matériel et méthodes | |
| Introduction | 30 |
| II.1. Préparation des argiles étudiées | 30 |
| 1. Préparation | 30 |
| 2. Activation des argiles | 31 |
| II.2. Préparation de la gomme arabique | 32 |
| 1. Broyage | 32 |
| 2. Dissolution dans l'eau | 33 |
| II.3. Essais de la coagulation-floculation | 34 |
| 1. Principe de la méthode du Jar-Test..... | 34 |
| 2. Protocole suivie pour les essais | 34 |
| 3. Paramètres testés..... | 35 |
| II.4. Matériels et produits utilisés | 35 |
| II.5. Méthodes d'analyse | 36 |
| 1. Mesure de la turbidité..... | 36 |
| 2. Mesure du pH | 37 |
| 3. Spectromètre d'absorption atomique..... | 37 |
| a) Principe | 38 |
| Références bibliographiques | |
| Chapitre III Résultats et discussion | |
| Introduction | 45 |
| III.1. Préparation des solutions étalons | 45 |
| III.2.1. Droite d'étalonnage du Plomb (Pb) | 45 |
| III.3. Analyse et interprétation des résultats expérimentaux..... | 48 |
| 1. Cas de la bentonite non traitée | 48 |
| 2. Cas du kaolin non traité | 50 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 3. Cas de la bentonite traitée chimiquement..... | 53 |
| 5. Cas de la bentonite calcinée | 59 |
| 6. Cas du kaolin calciné | 61 |
| 7. Cas de la bentonite plus la gomme arabique | 63 |
| 8. Cas du kaolin plus la gomme arabique | 65 |

Références bibliographiques

| | |
|--|-----------|
| Conclusion générale et perspectives | 70 |
|--|-----------|

Résumé

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Figure I.1. Tableau périodique (les métaux lourds). | 7 |
| Figure I.2. Le Plomb. | 9 |
| Figure I.3. Le Nickel | 11 |
| Figure I.4. Le Cadmium. | 12 |
| Figure I.5. Phénomène de coagulation-floculation | 18 |
| Figure I.6. Schéma de la particule de kaolinite | 19 |
| Figure I.7. Concasseur de laboratoire. | 21 |
| Figure I.8. Broyeur planétaire. | 22 |
| Figure I.9. Four à moufle | 23 |
| Figure I.10. Tamiseuse Retsch. | 24 |
| Figure I.11. La gomme arabique. | 24 |
| Figure I.12. Structure moléculaire de la gomme arabique. | 25 |

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| Figure II.1. Les argiles concassées..... | 30 |
| Figure II.2. Les argiles brayées..... | 31 |
| Figure II.3. Les argiles activées par l'acide chlorhydrique..... | 31 |
| Figure II.4. Les argiles calcinées au four | 32 |
| Figure II.5 .Broyage manuel de la gomme arabique..... | 33 |
| Figure II.6. Mise en solution de la gomme arabique. | 33 |
| Figure II.7. Floculateur de laboratoire utilisé pour les essais de coagulation-floculation. | 34 |
| Figure II.8. Turbidimètre Lovibon..... | 36 |
| Figure II.9. pH mètre..... | 41 |
| Figure II.10. Spectromètre à Absorption atomique, Shimadzu AA 6200..... | 37 |
| Figure II.11. Transitions des électrons associées à l'absorption optique..... | 38 |
| Figure II.12. Schéma d'un spectromètre d'absorption atomique..... | 39 |
| Figure II.13. Schéma d'une lampe à cathode creuse..... | 40 |
| Figure II.14. Principe du nébuliseur avec le brûleur..... | 41 |
| Figure II.15. Four à graphite. | 41 |
| Figure II.16. Schéma de principe du monochromateur..... | 42 |

Liste des figures

Chapitre III :

| | |
|--|-----------|
| Figure III.1. Droite d'étalonnage du plomb..... | 46 |
| Figure III.2. Droite d'étalonnage du cadmium. | 46 |
| Figure III.3. Droite d'étalonnage du nickel | 47 |
| Figure III.4. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée). | 48 |
| Figure III.5. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée)..... | 49 |
| Figure III.6. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité)..... | 51 |
| Figure III.7. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité). | 52 |
| Figure III.8. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement)..... | 53 |
| Figure III.9. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement)..... | 54 |
| Figure III.10. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement)..... | 56 |
| Figure III.11. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement). | 57 |
| Figure III.12. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée). | 59 |
| Figure III.13. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée)..... | 60 |
| Figure III.14. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné)..... | 61 |
| Figure III.15. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné)..... | 62 |
| Figure III.16. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique). | 63 |
| Figure III.17 . Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique). | 64 |

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| Figure III.18. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique)..... | 65 |
| Figure III.19. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique)..... | 66 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapiter I:

Tableau I.1. Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement[7] ..
..... **8**

Tableau I.2.Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de stokes. **16**

Chapitre III:

Tableau III.1.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée)..... **48**

Tableau III.2.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité
..... **51**

Tableau III.3.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement)..... **53**

Tableau III.4.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement)..... **56**

Tableau III.5.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée). **59**

Tableau III.6.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné). **61**

Tableau III.7.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique)..... **64**

Tableau III.8.Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique)..... **65**

Liste des abréviations

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

Cd : cadmium

g : gramme

GA : gomme arabique

HCl : acide chlorhydrique

ml : millilitre

ETM : les éléments traces métalliques

Ni : nickel.

NTU : nephelometric Turbidity Unit

Pb : plomb.

pH : Potentiel hydrogène.

SAA : Spectrométrie d'absorption atomique.

SEF : Spectromètre d'émission de flamme.

Introduction
générale

Introduction générale

Introduction générale

« L'eau n'est pas un bien marchand comme les autres mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel. » Directive Cadre européenne sur l'Eau, 2000

Le développement industriel, bien qu'indispensable à la croissance économique, s'accompagne de nombreuses conséquences environnementales, dont la pollution des ressources hydriques figure parmi les plus préoccupantes. Les effluents issus des industries métallurgiques, chimiques, minières ou encore électroniques contiennent souvent des métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), ou le nickel (Ni), qui présentent une toxicité élevée même à faibles concentrations. Contrairement à d'autres polluants organiques, ces éléments ne sont pas biodégradables et peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire, représentant un risque majeur pour la santé humaine et les écosystèmes aquatiques [1].

Face à cette problématique, il est impératif de mettre en œuvre des méthodes de traitement efficaces permettant la réduction, voire l'élimination, de ces contaminants avant tout rejet dans le milieu naturel [2]. Parmi les nombreuses technologies disponibles, la coagulation-floculation se distingue par sa simplicité, son faible coût et sa capacité à éliminer à la fois les particules colloïdales, les matières en suspension, et certains ions métalliques présents dans les eaux usées. Ce procédé physico-chimique repose sur l'ajout d'agents coagulants et floculants qui favorisent la déstabilisation, l'agrégation, puis la sédimentation des polluants présents dans l'eau [3].

Dans ce contexte, le présent travail vise à étudier l'efficacité du procédé de coagulation-floculation pour l'élimination de quelques métaux lourds à partir d'un effluent industriel simulé. L'objectif est de déterminer les conditions optimales de traitement (type et dose de coagulant, pH, temps d'agitation et de décantation) en vue d'une application pratique. Cette étude permettra également de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les métaux lourds et les agents coagulants, contribuant ainsi à l'amélioration des stratégies de dépollution des eaux industrielles.

Ainsi, ce mémoire se compose de deux grandes parties :

➤ La première section comprend un chapitre et la revue bibliographique :

Le premier chapitre rappellera quelques généralités sur la pollution des eaux, les métaux lourds, et le procédé de coagulation-floculation.

➤ La deuxième partie est divisée en deux chapitres :

Introduction générale

Un chapitre consacré aux matériels et méthodes ;

Un autre chapitre qui compile les résultats et les discussions.

Ce document se termine par une conclusion générale qui propose des suggestions d'orientations futures pour la poursuite des travaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] K. Chaouche, “Etude saisonnière de la variation du niveau de contamination des sols dans les régions Sahariennes Algériennes (31-33° N ; 4-9° E) par les polluants chimiques et microbiologiques.,” *Univ. kasdi merbah ouargla*, 2020.
- [2] A. BAIZID and A. TALI, “Procédés de traitement des eaux usées à la station d ’ épuration el karma,” *Univ. moamed ben ahmed oran*, pp. 2012–2013, 2013.
- [3] D. Amimeur, “Contribution à l’étude de l’élimination du plomb par coagulation floculation et par adsorption sur charbon actif . Effet de la minéralisation et des paramètres réactionnels,” *Univ. Mohamed Khider – Biskra*, 2018.

Chapitre I

Revue

bibliographique

Les métaux lourds comme le plomb, le cadmium et le nickel sont des produits chimiques toxiques présents naturellement dans l'environnement, mais dont la concentration a augmenté en raison des activités humaines telles que les industries lourdes, l'agriculture intensive, les déchets urbains et les déchets industriels. Ces polluants sont nocifs en raison de leur forte toxicité, de leur persistance et de leur bioaccumulation dans les organismes vivants, entraînant de graves répercussions sur la santé et les écosystèmes. L'élimination des eaux usées et des environnements contaminés est une priorité. Le couplage-floculation est une méthode efficace pour éliminer les métaux lourds en solution en ajoutant un coagulant qui peut rassembler les particules colloïdales et les ions métalliques dissous, créant ainsi des floccs plus gros qui peuvent être facilement séparés de l'eau. Les coagulants traditionnels comme l'aluminium ou le fer présentent des limites, telles que la toxicité résiduelle et la production de déchets chimiques. Les coagulants naturels comme l'argile et la gomme arabique sont de plus en plus utilisés pour le traitement écologique, économique et respectueux de l'environnement des eaux polluées par les métaux lourds.

I.1. Les eaux usées

I.1.1. Définition des eaux usées

L'eau usée brute fait référence à l'eau d'égout qui n'a pas été soumise à un processus de modification physique ou chimique destiné à éliminer les résidus solides et les polluants. Ces eaux peuvent engendrer des problèmes de pollution tels que la diffusion de substances chimiques nocives, de bactéries pathogènes et l'excès d'algues [1].

I.1.2. Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques comprennent les eaux ménagères (eaux de toilette, de lessive, de cuisine) et les eaux vannes, dans le système dit « tout à l'égout ». Elles contiennent des matières minérales et des matières organiques. Les matières minérales (chlorures, phosphates, sulfates, etc.) et les matières organiques constituées de composés ternaires, tels que les sucres et les graisses (formés de carbone, oxygène et hydrogène, mais aussi d'azote et, dans certains cas, d'autres corps tels que soufre, phosphore, fer, etc.).

I.1.3. Les eaux usées industrielles

On qualifie de rejets industriels tous les rejets issus d'une utilisation de l'eau qui ne sont pas domestiques. Cette définition englobe les rejets provenant des usines, ainsi que ceux issus d'activités artisanales ou commerciales. Ces eaux présentent une grande diversité et peuvent être nocives pour la faune aquatique, tout comme pour l'homme [1].

Il est toutefois possible de catégoriser les principales émissions industrielles en fonction des désavantages qu'elles déversent :

- Pollution provenant de substances minérales suspendues (lavage du charbon, extraction de sable et gravier, industries de production d'engrais phosphatés...)
- Pollution provenant de substances minérales en solution (usines de décapage, galvanisation...)
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, abattages, production de pâte à papier...)
- Pollution causée par des rejets d'hydrocarbures et autres produits chimiques (raffineries de pétrole, élevages porcins, produits pharmaceutiques...)
- Pollution résultant des rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs issus des industries nucléaires...) [2].

I.2. Les métaux lourds

I.2.1. Définition

Les éléments traces métalliques (ETM) désignent les 80 éléments qui composent la croûte terrestre, avec une concentration inférieure à 0,1 %. Les éléments détectés en traces peuvent être des métaux (Pb, Ni, Cd, etc.), des métalloïdes (As, B, Se) ou des non-métaux (N, F, Cl, Br). 20 Le terme « métaux lourds » désigne les 65 éléments traces dont la masse volumique est supérieure à 5 g/cm³ et qui peuvent avoir des effets toxiques sur les organismes végétaux et animaux, indiquant ainsi un potentiel de pollution. Dans le domaine des études environnementales, on associe souvent ce terme à l'adjectif « toxique », sans mentionner que certains ETM sont des nutriments essentiels pour la vie à faibles concentration [3] .

Tableau Périodique des Éléments

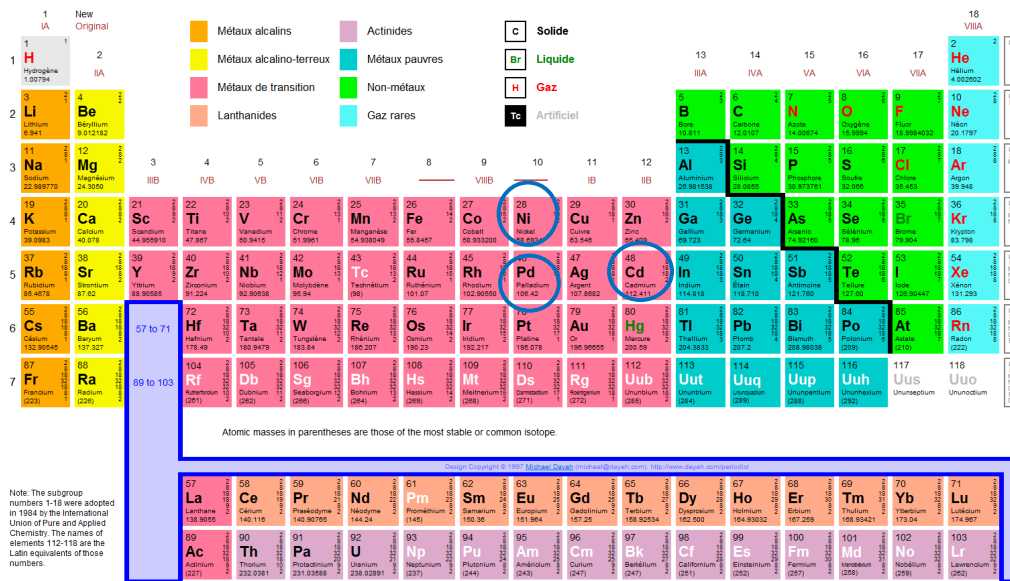


Figure 0 .1. Tableau périodique (les métaux lourds).

I.2.2. Les sources des métaux lourds

1. Les sources naturelles

Parmi les sources naturelles majeures, on peut mentionner l'activité volcanique, l'érosion des continents et les feux de forêt. L'influence des volcans peut se manifester par des émissions massives provoquées par une éruption explosive, ou par des émissions constantes de faible ampleur, qui proviennent en grande partie de l'activité géothermique et du dégazage du magma [4].

2. Les sources anthropiques

Les métaux d'origine anthropique se présentent sous des formes chimiques hautement réactives, ce qui entraîne des dangers nettement plus élevés que ceux posés par les métaux naturels, généralement présents sous des formes relativement inertes [5].

Voici les principales sources anthropiques (humaines) de rejets de métaux lourds :

- Procédés de production industrielle (par exemple, fusion des métaux courants, secteurs de l'acier et du fer).
- L'emploi de combustibles fossiles (par exemple, les centrales à charbon, les chaudières industrielles, les fours à ciment).
- Moyens de transports (par exemple, véhicules et moteurs terrestres et non terrestres, embarcations).

- Destruction de déchets produits (par exemple, interrupteurs électriques, amalgames dentaires, lampes fluorescentes) [6].

Tableau I.1. Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement [7].

| Utilisations | Métaux |
|---|--|
| Batteries et autres appareils électriques | Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd |
| Pigments et peintures | Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe |
| Alliages et soudures | Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd |
| Biocides (pesticides, herbicides) | As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn |
| Agents de catalyse | Ni, Hg, Pb, Cu, Sn |
| Verre | As, Sn, Mn |
| Engrais | Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn |
| Matières plastiques | Cd, Sn, Pb |
| Produits dentaires et cosmétiques | Sn, Hg |
| Textiles | Cr, Fe, Al |
| Raffineries | Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn |
| Carburants | Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd |

I.2.3. Toxicité des métaux lourds

La toxicité d'un métal est directement associée à sa réactivité avec les organismes vivants. Au stade actuel, la majorité des métaux jugés toxiques sont en réalité essentiels à la vie à faible dose. La gestion des émissions de métaux lourds dans l'environnement est complexe et difficile en raison de la variété des sources de rejet, de leur volume et, finalement, de leur toxicité. Toutefois, une concentration élevée de métaux lourds représente un danger pour les systèmes biologiques, étant donné qu'ils sont indestructibles dans le temps, produisent des effets cumulatifs sur les êtres vivants et s'intensifient lors des échanges de matière au sein des chaînes alimentaires.

Une des propriétés toxiques des métaux est leur capacité à créer des ligands. La toxicité et la disponibilité varient en fonction de la concentration des ions libres de l'élément, ainsi que de la quantité totale du métal ou du complexe métallique [8].

I.2.4. Effets des métaux lourds**1. Sur l'environnement**

L'accumulation de métaux lourds sur divers supports (sols, eaux, etc.) entraîne une pollution de la chaîne alimentaire. Ces éléments s'amassent au sein des êtres vivants, bouleversant ainsi leur équilibre biologique [9].

2. Sur l'homme

Les métaux s'accumulent dans le corps et provoquent des effets toxiques, affectant le système nerveux, les fonctions rénales, le foie, les fonctions respiratoires et cardiovasculaires. Le plomb, un toxique neurologique, provoque le saturnisme et des problèmes de développement cérébral. Le cadmium peut provoquer une décalcification osseuse, des douleurs et des fractures. Le nickel prévient l'anémie ferriprive mais peut provoquer un dysfonctionnement de la fonction thyroïdienne [9].

I.2.5. Caractérisation générale des métaux lourds**1. Le plomb**

Le plomb est un métal de teinte grisâtre, avec une nuance bleutée. Dans des conditions standards de température et de pression, il est solide. Sa température de fusion est relativement basse, approximativement 327,46 °C. Il est flexible, peut être déformé, souple et résistant bien à la corrosion ainsi qu'aux rayons ultraviolets (UV). Toutefois, il n'est pas un bon conducteur d'électricité [10].



Figure 0.2. Le Plomb.

a) Utilisation

Comme l'affirme Nadeau (2012), la production de batteries à base de plomb-acide pour les véhicules est devenue l'utilisation principale du plomb au fil des dernières années. On l'utilise aussi pour la fabrication de munitions et d'alliages. Il est également impliqué dans la production des éléments suivants :

- Fabrication de carburant au plomb et installations pour véhicules motorisés ;
- Matériaux de toiture, matériaux anti-bruit, matériel électrique et électronique ;
- Revêtement anticorrosion : le minium est un produit d'apprêt utilisé pour le fer et l'acier
- Matériau de protection contre les radiations ionisantes par sa densité importante. De plus, c'est un excellent matériau pour se protéger des radiations émises par les écrans de télévision.
- En incorporant du plomb dans le verre et le cristal, on peut obtenir une transparence supérieure et une fusion à basse température ;
- On exploite les caractéristiques semi-conductrices du sulfure de plomb pour les panneaux solaires ;
- Le nitrate de plomb est employé dans la pyrotechnie ainsi que dans l'industrie des allumettes [11].

b) Toxicité

Le plomb est répertorié comme l'un des quatre métaux les plus nocifs pour la santé. Il peut entrer dans le corps humain par divers moyens, mais la méthode principale est lors de la consommation d'aliments.

Le plomb peut se retrouver dans une variété d'aliments tels que les fruits, les légumes, la viande, les graines, les produits marins, ainsi que dans les boissons non alcoolisées et le vin. Une exposition brève à de grandes quantités de plomb peut provoquer des vomissements, la diarrhée, des convulsions, le coma ou même entraîner la mort. Toutefois, même de petites quantités de plomb peuvent représenter un danger pour les bébés, les jeunes enfants et les femmes enceintes.

Les symptômes d'une exposition à long terme à de faibles doses de plomb sont sévères, même s'ils sont moins visibles. Les déficiences intellectuelles peuvent résulter de l'anémie et de dommages au système nerveux. Parmi les autres manifestations, on note la perte d'appétit, les douleurs au ventre, la constipation, la fatigue, l'insomnie, l'irritabilité et les céphalées [12].

2. Nickel

Le nickel est un métal de transition particulièrement stable dans l'air et dans de nombreux milieux aquatiques en raison de sa résistance exceptionnelle à la corrosion et à l'oxydation. Il présente une densité élevée (environ 8,9 g/cm³), un point de fusion élevé (1455 °C) et une bonne conductivité électrique et thermique. D'un point de vue chimique, le nickel n'est pas très réactif ; Il ne s'oxyde que lorsqu'il est exposé à l'air humide et peut réagir

avec des acides forts comme l'acide sulfurique ou nitrique pour former des sels de nickel. On le trouve généralement dans ses composés sous la forme de l'ion Ni^{2+} , ce qui lui permet de former une variété de complexes avec des ligands organiques et inorganiques. À température ambiante, le nickel est également magnétique, même s'il est moins magnétique. Cela lui permet de construire de nombreux composés avec des ligands organiques et inorganiques. Bien qu'il soit moins magnétique que le fer, le nickel est également magnétique à température ambiante. Ces caractéristiques expliquent pourquoi il est utilisé dans les batteries, les catalyseurs chimiques et les alliages résistants.



Figure 0.3. Le Nickel.

a) Utilisation

De très nombreux alliages contiennent du nickel, à commencer par certains aciers. Quant aux alliages de nickel proprement dits, on en distingue trois catégories : les alliages fer-nickel (écrans cathodiques, physique des lasers, cryogénie, etc.), les alliages cuivre-nickel (résistance à la corrosion en milieu marin) et les superalliages (turboréacteurs, chaudières, moteurs d'avion). Les résistances chauffantes des grille-pain contiennent aussi du nickel.

En bijouterie, le nickel est ajouté à l'or pour obtenir des teintes particulières (or jaune, or rosé, or blanc). Les pièces de monnaie constituent également un débouché pour le nickel [13].

b) Toxicité

Le nickel présente une toxicité importante, surtout en milieu professionnel. Il est reconnu comme un allergène cutané majeur, capable de provoquer des réactions allergiques telles que des dermatites de contact, notamment chez les personnes sensibles exposées à des objets contenant du nickel (bijoux, pièces de monnaie, etc.). L'inhalation prolongée de poussières ou de fumées de nickel, particulièrement dans les industries métallurgiques, peut

entraîner des effets graves sur la santé respiratoire, allant de simples irritations à des cancers du poumon et des fosses nasales. Certains composés du nickel sont classés cancérogènes avérés (groupe 1) par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). Par voie digestive, l'ingestion de sels solubles de nickel peut causer des troubles gastro-intestinaux, voire des atteintes au foie et aux reins en cas d'exposition élevée. De plus, le nickel a tendance à s'accumuler dans l'organisme au fil du temps, surtout lors d'une exposition chronique.

3. Cadmium

Le cadmium est un métal de couleur argentée, malléable et ductile, qui présente une forte résistance à la corrosion. Il n'est pas indispensable pour le développement des êtres vivants animaux et ne contribue pas au métabolisme cellulaire. Il se situe dans le groupe 12 du tableau périodique des éléments, avec une masse molaire atomique de 112,4 g/mol et un numéro atomique de 48. Le cadmium possède huit isotopes stables naturels, sa fusion se produit à 321°C, il a une densité de 8,7 g/cm³ à 20°C, et il bout à 767°C. Le cadmium est généralement présent dans le sol sous forme de cation à l'état d'oxydation +II et à diverses concentrations [11].



Figure 0.4. Le Cadmium.

a) Utilisation

Le cadmium est employé dans divers domaines en particulier pour les écrans de télévision, les barres de contrôle des réacteurs nucléaires et les teintures (émail, glaçure).

Il est intégré dans plusieurs alliages à faible température de fusion (comme les soudures et brasures) et est utilisé pour produire certaines batteries d'accumulateurs (piles rechargeables).

Cependant, les applications majeures de ces composés incluent l'utilisation pour les revêtements anticorrosion (appliqués en fine couche sur l'acier par cadmiage, le cadmium offre

une protection contre la corrosion, spécifiquement saline) et la production de pigments colorés (jaune et rouge) [14].

b) Toxicité

Le cadmium est un polluant hautement toxique qui s'accumule à la surface du sol et peut être absorbé par les plantes, ce qui constitue un problème majeur pour la santé. L'exposition au cadmium peut entraîner de nombreux effets négatifs, notamment des problèmes respiratoires, des maladies pulmonaires et la destruction du mucus. De faibles concentrations de cadmium peuvent provoquer de graves problèmes respiratoires. Le cadmium interfère également avec la voie de stéroïdogenèse des ovaires, stimulant ou bloquant la biosynthèse de la progestérone. Des études ont montré une forte relation entre l'intoxication au cadmium et les lésions osseuses, les symptômes les plus courants étant la diminution de la minéralisation osseuse, des niveaux élevés d'ostéoporose et des douleurs osseuses [15].

I.3. Procédés d'élimination des métaux lourds

I.3.1. Electrolyse

L'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique (solution contenant des ions) crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement : les cations se dirigent vers la cathode, les anions vers l'anode. Quand la tension appliquée est suffisante, les réactions suivantes se produisent aux interfaces électrolyte électrodes [16].

- À l'anode : oxydation avec émission d'électrons $A^- \rightarrow A + e^-$
- À la cathode : réduction avec capture d'électrons $C^+ + e^- \rightarrow C$

I.3.2. Echange d'ion

L'échange d'ions est un processus où les ions de charges spécifiques présents dans une solution (comme les cations) sont retirés de cette solution via l'adsorption sur une matière solide (l'échangeur d'ions), afin d'être substitués par une quantité identique d'autres ions de charge similaire relâchés par le solide. Les ions de charge contraire ne sont pas influencés. Cette méthode est couramment employée pour le nettoyage des solutions de faible teneur en impuretés (<10mg/L). Les échangeurs d'ions se saturent rapidement, provoquant une régénération régulière et coûteuse [17].

I.3.3. Précipitation chimique

Certains métaux, non complexés, sont précipitables dans une zone donnée du pH, sous forme d'hydroxydes métalliques ou de composés soufrés insolubles. La précipitation des métaux est améliorée par ajout de quelques substances chimiques telles que du sulfure de sodium et l'hydroxyde de fer pour la précipitation du cadmium, les carbonates pour la précipitation du plomb ,etc. les carboxylates de sodium forment des précipités avec le zinc de façon très sélective et efficace [18].

I.3.4. Adsorption

L'adsorption est une interaction physique et chimique entre des solides et des gaz ou des liquides, provoquant l'accumulation de molécules d'adsorbat à la surface du solide. Il s'agit d'une séparation de mélanges qui permet d'éliminer une substance d'une autre phase. L'adsorption se produit lorsque les espèces chimiques passent de l'état de dispersion à l'état d'adsorbat, ce qui donne lieu au couple adsorbat/adsorbant [19].

I.3.5. Coagulation-floculation

L'élimination des matières en suspension et colloïdales est facilitée par les processus de floculation et de coagulation. Ce processus est connu sous le nom de coagulation au niveau colloïdal et à très petites particules. La coagulation est la réduction ou l'annulation provoquée par un réactif « coagulant ». De plus, la floculation sera discutée au niveau des particules plus grosses ; la floculation est l'agglomération et la précipitation de ces particules, qui sont ensuite coagulées par précipitation. Cette agglomération est facilitée par l'ajout à l'eau d'un réactif appelé « flocculant » ou « adjuvant de floculation » [20].

I.3.6. Choix de la coagulation-floculation :

Le recours à la coagulation-floculation constitue un choix pertinent pour le traitement des suspensions colloïdales, notamment celles contenant des argiles. Ce procédé est non seulement efficace pour la clarification et la réduction de la turbidité, mais il est également avantageux sur le plan économique. Afin de réduire les coûts liés à l'utilisation de produits chimiques industriels, l'emploi de coagulants et flocculants naturels s'avère particulièrement intéressant. Parmi ces alternatives naturelles, l'argile (comme la bentonite et kaolinite) peut jouer un rôle de coagulant ou d'adsorbant, tandis que la gomme arabique, un biopolymère d'origine végétale, agit efficacement comme flocculant en facilitant l'agglomération des particules fines. Ces matériaux présentent l'avantage d'être abondants, biodégradables, non toxiques et peu coûteux, ce qui permet de développer des procédés durables, respectueux de l'environnement et adaptés

aux contextes locaux. Ainsi, la coagulation-floculation, combinée à l'utilisation de coagulants et floculants naturels tels que l'argile et la gomme arabique, représente une solution à la fois écologique, économique et performante pour le traitement de diverses suspensions solides.

I.4.Coagulation-floculation

I.4.1. Matières en suspension et colloïde

I.4.1.1. Les suspensions colloïdales

Selon leur affinité pour l'eau, les colloïdes se divisent en deux groupes. On distingue les colloïdes hydrophiles et hydrophobes.

➤ **Les colloïdes hydrophiles**

Les colloïdes hydrophiles ont une forte affinité pour l'eau et l'adsorbent, créant une couche protectrice d'eau fixée au matériau solide par des liaisons physico-chimiques avec les groupes OH⁻, -NH₂⁻ et -COOH⁻, entièrement ou partiellement ionisés. Cette catégorie comprend les protéines, les glucides et les produits organiques fréquemment présents dans les systèmes aqueux.

➤ **Les colloïdes hydrophobes**

Les colloïdes hydrophobes sont souvent de nature minérale. Ils n'ont aucune affinité pour les molécules d'eau. La formation d'une couche d'hydratation est impossible. Leur surface contient des charges négatives qui provoquent une répulsion mutuelle, empêchant toute agglomération. Ce type de particules est en partie responsable de la turbidité. Les colloïdes hydrophiles et hydrophobes sont les seuls types de colloïdes. Il s'agit en fait d'un degré d'hydratation plus ou moins important, permis par la présence de groupements de type hydrophile.

L'interaction de deux particules est nécessaire à l'existence des systèmes colloïdaux. Elle rencontre deux forces opposées :

- Une force électrostatique tend à séparer les particules les unes des autres. La charge des particules de même signe détermine cette force.
- Une force d'attraction de type Van der Waals, liée à la forme et à la structure des colloïdes, ainsi qu'aux caractéristiques de l'environnement [21].

I.4.1.2. Décantation des suspensions colloïdales

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10mm et une surface spécifique de $6.102\text{m}^2.\text{m}^{-3}$ à 20 ans pour du colloïde de $10\text{-}2\mu\text{m}$ ayant une surface spécifique de $6.108\text{ m}^2.\text{m}^{-3}$. Il est donc impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement (Tableau I.2).

Tableau I.2. Temps de décantation des différentes particules d'après la loi de Stokes.

| Diamètre de particule | | Types de particules | Temps de Décantation pour 1 m d'eau | Surface Spécifiques $\text{m}^2.\text{m}^{-3}$ | Matière |
|-----------------------|---------------|----------------------|-------------------------------------|--|---------------------|
| Mm | μm | | | | |
| 10 | 10^4 | Gravier | 1 seconde | 6.10^2 | MES Décantations |
| 1 | 10^3 | Sable | 10secondes | 6.10^3 | |
| 10^{-1} | 10^2 | Sable fin | 2 minutes | 6.10^4 | |
| 10^{-2} | 10 | Limon | 2 heures | 6.10^5 | |
| 10^{-2} | 10 | Kyste de protozoaire | 20 heures | 6.10^5 | Colloïdes |
| 10^{-3} | 1 | Argile | 2 jours | 6.10^6 | |
| 10^{-3} | 1 | Bactérie | 8 jours | 6.10^6 | |
| 10^{-4} | 10^{-1} | Colloïde | 2 ans | 6.10^7 | |
| 10^{-5} | 10^{-2} | Colloïde | 20 ans | 6.10^8 | |

I.4.2. Théorie de la double couche

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont généralement chargés négativement (imperfections -du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques,). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont été avancées.

- ❖ **Théorie de HELMHOLTZ** : Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérente ou fixée).

- ❖ **Théorie de GOUM-CHAPMAN** : La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).
- ❖ **Théorie de STERN** : qui rassemble les deux précédentes et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel [22]

I.4.3. Phénomène de coagulation

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquence, à les stabiliser dans la solution. Le but principal de coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération. On peut obtenir cette déstabilisation par [23] :

- a) compression de la double couche ;
- b) adsorption et neutralisation des charges ;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité ;
- d) adsorption et pontage ;

I.4.4. Phénomène de floculation

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres, c'est la floculation. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de contact des particules, lesquelles sont provoquées par la différence de vitesse entre ces particules [23].

I.4.5. Étapes du procédé de coagulation-floculation

I.4.5.1. Coagulation

La coagulation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui présentent un processus qui, en premier lieu, déstabilise une suspension colloïdale et, en second lieu, agrège les particules en minuscules agrégats, ou flocons, sous l'influence de l'agitation et du mouvement brownien [24] .

I.4.5.2. Floculation

L'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui aboutissent à l'accumulation de particules stabilisées pour former des flocons, ou « flocs », est connu sous le nom de floculation.

Ce phénomène est réversible, ce qui signifie que ces ingrédients peuvent être éliminés, par exemple, en secouant vigoureusement le liquide pour récupérer la solution colloïdale d'origine [24].

I.4.5.3. Coagulation-floculation (interaction des deux étapes)

La coagulation-floculation permet d'éliminer plus facilement les MES (Matières En Suspension) et les colloïdes en les collectant en floccs, qui sont ensuite séparés par flottation, filtration et/ou décantation. Il s'agit donc d'un traitement physique qui permet d'éliminer tout ou partie des polluants des eaux usées, tels que les particules inertes ou vivantes, la matière organique floculable et certaines fractions de métaux lourds, les micropolluants liés aux MES et les macromolécules colloïdales (figure I.5). Le procédé de coagulation-floculation vise donc à augmenter la taille des particules (essentiellement colloïdales) en déstabilisant les particules en suspension puis en formant des floccs par absorption et agglomération. Les floccs obtenus seront filtrés et décantés par la suite [25].

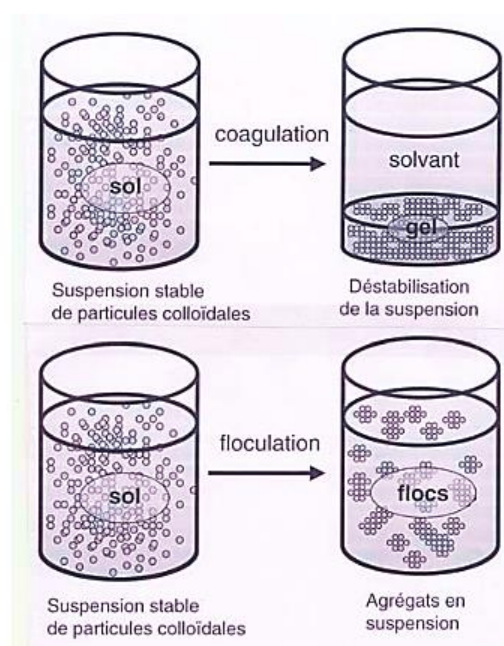


Figure I.5. Phénomène de coagulation-floculation

I.4.6. Les coagulants

Les coagulants que nous avons utilisés dans notre travail sont des argiles (Le kaolin et la bentonite)

I.4.6.1. Les argiles

1. Définition

L'argile est un matériau naturel composé principalement de minérales très fines cristallites (généralement inférieures à $2\mu\text{m}$). Sa création est liée à des changements chimiques, physiques et biologiques qui impactent les vastes roches mères. La décomposition moyenne de la surface de la Terre est assez similaire à la composition chimique des argiles. Il est composé d'environ 50 % de silicate d'aluminium hydraté, avec l'ajout de plusieurs minéraux apparentés tels que des carbonates, du quartz, des hydroxydes de fer et des oxydes. Elles se distinguent par leur structure feuilletée.

À l'état naturel, l'argile est un mélange d'argile et de minéraux impurs formé de diverses structures sous forme de débris rocheux ; Il s'agit d'un membre de la famille des aluminosilicates phylliteux connus sous le nom de « phyllosilicates ». Ce composé chimique est utilisé comme adsorbant depuis longtemps et est facilement disponible et à un prix raisonnable [26].

2. Choix des argiles

1. Le kaolin

a) Structure

Les kaolinites appartiennent à la famille des phyllosilicates 1/1. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche tétraédrique de silicium et d'une couche octaédrique d'aluminium. D'un feuillet de kaolinite à l'autre des ions hydroxyles OH^- des couches octaédriques sont en vis-à-vis d'un plan contenant des ions d'oxygène O^{2-} de la couche tétraédrique ; dans ce cas, les liaisons inter foliaires résultent de l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals [27].

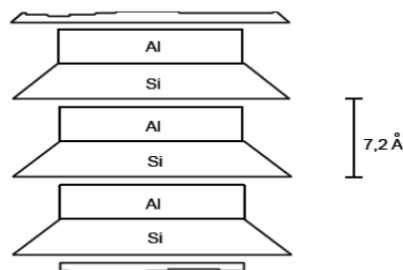


Figure I.6. Schéma de la particule de kaolinite.

b) Propriétés physico-chimiques

Ces caractéristiques ont été étudiées en profondeur par Cases et Murray. Le kaolin est considéré comme :

- ✓ Un minéral non gonflant.
- ✓ Les cristaux élémentaires se présentent sous forme de plaquettes hexagonales.
- ✓ Ph neutre ou basique.
- ✓ Bonnes propriétés couvrantes (utilisé comme pigment) ;
- ✓ Tendre et non abrasif ;
- ✓ Plastique, faiblement réfractaire et faiblement conducteur électrique et thermique [27].

2. La bentonite

a) Structure

La bentonite est une roche tendre, friable, très onctueuse au toucher, de teinte blanchâtre, grisâtre ou légèrement teinté de bleu. C'est une terre douée d'un pouvoir gonflant au contact de l'eau (5 à 30 fois son volume initial). Elle est constituée, principalement, par un minéral argileux appelé montmorillonite. La montmorillonite est composée de feuillets complexes à trois couches, séparés par des molécules d'eau[28].

Les bentonites sont des silicates d'alumine hydratés appartenant au groupe des Montmorillonites de formule brute [29]:

$Si_4 (Al_{(2-x)} R_x) (O_{10}, H_2O) (Ce_x, nH_2O)$ ou $Si_4 (Al_{(2-x)} R_x) (H_2O)_n$ avec :

- R = Mg, Fe, Mn, Zn, Ni
- Ce (cations échangeables) = Ca, Na, Mg.

b) Propriétés physico-chimiques

La bentonite est une argile composée principalement de montmorillonite, un minéral de la famille des smectites. Elle présente des propriétés chimiques remarquables, notamment une forte capacité d'échange cationique (CEC), ce qui lui permet d'adsorber divers ions présents en solution, comme le sodium, le calcium ou les métaux lourds. Sa structure en feuillets lui confère une grande affinité pour l'eau, permettant un gonflement important, en particulier dans le cas de la bentonite sodique. Sur le plan physique, elle est très fine, plastique lorsqu'elle est humide, et forme une barrière imperméable, ce qui en fait un matériau de choix dans les applications géotechniques et environnementales, comme les barrières d'étanchéité dans les

décharges. Elle est également utilisée comme additif dans les boues de forage, dans la clarification des liquides, et dans des produits cosmétiques et pharmaceutiques pour ses propriétés absorbantes et apaisantes. Sa stabilité thermique modérée permet une large gamme d'utilisations, bien qu'elle commence à se dégrader au-delà de 600 °C [30].

3. Méthodes de traitement des argiles

3.1. Concassage

Le concassage est une opération mécanique consistant à réduire la taille des matériaux solides, généralement par fragmentation. Dans le cas des matériaux argileux comme la bentonite et la kaolinite, le concassage est une étape préparatoire importante avant le séchage, le broyage ou le traitement chimique. Il permet de fragmenter les blocs ou les nodules d'argile brute en morceaux plus petits, facilitant ainsi leur manipulation et leur transformation ultérieure. Le concassage est souvent réalisé à l'aide de concasseurs à mâchoires, à cylindres ou à percussion, selon la dureté et la nature du matériau. Cette opération vise à améliorer l'homogénéité du produit final, à optimiser le rendement des broyeurs et à faciliter la réaction chimique dans les procédés de traitement (activation, purification, etc.). Pour la bentonite, un concassage doux est généralement suffisant, car il s'agit d'un matériau tendre [31].



Figure I.7. Concasseur de laboratoire.

3.2. Broyage

Le broyage est une opération de réduction granulométrique plus fine que le concassage. Il consiste à pulvériser les matériaux solides, comme la bentonite, en particules très fines, souvent inférieures au millimètre. Cette étape est essentielle pour augmenter la surface

spécifique de l'argile, ce qui améliore ses propriétés physico-chimiques comme la capacité d'adsorption ou la dispersion dans l'eau.

Le broyage des argiles est généralement effectué après le séchage et parfois après le concassage, en utilisant des équipements comme des broyeurs à boulets. Le choix du broyeur dépend de la finesse recherchée et de la nature du produit final. Le broyage fin permet ainsi d'optimiser les performances des argiles dans ses différentes utilisations [32].



Figure I.8. Broyeur planétaire.

3.3. Traitement chimique

L'acide d'activation peut améliorer la capacité de sorption naturellement faible des argiles. Cette dernière consiste à transformer les silicates en silice colloïdale, qui possède un fort pouvoir adsorbant. Ce changement s'effectue chimiquement par l'action d'acides forts (acides chlorhydriques).

Le traitement chimique avec des acides inorganiques a été largement utilisé pour améliorer les propriétés de surface et catalytiques des argiles par rapport à leurs argiles mères. Lorsque les argiles sont traitées avec de l'acide, les particules d'argile se désagrègent, les impuretés sont éliminées et les couches externes se dissolvent [33].

3.4. Traitement thermique

L'activation thermique est une méthode simple qui augmente la capacité de sorption de l'argile en libérant les sites actifs de l'eau. Le chauffage d'une argile à 105°C entraîne l'élimination de l'humidité, tandis qu'une température plus élevée à 500°C conduit à la formation de carbonate de calcium et à une modification de la capacité de sorption de l'argile.

Le processus de calcination implique deux types de réactions : la déshydratation et la déshydroxylation, qui provoquent des changements structurels et texturaux dans les argiles. Une calcination extrême entraîne une déformation de la structure cristalline et une capacité d'adsorption réduite [33].



Figure I.9. Four à moufle.

3.5.Tamisage

Le tamisage des argiles est une étape de classification granulométrique qui intervient généralement après le séchage et le broyage. Il permet de séparer les particules selon leur taille à l'aide de tamis de mailles calibrées. Cette opération est cruciale pour éliminer les agglomérats ou les particules trop grossières, et pour garantir une granulométrie homogène, essentielle dans des applications comme les adsorbants à base de bentonite et kaolinite.

Le tamisage permet aussi d'adapter la taille des particules aux besoins spécifiques des procédés industriels : une distribution granulométrique contrôlée améliore la réactivité chimique, la capacité d'adsorption, la plasticité ou encore la dispersion dans un liquide [34].



Figure I.10. Tamiseuse Retsch.

I.4.7. Le flocculant

Le principal flocculant employé dans notre travail est la gomme arabique :

I.4.7.1 La gomme arabique

1. Définition la gomme arabique

La gomme arabique produite en Afrique en particulier par l'Acacia Sénégal est une espèce spontanée exploitée grâce à ses exsudations qui sont particulièrement important du point de vue commercial et industriel (alimentation, boisson, cosmétique, pharmaceutique, etc.). Le Soudan étant le premier pays exportateur de gomme arabique, suivi par le Tchad, le Nigeria, le Sénégal, le Mali, le Niger et la Mauritanie [35].



Figure I.11. La gomme arabique.

2. Composition et Propriétés de la Gomme Arabique

a) Composition chimique

La gomme arabique est une chaîne ramifiée, un polysaccharide complexe, soit neutre, soit légèrement acide, qui se trouve sous forme de sel mixte (calcium, magnésium et potassium) de l'acide polysaccharidique.

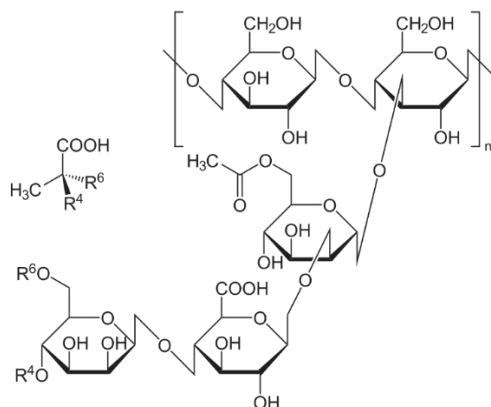


Figure I.12. Structure moléculaire de la gomme arabique.

b) Propriétés physico-chimiques :

Les caractéristiques physico-chimiques de la gomme arabe peuvent varier en fonction de l'âge et de l'origine des arbres, de la période d'exode, du climat et de la saison de l'année, entre autres facteurs.

Comparée aux autres gommages, la gomme arabique présente une viscosité relativement faible et une solubilité élevée dans l'eau. En ajoutant des acides ou des bases aux solutions de gomme arabique, cette viscosité peut être augmentée et modifiée. La gomme arabique peut se dissoudre dans l'eau à une concentration de 50 % p/v pour créer une solution fluide aux propriétés acides (pH ~ 4,5) [36].

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] F.Tebib, "Evaluation des performances épuratoires de la STEP de Groupement Reggane Nord GRN," *Univ. Ahmed Draïa Adrar*, 2020.
- [2] K.Bengouga, "Généralités sur les eaux usées," pp. 1–23, 2010.
- [3] H. Otmani, "Evaluation de la toxicité de quelques métaux lourds sur le comportement d'un modèle animal du groupe des Coelomates," *Univ. badji mokhtar annaba*, 2018.
- [4] K.Chaouche, "Etude saisonnière de la variation du niveau de contamination des sols dans les régions Sahariennes Algériennes (31-33° N ; 4-9° E) par les polluants chimiques et microbiologiques.," *Univ. kasdi merbah ouargla*, 2020.
- [5] K. A. B.Hafdallah , A.Nacib, "Etude de la toxicité des métaux lourds sur les êtres vivants," *Univ. Larbi Tebessi –Tebessa*, 2022.
- [6] Gérard Miquel, "les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé," 2001.
- [7] H.Kadi, "Adsorption des colorants cationique et métaux lourds sur bioadsorbant a base de rosmarinus officialinalis," *Univ. blida 1*, 2020.
- [8] K. Bellir, "caractirisation et etide de la retention des polluants organiques et inorganiques par des argiles locales :application dans l'impermeabilisation des C.E.T.," *Univ. constontine 3*, 2013.
- [9] "LES métaux lourds." [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.airbreizh.asso.fr/air-interieur/polluants-de-lair-interieur/les-metaux-lourds/&ved=2ahUKEwj0t9HX9oeNAXUcfKQEHYQfE2cQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw00ND05oddi7_j_jgBeQTiu
- [10] D. Amimeur, "Contribution à l'étude de l'élimination du plomb par coagulation floculation et par adsorption sur charbon actif . Effet de la minéralisation et des paramètres réactionnels," *Univ. Mohamed Khider – Biskra*, 2018.
- [11] B. A. Mehimmedetsi Djihane, "Etude des effets écotoxiques du cadmium et du plomb sur *Helix aspersa* en conditions contrôlées," *Univ. Frères Mentouri Constantine 1*, 2023.
- [12] B. LAAREM, "Elimination du plomb dans les effluents de l'unité affinage de plomb de

Références bibliographiques

- Sétif,” *Univ. bba*, 2024.
- [13] “définition nickel,” Futura Sciences. [Online]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-nickel-14795/&ved=2ahUKEwjAnI3kv4eNAXVIRKQEHUDH4QFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw2Yc5TNtGNLpa91fyrwLfBR>
- [14] N. Briki Nigassa, “Evaluation physicochimique de l’exposition au cadmium chez les insuffisants rénaux chroniques par spectrophotométrie d’absorption atomique,” *Univ. abou-bekr belkaid telemcen*, 2023.
- [15] A. N. Nawel, “Effet de la pollution par les métaux lourds sur *Triticum durum* Desf .,” *Univ. Badji Mokhtar-Annaba*, 2017.
- [16] “Degrémont et la Lyonnaise des Eaux «mémento technique de l’eau» 8ème et 9ème éditions, Lavoisier- technique et documentation, Paris, 1978, 1989.”
- [17] B. Nasma, “Etude de l’élimination du Plomb, du Zinc et du cadmium par adsorption sur un charbon actif préparé à base des noyaux de jujube.,” 2015.
- [18] S. Bessioud, “Traitement d’une eau de surface par électrocoagulation,” 2010.
- [19] I.Lansari, “Élimination des colorants textiles par des sorbants naturels Soutenue,” *Univ. abou-bekr belkaid telemcen*, 2021.
- [20] MOUMENI Mabrouka, “Traitement des eaux huileuses par coagulation / floculation,” *Ec. Natl. Polytech.*, 2015.
- [21] A. Benhamou and H. Djedjai, “Production d’eau potable Coagulation –Floculation,” *Univ. moamed boudiaf oran*, pp. 1–53.
- [22] Benalia Abderrezzaq, “étude expérimentale et modélisation du processus de la coagulation floculation ;application aux eaux destinées à la consommation,” *Univ. constantine 3*, no. D.
- [23] K. BELHADJ, “Le traitement physico-chimique par coagulation- floculation de rejet
- [24] Yves Mottot, “Coagulants et flocculants,” p. 20, 2000.
- [25] S.BECHAR, “Etude et optimisation de l’efficacité de gel des grains de *Nasturtium officinale* dans le traitement de l’eau Préparé,” *Univ. bba*, 2021.

Références bibliographiques

des eaux usées de la ville de Biskra,” *Univ. Mohamed khider –Biskra*, 2019.

- [26] N. NOUI and R. BENHAMDEP, “Préparation et caractérisation des argiles. Application à l’adsorption des colorants.,” *Univ. kasdi merbah ouargla*, 2020.
- [27] S. Selma and Y. Benchaa, “ETUDE DE L’EFFET DE LA TEMPERATURE ET DU TEMPS DE CALCINATION D’UN MATERIAU ARGILEUX,” *Univ. Abdelhamid Ibn Badis Most.*, 2021.
- [28] S. Zen, “Etude des propriétés physico- chimiques des argiles de l’ Est - Algérien . Application à l’ adsorption des colorants de tannerie,” *Univ. 8 mai 1945 Guelma*, p. 199, 2016.
- [29] S. safi, “Effet de la température sur la qualité de la bentonite et caractérisation physico-chimique par FTIR au niveau de la société BENTAL - unité de Mostaganem.,” *Univ. abdelhakid ibn dadis Most.*, pp. 1–64, 2014.
- [30] F. Bencheikh, “Département de Biotechnologie et Environnement Thème Adsorption du zinc par la bentonite brute et activée Présenté par Dirigé par,” *Ec. Natl. Polytech.*, 2015.
- [31] A. Eduardo and J. Galán, “Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses,” 2011.
- [32] S. GHRIEB, “Elaboration et Etude des Poudres Nanostructurées de FeS 2 Obtenues par Broyage,” *Univ. badji mokhtar annaba*, 2018.
- [33] Azara Abir, “Activation des argiles: modes et modifications structurales Abir,” *Ec. Natl. Polytech.*, 2018.
- [34] E. Jeandel and B. Chevalier, “Les matières premières argileuses pour l’industrie céramique : caractérisation, préparation, mise en forme,” 2002.
- [35] H. Bentrach, “Corrosion des ouvrages pétroliers : Utilisation de la gomme arabique comme inhibiteur environnemental pour l’acier API 5L X42,” *Univ. Mohamed Khider-Biskra*, 2015.
- [36] C. ZEROUALI and S. ZEDDAM, “Initiation a la caracterisation physicochimique et a la recherche de proprietes antioxydantes des gommages de plantes,” *Univ. belhadj bouchaub d’ain temouchent*, 2020.

Chapitre II

Matériel et méthodes

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire les procédures expérimentales, les produits chimiques, les méthodes analytiques ainsi que les différents appareillages utilisés au cours de ce travail.

II.1. Préparation des argiles étudiées**1. Préparation**

Avant son utilisation, cette argile est passée par une première étape de préparation mécanique :

- **Concassage**

Sur la figure, on observe des petits morceaux de pierre qui sont le résultat du concassage de la pierre argileuse à l'aide d'un marteau. Ces petits morceaux se présentent sous forme d'agrégats.



Le kaolin



La bentonite

Figure II.1. Les argiles brutes

- **Broyage et tamisage**

Le broyage de l'argile se fait d'abord à l'aide d'un mortier afin de diminuer la taille des morceaux d'halloysite concassée. Ensuite, on fait passer cette dernière dans un tamis d'un diamètre de 60 μm dans le but d'obtenir une poudre fine.

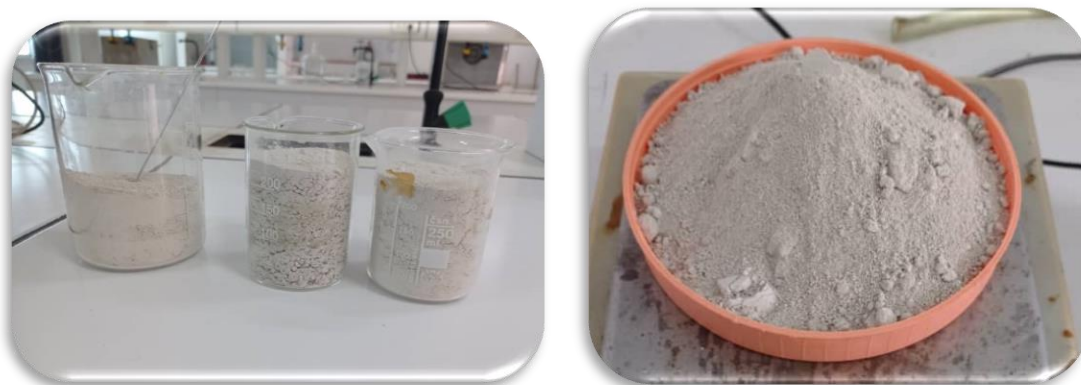


Figure II.2. Les argiles brayées

2. Activation des argiles

- **Traitement chimique**

La préparation de l'argile activée par HCl consiste à mélanger une quantité précise d'argile séchée avec une solution d'acide chlorhydrique (souvent 1 M), sous agitation continue. Le mélange est maintenu à température ambiante ou légèrement chauffé pendant 24 heures. Après traitement, l'argile est soigneusement lavée à l'eau distillée jusqu'à neutralité du pH, puis séchée à l'étuve. Cette activation améliore la porosité et les capacités absorbantes de l'argile.



Figure II.3. Les argiles activées par l'acide chlorhydrique.

- **Traitement thermique**

L'activation thermique de l'argile consiste à calciner l'argile préalablement séchée dans un four à haute température (500 °C), pendant 3 heures. Ce traitement thermique permet d'éliminer l'eau structurale, de modifier la structure cristalline et d'augmenter la surface spécifique.

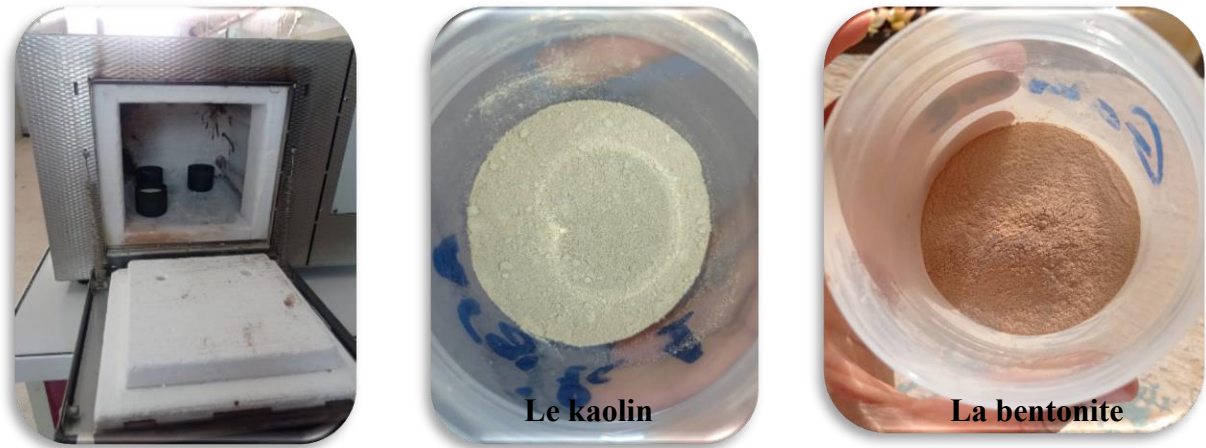


Figure II.4. Les argiles calcinées au four.

II.2. Préparation de la gomme arabique

1. Broyage

Le broyage de la gomme arabique consiste à réduire les blocs ou grains secs en une fine poudre afin de faciliter sa dissolution dans l'eau. Cette opération peut être réalisée à l'aide d'un mortier et d'un pilon. Le broyage améliore la surface de contact avec l'eau, ce qui permet une dissolution plus rapide et homogène.



Figure II.5. Broyage manuel de la gomme arabique.

2. Dissolution dans l'eau

La gomme arabique se dissout facilement dans l'eau tiède (40 °C) en formant une solution colloïdale claire et visqueuse. Pour une dissolution homogène, elle est généralement ajoutée progressivement sous agitation, ce qui permet d'éviter la formation de grumeaux.

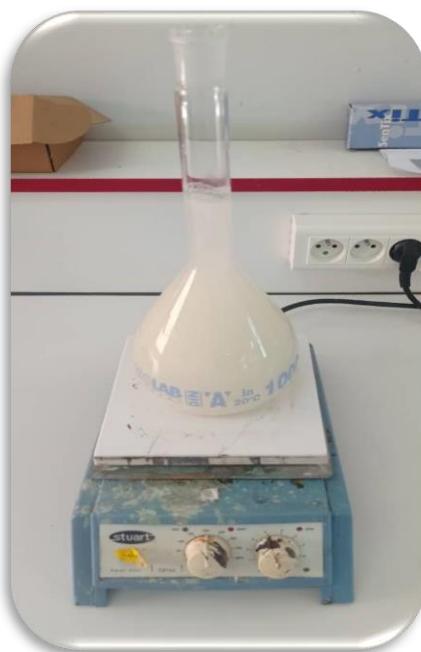


Figure II.6. Mise en solution de la gomme arabique.

II.3. Essais de la coagulation-floculation

1. Principe de la méthode du Jar-Test

La coagulation est l'une des méthodes que nous avons choisies pour éliminer les ions du plomb, les ions du nickel et les ions du cadmium dans l'eau. Ce type de traitement reste le plus utilisé et certainement le moins coûteux par rapport aux autres techniques de traitement. Les essais de Jar test ont été réalisés au niveau du laboratoire du département de génie de l'environnement à l'université de Bordj Bouarreridj. A noter que le matériel en question est constitué par un flocculateur à 6 agitateurs munis d'une vitesse de rotation individuelle variant entre 0 et 200 tr/min. Cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de béciers.

La méthode de Jar-Test consiste à introduire un coagulant, dans une série de 6 béciers d'un litre sous agitation pendant une courte durée, mais avec une vitesse très rapide permettant ainsi d'assurer une très bonne dispersion des réactifs et une bonne déstabilisation chimique des colloïdes. L'agitation rapide est suivie par une agitation lente, dans le but est de favoriser la mise en contact des particules contigües et éviter de briser les floes formés. Après décantation, le surnageant est récupéré pour être analysé [1].

2. Protocole suivie pour les essais

L'ensemble de nos essais vont être réalisés dans un flocculateur de type Fisher.



Figure II.7. Flocculateur de laboratoire utilisé pour les essais de coagulation-floculation.

Nous avons réalisé les essais en suivant les étapes suivantes :

- Une agitation rapide pendant 2 min avec une vitesse égale à 200 tr /min.
- Une agitation lente pendant 20 min avec une vitesse égale à 40 tr / min
- Une décantation durant 30 minutes.

Après 30 minutes de décantation, le surnageant est récupéré pour subir les analyses suivantes:

- pH
- La turbidité
- La concertation des métaux (Pb, Ni, Cd)

3. Paramètres testés

Différents paramètres opérationnels ont été également testés :

- Détermination de la dose optimale du coagulant. Dans cet essai les doses des argiles utilisées sont respectivement (0.25 - 0,5 - 0.75 - 1 - 1.25 et 1.5 g/L).
- La concentration massique initiale de chaque polluant introduite dans chaque bécher est comme suit :
(pour le Pb=40 mg /L, pour le Cd=4 mg /L, pour le Ni =25mg/L)
- Effet de la variation de temps et vitesse d'agitation
- Effet de la variation de la gomme arabique (20 ml).

II.4. Matériels et produits utilisés

a) Petit matériel

- ✓ Verrerie de laboratoire : entonnoir, bécchers, fiole jaugée, éprouvette, spatule.
- ✓ Barreau magnétique
- ✓ Papier filtre
- ✓ Mortier

b) Appareillage :

- ✓ Turbidimètre
- ✓ pH mètre
- ✓ Concasseur de laboratoire

- ✓ Broyeur planétaire
- ✓ Tamiseur Retsh
- ✓ Four a moufle
- ✓ Spectromètre d'absorption atomique
- ✓ Flocculateur

c) Produits :

- ✓ Acide chlorhydrique (HCl)
- ✓ Bentonite
- ✓ Kaolin
- ✓ La gomme arabique
- ✓ Nitrate de plomb
- ✓ Chlorure de nickel
- ✓ Chlorure de cadmium
- ✓ L'eau distillée

II.5. Méthodes d'analyse

1. Mesure de la turbidité



Figure II.8. Turbidimètre Lovibon

2. Mesure du pH



Figure II.9. pH mètre

3. Spectromètre d'absorption atomique

La méthode d'analyse par absorption atomique a pris une importance considérable au cours ces toutes dernières années. Sa spécificité, sa sensibilité, sa relative simplicité et sa rapidité d'exécution grâce aux appareils commerciaux actuellement existants en font l'une des méthodes les plus utiles en analyse chimique.

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) et l'émission de flamme (EF), encore appelée photométrie de flamme, permettent de doser dans pratiquement toute sorte d'échantillon, un ou plusieurs éléments prédéfinis (métaux ou non-métaux) choisis dans une liste en contenant environ 70 éléments. Le spectromètre utilisé est de marque Shimadzu, type AA 6200.



Figure II.10. Spectromètre à Absorption atomique, Shimadzu AA 6200.

a) Principe

Un rayonnement monochromatique, émis par une lampe et correspond à la raie de résonance de l'élément à doser est envoyé sur une population d'atomes du même élément à l'état vapeur. La mesure de l'affaiblissement de l'intensité lumineuse est, dans des conditions déterminées, fonction de la concentration de l'élément à doser [19].

La spectrométrie d'absorption atomique est une méthode d'analyse élémentaire qui utilise la propriété des atomes d'être excités par l'apport d'une énergie extérieure sous forme d'un rayonnement électromagnétique (photons) de fréquence bien définie. L'absorption d'un photon de fréquence ν par un atome donné n'est possible que si la différence d'énergie entre le niveau initial E_b et le niveau E_h , après absorption correspond à une transition entre deux niveaux énergétiques de cet atome (Figure III.11) soit :

$$\nu = \frac{E_h - E_b}{h}$$

Avec h : constante de Planck.

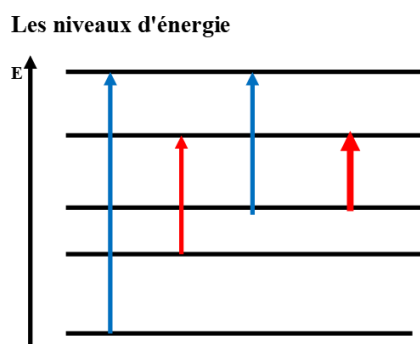


Figure II.11. Transitions des électrons associées à l'absorption optique.

Ici, on considère les transitions dont le niveau inférieur et le niveau fondamental, car il est généralement peuplé.

Le rayonnement incident à la longueur d'onde de résonance d'intensité I_0 est focalisé sur la flamme contenant les atomes à l'état fondamental, puis transmis avec une intensité I réduite d'une quantité déterminée par la concentration des atomes dans la flamme. Le rayonnement est dirigé vers le détecteur où l'intensité est mesurée. La quantité de lumière absorbée est déterminée en comparant I à I_0 .

L'absorption de la lumière caractérisée par le terme « **absorbance A** », liée à la concentration par une relation linéaire selon la loi de **Beer-Lambert** :

$$A = \log(I_0 / I) = k \cdot l \cdot c$$

Avec:

- k : le coefficient d'absorption, constante qui est caractéristique des absorbantes.
 - l : la longueur du trajet lumineux intercepté par le milieu absorbant (la flamme).
 - c : la concentration des atomes absorbants dans la flamme.
- L'absorbance est donc, d'après cette équation, proportionnelle à la concentration des espèces absorbante pour des conditions données. Cependant, lorsque la concentration et l'absorbance augmentent, les imperfections du procédé d'absorption provoquent une déviation de la droite d'étalonnage qui s'incurve vers l'axe des concentrations.

b) Appareillage

Un spectromètre d'absorption atomique comprend de façon classique (Figure II.12) :

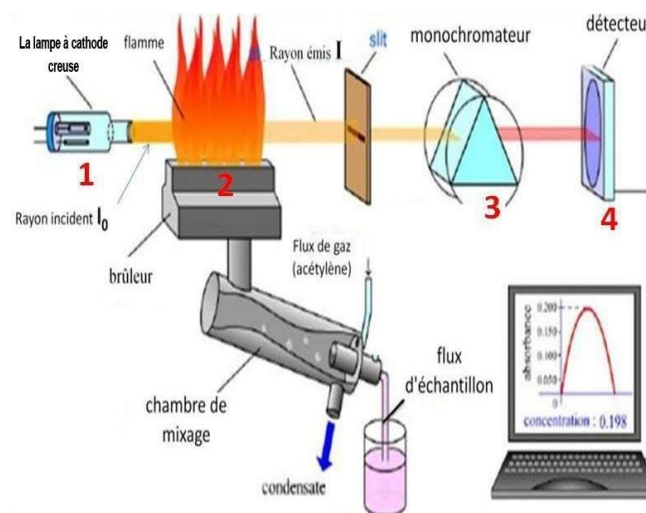


Figure II.12. Schéma d'un spectromètre d'absorption atomique.

A. Une source génératrice de photons

Le plus souvent une lampe à cathode creuse.

• Lampe à cathode creuse

C'est la source la plus utilisée en spectroscopie d'absorption atomique, dont le schéma est représenté à la Figure II.13. La cathode est constituée du métal de même nature que l'analyse ou sert de support à une couche de ce métal.

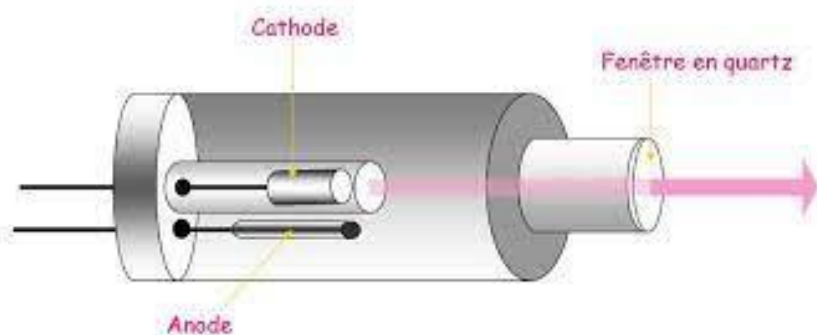


Figure II.13. Schéma d'une lampe à cathode creuse.

L'application d'une tension d'environ 300 V entre les électrodes provoque l'ionisation du gaz inerte et l'apparition d'un courant de 5 à 15 mA lié au flux des cations vers la cathode et à celui des électrons vers l'anode. Si la tension est assez élevée, les cations gazeux bombardent la cathode avec une énergie cinétique suffisante pour arracher des atomes métalliques et produire ainsi une vapeur atomique ; ce procédé s'appelle la pulvérisation cathodique.

B. Un système d'atomisation

Flamme, four graphite

- **La flamme**

Elle est utilisée en spectrométrie d'absorption atomique en flamme (FAAS) pour l'analyse des échantillons en solution. L'énergie thermique doit être suffisante pour atomiser les éléments sans toutefois les exciter ou les ioniser.

La flamme est alimentée par :

- une source de **carburant** (gaz sous pression en bouteille) dont le débit est régulé par un détendeur.
- Une source de **comburant** (oxygène en bouteille ou air comprimé à l'aide d'un compresseur dont le débit doit être stabilisé).
- Un **bruleur** (ou les gaz se mélangent et sont enflammés).

La flamme est généralement isolée de l'extérieur par une cheminée qui lui évite les fluctuations dues aux phénomènes de convection.

- **Pulvérisation**

L'élément est présent sous forme de composés chimiques dans une solution (aqueuse ou organique) à une certaine concentration c . Son introduction dans la flamme se fait par pulvérisation dans le gaz comburant, en utilisant le phénomène de Venturi

(Figure III.14) : le gaz traverse un orifice étroit, à la sonie duquel il acquiert une très grande vitesse ; il en résulte en cet endroit une diminution importante de pression

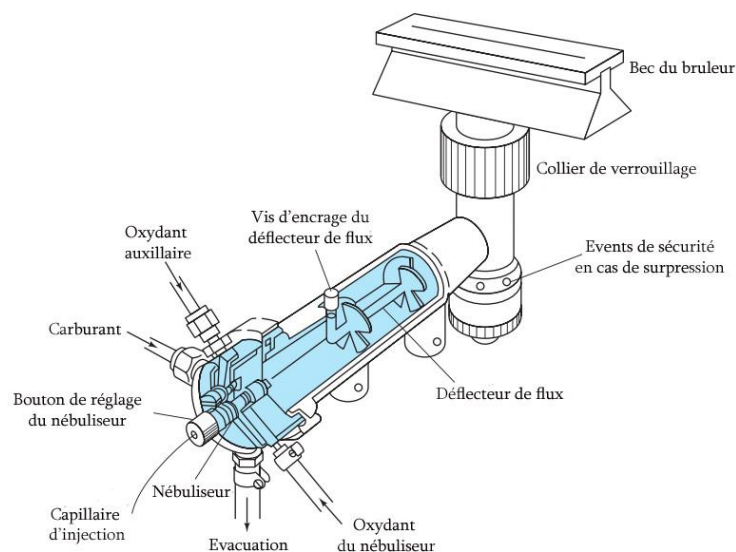


Figure II.14. Principe du nébuliseur avec le brûleur.

- **Le four en graphite**

Il est utilisé en absorption atomique électrothermique (ETAAS). Il a permis de reculer la limite de détection jusqu'à la partie par billion (ppb, part per billion) ($\mu\text{g/L}$).

Il se présente sous la forme d'un tube de graphite d'environ 50 mm de long et d'environ 9 mm de diamètre intérieur, placé de sorte que le faisceau incident se trouve dans l'axe de tube. Le tube en graphite est entouré d'une enveloppe métallique dans laquelle en fait circuler de l'eau, le tube étant séparé de son enveloppe par un espace traversé par un gaz inerte, généralement de l'argon (Figure III.15).

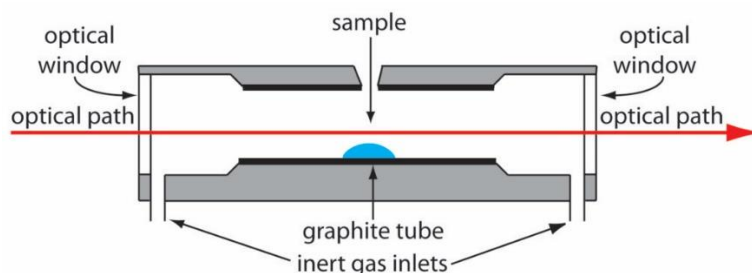


Figure II.15. Four à graphite.

- c) **Un monochromateur (un sélecteur de radiation)**

Il est placé entre l'atomiseur et le détecteur, et il sert à éliminer toutes les raies lumineuses dont les longueurs d'onde ne correspondent pas à celle de l'élément. Il doit éliminer :

- Les raies de l'élément à doser émises par la lampe non exploitée dans le cadre de l'analyse.
- Les raies du gaz de remplissage.
- Les raies d'éventuelles impuretés.
- L'émission propre de la flamme

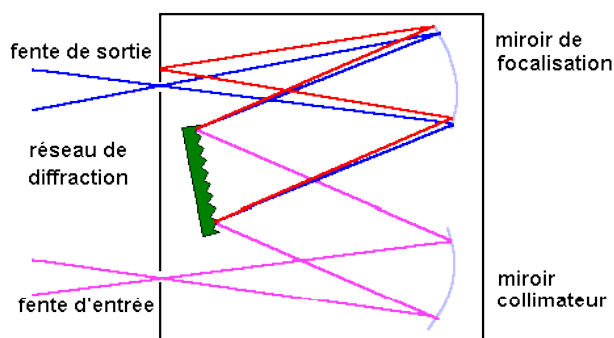


Figure II.16. Schéma de principe du monochromateur.

d) Méthode de la droite d'étalonnage

Pour obtenir une courbe d'étalonnage utilisable pour des dosage par absorption atomique, on effectue des mesures préliminaires en aspirant dans les flamme des échantillons de solutions contenant des concentrations connues de l'élément à doser, on mesure l'absorption de chaque solution, puis on représente graphiquement l'absorption mesurée en fonction de la concentration de la solution, si la solution étudiée ne comporte qu'un seul élément, on prépare les solutions étalons en dissolvant une quantité pesée d'un sel de cet élément à doser dans un volume connu d'eau distillée ou déminéralisée, contenu dans une fiole jaugée. En revanche, si d'autres espèces sont présentes, elles doivent également être introduites dans les solutions étalons à des concentrations voisines de celles de la solution étudiée.

La droite d'étalonnage a été tracée après avoir réglé le spectromètre et préparé des solutions étalons de plomb. Le détail de cette courbe sera traité dans le chapitre résultats et discussion.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. F. Sahnoun, M. Zarrouki, and A. L. I. A. S, “2018/2019,” 1819.
- [2]. F. Rouessac, A. Rouessac, D. Cruché, C. Duverger-Arfulso, and A. Martel, “Analyse chimique : Méthodes et techniques instrumentales,” 2009, [Online]. Available: <http://www.amazon.fr/dp/2100518615>
- [3]. C. Ducauze, “Chimie analytique, analyse chimique et chimométrie – concepts, démarche et méthodes”.
- [4]. D. U. Qu et al., “Université du québec à montréal mise au point d ’ une méthode d’analyse en fluorescence pour la détermination du béryllium dans L’air en milieu de travail,” 2010.

Chapitre III

Résultats et discussion

Résultats et discussion

Introduction

Dans cette partie nous allons exposer les résultats de traitement de l'eau contenant les différents polluants à savoir (le plomb, le nickel et le cadmium) par coagulation-floculation.

L'étude est réalisée en plusieurs étapes :

- Traitements physico-chimiques des différentes argiles (concassage, séchage, broyage, tamisage, traitement chimique et traitement thermique)

- Les essais de floculation-coagulation

- Analyses physico-chimique (mesure du pH, de la turbidité et de la concentration des différents métaux).

III.1. Préparation des solutions étalons

Les solutions étalons ont été préparées directement à partir de solutions mères de 1mg/mL et les dilutions ont été faites avec de l'eau bidistillée en fonction des concentrations caractéristiques de chaque métal analysé.

III.2.1. Droite d'étalonnage du Plomb (Pb)

La droite d'étalonnage a été tracée après avoir réglé le spectromètre et préparer des solutions étalons. Les résultats sont présentés dans le tableau 1

La figure (III.1) représente le tracé de ces résultats qui nous ont permis d'obtenir une droite avec un coefficient de régression qui s'approche de l'unité (réalisé à l'aide du logiciel Originlab 2018).

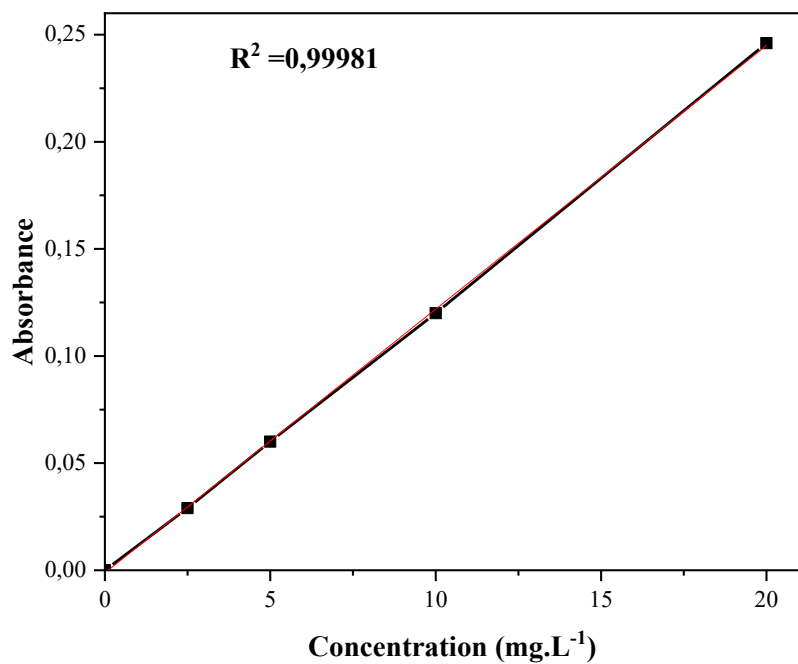


Figure III.1. Droite d'étalonnage du plomb.

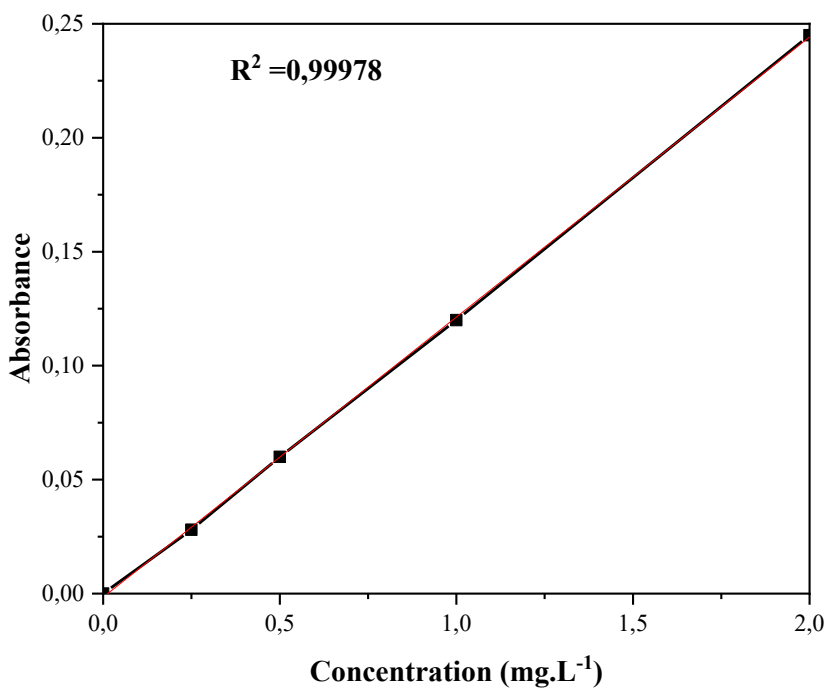


Figure III.2. Droite d'étalonnage du cadmium.

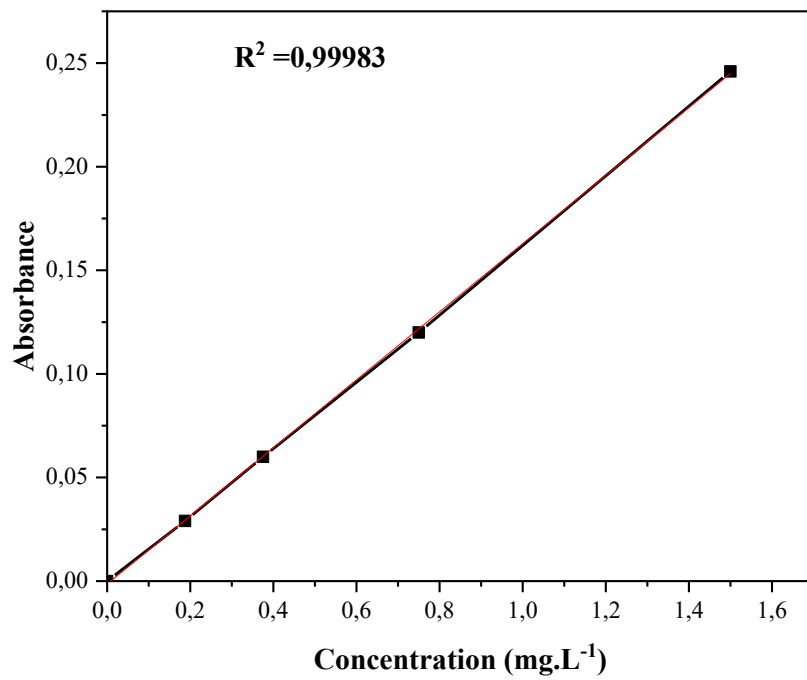


Figure III.3. Droite d'étalonnage du nickel

III.3. Analyse et interprétation des résultats expérimentaux

1. Cas de la bentonite non traitée

Les résultats des essais de coagulation et des analyses physico-chimique nous montrent que la turbidité augmente avec la dose de coagulant (de 12,2 NTU à 0,25 mg/L jusqu'à 26,7 NTU à 1,5 mg/L). Cette augmentation suggère qu'un excès de coagulant peut entraîner une re-suspension des particules ou la formation de floes moins décantables. On constate qu'à faible dose, le coagulant neutralise les charges des particules colloïdales, favorisant leur agrégation et leur élimination. À dose élevée (> 1 mg/L), un sur-dosage peut provoquer une charge positive excessive, conduisant à une répulsion électrostatique entre les particules et une augmentation de la turbidité résiduelle [1].

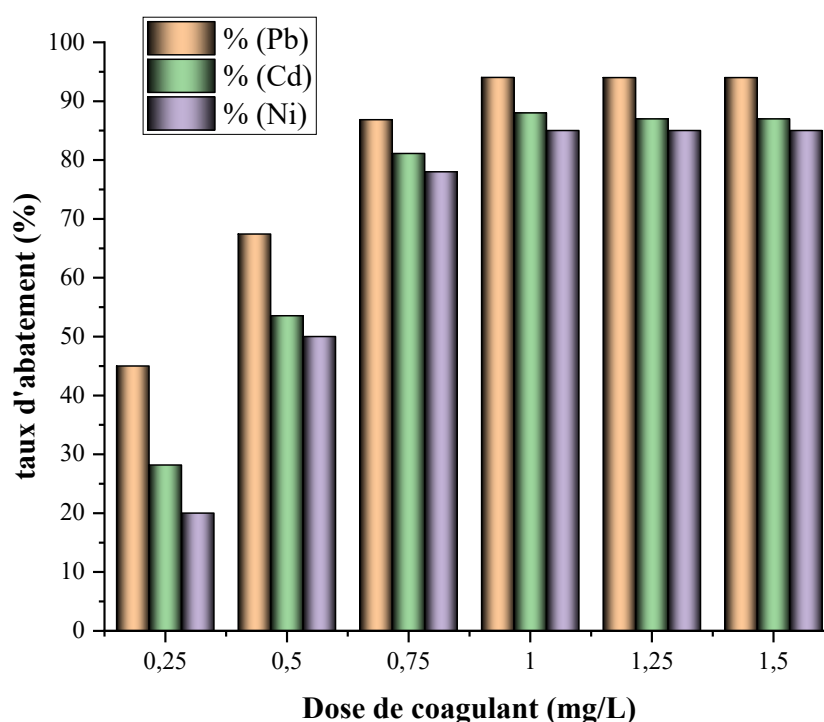


Figure III.4. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée).

Tableau III.1. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 7,96 | 7,93 | 8,09 | 8,23 | 8,22 | 8,10 |

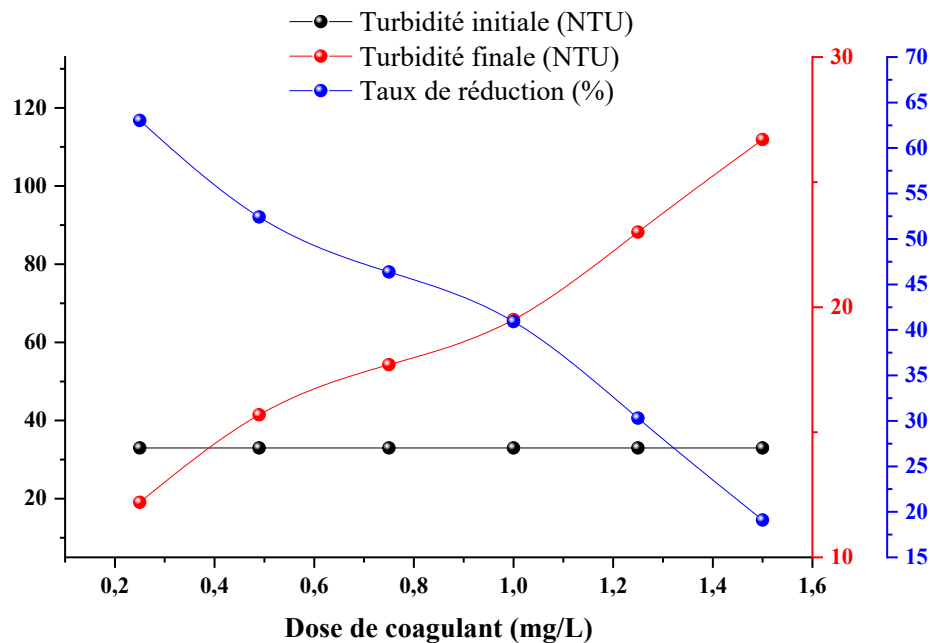


Figure III.5. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (cas de la bentonite non traitée).

Le pH reste relativement stable (entre 7,93 et 8,23), légèrement alcalin, ce qui est favorable à l'adsorption des métaux lourds sur la bentonite. La bentonite a un pouvoir tampon, limitant les variations de pH. En milieu alcalin ($\text{pH} > 7$), les métaux forment des hydroxydes ou des complexes adsorbables plus facilement [2].

Pour le plomb, L'élimination passe de 45% à 0,25 mg/L à 94% à 1 mg/L, puis se stabilise. Celle du cadmium passe de 28,1% à 0,25 mg/L à 88% à 1 mg/L. et celle du nickel passe de 20% à 0,25 mg/L à 85% à 1 mg/L. L'optimum est à 1 mg/L de coagulant. Au-delà, aucun gain significatif n'est observé, indiquant une saturation des sites d'adsorption de la bentonite. On remarque un l'ordre d'affinité suivant :

(Pb^{2+} a une charge élevée et un rayon ionique favorable à l'échange cationique) [3]. Ainsi la dose de 1mg/L offre une élimination des métaux (94% Pb, 88% Cd, 85% Ni), Une turbidité modérée (19,5 NTU).

Un pH stable ($\sim 8,2$), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

La turbidité augmente au-delà de 1 mg/L, suggérant un compromis entre élimination des métaux et clarification. La bentonite non traitée montre une bonne affinité pour le Pb, mais une efficacité moindre pour le Cd et le Ni (peut nécessiter une modification chimique pour améliorer leurs éliminations).

La bentonite non traitée est efficace pour éliminer les métaux lourds, particulièrement le Pb, avec une dose optimale de coagulant à 1 mg/L. Les résultats s'alignent avec les mécanismes connus d'adsorption/échange cationique des argiles. Pour des applications industrielles, une optimisation du procédé (prétraitement de la bentonite, contrôle précis du pH) pourrait encore améliorer les performances.

2. Cas du kaolin non traité

A partir des résultats des figures (III.7) et ainsi que des résultats du tableau (III.2), on remarque que la turbidité diminue significativement avec l'augmentation de la dose de coagulant, passant de 25,1 NTU (0,25 mg/L) à 7,11 NTU (1,5 mg/L). La réduction la plus marquée se produit entre 0,25 mg/L et 0,5 mg/L, puis se stabilise progressivement.

Le kaolin, riche en silicates et aluminosilicates, agit comme un noyau de floculation en présence de coagulant, favorisant l'agrégation des particules colloïdales [4]. La diminution continue de la turbidité suggère que le coagulant améliore la décantation sans provoquer de restabilisation, contrairement à la bentonite (où la turbidité augmentait à haute dose).

L'élimination du plomb est maximale Plomb (95 %) dès 1 mg/L, et stable jusqu'à 1,5 mg/L. Le taux d'élimination du cadmium quant à lui passe de 25% (0,25 mg/L) à 90% (1 mg/L). Le taux d'élimination du nickel passe de 23% (0,25 mg/L) à 84% (1 mg/L). On constate un ordre d'affinité $Pb > Cd > Ni$, similaire à la bentonite, mais avec des taux légèrement inférieurs pour le Cd et le Ni. Cela reflète la moindre capacité d'échange cationique du kaolin comparé à la bentonite [5].

Comme pour la bentonite une saturation des sites c'est-à-dire l'efficacité est à 1 mg/L, indiquant une limite physique d'adsorption.

Ainsi on constate que le kaolin réduit mieux la turbidité à haute dose (7,11 NTU à 1,5 mg/L vs 26,7 NTU pour la bentonite), probablement grâce à sa structure lamellaire moins sensible à la restabilisation.

La bentonite est légèrement plus efficace (94% Pb vs 95% pour le kaolin, mais 88% Cd vs 90% pour le kaolin).

Le kaolin montre une meilleure élimination du Ni (84% vs 85% pour la bentonite), malgré sa moindre CEC, suggérant un rôle complémentaire des mécanismes de précipitation.

Ceci peut être expliqué par les points suivants :

Dose optimale : 1 mg/L, avec :

Adsorption par échange cationique (sur les sites $-\text{Si}-\text{O}^-$ et $\text{Al}-\text{O}^-$).

Précipitation (formation d'hydroxydes en milieu neutre/alcalin) et coprécipitation avec les floes de kaolin-coagulant [6].

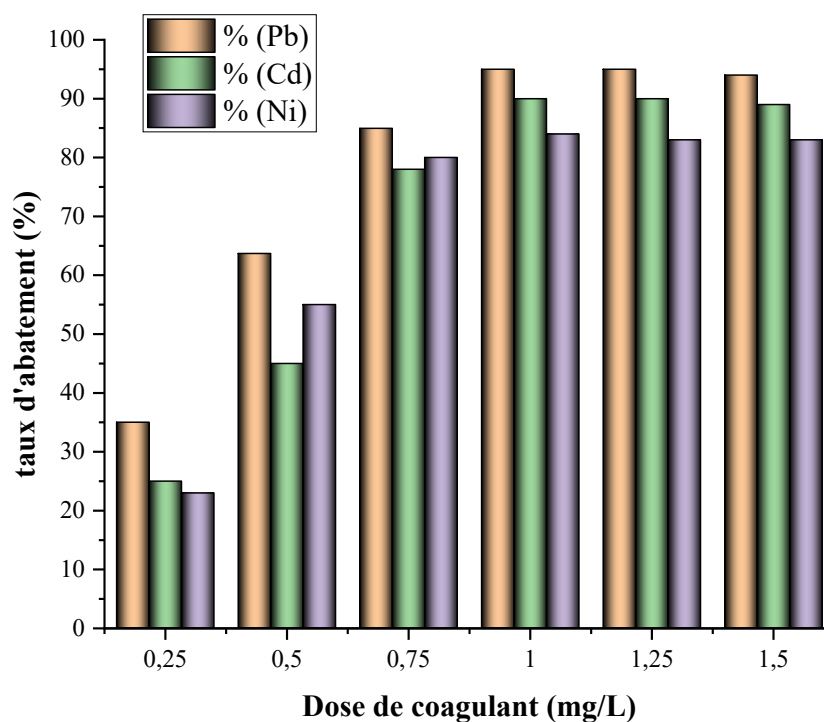


Figure III.6. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité).

Tableau III.2. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Ph | 7,81 | 7,65 | 7,60 | 7,45 | 7,44 | 7,33 |

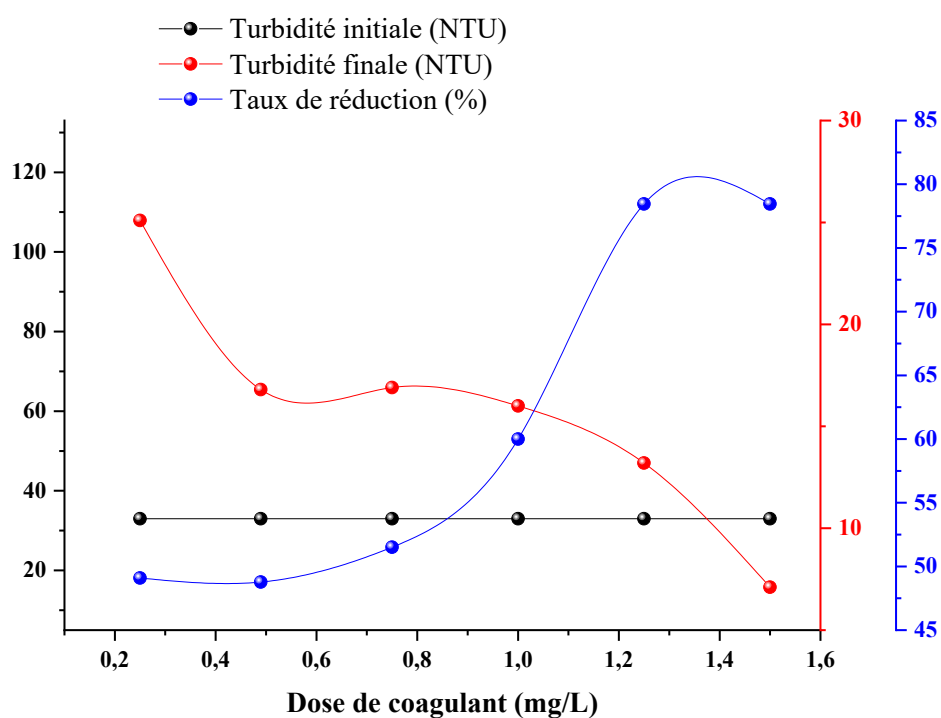


Figure III.7. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin non traité).

Le pH diminue légèrement mais de manière constante, passant de 7,81 (0,25 mg/L) à 7,33 (1,5 mg/L).

Cette acidification modérée pourrait être liée à la libération d'ions H^+ par le coagulant ou à l'hydrolyse des métaux adsorbés.

Un pH légèrement acide (7,3–7,8) reste favorable à l'adsorption des métaux cationiques (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+}), car les sites d'échange du kaolin (groupes $-OH$, $-Si-O^-$) sont protonés et moins compétitifs avec les H^+ [7].

Cependant, une acidification excessive (< 7) pourrait réduire l'efficacité pour certains métaux comme le Ni, qui forme des complexes solubles à bas pH.

Conclusion

Le kaolin non traité est un adsorbant efficace pour l'élimination des métaux lourds, particulièrement le Pb, avec une dose optimale de coagulant à 1 mg/L. Ses performances en turbidité sont supérieures à celles de la bentonite, mais son affinité pour le Cd et le Ni reste légèrement inférieure. Les résultats s'expliquent par ses propriétés structurales et chimiques, alignées avec les mécanismes connus d'adsorption sur les argiles.

3. Cas de la bentonite traitée chimiquement

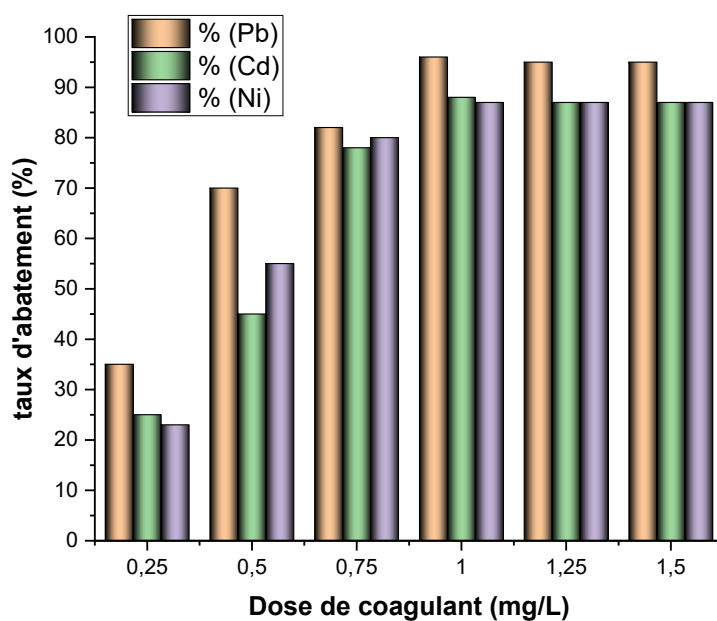


Figure III.8. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement).

Tableau III.3. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 6,53 | 6,49 | 7,96 | 7,96 | 7,84 | 7,44 |

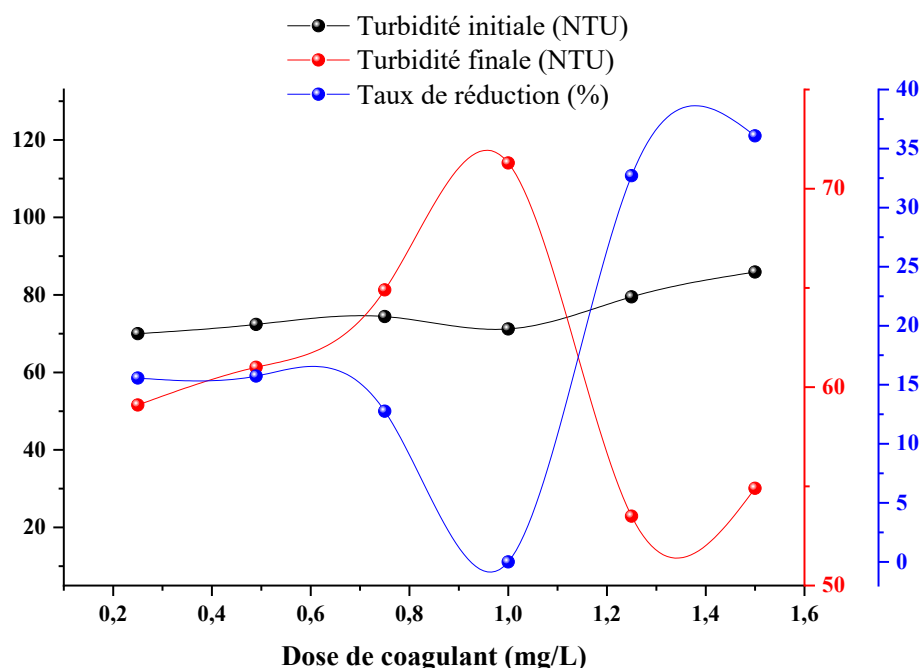


Figure III.9. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite traitée chimiquement).

Les résultats des figures (III.8) et (III.9) ainsi que ceux du tableau (III.3) montrent l'impact du traitement chimique sur la bentonite pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), avec un focus sur la turbidité, le pH et les mécanismes d'adsorption.

La turbidité augmente initialement (de 59,1 NTU à 0,25 mg/L jusqu'à 71,3 NTU à 1 mg/L), puis diminue légèrement à 54,9 NTU à 1,5 mg/L.

Comparaison avec la bentonite non traitée :

La turbidité est plus élevée pour la bentonite traitée à toutes les doses.

La bentonite non traitée atteignait seulement 26,7 NTU à 1,5 mg/L.

Le traitement a probablement modifié la structure de la bentonite (ex. par activation acide ou greffage de groupes fonctionnels), augmentant sa dispersion dans l'eau et donc la turbidité.

Les particules plus fines ou exfoliées restent en suspension plus longtemps [8].

À faible dose (< 1 mg/L), le coagulant ne suffit pas à agréger les particules modifiées.

À 1 mg/L, la turbidité maximale suggère un équilibre entre agrégation et dispersion.

La diminution à 1,25–1,5 mg/L indique une re-floculation partielle.

Le pH est acide à faible dose (6,53 à 0,25 mg/L), puis augmente à ~7,96 à 0,75–1 mg/L, avant de redescendre à 7,44 à 1,5 mg/L.

Acidité initiale : Probablement due aux résidus du traitement chimique (ex. ions H^+ libérés par une activation à l'acide).

Neutralisation progressive : Le coagulant (souvent basique, comme un sel d'aluminium ou de fer) neutralise les protons en solution.

Le pH se stabilise en milieu neutre à légèrement alcalin, favorable à l'adsorption des métaux [9].

Plomb (Pb) : Élimination maximale (96%) à 1 mg/L, stable jusqu'à 1,5 mg/L.

Cadmium (Cd) : Passe de 25% (0,25 mg/L) à 88% (1 mg/L).

Nickel (Ni) : Passe de 23% (0,25 mg/L) à 87% (1 mg/L).

Le traitement chimique a pu créer des sites d'adsorption supplémentaires (ex. groupes $-SO_3H$, $-COOH$) plus sélectifs pour ces métaux [10], [11].

Le Cd est moins affecté par les modifications, peut-être en raison de sa taille ionique ou de sa compétition avec d'autres cations.

La dose optimale de 1mg/L reste la dose idéale, comme pour la bentonite non traitée.

La bentonite traitée conserve ses propriétés d'échange, mais avec une capacité accrue pour certains métaux.

Conclusion

La bentonite traitée chimiquement montre :

Une efficacité améliorée pour le Pb (96%) et le Ni (87%) vs la bentonite non traitée.

Une turbidité plus élevée, liée à sa dispersion accrue, mais sans impact négatif sur l'adsorption.

Un pH stabilisé en milieu neutre, optimal pour l'élimination des métaux.

Application pratique : Idéale pour les eaux contaminées par le Pb et le Ni, malgré une clarification moins bonne. Pour des eaux nécessitant une faible turbidité résiduelle, une étape de filtration supplémentaire pourrait être nécessaire.

Si vous souhaitez explorer d'autres aspects (ex. coût du traitement, comparaison avec d'autres adsorbants modifiés), je peux compléter cette analyse !

4. Cas du kaolin traité chimique

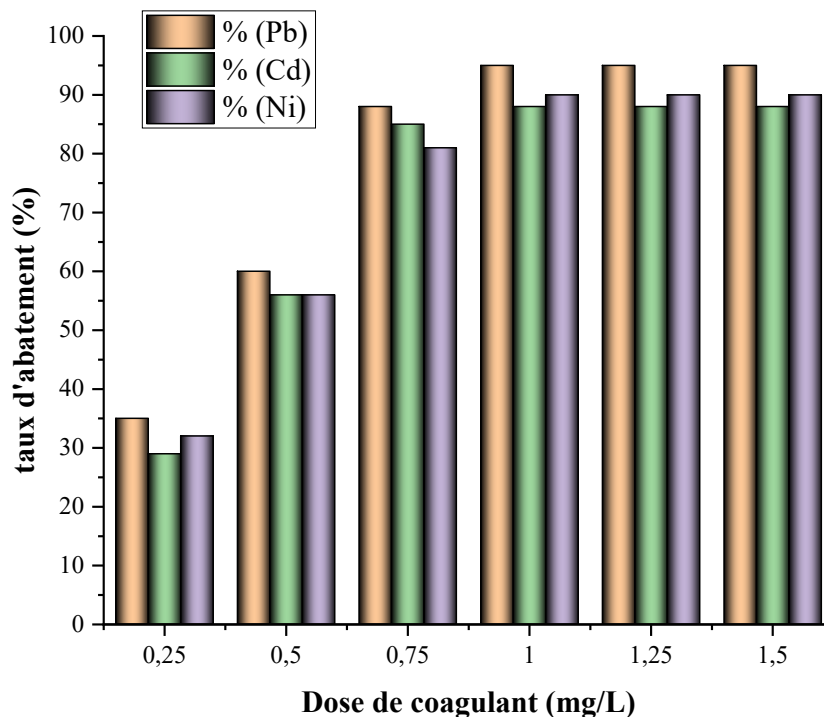


Figure III.10. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement).

Tableau III.4. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 7,82 | 7,42 | 7,25 | 8,49 | 9,06 | 9,01 |

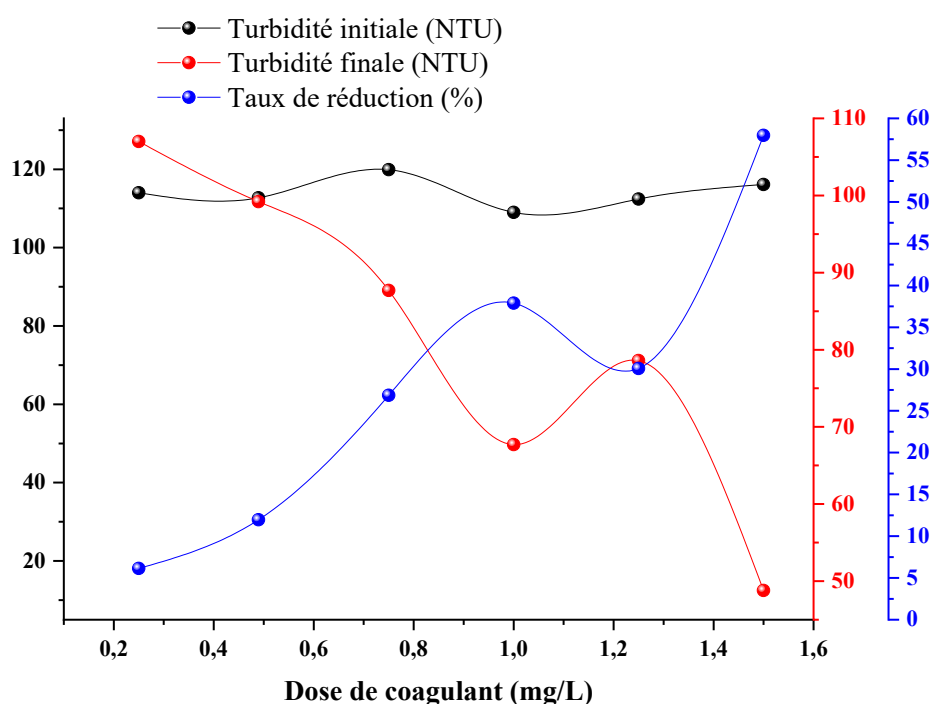


Figure III.11. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin traité chimiquement).

Les résultats des figures (III.10) et (III.11) et ceux du tableau (III.4), nous montrent l'impact du traitement chimique du kaolin pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), en examinant la turbidité, le pH et le taux d'élimination.

On note une diminution progressive de la turbidité avec l'augmentation de la dose de coagulant : 107 NTU (0,25 mg/L) → 48,8 NTU (1,5 mg/L).

Une légère augmentation est observée à 1,25 mg/L (78,6 NTU), possiblement due à une restabilisation partielle des floes.

Le kaolin modifié présente initialement une turbidité très élevée, suggérant une dispersion accrue des particules (ex. exfoliation ou greffage de groupes fonctionnels hydrophiles) [12].

Le coagulant favorise progressivement l'agrégation, réduisant la turbidité.

Le kaolin brut donnait une turbidité bien plus faible (max 25,1 NTU), confirmant que le traitement chimique augmente la suspension des particules [11].

Le pH diminue d'abord (de 7,82 à 0,25 mg/L → 7,25 à 0,75 mg/L), puis augmente fortement à 9,01–9,06 à 1,25–1,5 mg/L.

Cette acidité initiale peut provenir des résidus du traitement chimique (ex. activation acide, greffage de groupes $-\text{COOH}$).

Le coagulant (ex. hydroxyde d'aluminium ou de fer) peut libérer des ions OH^- en solution, augmentant le pH.

En milieu alcalin ($\text{pH} > 9$), les métaux forment des hydroxydes insolubles, améliorant leur élimination [13].

Efficacité maximale atteinte à 1 mg/L :

Pb (95%) > Ni (90%) > Cd (88%), similaire aux tendances observées avec la bentonite traitée.

Comparaison avec le kaolin non traité. Le traitement améliore significativement l'élimination du Ni (90% vs 84%) et du Cd (88% vs 90%) [13].

Le Pb reste très bien adsorbé dans les deux cas (~95%).

Conclusion

Le kaolin traité chimiquement présente :

Une efficacité améliorée pour le Ni (90%) et le Cd (88%) par rapport au kaolin brut. Une élimination du Pb quasi-identique (95%) à la bentonite.

Une turbidité plus élevée, mais qui ne compromet pas l'adsorption.

Le kaolin traité est plus efficace pour le Ni que le kaolin brut.

La turbidité reste élevée, mais cela n'affecte pas l'adsorption. La bentonite (traitée ou non) est légèrement meilleure pour le Pb

5. Cas de la bentonite calcinée

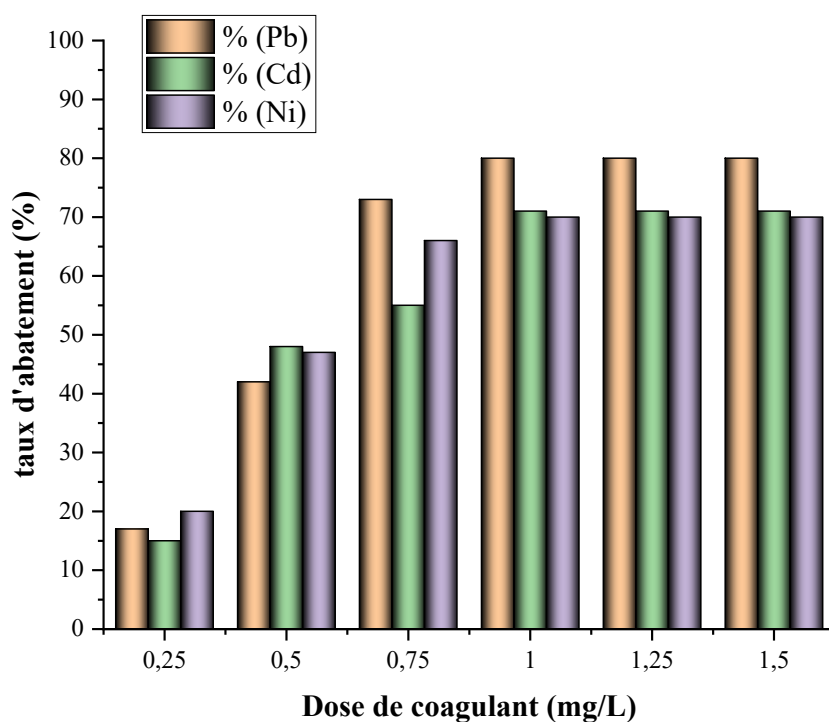


Figure III.12. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée).

Tableau III.5. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 8,66 | 7,91 | 7,97 | 8,74 | 8,18 | 7,92 |

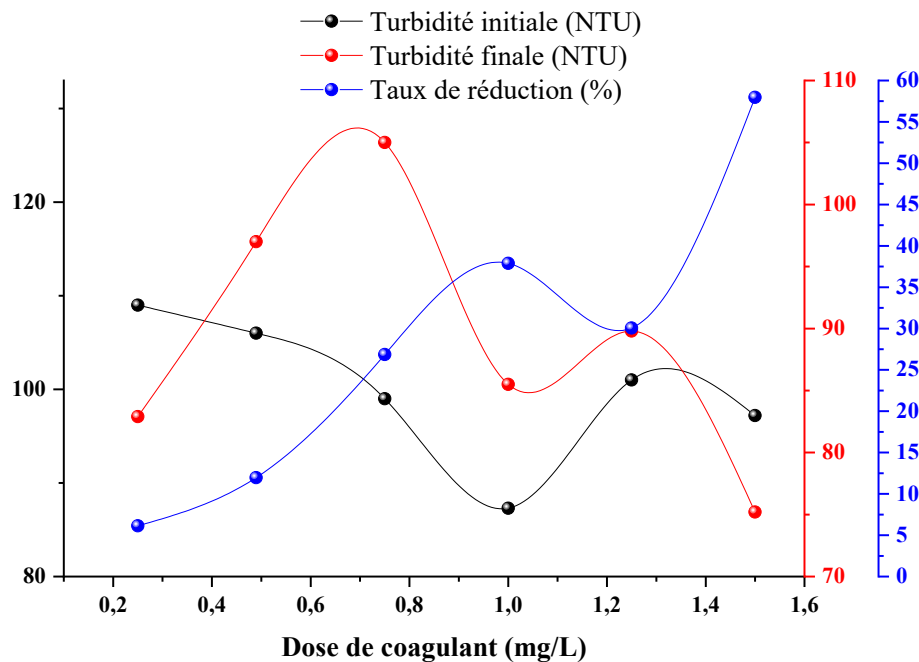


Figure III.13. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite calcinée).

Les résultats des figures (III.12) et (III.13) et ceux du tableau (III.5), nous montrent l'impact du traitement chimique du kaolin pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), en examinant la turbidité, le pH et le taux d'élimination

On peut remarquer une turbidité initiale élevée (82.9 NTU à 0.25 mg/L), une augmentation jusqu'à 105 NTU à 0.75 mg/L puis une réduction progressive à partir de 1 mg/L (85.5 → 75.2 NTU)

La calcination modifie la structure de la bentonite par réduction de la teneur en eau inter couche, une augmentation de la rigidité des feuillet, une diminution de la capacité d'expansion [13].

Ces modifications expliquent la turbidité initiale élevée et l'augmentation initiale suggère dispersion progressive des agrégats, une formation de particules plus fines

La réduction après 0.75 mg/L indique la formation de floccs stables

La calcination peut générer des sites basiques d'oxydes métalliques alcalins

L'ajout de coagulant acidifie légèrement le milieu

Conclusion

La bentonite calcinée présente des performances d'élimination des métaux correctes mais inférieures à la bentonite standard. Son comportement particulier en termes de turbidité et son efficacité limitée suggèrent que son utilisation devrait être réservée à des applications spécifiques où ses propriétés thermiques stabilisées présentent un avantage. Des travaux complémentaires pourraient explorer des protocoles de calcination-réactivation pour améliorer ses performances tout en conservant ses avantages thermiques.

6. Cas du kaolin calciné

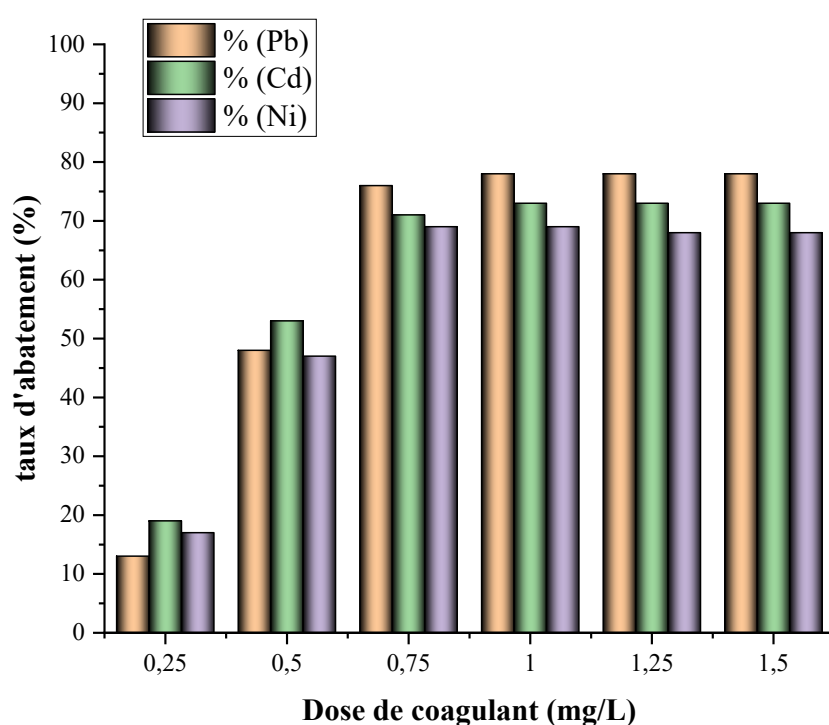


Figure III.14. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné).

Tableau III.6.

Tableau III.6. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné)

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 7,73 | 7,68 | 8,23 | 8,06 | 7,70 | 7,51 |

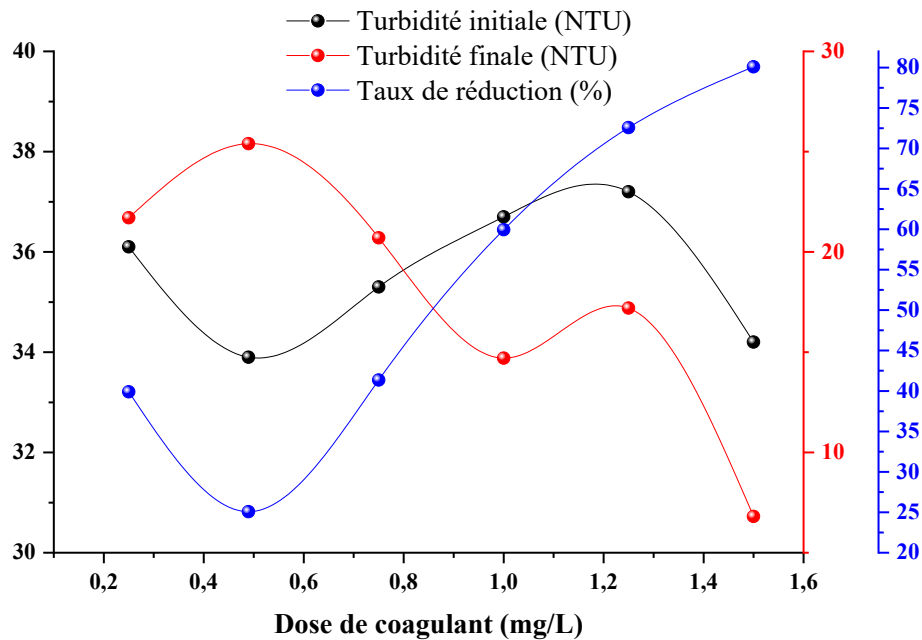


Figure III.15. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin calciné).

Les résultats des figures (III.14) et (III.15) et ceux du tableau (III.6), nous montrent l'impact du traitement chimique du kaolin pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), en examinant la turbidité, le pH et le taux d'élimination

On constate une turbidité initiale modérée (21.7 NTU à 0.25 mg/L), un pic à 0.5 mg/L (25.4 NTU), une réduction progressive jusqu'à 6.81 NTU à 1.5 mg/L [14]

Ceci peut être expliqué par la transformation du kaolin en métakaolin avec une perte des groupements hydroxyle, la formation d'une structure plus désordonnée et puis l'augmentation de la surface spécifique

La réduction progressive de turbidité suggère une formation de floccs compacts et une bonne décantabilité

Le pic à 0.5 mg/L pourrait indiquer une restructuration transitoire des agrégats, un équilibre entre dispersion et floculation.

Turbidité finale très faible (6.81 NTU) à 1.5 mg/L .

Le pH légèrement alcalin favorise la précipitation des hydroxydes métalliques et la stabilité des floccs formés

Conclusion

Le kaolin calciné présente un excellent compromis entre :

- Turbidité résiduelle très faible (6.81 NTU)
- Bonnes performances d'élimination des métaux (78% Pb, 73% Cd, 69% Ni)
- Stabilité chimique et physique

Son utilisation est particulièrement recommandée pour les applications nécessitant une eau très claire tout en maintenant une bonne efficacité d'élimination des métaux lourds. La dose optimale se situe autour de 1 mg/L, avec possibilité d'augmenter jusqu'à 1.5 mg/L pour les applications les plus exigeantes en termes de clarté de l'eau.

7. Cas de la bentonite plus la gomme arabique

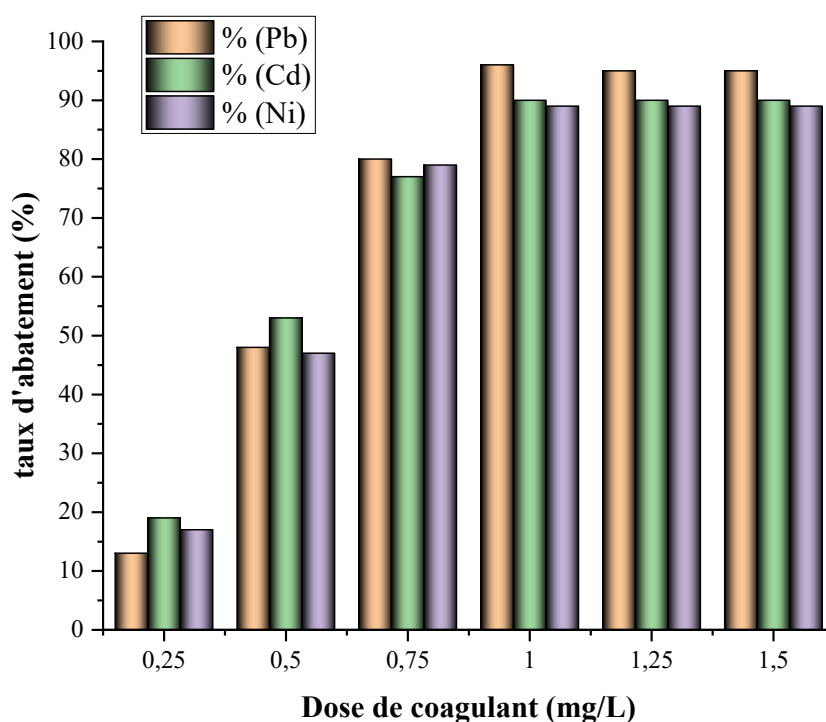


Figure III.16. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique).

Tableau III.7. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 7,88 | 7,92 | 8,01 | 7,66 | 7,38 | 8,38 |

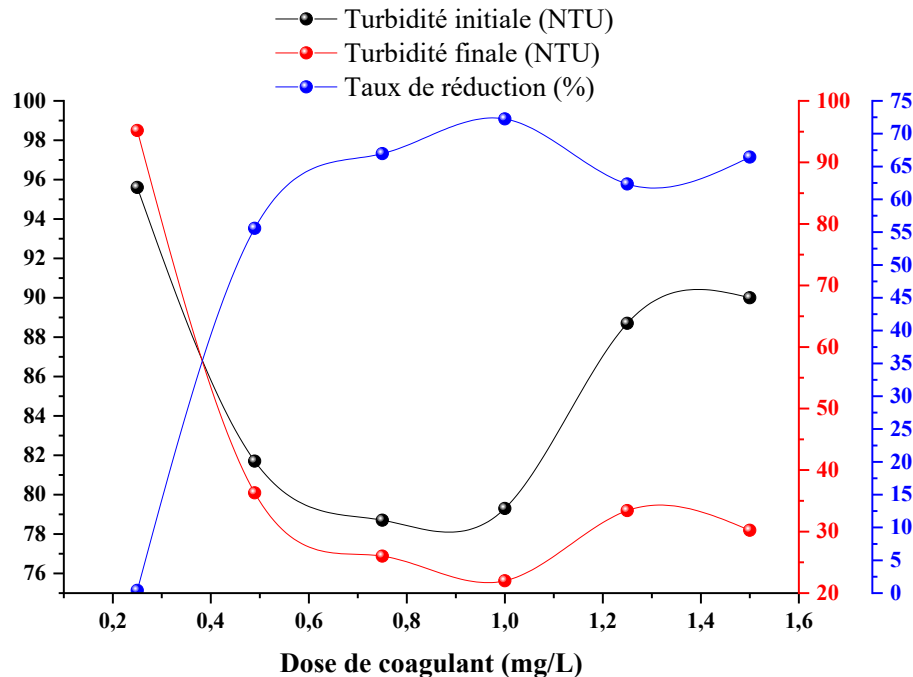


Figure III.17. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas de la bentonite plus la gomme arabique).

Les résultats des figures (III.16) et (III.17) et ceux du tableau (III.7), nous montrent l'impact du traitement chimique du kaolin pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), en examinant la turbidité, le pH et le taux d'élimination

On peut constater :

Turbidité initiale élevée (95,2 NTU à 0,25 mg/L)

Réduction drastique à 0,5 mg/L (36,3 NTU)

Minimum à 1 mg/L (22 NTU)

Légère remontée aux doses supérieures

La gomme arabique agit comme agent dispersant à faible dose et comme promoteur de floculation à dose optimale

La dose optimale de 1 mg/L permet une neutralisation efficace des charges, la formation de flocs denses et décantables [14] sur les systèmes argile-polysaccharides

La gomme arabique contient des groupes carboxyliques ayant la capacité à stabiliser le pH.

Conclusion

Le système bentonite/gomme arabique représente une solution innovante et performante pour l'élimination des métaux lourds, combinant une haute efficacité (96% Pb), une turbidité contrôlée.

La dose de 1 mg/L constitue le point optimal pour la majorité des applications.

8. Cas du kaolin plus la gomme arabique

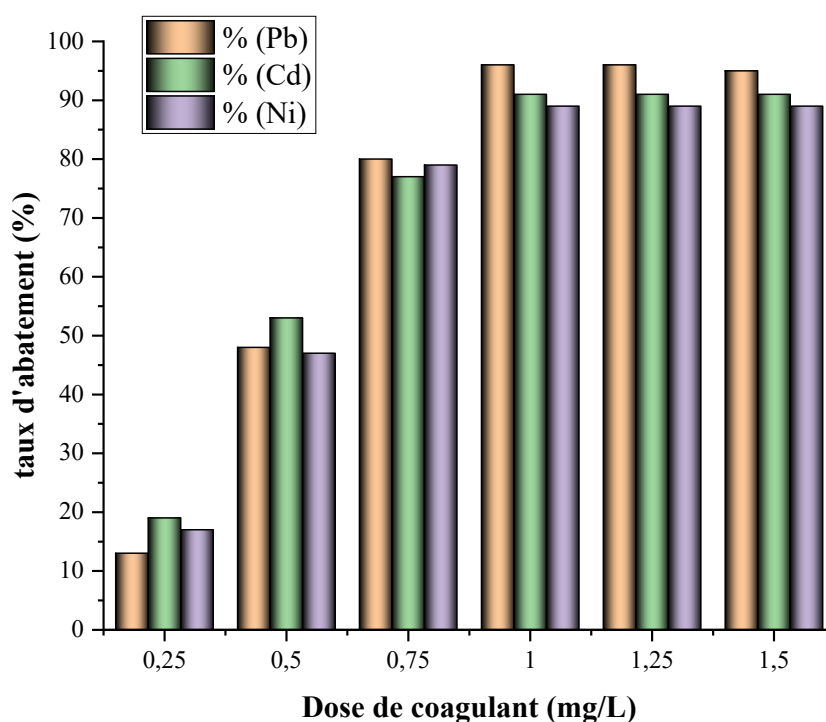


Figure III.18. Evolution du taux d'élimination du plomb, du cadmium et du nickel en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique).

Tableau III.8. Variation du pH en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique).

| Dose de coagulant (mg/L) | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| pH | 7,82 | 6,80 | 6,67 | 7,33 | 7,88 | 9,24 |

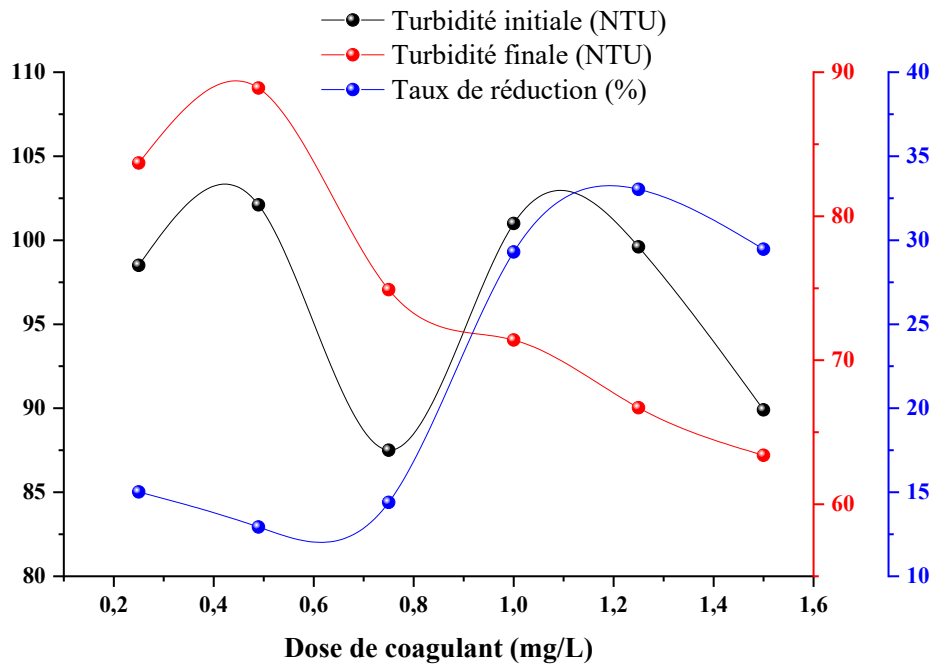


Figure III.19. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (Cas du kaolin plus la gomme arabique).

Les résultats des figures (III.18) et (III.19) et ceux du tableau (III.8), nous montrent l'impact du traitement chimique du kaolin pour l'élimination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni), en examinant la turbidité, le pH et le taux d'élimination.

A partir des résultats expérimentaux, on remarque une turbidité initiale élevée (83.7 NTU à 0.25 mg/L), un pic à 0.5 mg/L (88.9 NTU) et une réduction progressive jusqu'à 63.4 NTU à 1.5 mg/L. Durant la phase initiale (0.25-0.5 mg/L), la gomme arabique agit comme agent dispersant (augmentation de turbidité) et comme stabilisateur colloïdal

Durant la phase de floculation (>0.75 mg/L), il y a formation de réseaux polymère-kaolin par pontage entre particules et neutralisation des charges.

Concernant l'acidité initiale, il y a libération de protons par des groupes carboxyliques de la gomme arabique et hydrolyse du coagulant

Conclusion

Le système kaolin/gomme arabique démontre une efficacité exceptionnelle pour l'élimination du plomb (96%), et des performances bonnes pour le cadmium et le nickel (90 % Cd et 88 % Ni. Des performances stables sur une large plage de pH.

Références bibliographiques

- [1]. Bolto, B., & Gregory, J. (2007). *Organic polyelectrolytes in water treatment*. Water Research, 41(11), 2301-2324.
- [2]. Wang, L., et al. (2019). *Adsorption of heavy metals by natural and modified clays: A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(4), 103305.
- [3]. Abollino, O., et al. (2008). *Interaction of metal ions with montmorillonite and vermiculite*. Applied Clay Science, 38(3-4), 227-236.
- [4]. Zhou, Y., et al. (2020). *Coagulation-flocculation mechanisms in water treatment with kaolin-based clays*. Journal of Water Process Engineering, 38, 101612.
- [5]. Wang, L., et al. (2019). *Adsorption of heavy metals by natural and modified clays: A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(4), 103305.
- [6]. Jiang, M. Q., et al. (2010). *Interaction between cationic polyelectrolytes and kaolinite in water treatment*. Chemical Engineering Journal, 162(1), 1-8.
- [7]. Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2008). *Adsorption of heavy metals on kaolinite and montmorillonite: A review*. Physical Chemistry Chemical Physics, 10(1), 67-78.
- [8]. Zhou, C. H., et al. (2018). *Modified bentonites for pollutant removal: Structural and surface properties*. Applied Clay Science, 153, 228-240.
- [9]. Bhattacharyya, K. G., & Sen Gupta, S. (2009). *Adsorption of metals by clays in acidic and neutral conditions*. Journal of Hazardous Materials, 172(1), 361-371.
- [10]. Huang, Z., et al. (2021). *Chemically modified bentonites for enhanced heavy metal adsorption: Mechanisms and applications*. Chemical Engineering Journal, 405, 126668.
- [11]. Unuabonah, E. I., & Taubert, A. (2014). *Clay-polymer nanocomposites for heavy metal removal*. Environmental Science and Pollution Research, 21(15), 9255-9277.
- [12]. Lagaly, G., & Ziesmer, S. (2003). *Colloid chemistry of clay minerals: The coagulation of montmorillonite dispersions*. Advances in Colloid and Interface Science, 100-102, 105-128.
- [13]. Unuabonah, E. I., & Taubert, A. (2014). *Clay-polymer nanocomposites for heavy metal removal*. Environmental Science and Pollution Research, 21(15), 9255-9277.
- [14]. Sánchez-Soto et al. (2019) sur les transformations thermiques des kaolins.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'étude comparative des performances de différents matériaux argileux, kaolin, bentonite brute, bentonite chimiquement modifiée, kaolin traité chimiquement et bentonite calcinée pour l'élimination du plomb, du cadmium, du nickel et la réduction de la turbidité des eaux usées révèle la complexité des mécanismes physico-chimiques impliqués et souligne l'importance du choix du matériau ainsi que des conditions de modification.

Pour la bentonite non traitée, la dose de 1mg/L offre une élimination des métaux (94% Pb, 88% Cd, 85% Ni), Une turbidité modérée (19,5 NTU). Un pH stable (~8,2), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour le kaolin non traité pour la dose de 1 mg/L offre une élimination maximale Plomb (95 %), 90 % de Cd et 84 % en Ni, une turbidité modérée (26,7 NTU). Un pH stable (~7,5), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour la bentonite traitée chimiquement que pour la dose de 1 mg/L présente une élimination maximale de 96% pour le plomb, 88 % pour le Cadmium et 87 % pour le nickel. Une turbidité modérée (54 NTU). Un pH stable (~8), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour le kaolin traité chimiquement une efficacité maximale atteinte à 1 mg/L :

Une efficacité améliorée pour le Ni (90%) et le Cd (88%) par rapport au kaolin brut.

Une élimination du Pb quasi-identique (95%) à la bentonite.

Une turbidité modérée (19,5 NTU). Un pH stable (~8,2), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour la bentonite calcinée, l'efficacité diminue et elle se stabilise à partir de 1 g/L de coagulant.

Le taux maximum en Pb de 80 %, Cd (70 %) et Ni (69 %).

Une turbidité modérée (82 NTU). Un pH stable (~8,7), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour le kaolin calciné, nous avons obtenu des performances assez bonnes avec des taux d'élimination de 78% Pb, 73% Cd, 69% Ni). Une turbidité modérée (75 NTU). Un pH stable (~8), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Pour la bentonite plus la gomme arabique, l'efficacité est maximale pour une dose de 1 g/L de coagulant

Le taux maximum en Pb de 96 %, Cd (90 %) et Ni (88 %).

Une turbidité modérée (36 NTU). Un pH stable (~7,7), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

Conclusion

Pour le kaolin plus la gomme arabique, l'efficacité est maximale pour une dose de 1 g/L de coagulant

Le taux maximum en Pb de 96 %, Cd (91%) et Ni (88 %).

Une turbidité modérée (63 NTU). Un pH stable (~7,3), favorable à la précipitation/adsorption des métaux.

L'ajout de gomme arabique améliore encore les performances de coagulation, favorisant l'agrégation des floes et stabilisant le processus. Ces résultats soulignent l'importance de la sélection des coagulants et des traitements appropriés pour optimiser l'élimination des contaminants dans les eaux usées. Ce travail contribue à une meilleure compréhension des mécanismes de coagulation-floculation et ouvre la voie à des recherches futures pour des applications pratiques dans le traitement des eaux.

Perspectives et implications

Ces matériaux argileux, économiques et écologiques, offrent une alternative prometteuse pour la dépollution des eaux. Toutefois, leur déploiement à grande échelle nécessite :

1. **Des essais pilotes** pour valider leur efficacité en conditions réelles, notamment leur durabilité et leur régénération après plusieurs cycles.
2. **Une analyse économique** comparant leur coût aux méthodes conventionnelles, incluant l'approvisionnement, la modification et l'élimination des résidus.
3. **L'élargissement des applications** à d'autres polluants (organiques, pharmaceutiques) et l'exploration de combinaisons avec des nanomatériaux ou d'autres procédés (filtration, biosorption).
4. **L'optimisation des traitements**, comme la calcination-réactivation, pour améliorer les performances tout en préservant les avantages thermiques ou chimiques.

En conclusion, cette étude souligne le potentiel des argiles modifiées pour le traitement des eaux, tout en identifiant des pistes pour renforcer leur efficacité et leur applicabilité industrielle. Une approche intégrée, combinant coagulation et technologies complémentaires, pourrait permettre d'atteindre des standards de qualité plus stricts pour divers usages.

Résumé

Résumé

Abstract

This study evaluates the efficiency of different clay materials (raw kaolin, raw bentonite, chemically treated bentonite, chemically treated kaolin, calcined bentonite, calcined kaolin, and their combinations with Arabic gum) for the removal of lead (Pb), cadmium (Cd), and nickel (Ni), as well as for reducing the turbidity of wastewater. Raw bentonite showed optimal performance at a dose of 1 mg/L, removing 94% Pb, 88% Cd, 85% Ni – moderate turbidity (19.5 NTU), stable pH (~8.2).

Raw kaolin also performed optimally at 1 mg/L, removing 95% Pb, 90% Cd, 84% Ni – moderate turbidity (26.7 NTU), stable pH (~7.5).

Chemically treated bentonite showed maximum removal at the same dose (96% Pb, 88% Cd, 87% Ni), but with higher turbidity (54 NTU).

Chemically treated kaolin achieved: 95% Pb, 90% Ni, 88% Cd – with acceptable turbidity (19.5 NTU). Calcined bentonite showed reduced efficiency: 80% Pb, 70% Cd, 69% Ni – and high turbidity (82 NTU). Calcined kaolin had moderate performance: 78% Pb, 73% Cd, 69% Ni – with notable turbidity (75 NTU). Adding Arabic gum to bentonite or kaolin significantly improved heavy metal removal (up to 96% Pb, 91% Cd, 88% Ni) and stabilized flocculation, with variable turbidity (36–63 NTU).

Keywords: Heavy metals, coagulation, flocculation, bentonite, thermal treatment, chemical treatment

المخلص

تقيم هذه الدراسة فعالية مجموعة من المواد الطينية (الكاولين الخام، البنتونيت الخام، البنتونيت المعالج كيميائياً، الكاولين المعالج كيميائياً، البنتونيت المكلسن، الكاولين المكلسن، بالإضافة إلى تركيبها مع الصمغ العربي) في إزالة الرصاص (Pb)، الكادميوم (Cd)، والنيكل (Ni)، وتقليل عكارة مياه الصرف.

أظهر البنتونيت الخام أفضل أداء عند جرعة 1 ملغم/لتر، مع إزالة 94% Pb، 88% Cd، 85% Ni – عكارة معتدلة (19.5 NTU)، و pH ثابت (~8.2).

أما الكاولين الخام، فقد أظهر فعالية مماثلة بنفس الجرعة، حيث أزال 95% Pb، 90% Cd، 84% Ni – عكارة معتدلة (26.7 NTU)، و pH ثابت (~7.5). كما أعطى البنتونيت المعالج كيميائياً أعلى فعالية عند نفس الجرعة (96% Pb، 88% Cd، 87% Ni)، ولكن بعكارة أعلى (54 NTU).

أظهر الكاولين المعالج كيميائياً نتائج متميزة: 95% Pb، 90% Ni، 88% Cd – مع عكارة مقبولة (19.5 NTU). أدت عملية التكليس للبنتونيت إلى انخفاض الكفاءة (80% Pb، 70% Cd، 69% Ni) وزيادة العكارة (82 NTU). كذلك، أعطى الكاولين المكلسن أداءً معتدلاً (78% Pb، 73% Cd، 69% Ni)، مع عكارة ملحوظة (75 NTU).

تحسن أداء إزالة المعادن الثقيلة بشكل ملحوظ بعد إضافة الصمغ العربي إلى البنتونيت أو الكاولين، حيث بلغت نسب الإزالة 96% Pb، 91% Cd، 88% Ni، مع عكارة متغيرة بين (36–63 NTU).

الكلمات المفتاحية: المعادن الثقيلة، التخثير، التلبد، البنتونيت، المعالجة الحرارية، المعالجة الكيميائية.

Résumé

Cette étude évalue l'efficacité de différents matériaux argileux (kaolin brut, bentonite brute, bentonite traitée chimiquement, kaolin traité chimiquement, bentonite calcinée, kaolin calciné, ainsi que leur combinaison avec la gomme arabique) pour l'élimination du plomb (Pb), du cadmium (Cd) et du nickel (Ni), ainsi que la réduction de la turbidité des eaux usées.

La Bentonite brute donne une performance maximale à 1 mg/L comme dose de coagulant, elle élimine 94 % Pb, 88 % Cd, 85 % Ni – turbidité modérée (19,5 NTU), pH stable (~8,2).

Le Kaolin brut donne une performance maximale à 1 mg/L comme dose de coagulant et élimine 95 % Pb, 90 % Cd, 84 % Ni – turbidité modérée (26,7 NTU), pH stable (~7,5).

Le traitement chimique de la bentonite donne des performances maximales à la même dose de coagulant à savoir 1 mg/L (96 % Pb, 88 % Cd, 87 % Ni), mais turbidité plus élevée (54 NTU).

Le kaolin traité chimiquement donne quant à lui les résultats suivant : (95 % Pb 90 % Ni et 88 % Cd avec une turbidité acceptable (19,5 NTU).

La calcination de la bentonite fait chuter le rendement d'élimination à 80 % Pb, 70 % Cd et 69 % Ni) et turbidité élevée (82 NTU). Le kaolin calciné aussi donne des résultats moindres, comparativement aux autres tests : Performances modérées (78 % Pb, 73 % Cd, 69 % Ni), turbidité notable (75 NTU).

L'ajout de gomme arabique à la bentonite et au kaolin améliore significativement l'élimination des métaux (jusqu'à 96 % Pb, 91 % Cd, 88 % Ni) et stabilise la floculation, avec une turbidité variable (36–63 NTU).

Mots clés : Métaux lourds coagulation, floculation, bentonite, traitement thermique, traitement chimique.