

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Biochimie Appliquée

Présenté et soutenu par :
GHACHA Radhia / DRICHE Ouarda

Le : mardi 3 juin 2025

Etude du pouvoir adsorbant du charbon actif dans l'élimination de chlore des eaux naturelles

Jury :

Mme. Mokrani Djamilia	MAA	Université de Biskra	Président
Mme. Yasri Nabila	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Mme. Zekri Wissame	MAA	Université de Biskra	Examinateur

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et la motivation nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant **Yasri Nabila** pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce mémoire. Son soutien constant a grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre sujet.

Nous tenons à remercier l'équipe du laboratoire de la Faculté des Sciences de la nature et de la vie et de la Faculté des Sciences agronomies, en particulier l'ingénieur du laboratoire Kamal, pour leur aide et les moyens mis à notre disposition durant la phase expérimentale. Un grand merci à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur soutien moral inconditionnel, leurs encouragements constants et leur présence à chaque étape de notre parcours universitaire.

Enfin, nous n'oubliions pas nos camarades de promotion, avec qui nous avons partagé des moments inoubliables, d'entraide, de fatigue mais aussi de joie, tout au long de ces années.

Dédicace

Louange à Allah, par Sa grâce les bonnes œuvres s’accomplissent. Une louange ininterrompue et une gratitude infinie à Celui qui m’a accordé la force, la patience et la persévérence pour mener à bien ce travail. À Lui la louange, en tout temps et en toute circonstance.

À **mon cher père**, mon premier modèle et mon soutien éternel... merci pour ta patience, ton appui et tes sacrifices qui ont été la lumière guidant mes pas.

À **ma tendre mère**, ce cœur débordant d’amour, cette prière silencieuse qui m’a toujours précédée... sans toi, je ne serais pas celle que je suis aujourd’hui.

À **ma précieuse sœur, Soundous**, ma seule sœur, une partie de mon âme... merci pour ta présence, ton soutien et tes mots qui ont souvent apaisé mes moments de doute.

À mes chers frères **Ahmed, Abdel Salam, Ibrahim, Mahmoud, Abdel Djabbar, Walid et Seif Eddine**, piliers de mon cœur et fierté de ma vie... je vous suis profondément reconnaissante pour votre présence constante.

À mes amies bien-aimées **Ouarda, Nour El Houda, Nesrine, Samah, Manar et Roufaïda**, chaque moment partagé avec vous a été une lumière, chaque mot un encouragement... merci du fond du cœur pour votre amitié sincère.

Enfin... à toute personne qui m’a soutenue par une parole bienveillante, une prière discrète ou un simple sourire... merci, vous faites aussi partie de cet accomplissement.

GHACHA Radhia

إِهْدَاءٌ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون "

إِلَهٌ لَا يُطِيبُ اللَّيلُ إِلَّا بِذِكْرِهِ وَلَا يُطِيبُ النَّهَارُ إِلَّا بِطَاعَتِهِ وَلَا يُطِيبُ اللَّهُوَاتُ إِلَّا بِذِكْرِهِ اللَّهُوَاتُ

إِلَى مَنْ بَلَغَ الرِّسَالَةَ وَأَدَى الْأَمَانَةَ "سَيِّدُنَا مُحَمَّدٌ"

وَفِي الْحَلْظَةِ أَكْثَرُ فَخْرًا أَهْدَى عَمَلِي هَذَا إِلَى مَنْ رَبَّانِي وَكَافَحَ مِنْ أَجْلِي إِلَى الْمَصْبَاحِ الَّذِي أَنْارَ دُرْبِي

وَلَمْنَ أَحْمَلْ اسْمَهُ بِكُلِّ افْتَخَارٍ طَابَ بِكُلِّ الْعُمُرِ يَا سَيِّدَ الرِّجَالِ وَطَبِّتَ يَا عُمَرًا أَرْجُو مِنَ اللَّهِ أَنْ يَمْدُ فِي عُمْرِكَ لِتَرِى ثَمَارًا قَدْ

حَانَ قَطْفَهَا ... وَالَّدِي الْعَزِيزُ

إِلَى مَلَكِي فِي الْحَيَاةِ وَمَعْنَى الْحُبِّ وَقَرْةِ عَيْنِي وَأَعْزُّ مَا أَمْلَكَ إِلَى بَسْمَةِ الْحَيَاةِ وَسَرِ الْوِجُودِ إِلَى مَنْ كَانَ دَائِمًا سَرِّ

نَجَاحِي وَحَانَهَا بِالْسَّمْ جَرَاحِي إِلَى غَالِيَتِي وَجَنَّةِ قَلْبِي الَّتِي رَافَقْتِي وَأَرْشَدَتِي فِي كُلِّ مَشَارِيِّ الْحَيَاةِ أَمِيِّ الْغَالِيَةِ حَفَظَهَا اللَّهُ

إِلَى رُوحِ سَكْنَتِ الْثَّرَى وَخَلَقَتِ فِي الْقَلْبِ حَبًّا لَا يُنْسِى، عَمِيِّ الْعَزِيزِ...

رَحْمَكَ اللَّهُ وَجَمِعْنِي بِكَ فِي دَارِ لَا فَقْدُ فِيهَا.

إِلَى نَفْسِي الَّتِي رَاهَتْ عَلَى النَّجَاحِ اصْبَرِي وَصَابَرِي فَلَا يَزَالُ الطَّرِيقُ طَوِيلٌ

إِلَى صَدِيقِي وَزَمِيلِي الْعَزِيزَةِ الْغَالِيَةِ رَاضِيَةٍ

شَكْرًا لَكَ عَلَى الدَّعْمِ وَالْمَشَارِكَةِ الصَّادِقَةِ فِي كُلِّ خَطْوَةٍ مِنْ رَحْلَتِنَا الْعَلْمِيَّةِ.

دَمْتِي رَفِيقَةَ دَرْبِ وَذَكْرِي جَمِيلَةَ لَا تُنْسِى.

إِلَى ضَلَعِي الثَّابِتِ الَّذِي لَا يَمْلِي إِلَى مَنْ رَزَقْتَ بِهَا سَنَدًا إِلَى مَنْ أَرَى التَّمَنَّى مِنْ

طَرِيقِي أَشْوَاكَ الْفَشْلِ إِلَى أَخْتِي الْحَبِيبَةِ خَلُودَ.

إِلَى إِخْوَتِي عَلَيِّ ... عَيْسَى ... سَفِيَّانِ ... مَخْلُوفِ ... وَمُحَمَّدِ

الَّذِينَ لَدِيهِمْ مِيَزَةٌ كَبِيرَةٌ فِي تَشْجِيعِي وَتَحْفِيزيِّي، الَّذِينَ اكْتَسَبُتُ بِحُضُورِهِمْ قُوَّةً وَحَبَّا لَا حَدُودَ لَهُمَا، وَلَمْنَ تَعْلَمْتُ مَعْهُمْ مَعْنَى

الْحَيَاةِ دَمْتُنِي لِي السَّنَدِ فِي الْحَيَاةِ حَفَظُكُمُ اللَّهُ

إِلَى ابْنِ عَمِيِّ الْعَزِيزِ عَبْدِ الْقَادِرِ...

شَكْرًا لَكَ عَلَى دَعْمِكَ الصَّادِقِ وَمَسَاعِدِكَ الَّتِي كَانَ لَهَا بَالِغُ الْأَثْرِ، دَمْتَ سَنَدًا وَفَخْرًا.

وَالَّى كُلِّ مَنْ مَدَدَ عَوْنَ وَالْمَسَاعِدَةَ وَلَوْ بِكَلْمَةٍ طَيِّبَةٍ.

" وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنَّ الْحَمْدَ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ "

الْحَمْدُ لِلَّهِ عَلَى حَسْنِ التَّنَامِ وَالْخَتَامِ

Table de matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste de tableaux	I
Liste de figures	II
Liste des abréviations	III
Introduction	1

Partie bibliographique

Chapitre 1 Généralités sur l'eau

I.1. Cycle de l'eau dans la nature	3
I.2.Ressources en eau	3
I.2.1.Eaux de surface	3
I.2.2.Eaux souterraines	4
I.3.Eaux destinées à la consommation humaine.....	4
I.3.1. Eau minérale naturelle.....	4
I.3.2. Eau de source	4
I.3.3. Eau du robinet	4
I.4. Propriétés physico chimique du l'eau.....	5
I.4.1. Propriétés organoleptique.....	5
I.4.2. Propriétés physique	5
I.4.3. Propriétés chimique.....	5
I.5.Pollution des eaux	6
I.5.1.Pollution physique.....	7
I.5.2.Pollution chimique	7
I.5.3.Pollution microbiologique.....	7
I.6.Traitemennt des eaux	7
I.6.1.Désinfection par Chloration	7

Chapitre 2 Adsorption sur charbon actif

II.1.Adsorption	9
-----------------------	---

II.2.Types d'adsorption	9
II.2.1.Adsorption chimique (Chimisorption).....	9
II.2.2. Adsorption physique (Physisorption)	9
II.3. Mécanisme d'adsorption.....	9
II.4.Facteurs qui influencent l'adsorption	10
II.5.Charbon actif	10
II.5.1.Types de charbon actif	11
II.5.1.1.Charbon actif en poudre (CAP)	11
II.5.1.2.Charbon actif granulaire (CAG)	11
II.5.2. Structure et porosité d'un charbon actif.....	11
II.5.3. Fabrication d'un charbon actif.....	12
II.5.3.1. Activation physique	12
II.5.3.2. Activation chimique.....	12

Partie expérimentale

chapitre 3 Matériels et méthodes

III.1. Prélèvements d'échantillons d'eau.....	13
III.1.1. Dans le cas de prélèvement à un robinet	13
III.2.Caractéristiques physico chimiques	13
III.2.1.Méthodes d'analyse des paramètres physicochimique	14
III.2.1.1.PH	14
III.2.1.2.Calcium et Magnésium	14
III.2.1.3.Sulfates	15
III.2.1.4.Chlorure	16
III.2.1.5. Potassium.....	18
III.2.1.6. Sodium.....	18
III.3.Caractéristiques de charbon actif utilisé.....	19
III.4.Dosage de chlore	20
III.4.1. Préparation d'une solution à étudier.....	21
III.4.2. Étalonnage du spectrophotomètre	22
III.5. Description des essais.....	23
III.5.1. Cinétique d'adsorption	23

III.5.2. Effet du pH de traitement	25
III.5.3. Effet de la dose du charbon actif	27
Chapitre 4 Résultats et discussion	
IV.1. Caractéristiques des eaux analysées.....	30
IV.1.1. Caractéristiques physico chimiques	30
IV.1.2. Comparaison entre l'eau de Guedila et l'eau de robinet	31
IV.1.2.1.Composition ionique	31
IV.1.2.2.PH initial.....	31
IV.2.Cinétique d'adsorption.....	32
IV.2.1. Eau de Guedila	32
IV.2.2. Eau de robinet.....	33
IV.3. Effet du pH de traitement.....	35
IV.3.1. Eau de Guedila	35
IV.3.2. Eau de robinet.....	36
IV.4.Effet de la dose de charbon actif.....	38
IV.4.1.Eau de Guedila	38
IV.4.2.Eau de Robinet	39
IV.5. Isotherme d'adsorption	41
IV.5.1. Modèle de Langmuir	41
IV.5.2. Modèle de Freundlich.....	41
IV.6.Compréhension le mécanisme de déchloration par adsorption sur charbon actif	43
Conclusion.....	45
Références bibliographiques.....	47

Liste de tableaux

Tableau 1. Les caractéristiques physique-chimique de charbon actif utilisé.	20
Tableau 2. Données de la courbe d'étalonnage pour le dosage de chlore dans l'eau distillée.....	22
Tableau 3. PH de chaque échantillon.	27
Tableau 4. Caractéristiques physico chimiques des eaux minéralisées testées.....	30

Liste de figures

Figure 1. Cycle de l'eau (Kahoul, 2017)	3
Figure 2. Échantillons d'eau utilisés dans des expériences d'adsorption sur CA (original).	13
Figure 3. Charbon actif utilisé dans les essais d'élimination de chlore (original).	20
Figure 4. Spectrophotométrie UV-Visible (original)	21
Figure 5. Réactif DPD No.1 pour dosage le chlore libre (original).	21
Figure 6. La courbe d'étalonnage.	23
Figure 7. Agitateur magnétique (original)	24
Figure 8. Détection du chlore libre dans l'eau par la méthode DPD (original).	25
Figure 9. Préparation d'échantillons d'eau avec différents pH.	25
Figure 10. Solutions d'ajustement du pH (original)	26
Figure 11. PH mètre (original).	26
Figure 12. Expérience sur l'effet du pH sur l'absorption du chlore par le charbon actif (original).	27
Figure 13. Filtration d'échantillons (original)	28
Figure 14. Effet du temps d'agitation sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de guedila.	32
Figure 15. Effet du temps d'agitation sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de robinet.....	33
Figure 16. Evolution du rendement déchloration des eaux en fonction du temps d'agitation différents (0 min , 50 min , 2 heure).....	34
Figure 17. Effet du pH de traitement sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de guedila.	35
Figure 18. Effet du pH de traitement sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de robinet.....	36
Figure 19. Evolution du rendement de déchloration des eaux en fonction du pH de traitement différents.....	37
Figure 20. Rendement d'adsorption de chlore sur les différentes doses de charbon actif dans l'eau de guedila.	38
Figure 21. Rendement d'adsorption de chlore sur les différentes doses de charbon actif dans l'eau de robinet.....	39
Figure 22. Evolution du rendement d'élimination de chlore des eaux en fonction de la dose de l'adsorbant (0.1 à 2 g/L).....	40
Figure 23. Isotherme d'adsorption pour l'eau du guedila et l'eau du robinet.....	42

Liste des abréviations

C : Concentration molaire (mol/l).

CA : Charbon actif.

CAP : Charbon actif en poudre.

CAG : Charbon actif granulaire.

CE : conductivité électrique.

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

PCB : Polychlorobiphényles.

DPD : diéthyl-para-phénylènediamine.

HCl : acide chlorhydrique.

NAOH : Hydroxyde de sodium.

HClO : Acide hypochloreux

OCl⁻ : Ion hypochlorite

OMS : Organisation mondiale de la santé.

T : température d'activation.

UV-Visible : Spectrophotomètre ultra-violet, vis.

λmax : longueur d'onde maximal.

Introduction

Les agents pathogènes transmis par l'eau appartiennent principalement à trois catégories : les bactéries, les virus et les parasites. Pour éliminer ces micro-organismes, plusieurs procédés de désinfection peuvent être mis en œuvre, notamment la chloration, l'irradiation par rayons ultraviolets (UV) ou l'utilisation de l'ozone (Evens et Paul, 2002).

La désinfection chimique repose principalement sur l'utilisation du chlore ou de ses composés dérivés (Evens et Paul, 2002).

Le chlore, qu'il soit utilisé sous forme de chlore gazeux ou d'hypochlorite de sodium (eau de Javel), constitue l'agent oxydant chimique le plus couramment employé à l'échelle mondiale, notamment en Algérie. Dans la wilaya de Biskra, l'hypochlorite de sodium est systématiquement utilisé pour la désinfection des eaux destinées à la consommation humaine (Guergazi et Achour, 2005).

Toutefois, la chloration de l'eau peut conduire à la formation de sous-produits de désinfection, dont certains peuvent présenter une toxicité pour la santé humaine (Ouchene *et al.*, 2020).

L'adsorption peut constituer une technique privilégiée pour l'élimination de la matière organique et du chlore, dans le but de limiter les effets néfastes de la chloration sur la santé des consommateurs. En effet, ce procédé se révèle efficace pour la rétention et l'élimination des composés organiques et minéraux solubles dans l'eau, sans altérer leur structure chimique (Ouchene *et al.*, 2020).

Le charbon actif est particulièrement efficace pour l'élimination du chlore libre de l'eau, car il ne nécessite pas l'ajout de réactifs chimiques et permet simultanément l'élimination de nombreux polluants organiques persistants (POP) (Bingjing *et al.*, 2019).

Cette étude vise à évaluer l'efficacité du charbon actif dans l'élimination du chlore présent dans les eaux souterraines.

- Pour ce faire, plusieurs paramètres opératoires seront examinés afin d'optimiser le processus de déchloration à l'aide de charbon actif, sous forme granulaire (CAG) ou en poudre (CAP).
- Les paramètres considérés incluent la cinétique d'adsorption du chlore, le pH du milieu réactionnel, ainsi que l'influence de la dose de l'adsorbant.

- L'étude cherche également à démontrer que l'élimination du chlore libre s'effectue à la fois par adsorption sur la surface du charbon actif et par des mécanismes de réduction chimique.

En réponse aux objectifs fixés, ce travail sera réalisé en deux grandes parties :

- ✓ La première partie est une synthèse bibliographique qui comportera deux chapitres.
 - Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur l'eau et la pollution de l'eau, et à la fin du chapitre, nous parlerons du traitement de l'eau à l'aide désinfection par chloration.
 - Au cours du deuxième chapitre, nous présenterons une étude théorique de l'adsorption sur charbon actif.
- ✓ La deuxième partie de l'étude est axée sur l'expérimentation, Elle sera partagée en deux chapitres.
 - Le troisième chapitre portera sur les matériels et méthodes.
 - Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus avec leur discussion, et suivi avec conclusion générale.

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre 1

Généralités sur l'eau

I.1. Cycle de l'eau dans la nature

L'eau participe à un cycle hydrologique continu entre la surface terrestre et l'atmosphère. Elle s'évapore des océans, lacs et forêts, se condense en nuages transportés par les vents, puis retombe sous forme de précipitations (pluie ou neige) sous l'effet de phénomènes météorologiques complexes. L'eau de ruissellement s'infiltra dans le sol, alimente les nappes souterraines et se purifie en traversant différentes couches géologiques. Une partie des eaux souterraines rejoint directement la mer, tandis qu'une autre alimente les rivières. Enfin, l'eau retourne à l'atmosphère sous forme de vapeur par la transpiration des végétaux, qui retiennent aussi une partie de l'eau de pluie dans leur feuillage comme le montre la figure 1 (Kahoul, 2017).

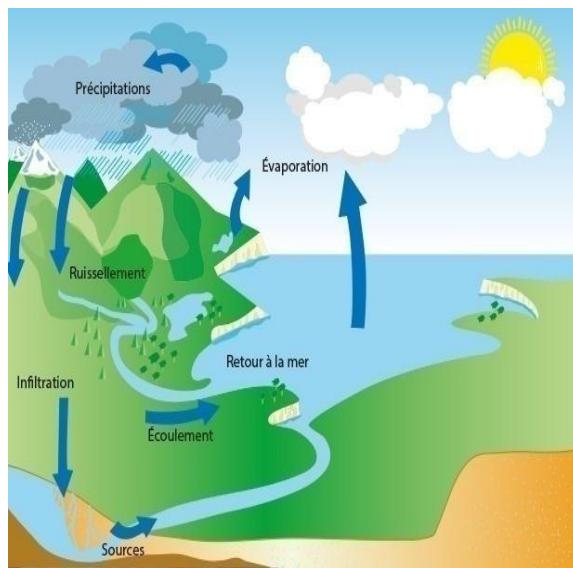


Figure 1. Cycle de l'eau (Kahoul, 2017)

I.2. Ressources en eau

I.2.1. Eaux de surface

Contrairement aux eaux souterraines, les eaux de surface regroupent les eaux présentes à la surface ou à proximité immédiate du sol. Il s'agit principalement des cours d'eau, des lacs, des océans et des eaux de ruissellement. Leur température varie en fonction du climat et des saisons. La teneur en matières en suspension dépend de la pluviométrie, de la nature des sols avoisinants et du relief. Leur composition en sels minéraux fluctue selon la nature du terrain, les précipitations et les rejets anthropiques. En général, les eaux de surface sont riches en oxygène dissous et pauvres en dioxyde de carbone (Degrémont, 2005).

I.2.2. Eaux souterraines

Les eaux souterraines désignent l'ensemble des eaux situées sous la surface du sol, dans la zone de saturation, en contact direct avec le sol ou le sous-sol. Elles se distinguent par une faible turbidité et une contamination bactérienne généralement faible, car elles sont protégées des sources directes de pollution. En conséquence, elles présentent souvent une dureté élevée en raison de leur interaction prolongée avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents tels que le calcium et le magnésium. De plus, les concentrations en fer et en magnésium y sont souvent élevées (Degrémont, 2005).

I.3. Eaux destinées à la consommation humaine

I.3.1. Eau minérale naturelle

Issue exclusivement de sources souterraines, elle est naturellement pure, exempte de toute contamination humaine, et microbiologiquement saine. Sa composition physico-chimique est stable dans le temps, ce qui peut lui conférer des propriétés bénéfiques pour la santé. Elle ne subit aucun traitement ni ajout de substances chimiques. Reconnue pour ses vertus thérapeutiques, sa consommation est autorisée par les autorités sanitaires (Khammar, 2018).

I.3.2. Eau de source

Elle provient également de nappes souterraines et est propre à la consommation humaine sans traitement. Contrairement à l'eau minérale naturelle, sa composition n'est pas nécessairement stable. Elle doit répondre aux normes de potabilité en vigueur, comme l'eau du robinet. Une même marque peut provenir de plusieurs sources, avec des compositions minérales variables, tout en respectant les règles d'étiquetage (Khammar, 2018).

I.3.3. Eau du robinet

Captée à partir d'eaux souterraines ou superficielles (rivières, lacs, fleuves), l'eau du robinet est traitée dans des stations spécialisées pour répondre aux normes sanitaires. Elle est ensuite acheminée via un réseau de distribution jusqu'au consommateur, après stockage dans des réservoirs (Khammar, 2018).

I.4. Propriétés physico chimique du l'eau

I.4.1. Propriétés organoleptique

- ✓ La couleur vraie d'une eau est causée uniquement par des substances dissoutes capables de traverser un filtre de 0,45 nm de porosité. Dans les eaux claires ou faiblement turbides, les couleurs vraie et apparente sont généralement similaires (Rodier *et al.*, 2009).
- ✓ L'odeur de l'eau indique une pollution ou la présence de matière organique en décomposition, souvent en concentrations trop faibles pour être détectées par les méthodes d'analyse classiques (Rodier *et al.*, 2009).
- ✓ La turbidité résulte de la présence de particules en suspension, principalement colloïdales, telles que les argiles, limons, silices et matières organiques. Elle évalue l'abondance de ces particules (Rodier *et al.*, 2009).

I.4.2. Propriétés physique

- ✓ La conductivité électrique d'une solution (CE) est mesure la capacité d'une solution à conduire le courant électrique, basée sur une colonne d'eau avec deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface, séparées par 1 cm. La mesure de la conductivité est exprimée en µS/cm. Il existe une relation entre la concentration en sels dissous d'une eau et sa conductivité (Rodier *et al.*, 2009).
- ✓ Le pH de l'eau indique si celle-ci est acide ou alcaline, et il dépend de la concentration des ions hydrogène H⁺ présents. Mesurer le pH est essentiel, car il affecte de nombreux équilibres physico-chimiques dans l'eau (Arouya, 2022).

I.4.3. Propriétés chimique

- ✓ La dureté correspond à la somme des concentrations des ions calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺), qui sont des ions alcalinoterreux. bien que des ions comme le fer et l'aluminium puissent également contribuer (Rodier *et al.*, 2009).
- ✓ Le calcium (Ca²⁺) est un minéral alcalino-terreux et le principal composant de la dureté de l'eau. Le calcium est généralement l'élément le plus abondant dans l'eau potable. Sa concentration varie principalement en fonction des types de terrains traversés par l'eau (Rodier *et al.*, 2009).

- ✓ Le magnésium (Mg^{2+}) est trouvant dans la plupart des eaux naturelles. Il participe à la dureté de l'eau. De plus, il joue un rôle crucial dans la croissance et la production de certaines hormones (Savary, 2010).
- ✓ Les sulfates (SO_4^{2-}) proviennent du ruissellement ou de l'infiltration dans les terrains riches en gypse. Ils résultent également de l'activité de certaines bactéries, Ces bactéries peuvent oxyder l'hydrogène sulfuré (H_2S), qui est toxique, en sulfate (BELGHITI *et al.*, 2013).
- ✓ Le sodium est un élément omniprésent dans l'eau. En plus de la lixiviation des formations géologiques riches en chlorure de sodium, le sodium peut également provenir de la décomposition de minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des dépôts marins, de l'intrusion d'eaux salées dans les nappes aquifères, ainsi que de divers usages industriels (BELGHITI *et al.*, 2013).
- ✓ Les nitrates sont abondants dans la plupart des eaux et sont présents naturellement en faibles concentrations dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Ils sont également solubles dans l'eau (Savary, 2010).
- ✓ Les nitrites sont également présents, mais à des concentrations beaucoup plus faibles que celles des nitrates. Selon l'OMS, la concentration normale de nitrites est de 0,1 mg/l. Une présence élevée de nitrites dans l'eau compromet la qualité de celle-ci et peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine (Rodier *et al.*, 2009).
- ✓ Les concentrations de chlorures (Cl^-) dans les eaux varient considérablement et dépendent principalement de la nature des sols et des roches traversés. En général, les eaux courantes non polluées contiennent souvent des quantités de chlorures. Dans l'eau, le chlorure est incolore et inodore, mais il peut donner une saveur salée (Degrémont, 2005).

I.5. Pollution des eaux

La pollution des eaux désigne l'altération de la qualité de l'eau due à des modifications de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Elle a des conséquences néfastes sur les organismes vivants et résulte principalement des activités humaines : urbaines (eaux usées, égouts), agricoles (usage d'engrais et de pesticides) et industrielles (secteurs agroalimentaire, chimique, pétrochimique) (Stéphane et Pascale, 2018)

On distingue trois types principaux de pollution :

I.5.1. Pollution physique

Causée par des éléments solides issus des rejets domestiques et industriels. Elle comprend :

- ✓ La pollution solide (particules des eaux industrielles, ruissellement, décharges).
- ✓ La pollution thermique (liée aux eaux de refroidissement des usines, perturbant l'équilibre écologique).
- ✓ La pollution radioactive (provenant des centrales nucléaires et usines de traitement).
(Stéphane et Pascale, 2018)

I.5.2. Pollution chimique

Liée aux substances chimiques organiques et minérales générées par l'activité humaine. Elle inclut les solvants, métaux lourds (Zn, Pb, Cd), HAP, PCB, produits pharmaceutiques, sels, pesticides, etc (Stéphane et Pascale, 2018).

I.5.3. Pollution microbiologique

Issue des rejets hospitaliers, agricoles et d'eaux usées, elle introduit dans l'eau des microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) nuisibles à l'environnement et à la santé humaine (Stéphane et Pascale, 2018).

I.6. Traitement des eaux

Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. la connaissance de ces ressources en eau et de leur qualité est une condition nécessaire (Harrat et Achour, 2010).

La production d'eau potable à partir de ressources naturelles nécessite généralement un traitement approprié, en fonction des paramètres de qualité à corriger. Lorsqu'il s'agit d'eaux souterraines de bonne qualité, un traitement minimal peut suffire, notamment la chloration (Guergazi et Achour, 2005).

I.6.1. Désinfection par Chloration

La chloration est bien connue pour ses fonctions multiples : elle permet l'élimination des agents pathogènes, l'oxydation de la matière organique et de certains éléments minéraux. Elle joue également un rôle essentiel dans le maintien d'un résiduel désinfectant, garantissant ainsi

une protection microbiologique continue de l'eau tout au long de son acheminement dans le réseau de distribution (Guergazi et Achour, 2005).

Le chlore, sous forme d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) ou de chlore gazeux, représente l'agent oxydant chimique le plus couramment utilisé à l'échelle mondiale, notamment en Algérie. À Biskra, l'hypochlorite de sodium est systématiquement employé pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine (Guergazi et Achour, 2005).

Chapitre 2

Adsorption sur charbon actif

II.1. Adsorption

L'adsorption constitue un phénomène surfacique caractérisé par la fixation réversible de molécules (adsorbat) à l'interface d'un matériau solide (adsorbant). Ce processus implique l'accumulation d'espèces atomiques ou moléculaires, provenant d'une phase gazeuse ou liquide, à la surface du substrat solide (Crini et Morin, 2017).

L'adsorption constitue l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'élimination des substances organiques, principales sources de pollution, ainsi que pour la purification des eaux (Khirani, 2007).

II.2. Types d'adsorption

II.2.1. Adsorption chimique (Chimisorption)

Est un processus irréversible qui se produit à la surface de l'adsorbant. Il implique la formation d'une liaison chimique entre la molécule adsorbée et un site actif spécifique de la surface, ce qui entraîne une fixation localisée des molécules d'adsorbat. Une fois adsorbées, ces molécules perdent leur liberté de mouvement et ne peuvent pas se détacher spontanément de la surface de l'adsorbant (Grah, 2009).

II.2.2. Adsorption physique (Physisorption)

Est un phénomène réversible résultant principalement des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène entre les molécules d'adsorbat et les atomes de la surface de l'adsorbant. Ces forces d'attraction relativement faibles permettent aux molécules adsorbées de se déplacer sur la surface et de s'adsorber plus facilement (Grah, 2009).

II.3. Mécanisme d'adsorption

Le processus d'adsorption des composés présents dans une phase liquide sur le charbon actif se déroule en quatre étapes distinctes :

- ✓ Première étape : Transfert de l'adsorbat depuis la phase liquide vers la couche limite du film liquide entourant la particule solide, par convection ou diffusion. Cette étape est très rapide.
- ✓ Deuxième étape : Migration de l'adsorbat à travers le film liquide jusqu'à la surface externe de l'adsorbant. Cette étape est également rapide.

- ✓ Troisième étape : Diffusion de l'adsorbat à l'intérieur de la particule d'adsorbant, sous l'effet du gradient de concentration. Cette phase est plus lente et suit deux mécanismes distincts :
 - (3a) Diffusion de surface sous forme adsorbée.
 - (3b) Diffusion à travers les pores sous forme libre.
- ✓ Quatrième étape : Adsorption finale de l'adsorbat au sein des micropores de l'adsorbant. Cette étape est très rapide (Bacchi *et al.*, 2021).

II.4. Facteurs qui influencent l'adsorption

Selon Grah (2009) l'adsorption des substances organiques ou inorganiques sur la surface des charbons actifs dans les solutions aqueuses a été largement étudiée. Plusieurs facteurs influencent ce processus, qui peut être détaillés comme suit :

- ✓ Le type de composé à adsorber : Les composés possédant un poids moléculaire élevé et une faible solubilité dans l'eau sont généralement mieux adsorbés par les charbons actifs, en raison de leurs propriétés physico-chimiques favorables à l'adsorption.
- ✓ La concentration du composé à éliminer : L'adsorption est généralement plus efficace à des concentrations élevées du composé cible. En effet, à mesure que la concentration augmente, la demande en charbon actif pour l'adsorption augmente également.
- ✓ Le pH de la solution : Le pH de la solution joue un rôle déterminant dans l'efficacité de l'adsorption. Pour obtenir les meilleures performances, il est généralement recommandé de maintenir un pH compris entre 4 et 7,1, bien que ce domaine puisse varier selon les caractéristiques spécifiques de l'adsorbant utilisé.

II.5. Charbon actif

L'adsorbant le plus couramment utilisé en pratique est le charbon actif, issu de la carbonisation de matières organiques telles que le bois ou la tourbe, suivie d'un processus d'activation (Lesage, 2009).

Le charbon actif peut être produit sous forme de poudre ou en granulés. Le charbon actif possède une capacité élevée d'adsorption, lui permettant de capturer et de retenir efficacement les fluides au contact de sa surface (Lesage, 2009).

II.5.1.Types de charbon actif

II.5.1.1.Charbon actif en poudre (CAP)

Ce type de charbon actif se présente sous forme de particules fines d'environ 44 microns, favorisant une adsorption rapide. Toutefois, son utilisation dans les systèmes d'adsorption fixes peut s'avérer complexe en raison de sa manipulation délicate et de la chute de pression significative qu'il engendre, rendant ainsi sa régénération plus difficile (Chand et Meenakshi, 2005).

II.5.1.2.Charbon actif granulaire (CAG)

Il se compose de granulés dont la taille varie entre 0,6 et 4,0 mm. Il se distingue par sa dureté, sa résistance mécanique et sa stabilité dans diverses conditions opérationnelles. Bien que son coût soit supérieur à celui du PAC, il présente une faible résistance hydrodynamique et peut être régénéré efficacement par un traitement à la vapeur (Chand et Meenakshi, 2005).

II.5.2. Structure et porosité d'un charbon actif

La surface d'un charbon actif est constituée d'un empilement désordonné de feuilles de graphène, formant une structure amorphe présentant de nombreux interstices. Ces interstices correspondent aux pores du matériau, qui jouent un rôle fondamental dans ses propriétés d'adsorption. Un pore est défini comme une cavité étroite et profonde, débouchant nécessairement à la surface du solide, et accessible à un fluide (Guilossou, 2019).

Selon la classification de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA), la porosité des matériaux est divisée en trois catégories en fonction de la taille des pores :

- ✓ Les macropores : de diamètre supérieur à 50 nm, facilitent l'accès du fluide à l'intérieur du matériau.
- ✓ Les mésopores : dont le diamètre est compris entre 2 et 50 nm, assurent le transport du fluide à travers la structure.
- ✓ Les micropores : de diamètre inférieur à 2 nm, représentent la majorité des sites d'adsorption actifs (Guilossou, 2019).

Selon Harris *et al* (2008), la surface des charbons actifs est majoritairement constituée d'un réseau hexagonal semblable à celui du graphène. Toutefois, les auteurs émettent l'hypothèse que

cette structure intègre également des cycles pentagonaux et heptagonaux, conférant au matériau une organisation désordonnée rappelant celle des fullerènes.

II.5.3. Fabrication d'un charbon actif

La fabrication du charbon actif implique l'utilisation de matériaux carbonés à faible teneur en éléments inorganiques, tels que la tourbe, le charbon, le lignite, le bois ou la coquille de noix de coco. Ce processus se fait par activation chimique ou physique afin d'augmenter la surface interne et le nombre de sites d'adsorption pour les composés ciblés. Le choix de la méthode d'activation influence la chimie de surface du charbon (Guilossou, 2019).

II.5.3.1. Activation physique

Se divise en deux étapes : la carbonisation et l'activation.

Le matériau précurseur est d'abord carbonisé à des températures de 700-900°C dans une atmosphère inerte, éliminant les éléments non carbonés sous forme gazeuse, créant un solide amorphe riche en carbone. Ce matériau est ensuite activé à haute température avec de l'air, de la vapeur d'eau ou du dioxyde de carbone, ce qui génère une porosité développée et améliore l'accessibilité de la structure interne des pores (Guilossou, 2019).

II.5.3.2. Activation chimique

Se déroule en une seule étape. Le matériau est imprégné d'un agent d'activation (acides, bases, métaux alcalinoterreux), puis chauffé entre 400 et 600°C dans une atmosphère inerte ou oxydante. Ces agents influencent la décomposition pyrolytique et empêchent la formation de goudron, augmentant ainsi la surface active du charbon (Guilossou, 2019).

Deuxième Partie : Partie expérimentale

Chapitre 3

Matériels et Méthodes

III.1. Prélèvements d'échantillons d'eau

Afin d'étudier du pouvoir adsorbant du charbon actif pour l'élimination de chlore des eaux naturelles, nous avons choisi l'eau de robinet et l'eau minérale commercialisée de la marque Guedila. Ce sont des eaux souterraines de la région de Biskra et sont des eaux destinées à la consommation humaine (figure 2).



Figure 2. Échantillons d'eau utilisés dans des expériences d'adsorption sur CA (original).

III.1.1. Dans le cas de prélèvement à un robinet

Il est important de souligner qu'avant toute utilisation, l'eau stagnante dans les canalisations doit être éliminée. Pour ce faire, l'approche recommandée est d'ouvrir le robinet à plein débit pendant 5 à 10 secondes, puis de continuer à le faire couler à débit moyen pendant environ 2 minutes, afin d'assurer un réapprovisionnement en eau adéquat et de réduire le risque de contamination (Rodier *et al.*, 2009).

III.2. Caractéristiques physico chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques d'une eau jouent un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie...). Ainsi nous avons réalisé quelques analyses physico-chimiques des eaux prélevées.

III.2.1. Méthodes d'analyse des paramètres physicochimique

Les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines sont déterminés par les méthodes standards d'analyse (Rodier, 2009).

III.2.1.1. PH

- **Principe**

La mesure du pH se fait selon la méthode électrométrique, par un pH-mètre qui fonctionne grâce à une source d'énergie (pile, secteur...). L'appareil est étalonné directement en unité de pH. Il comporte aussi un régulateur ou compensateur de température pour les mesures effectuées en dehors de 20°C.

- **Mode opératoire**

- ✓ Appuyer sur le bouton ON/OFF pour mettre l'appareil sous tension.
- ✓ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée et l'essuyer avec un mouchoir jetable propre.
- ✓ Plonger l'électrode dans l'échantillon contenu dans un bêcher dans lequel le barreau d'un agitateur magnétique homogénéise l'échantillon.
- ✓ Après stabilisation de l'affichage sur le cadran du pH mètre, nous avons noté le pH à la température de 20°C.
- ✓ Rincer à nouveau l'électrode avec de l'eau distillée et l'essuyer avec un mouchoir jetable propre pour réaliser la mesure suivante.

III.2.1.2. Calcium et Magnésium

- **Principe**

Titrage molaire des ions calcium et magnésium avec une solution de sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique, EDTA à pH10. Le noir chrome T qui donne une couleur rouge foncé ou violet en présence des ions calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur

- **Réactifs**

1- Solution d'EDTA N/50 :

EDTA (3,725 g) après déshydratation à 80°C pendant 2h

Eau distillée (1000 ml)

2- Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 2N :

NaOH (80 g)

Eau distillée (1000 ml)

3- Colorant HNS (0,20 g)

- **Mode opératoire**

- ✓ Dissoudre 0,20 g de colorant (HNS) dans 10ml d'eau à analyser
- ✓ Ajouter 40ml d'eau distillée
- ✓ Ajouter 2ml de NaOH (2N)
- ✓ ET titrage avec l'EDTA jusqu'à obtention une couleur violet

- **Expression des résultats**

La détermination du mg/l de calcium est donnée par la formule suivante :

$$M(g/l) Ca^{2+} = V \text{ EDTA} \times M(Ca^{2+}) / M(Ca^{2+}) = 40,08 \text{ g}$$

La détermination du mg/l de magnésium est donnée par la formule suivant :

$$M(g/l) Mg^{2+} = V (Mg^{2+}) \times M (Mg^{2+}) / M (Mg^{2+}) = 24,312 \text{ g}$$

III.2.1.3.Sulfates

- **Principe**

Les ions sulfates sont précipités et passés à l'état de sulfate de baryum.

En présence de Ba Cl₂



- **Réactifs**

1-Solution stabilisante :

Acide chlorhydrique (60 ml)

Ethanol (200 ml)

Chlorure de sodium (150 g)

Glycérol (100 ml)

Eau distillée (1000 ml)

2-Solution de chlorure de baryum :

Chlorure de baryum (150 g)

Acide chlorhydrique (5 ml)

Eau distillée (1000 ml)

- **Mode opératoire**

- ✓ Prendre 25 ml d'eau à analyser puis compléter à 100 ml d'eau distillée (mélange 1).
- ✓ Prendre 20 ml du mélange I puis compléter à 100 ml d'eau distillée.
- ✓ Ajouter 5 ml de la solution stabilisante.
- ✓ Ajouter 2 ml de chlorure de baryum.
- ✓ Agiter énergiquement pendant 2 min.
- ✓ Passer au spectrophotomètre - 420 nm.

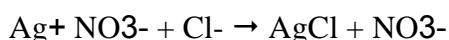
- **Expression des résultats**

Le résultat est donné directement en mg/l.

III.2.1.4.Chlorure

- **Principe**

Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur



- **Réactifs**

1- Solution de nitrate d'argent à 0,01 N :

AgNO₃ (1,6987 g)

Eau distillée (1000 ml)

2-Indicateur coloré K₂CrO₄ à 10%:

Chromate de potassium K₂CrO₄ (10 g)

Eau distillée (100 ml)

3- Solution de chlorure à 71mg/l :

Chlorure d'ammonium NH₄Cl (0,107 g)

Eau distillée (1000 ml)

- **Mode opératoire**

- ✓ Prendre 5 ml d'eau à analyser.
- ✓ Ajouter 2 gouttes de K₂CrO₄ (coloration jaunâtre).
- ✓ Titrer avec AgNO₃ à 0,01 N jusqu'à coloration brun-rougeâtre.

- **Expression des résultats**

La détermination du mg/l de chlorure est donnée par la formule suivant :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{V \text{ AgNo}_3 \times C \text{ AgNo}_3 \times F \times M_{\text{Cl}} - v \text{ AgNo}_3 \times (0,01 \times 35,5 \times 1000) \times F}{P_E} \times \frac{5}{5}$$

V_{AgNo3}: Volume d' AgNO₃ nécessaire pour le dosage de l'échantillon

C_{AgNo3} : Concentration molaire d'AgNO₃ (0,01 N)

M_{Cl-} : Masse molaire de chlorure en g

PE : Prise d'essai

F : Facteur de facteur de correction du titre d'Ag NO,

Pour le F:

- ✓ Prendre 5 ml de la solution mère à 71 mg/l
- ✓ Ajouter 2 gouttes de l'indicateur coloré
- ✓ Doser par AgNO₃, à 0,01 N jusqu'au virage (Couleur brun rougeâtre)

$$F = \frac{1}{V \text{ AgNo}_3}$$

$$M(\text{g/l}) \text{ Cl}^- = V \text{ AgNo}_3 \times 71 \times F / F = 0,71$$

III.2.1.5. Potassium

- **Principe**

La spectrométrie d'absorption atomique est une technique qui s'est largement développée ces dernières années mais dont le phénomène de base était connu depuis très longtemps. Les séduisantes possibilités de la méthode et en particulier sa rapidité, l'ont fait adapter au dosage d'un certain nombre d'éléments rencontrés dans les eaux.

- **Réactifs**

1- Acide nitrique.

2- Solution mère étalon de potassium à (100 mg/L) :

Chlorure de potassium déshydraté (190,7 mg)

Eau déionisée ou ultra-pure q.s.p. (1 L)

3- Solution fille étalon de potassium à (2 mg/L).

Préparer, à partir de la solution fille, des dilutions dans l'eau déionisée ou ultra-pure (acidifiée à pH < 2 par de l'acide nitrique) couvrant la gamme de concentrations souhaitées (max. : 2 mg/L).

- **Mode opératoire**

Nébuliser l'eau à analyser dans une flamme air-acétylène légèrement oxydante en intercalant de l'eau ultra-pure entre chaque échantillon. Effectuer les lectures à la longueur d'onde de (766,5 nm).

III.2.1.6. Sodium

- **Principe**

Pour un atome à l'état libre, le passage de l'état fondamental à l'état excité est conditionné à la fourniture d'un quantum d'énergie correspondant à la différence d'énergie entre

le niveau excité En et le niveau fondamental E0, plusieurs transitions électroniques étant possibles suivant la quantité d'énergie fournie, comme le montre le diagramme d'énergie ci-dessous. Ce transfert

Correspond à une absorption d'énergie, qui peut être réémise spontanément sous forme de photons lors du retour à l'état fondamental initial

- **Réactifs**

1- Acide nitrique.

2- Solution étalon de sodium ou de potassium à (1 g/L) :

Chlorure de sodium pur déshydraté (2,542 g)

Eau déionisée q.s.p. (1 000 mL)

3- Solution étalon de potassium à (1 g/L) :

Chlorure de potassium déshydraté (1,907 g)

Eau déionisée q.s.p. (1 000 mL)

- **Établissement de la gamme d'étalonnage**

Préparer à partir de chacune des solutions étalons quatre dilutions couvrant la gamme des concentrations souhaitées.

- **Mode opératoire**

Nébuliser l'échantillon dans une flamme air-acétylène en intercalant de l'eau permutée entre chaque solution. Effectuer les lectures au spectromètre de flamme à la longueur d'onde de (589 nm) pour le sodium et (766,5 nm) pour le potassium. Régler le zéro de l'appareil avec de l'eau déionisée. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

III.3. Caractéristiques de charbon actif utilisé

Norit PK 1-3 est un charbon actif granulaire utilisable dans une large gamme d'applications liées à l'eau, notamment le traitement de l'eau potable et des eaux de processus. Norit PK 1-3 est produit par activation à la vapeur (figure 3).

- ✓ Valeur de réduction de moitié de la déchloration est 5 cm.

Tableau 1. Les caractéristiques physique-chimique de charbon actif utilisé.

Granulométrie > 3,15 mm	max. 10 % massique
Granulométrie < 0,71 mm	max. 5 % massique
Surface totale (B.E.T.)	875 m ² /g
Masse volumique apparente	290 kg/m ²
Masse volumique après lavage et égouttage	255 kg/m ²
Dimension efficace D	1,2 mm
Coefficient d'uniformité	1,8
PH	alcalin
Indice d'iode	800

**Figure 3.** Charbon actif utilisé dans les essais d'élimination de chlore (original).

III.4. Dosage de chlore

En présence de chlore libre, la DPD (diéthyl-p-phényldiamine) prend une coloration rouge d'intensité proportionnelle à la teneur en chlore, susceptible d'être dosée par spectrophotométrie (figure 4) .

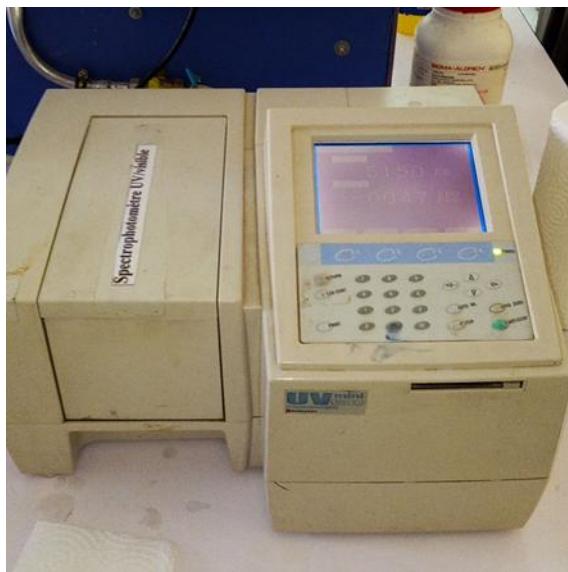


Figure 4. Spectrophotométrie UV-Visible (original)

Cette méthode est peu sensible aux interférences dues aux Fe, Mn, nitrites, nitrates et permet de doser les différentes formes de chlore actif : Cl₂ libre, monochloramines, di...et trichloramines, chlore total.



Figure 5. Réactif DPD No.1 pour dosage le chlore libre (original).

III.4.1. Préparation d'une solution à étudier

- Dissoudre, dans un erlenmeyer, un sachet de DPD dans un échantillon de 10 ml de solution à analyser (ici, une solution d'eau de javel diluée à C_m = 2 mg/L en chlore libre).

- Boucher, mélanger.
- Verser dans une cuve en verre de 10 ml.
- Rechercher le maximum d'absorption à l'aide de la fonction automatique du spectrophotomètre : $\lambda_{\text{max}} =$
- Régler le spectrophotomètre en mode manuel à la longueur d'onde $\lambda_{\text{max}} = 515\text{nm}$
- Effectuer un « zéro » avec de l'eau distillée.

III.4.2. Étalonnage du spectrophotomètre

On cherche à produire différentes solutions d'eau de Javel diluée par dilution d'une solution mère S0 à 2 mg/L de chlore libre.

- Calculer les volumes utilisés afin de préparer les différentes solutions dans des béchers.
- Verser dans une cuve et additionner d'un sachet de DPD.
- Boucher, mélanger.
- Mesurer leurs absorbances.

Tableau 2. Données de la courbe d'étalonnage pour le dosage de chlore dans l'eau distillée.

Solution	S0	S1	S2	S3	S4	S5
Concentration (mg/L)	2	1,5	1	0,5	0,3	0,1
Absorbance à 515 nm	0,493	0,36	0,246	0,125	0,072	0,024

- Tracer la courbe $\text{Absorbance} = f(C_m \text{ chlore})$.

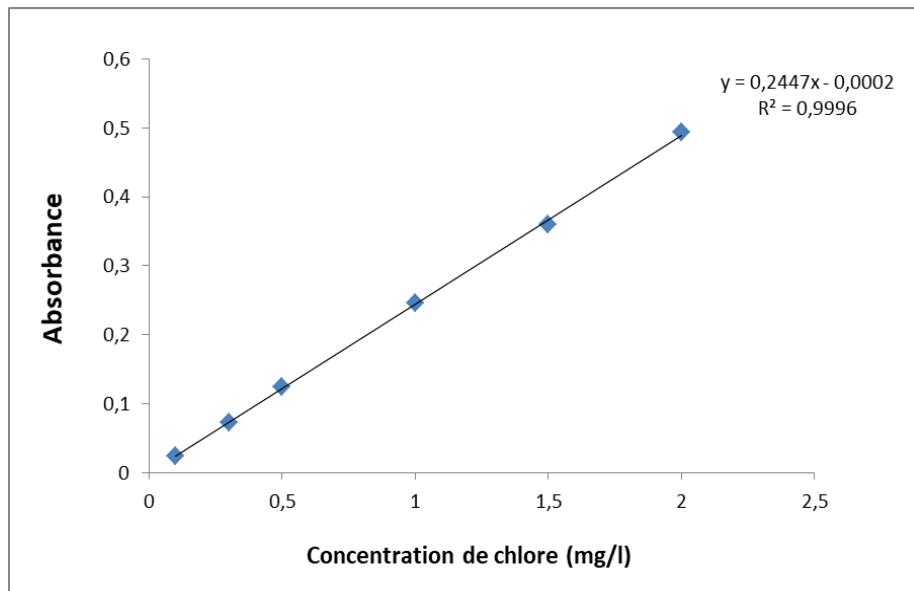


Figure 6. La courbe d'étalonnage.

III.5. Description des essais

Les essais d'élimination de chlore ont été réalisés en discontinu sur des agitateurs magnétiques. On fait agiter l'eau minéralisée ou l'eau de robinet avec une dose constante de l'adsorbant.

La séparation solide/liquide de l'échantillon prélevé est réalisée par filtration sous vide à l'aide d'un papier filtre de 0,45 µm de porosité. Pour chaque échantillon filtré on a mesuré la teneur de chlore résiduel.

Différents essais ont été effectués permettant d'examiner l'influence de certains paramètres réactionnels sur l'élimination de chlore sur l'adsorbant CA tel que : la cinétique de la rétention de chlore par l'adsorbant, le pH de traitement et l'effet de la dose de l'adsorbant.

III.5.1. Cinétique d'adsorption

Les cinétiques de l'élimination de chlore des eaux souterraines sont réalisées sur un agitateur magnétique (figure 7), par mise en contact de 1 L de l'échantillon à déchlorer avec une dose constante de charbon actif 1g/l.



Figure 7. Agitateur magnétique (original)

- Les solutions traitées sont agitées pendant 2 heures.
- Les prélèvements au cours du temps ($t=0$; $t=50$ min ; $t=2$ heures) pour les deux échantillons.
- Le dosage de la teneur résiduelle de chlore permet de suivre la cinétique de sa rétention sur le charbon actif en grains (CAG).
- Rincer les tubes à essai avec l'échantillon en laissant deux ou trois gouttes dans le tube.
- Ajouter une pastille DPD N° 1, écraser la pastille avec le pilon puis remplir le tube à essai avec l'échantillon jusqu'au repère de 10 ml.
- Mélanger doucement à l'aide du pilon pour faire dissoudre la pastille et veiller à ce que les particules restantes se soient déposées.
- Procéder Pour obtenir des mesures précises, remuer doucement le tube jusqu'à la résorption des bulles.
- Mesurer leurs absorbances par spectrophotométrie UV-Vis à longer d'onde 515 nm.



Figure 8. Détection du chlore libre dans l'eau par la méthode DPD (original).

III.5.2. Effet du pH de traitement

Nous avons effectué ces tests en préparant trois échantillons d'eau du robinet et trois échantillons d'eau commerciale de Guedila (figure9).



Figure 9. Préparation d'échantillons d'eau avec différents pH.

Le pH des traitements a été modifié et contrôlé dans une plage comprise entre 4 et 9, selon les conditions expérimentales.

Le pH des solutions a été ajusté à la valeur souhaitée à l'aide :

- HCl (0,1 N) pour abaisser le pH.
- NaOH (0,01 N) pour augmenter le pH.

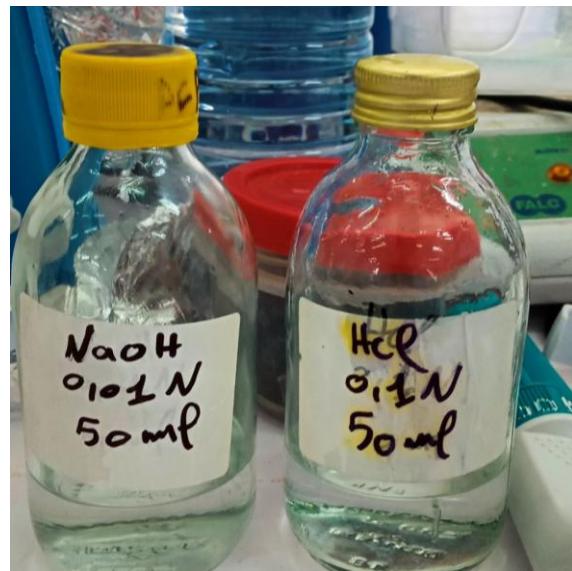


Figure 10. Solutions d'ajustement du pH (original).

Le pH a été maintenu constant tout au long de l'expérience en effectuant des ajustements réguliers si nécessaire. Les valeurs de pH ont été mesurées à l'aide d'un pH-mètre (figur 11) calibré, assurant la précision du suivi.

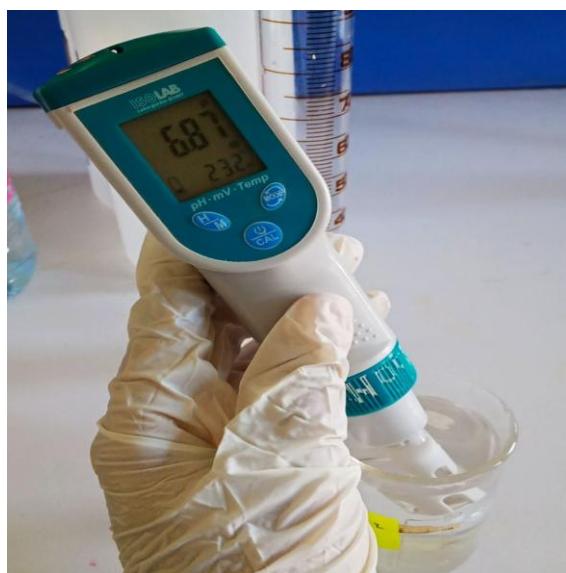


Figure 11. PH mètre (original).

Tableau 3. PH de chaque échantillon.

Eau de Guedila		Eau de robinet	
Echantillon 1	PH= 4	Echantillon 1	PH = 4
Echantillon 2	PH=7,35	Echantillon 2	PH = 6,98
Echantillon 3	PH=9	Echantillon 3	PH = 9

Avec l'ajout de 1 g / 100 ml de CA à chaque échantillon Pendant 2 heures (figure 12).

**Figure 12.** Expérience sur l'effet du pH sur l'absorption du chlore par le charbon actif (original).

- Après la filtration, Ajouter une pastille DPD N° 1, écraser la pastille avec le pilon puis remplir le tube à essai avec l'échantillon jusqu'au repère de 10 ml.
- Mélanger doucement à l'aide du pilon pour faire dissoudre la pastille et veiller à ce que les particules restantes se soient déposées.
- Mesurer leurs absorbances par spectrophotométrie UV-Vis à longer d'onde 515 nm.

III.5.3. Effet de la dose du charbon actif

L'étude de l'effet de la dose de l'adsorbant sur la déchloration des eaux souterraines a été réalisée en préparant trois échantillons d'eau du robinet et trois échantillons d'eau commerciale

de Guedila, avec variant la dose du charbon actif de 0,1 à 2 g/l pour chaque échantillon Pendant 2 heures.

Les échantillons des solutions prélevés sont filtrés sous vide à l'aide d'un papier filtre à 0,45 µm de porosité (figure 13).



Figure 13. Filtration d'échantillons (original)

- Pour chaque échantillon filtré on a mesuré la teneur de chlore.
- Ajouter une pastille DPD N° 1, écraser la pastille avec le pilon puis remplir le tube à essai avec l'échantillon jusqu'au repère de 10 ml.
- Mélanger doucement à l'aide du pilon pour faire dissoudre la pastille.
- Mesurer leurs absorbances par spectrophotométrie UV-Vis à longer d'onde 515 nm.

Afin d'observer le pouvoir adsorbant du charbon actif, on calcule le rendement (R%) d'élimination suivant la formule :

$$R \% = ((C_0 - C_t)/C_0) \times 100$$

Où : C₀ et C_t représentent respectivement les concentrations initiales et résiduelles en chlore exprimées en mg/l.

Chapitre 4

Résultats et Discussion

Ce chapitre présent une analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de l'élimination du chlore des eaux naturelles à l'aide du charbon actif. Cette analyse vise à interpréter l'influence de divers paramètres opératoires, tels que le temps de contact, le pH et la dose de charbon actif, sur l'efficacité du processus d'adsorption.

Les résultats sont examinés en les confrontant aux données issues de la littérature scientifique, dans le but de mieux appréhender les mécanismes d'adsorption impliqués et de formuler des recommandations pertinentes en vue d'une application pratique du procédé.

IV.1. Caractéristiques des eaux analysées

IV.1.1. Caractéristiques physico chimiques

Tableau 4. Caractéristiques physico chimiques des eaux minéralisées testées.

Paramètre	Eau de Guedila	Eau de robinet	Concentration selon le JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13 9 mars 2014
PH	7,35	6,98	$\geq 6,5$ et ≤ 9
Calcium (mg/l)	78	198	200
Magnésium (mg/l)	37	65	200
Sodium (mg/l)	29	663,4	200
Potassium (mg/l)	2	3,56	12
Sulfates (mg/l)	95	82,61	400
Chlorure (mg/l)	40	593	500
Nitrate (mg/l)	4,5	-	50
Nitrite (mg/l)	<0,01	-	0,2

IV.1.2. Comparaison entre l'eau de Guedila et l'eau de robinet

L'efficacité de l'élimination du chlore par adsorption sur charbon actif varie significativement entre les deux types d'eau étudiés : l'eau minérale Guedila et l'eau du robinet.

Cette différence est directement attribuée aux propriétés physiques et chimiques intrinsèques de chaque type d'eau, qui à leur tour influencent grandement le mécanisme d'adsorption.

IV.1.2.1. Composition ionique

L'eau du robinet analysée dans cette étude présente des concentrations nettement plus élevées en sodium (663,4 mg/L), en chlorures (593 mg/L) et en calcium (198 mg/L) par rapport à l'eau de Guedila : sodium (29 mg/L), chlorure (40 mg/L) et calcium (78 mg/L).

Selon Morlay *et al* (2006), Dans la phase liquide, les solutés et les solvants sont en compétition pour les sites d'adsorption à la surface du solide

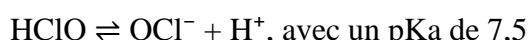
Le processus d'absorption des composés inorganiques dépend principalement des interactions ioniques. Il est important de prendre en compte les propriétés du matériau absorbant, c'est-à-dire la gamme de formes chimiques qu'il peut prendre en solution, afin de déterminer avec précision la charge électrique qu'il porte et d'évaluer son comportement par rapport au matériau absorbant (Morlay *et al.*, 2006).

L'influence des ions en solution sur le processus d'adsorption est significative. Par exemple, les ions sodium (Na^+) et calcium (Ca^{2+}) sont susceptibles de concurrencer le chlore pour les sites d'adsorption actifs à la surface du charbon actif, réduisant ainsi l'efficacité de l'élimination du chlore (Ayrancı et Duman, 2005).

IV.1.2.2. pH initial

Le pH initial de l'eau de robinet ($\approx 6,98$) est légèrement plus favorable pour l'adsorption que celui de Guedila ($\approx 7,35$).

Le pH influence directement la répartition des formes chimiques du chlore libre en solution, selon l'équilibre suivant :



À pH 7, l'acide hypochloreux (HClO) est majoritaire, représentant environ 75 % des espèces, contre 25 % pour l'ion hypochlorite (OCl^-). Lorsque le pH augmente au-delà de cette valeur, l'équilibre se déplace en faveur de la forme ionisée OCl^- (Bingjing *et al.*, 2019).

Le charbon actif présente une affinité plus élevée pour HClO que pour OCl^- . Par conséquent, l'efficacité d'adsorption du chlore libre par le charbon actif augmente à mesure que le pH de la solution diminue (Bingjing *et al.*, 2019).

IV.2. Cinétique d'adsorption

vitesse du processus d'élimination du chlore par le charbon actif. Dans cette étude, les essais ont été réalisés avec une dose constante de 1 g/L de charbon actif sur deux types d'eaux : l'eau minérale de Guedila et l'eau de robinet. Les mesures ont été prises à trois intervalles de temps : 0 min, 50 min, et 120 min.

IV.2.1. Eau de Guedila

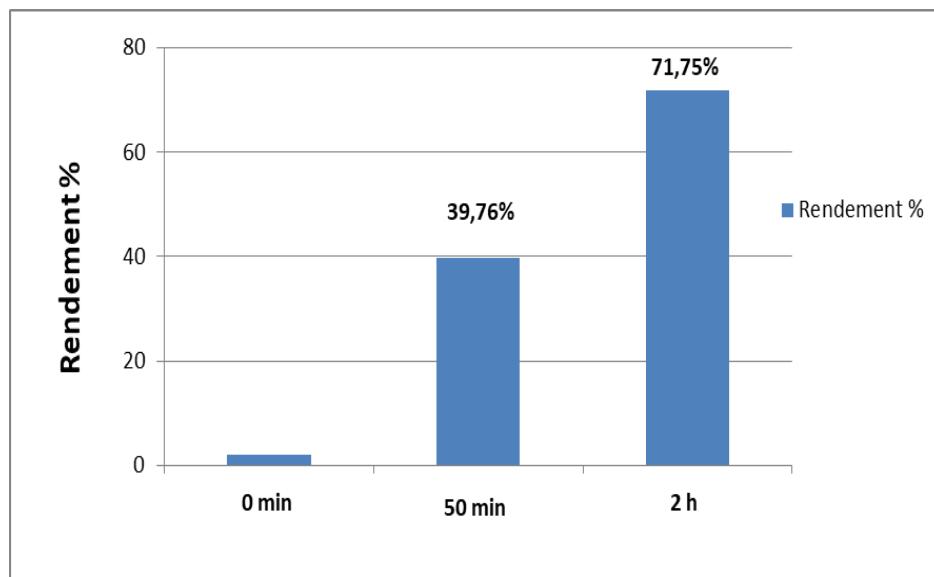


Figure 14. Effet du temps d'agitation sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de guedila.

IV.2.2. Eau de robinet

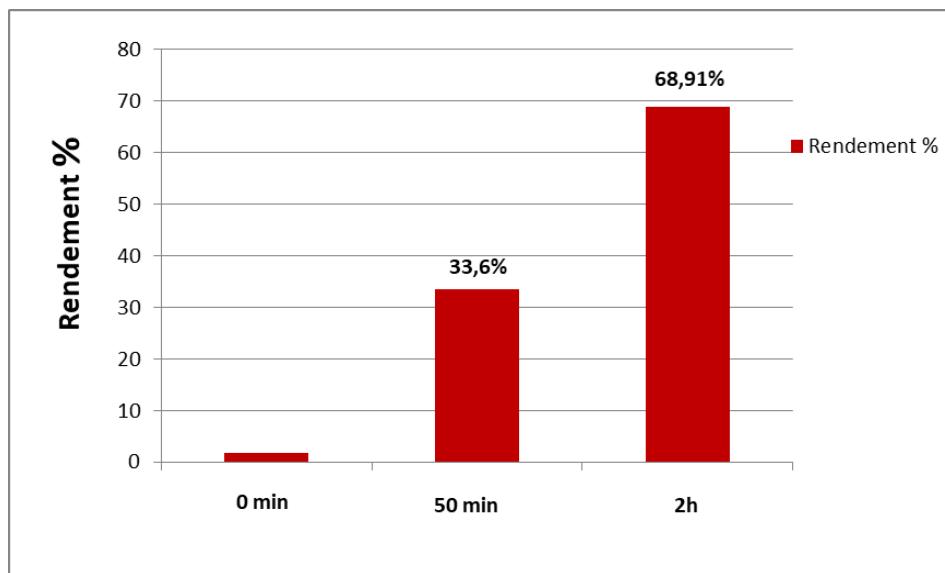


Figure 15. Effet du temps d'agitation sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de robinet.

Il est à noter que, dans les deux types d'eau étudiés (Guedila et robinet), une réduction significative du chlore libre a été observée durant les 50 premières minutes de l'expérimentation. Au-delà de 120 minutes, le taux d'élimination tend vers un état de stabilité, suggérant ainsi l'atteinte d'un état de saturation ou d'équilibre approximatif de la capacité d'adsorption du charbon utilisé.

Les capacités d'élimination ont augmenté progressivement avec l'allongement du temps de contact. Le charbon actif a agi par un double mécanisme impliquant l'adsorption physique du chlore libre et sa réduction chimique (Bingjing *et al.*, 2019).

Ce phénomène s'explique par la présence initiale d'un grand nombre de sites actifs non saturés à la surface du charbon actif. À mesure que ces sites se remplissent, le taux d'adsorption diminue (Bansal et Goyal, 2005).

Le processus d'absorption se poursuit principalement pendant les deux premières heures, jusqu'à atteindre un état presque stable, tandis que le processus de réduction catalytique se poursuit. Ainsi, l'adsorption était le mécanisme dominant au cours de la phase initiale, tandis que la réduction catalytique contribuait à la décomposition continue du chlore libre adsorbé,

prolongeant ainsi l'efficacité du système d'élimination du chlore à base de charbon actif (Bingjing *et al.*, 2019).

Ce double mécanisme adsorption physique et réduction chimique renforce l'efficacité de l'élimination. Le charbon actif granulaire (Norit PK 1-3), utilisé dans cette étude, présente une grande surface spécifique ($875 \text{ m}^2/\text{g}$), ce qui améliore considérablement la captation des molécules de chlore.

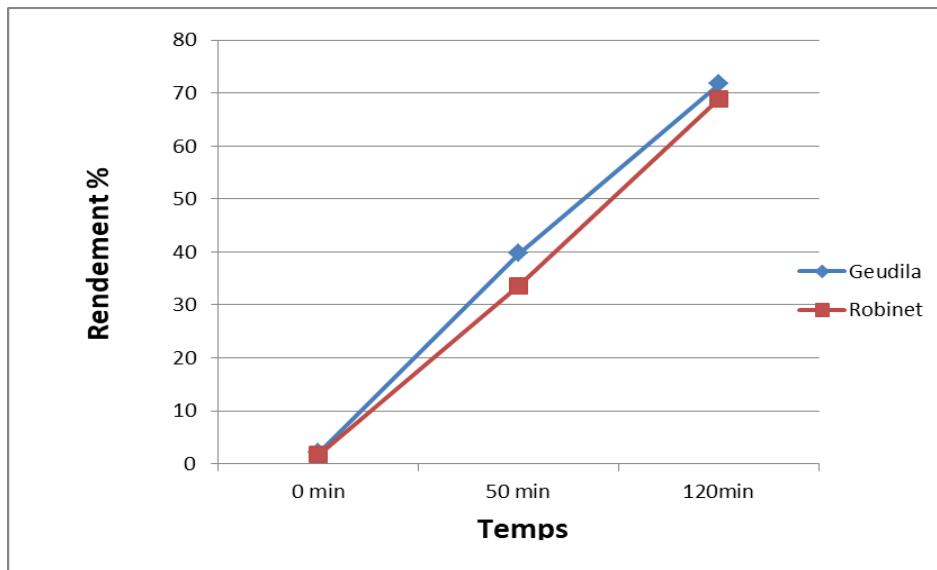


Figure 16. Evolution du rendement déchloration des eaux en fonction du temps d'agitation différents (0 min , 50 min , 2 heure).

Les résultats obtenus mettent en évidence une efficacité supérieure de l'élimination du chlore dans l'eau minérale commerciale (Guedila) par rapport à l'eau du robinet (figure 16). Cette différence peut être attribuée à la composition de l'eau Guedila, caractérisée par une plus faible teneur en matières organiques et en ions concurrents, ce qui favorise une plus grande disponibilité des sites d'adsorption du charbon actif pour le chlore.

Selon Moreno-Castilla (2004), le charbon actif se distingue par sa structure poreuse, laquelle facilite l'adsorption de solutés par le biais de mécanismes de physisorption ou de chimisorption.

Dans un milieu caractérisé par une faible concentration en composés concurrents, à l'instar de l'eau minérale, les sites d'adsorption demeurent largement disponibles, permettant une fixation efficace des molécules de chlore. Inversement, la présence de substances telles que les acides

humiques, les ions carbonate ou les chloramines dans l'eau du robinet peut interférer avec ces mécanismes, entraînant une réduction significative de la performance du charbon actif (Moreno-Castilla, 2004).

IV.3. Effet du pH de traitement

Le pH constitue un paramètre déterminant qui influence à la fois la forme chimique du chlore libre présent dans l'eau et les propriétés de surface, notamment la charge électrostatique, du charbon actif. Dans le cadre de cette étude, des essais ont été conduits à trois valeurs de pH distinctes (4, 7 et 9) et ce, pour deux types d'eau : l'eau de Guedila et l'eau du robinet.

IV.3.1. Eau de Guedila

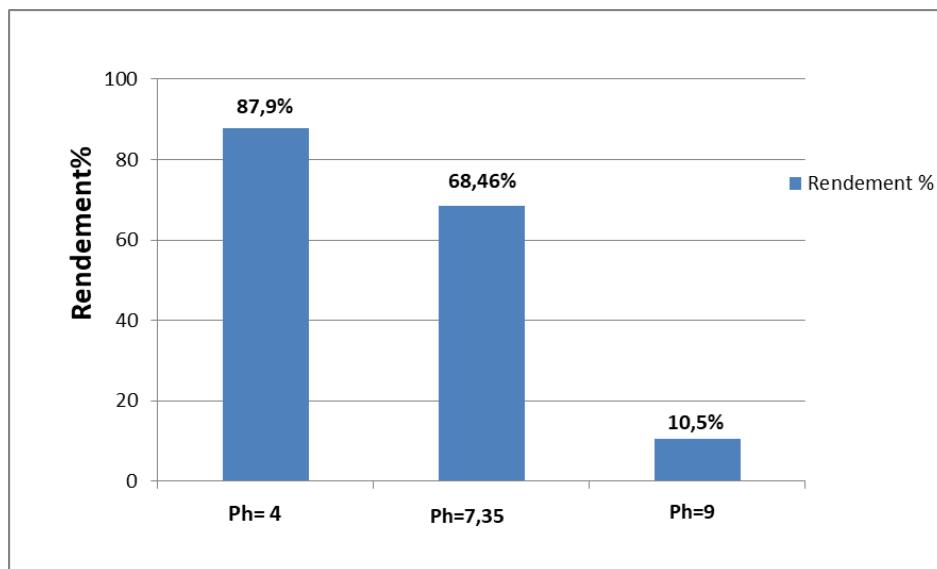


Figure 17. Effet du pH de traitement sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de guedila.

IV.3.2. Eau de robinet

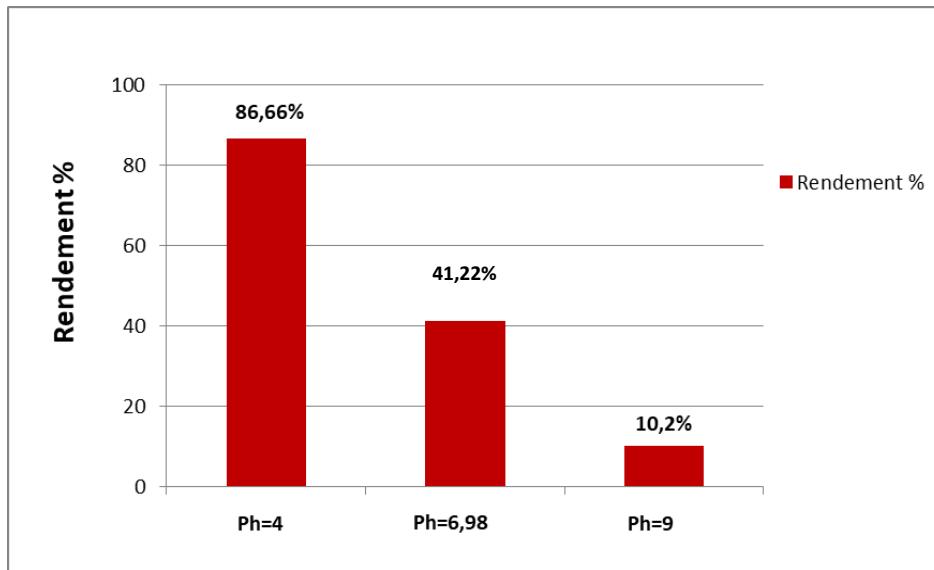


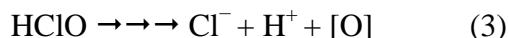
Figure 18. Effet du pH de traitement sur l'élimination de chlore par adsorption sur CA en eau de robinet.

L'interaction entre le charbon actif et le chlore libre peut s'effectuer via deux types de réactions chimiques distinctes :

- ✓ Le premier type de réaction (décrit par les équations 1 et 2) conduit à la formation de composés organiques oxygénés à la surface du charbon actif, entraînant subséquemment une augmentation nette de sa masse.



- ✓ Le second type de réaction (illustré par les équations 3 et 4) génère du dioxyde de carbone comme produit final, ce qui se traduit par une perte de masse nette du matériau adsorbant.



Où C^* est le site actif du carbone et C^*O est la surface des oxydes (Bingjing *et al.*, 2019).

De plus, à des pH élevés, la surface du charbon actif acquiert une charge négative, ce qui limite l'adsorption des anions en raison des interactions répulsives d'origine électrostatique entre ces derniers et la surface du matériau (Yousef *et al.*, 2014).

À pH 7, l'acide hypochloreux (HClO) est majoritaire. Lorsque le pH augmente au-delà de cette valeur, l'équilibre se déplace en faveur de la forme ionisée (OCl^-), le charbon actif présente une affinité plus élevée pour HClO que pour OCl^- (Bingjing *et al.*, 2019).

Par conséquent, l'efficacité d'adsorption du chlore libre par le charbon actif augmente à mesure que le pH de la solution diminue (Bingjing *et al.*, 2019).

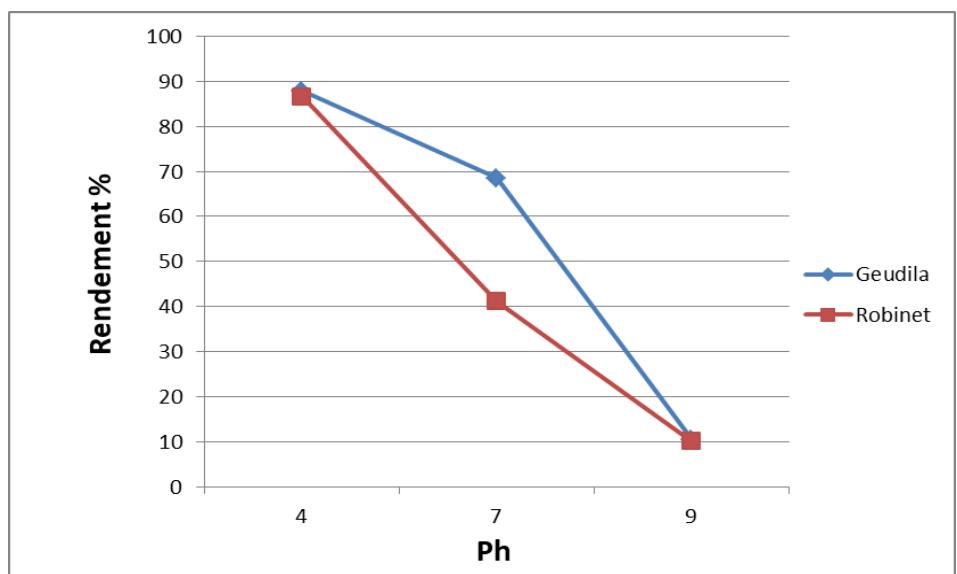


Figure 19. Evolution du rendement de déchloration des eaux en fonction du pH de traitement différents.

La courbe Evolution du rendement de déchloration des eaux en fonction de différents niveaux de pH de traitement, montre la différence entre l'élimination du chlore de l'eau du guedila et de l'eau du robinet.

Alors que l'eau de guedila était plus efficace pour éliminer le chlore grâce au charbon actif (figure 19).

Cette différence d'efficacité peut s'expliquer par la composition ionique moins complexe de l'eau de Guedila. En effet, elle contient des concentrations plus faibles en ions tels que Na^+ , Ca^{2+} et Cl^- , qui sont connus pour interférer avec le processus d'adsorption. Dans le cas de l'eau

du robinet, la présence plus élevée de ces ions crée une concurrence avec les molécules de chlore pour les sites actifs du charbon actif, ce qui limite l'efficacité de l'adsorption (Ayranci et Duman, 2005).

IV.4.Effet de la dose de charbon actif

La dose de charbon actif est un paramètre déterminant dans l'optimisation du processus d'adsorption. Elle influence directement la surface disponible pour la rétention des molécules de chlore. Dans le cadre de cette étude, des essais ont été réalisés en faisant varier la concentration en charbon actif de 0,1 à 2 g/L pour les deux types d'eau testés (Guedila et eau de robinet).

IV.4.1.Eau de Guedila

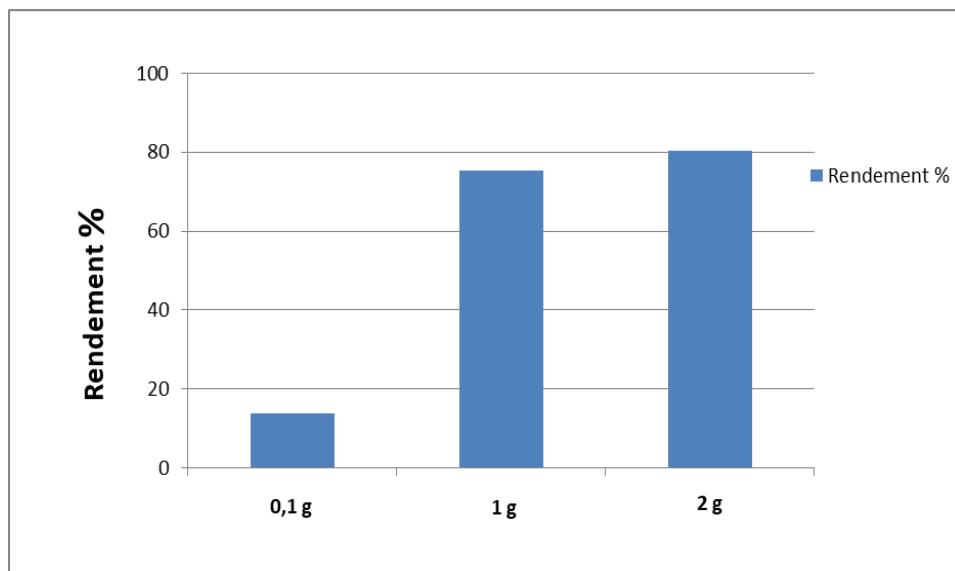


Figure 20. Rendement d'adsorption de chlore sur les différentes doses de charbon actif dans l'eau de guedila.

IV.4.2.Eau de Robinet

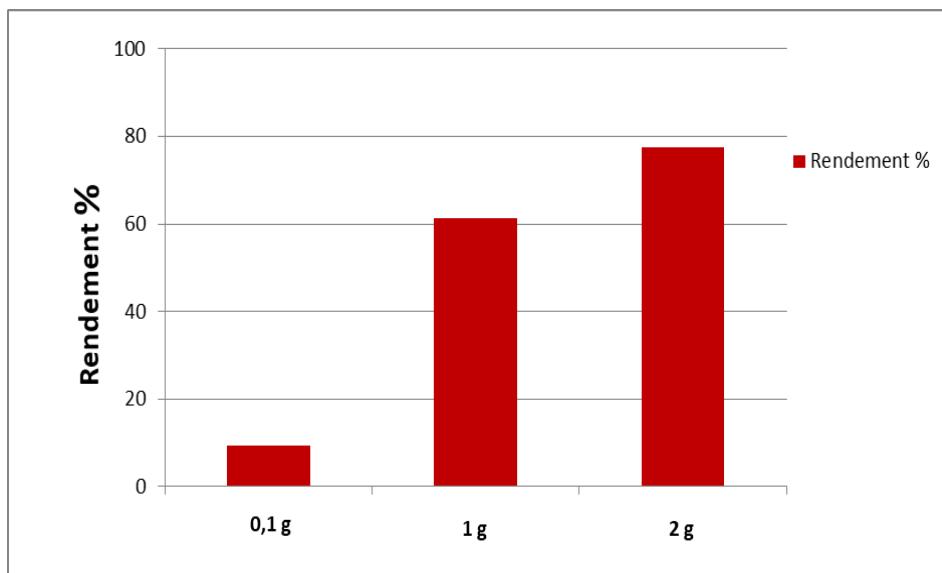


Figure 21. Rendement d'adsorption de chlore sur les différentes doses de charbon actif dans l'eau de robinet.

L'augmentation de la dose de 0,1 à 2 g/L a amélioré l'efficacité d'élimination de manière presque linéaire jusqu'à un certain point. Après une certaine dose (proche de 1,5 – 2 g/L), il n'y a pas eu d'amélioration significative, surtout dans l'eau de guedila.

En augmentant la dose d'adsorbant, on accroît proportionnellement la surface active accessible pour les interactions adsorptives (Yousef *et al.*, 2014).

Il a été observé qu'au-delà d'une certaine dose optimale de charbon actif, l'efficacité d'adsorption tend à se stabiliser. Cette phase de saturation indique que la majorité des composés adsorbables présents dans la solution aqueuse ont déjà été captés par les sites actifs disponibles. Par conséquent, l'ajout supplémentaire d'adsorbant n'entraîne pas une augmentation significative du rendement (Ahmedpour, 1997).

Selon Bansal et Goyal (2005), le phénomène d'adsorption ne dépend pas uniquement de la surface spécifique du charbon actif, mais également de la nature et de la concentration des groupes fonctionnels oxygénés présents à sa surface, en particulier les groupes acides.

Il a été observé que l'adsorption des cations métalliques augmente suite à l'oxydation du carbone, tandis qu'elle diminue après le dégazage. Cette augmentation est attribuée à la formation

de groupes acides de surface qui, en milieu aqueux, s'ionisent en libérant des ions H^+ dans la solution. Ce processus laisse derrière lui des sites chargés négativement sur la surface du charbon, favorisant l'attraction électrostatique et l'adsorption des cations métalliques (Bansal et Goyal, 2005).

En revanche, l'élimination de ces sites lors du dégazage réduit significativement la capacité du charbon à fixer ces espèces ioniques (Bansal et Goyal, 2005).

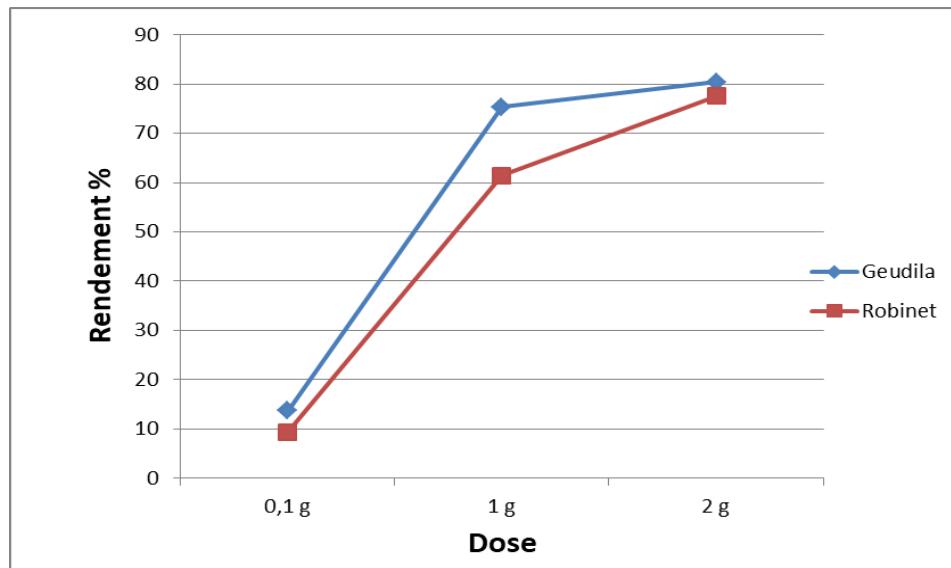


Figure 22. Evolution du rendement d'élimination de chlore des eaux en fonction de la dose de l'adsorbant (0.1 à 2 g/L).

Les rendements d'élimination du chlore se sont révélés systématiquement supérieurs pour l'eau minérale de Guedila par rapport à l'eau du robinet (figure 22).

Ce résultat confirme les résultats rapportés dans la littérature. Selon lesquels la qualité physico-chimique initiale de l'eau influence de manière significative l'efficacité des processus d'adsorption (Zhang *et al.*, 2009).

IV.5. Isotherme d'adsorption

Dans le cadre de cette étude, nous avons interprété les résultats expérimentaux en appliquant les formes linéaires des isothermes d'adsorption de Freundlich et de Langmuir, afin de modéliser le comportement du charbon actif vis-à-vis de l'élimination du chlore. Cette analyse a été menée en considérant différentes doses de charbon actif, variant de 0,1 à 2 g/L, tandis que la concentration initiale en chlore a été maintenue constante à 40 mg/L pour l'eau minérale de Guedila et à 593 mg/L pour l'eau de robinet.

Une isotherme d'adsorption représente la relation, à température constante, entre la quantité d'adsorbat fixée à l'équilibre par unité de masse d'adsorbant q_e en (mg/g) et sa concentration résiduelle en solution C_e en (mg/L). Elle constitue un outil essentiel pour évaluer l'affinité entre l'adsorbant en l'occurrence le charbon actif et l'adsorbat, ici le chlore. L'étude des isothermes d'adsorption permet ainsi d'optimiser les conditions de fonctionnement et de dimensionnement des procédés de traitement des eaux (Foo et Hameed, 2012).

IV.5.1. Modèle de Langmuir

Selon Foo et Hameed (2010) ce modèle repose sur l'hypothèse que l'adsorption se fait en une seule couche (monocouche) sur un support homogène :

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

q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g).

C_e : concentration résiduelle à l'équilibre (mg/L).

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

K_L : constante de Langmuir liée à l'affinité du site (L/mg).

IV.5.2. Modèle de Freundlich

Selon Foo et Hameed (2010) ce modèle empirique suppose une adsorption sur surface hétérogène, pouvant se produire en plusieurs couches :

$$q_e = K_F \cdot C_e^{n/1}$$

KF : constante liée à la capacité d'adsorption.

n : indicateur de l'intensité de l'adsorption.

Lorsque $< n1$, cela reflète une adsorption favorable.

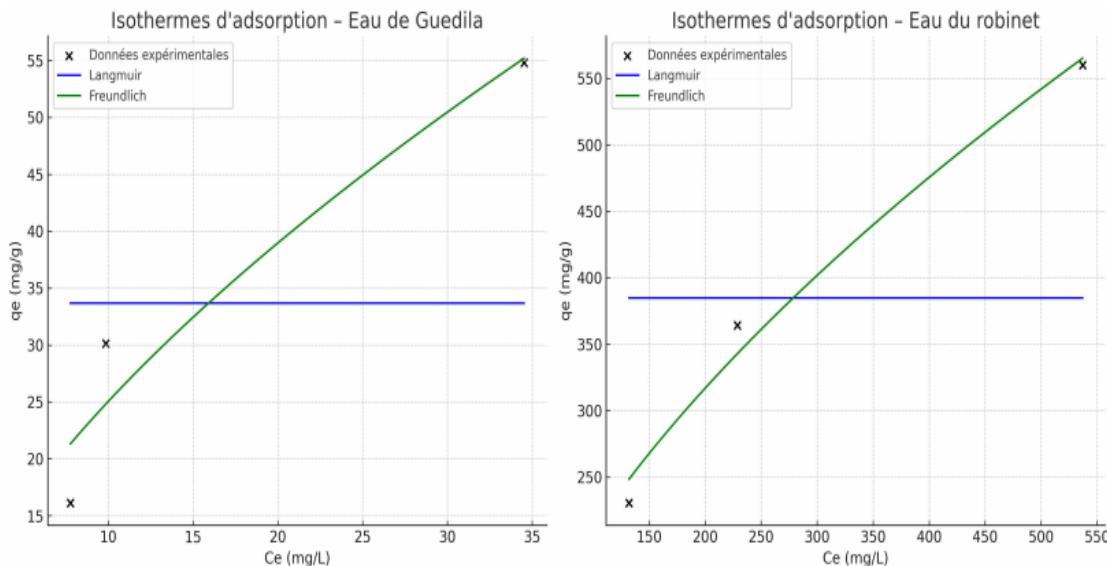


Figure 23. Isotherme d'adsorption pour l'eau du guedila et l'eau du robinet.

Le modèle de Freundlich s'est révélé plus approprié pour décrire les isothermes d'adsorption dans les deux types d'eau étudiés (valeurs réalistes de KF et $< n1$).

Le modèle de Langmuir a conduit à des constantes non réalistes (valeurs négatives de KL), indiquant une inadéquation avec les données expérimentales et suggérant que les hypothèses de surface homogène et d'adsorption en monocouche ne sont pas valides dans ce cas (Foo et Hameed, 2012).

L'eau de guedila : $n=1,57$ adsorption favorable sur un support hétérogène

L'eau du robinet : $n=1,71$ adsorption encore plus favorable malgré une concentration initiale plus élevée

Les résultats obtenus suggèrent que l'hétérogénéité structurelle du charbon actif (Norit PK 1-3), caractérisée par une distribution variée de sites d'adsorption et de tailles de pores, rend le modèle de Freundlich plus apte à décrire le comportement d'adsorption observé (Bansal et Goyal, 2005 ; Foo et Hameed, 2010).

IV.6.Compréhension le mécanisme de déchloration par adsorption sur charbon actif

L'élimination du chlore libre par le charbon actif repose sur un double mécanisme : une adsorption initiale prédominante, suivie d'une réduction catalytique. L'adsorption constitue l'étape principale au début du processus, permettant la fixation du chlore libre à la surface du charbon, tandis que la réduction chimique intervient ensuite pour transformer le chlore adsorbé en espèces inoffensives, telles que les ions chlorure (Cl^-) (Bingjing *et al.*, 2019).

- ✓ Selon Guilloisou (2019) L'adsorption physique, qui est principalement assurée par des interactions de type Van der Waals entre les molécules de chlore notamment l'acide hypochloreux (HOCl) et la surface poreuse du charbon actif. Ce phénomène est favorisé par la très grande surface spécifique du charbon actif granulaire Norit PK 1-3 (environ $875 \text{ m}^2/\text{g}$) ainsi que par sa structure microporeuse ($< 2 \text{ nm}$).
- ✓ La réduction chimique, au cours de laquelle le chlore libre est converti en ions chlorure (Cl^-), non toxiques, par réaction avec des groupements fonctionnels réducteurs présents à la surface du charbon, tels que les fonctions phénoliques ou quinoniques (Snyder *et al.*, 2007).

L'efficacité globale du processus observée dans nos résultats, notamment à pH neutre et pour des doses optimales comprises entre 1 et 2 g/L, s'explique par cette synergie entre adsorption et réduction.

Conclusion

L'eau potable représente un enjeu crucial en matière de santé publique, en particulier dans les régions où la qualité de l'eau peut être compromise par certains procédés de traitement tels que la chloration. Bien que cette méthode soit largement utilisée pour garantir la désinfection microbiologique de l'eau, elle peut entraîner la formation de sous-produits potentiellement nocifs pour la santé humaine.

C'est dans cette optique que nous avons orienté notre étude vers l'évaluation du pouvoir adsorbant du charbon actif, dans le but de réduire la teneur en chlore libre résiduel dans des eaux naturelles destinées à la consommation.

Les essais réalisés ont permis de confirmer l'efficacité notable du charbon actif granulaire Norit PK 1-3 dans l'élimination du chlore libre présent dans deux types d'eau : l'eau minérale de Guedila et l'eau de robinet. Les résultats ont mis en évidence l'influence de plusieurs paramètres opératoires sur cette efficacité, notamment le temps de contact, avec une diminution significative du chlore observée dès les 50 premières minutes suivie d'une stabilisation après deux heures, le pH de traitement, où une adsorption optimale a été enregistrée dans une plage allant de 4 à 7, et enfin la dose de charbon actif, dont l'augmentation a amélioré le rendement jusqu'à atteindre un seuil de saturation. Dans l'ensemble, l'eau de Guedila a montré de meilleures performances d'adsorption, ce qui pourrait s'expliquer par une composition ionique moins complexe que celle de l'eau de robinet.

Cependant, notre travail comporte certaines limites. Le manque d'équipements sophistiqués a pu affecter la précision de certaines mesures, et nous n'avons pas pu étudier l'impact de la température sur le processus d'adsorption, qui aurait pourtant pu influencer la cinétique observée. De plus, le temps restreint alloué à l'expérimentation n'a pas permis d'effectuer un nombre suffisant de répétitions, ce qui limite la robustesse statistique des résultats. Il convient également de noter que l'effet potentiel des ions interférents présents dans l'eau de robinet, tels que le sodium ou le calcium, n'a pas été examiné en détail.

À l'avenir, plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés, notamment l'élargissement des essais à d'autres types de charbon actif, en particulier ceux issus de matières végétales locales, ainsi que la réalisation d'analyses plus approfondies concernant les sous-produits issus de la réduction du chlore.

Une validation à l'échelle pilote ou semi-industrielle, en partenariat avec les services de gestion des eaux, permettrait également de mieux transposer ces résultats à des conditions d'utilisation réelle. Bien que cette étude reste modeste, elle constitue, à notre échelle, une première approche expérimentale dans un domaine aussi complexe et nous espérons qu'elle pourra encourager de futures recherches dans le domaine du traitement de l'eau.

Références bibliographique

- Ahmedpour, A. (1997). The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation . *Carbon* , 471-497.
- Arouya, K. (2022). Pollution des eaux : impact des eaux usées sur la qualité des eaux de surface. (S. :. européennes, Ed.)
- Ayrancı, E., & Duman, O. (2005). Adsorption behaviors of some phenolic compounds onto high specific area activated carbon cloth. *Journal of Hazardous Materials* , 125-132.
- Bacchi, A., Guyomard, K., Buchet, V., Héquet, V., & Stavrakakis, C. (2021). Adsorption sur charbon actif pour une amélioration de la qualité de l'eau de mer en aquaculture 2.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). Activated carbon adsorption. Taylor & Francis Group.
- Belghiti, M. L., Chahlaoui, A., Bengoumi, D., & El moustaine, R. (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bacteriologique des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire dans la région de meknès (maroc). *larhyss journal* , 21-36.
- Bingjing, L., Huaixu, Z., Wei, Z., Liuya, H., Jun, D., Juan, H., et al. (2019). Cost effective activated carbon treatment process for removing free chlorine from water. *Asia pacific journal of chemical engineering* , 714-720.
- Chand, B., & Meenakshi, G. (2005). Activated Carbon Adsorption. taylor and francis groupe.
- Cieszynska, M., Wesolowski, M., Bartoszewicz, M., Michalska, M., & Nowacki, J. (2012). Application of physicochemical data for water-quality assessment of watercourses in the Gdansk Municipality (South Baltic coast). *Environ Monit Assess* , 1-13.
- Crini, G., & Morin, N. (2017). Eaux industrielles contaminées (Besançon ed.). Presses universitaires de Franche-Comté.
- Degrémont , S. (2005). Mémento technique de l'eau (2ème édition TOME1 ed.).
- Evens, E., & Paul, V. (2002, juin les 26,27,28 juin). *Gestion Intégrée de l'Eau en Haïti Actes du Colloque International. 2002* . Port-au-Prince.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal* , 2-10.
- Foo, K., & Hameed, B. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal* , 2-10.

- Grah, P. A. (2009). Traitement des eaux par action combinée de la photocatalyse solaire et de l'adsorption sur charbon actif : conception et réalisation du procédé. Université Paul Verlaine Metz.
- Guergazi, S., & Achour, S. (2005). caractéristiques physicochimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680 , 119-127.
- Guillossou, R. (2019). Elimination des micropolluants organiques dans les eaux résiduaires urbaines par adsorption sur charbon actif : compréhension des processus et implications opérationnelles. Thèse défendue à l'Ecole des Ponts Paris.
- Harrat, N., & Achour, S. (2010). Pollution physico-chimique des eaux de barrage de la region de el-taref. impact sur la chloration. Larhyss Journal , 47-54.
- Harris, P. J., Liu, Z., & Suenaga, K. (2008). Imaging the atomic structure of activated carbon. journal of physics: condensed matter , 20-36.
- Kahoul, M. (2017). Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'El Harrouch (wilaya de Skikda). Thèse doctorat .
- Khammar, H. (2018). Hydrochimie et qualité des eaux. University larbi ben m'hidi oum bouaghi departement des sciences de la nature et de la vie.
- Khirani, s. (2007). Procédés hybrides associant la filtration membranaireet l'adsorption / échange ionique pour le traitement des eaux usées en vue de leurréutilisation. thèse doctorat.
- Lesage, G. (2009). Etude de l'élimination de substances aromatiques dangereuses dans un procédé couplant adsorption et biodégradation. thèse doctorat.
- Marc, O. (2020). chimie de l'environnement. canada: lab édition.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials q.
- Morlay, C., Ladin, I., Chesneau, M., & Joly, J.-P. (2006). Charbons actifs et traitement des eaux. Carbone et environnement , 95-99 p.
- Ouchene, A., Khelili, H., & Guellal, M. (2020). Traitement des eaux avant la consommation par la chloration (eau de javel) pour neutraliser les virus et les bactéries affectant la santé humaine. L'impact du covid-19 sur l'environnement , 1-9.

- Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau , eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats (9éme édition ed.). Paris: Dunod.
- Savary, P. (2010). Guide des analyses de la qualité de l'eau. (Territorial, Ed.)
- Sheng, M., & Enge, W. (2023). Water, Basic science.
- Snyder, S. A., Adham, S., Redding, A. M., Cannon, F. S., DeCarolis, J., Oppenheimer, J., et al. (2007). Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Envirenental sciences t technology* , 156–181.
- Stéphane, M., & Pascale, P. (2018). Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chéliff (Algérie). université de perpiganan via domitia, et université de mostaganem.
- Swiatkowski, A., Pakula, M., Biniak, S., & Walczyk, M. (2004). Influence of the surface chemistry of modified activated carbon on its electrochemical behaviour in the presence of lead(II) ions.
- Youcef, L., Ouakouak, A., boulanouar, D., & Achour, S. (2014). Ettude du pouvoir adsorbant du charbon actif en poudre pour l'élimination des phosphates des eaux naturelles . *Larhyss Journal* , 35-46.
- Zhang, Y., Zhou, J., & Wang, L. (2009). Competitive adsorption of chloride and organic compounds onto activated carbon. *Water Research* , 159–116.

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية الكربون النشط في إزالة الكلور الحر المتبقى الموجود في المياه الطبيعية المخصصة للاستهلاك البشري. تم اختبار نوعين من المياه : مياه قديلة المعدنية ومياه الصنبور. وأظهرت الاختبارات أن ظاهرة امتصاص الكلور على الكربون النشط تتأثر بعدة معايير تشغيلية. تزداد كفاءة الامتصاص مع مرور وقت التلامس، مع ملاحظة انخفاض كبير في الكلور خلال أول 50 دقيقة، يليه الاستقرار بعد ساعتين. يلعب الرقم الهيدروجيني للمعالجة أيضاً دوراً حاسماً، حيث تم تسجيل الأداء الأمثل للامتصاص بين الرقم الهيدروجيني 4 و 7. بالإضافة إلى ذلك، فإن زيادة جرعة الكربون النشط جعلت من الممكن تحسين كفاءة الامتصاص حتى الوصول إلى عتبة التسبيح. أظهرت مياه قديلة المعدنية نتائج امتصاص أفضل من مياه الصنبور. تعود هذه النتيجة إلى الاختلاف في آليات إزالة الكلور في بيئتي التمرين المختلفتين.

الكلمات المفتاحية: الكربون النشط، المياه الطبيعية، الكلور، الامتصاص، إزالة الكلور.

Résumés

Le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité du charbon actif pour éliminer le chlore libre résiduel présent dans les eaux naturelles destinées à la consommation humaine. Deux types d'eau ont été testés : l'eau minérale et l'eau du robinet. Les tests ont montré que le phénomène d'adsorption du chlore sur charbon actif est affecté par plusieurs paramètres opérationnels. L'efficacité d'absorption augmente avec le temps de contact, avec une diminution significative du chlore observée pendant les 50 premières minutes, suivie d'une stabilisation après 2 heures. Le pH du traitement joue également un rôle crucial, puisque des performances d'adsorption optimales ont été enregistrées entre pH 4 et 7. De plus, l'augmentation de la dose de charbon actif a permis d'améliorer l'efficacité d'absorption jusqu'à atteindre le seuil de saturation. L'eau minérale Guedila a montré de meilleurs résultats d'absorption que l'eau du robinet. Ce résultat est dû à la différence des mécanismes de déchlororation dans les deux environnements de minéralisation différents.

Mots clé : Charbon actif, eaux naturelles, chlore, adsorption, déchlororation.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effectiveness of active carbon in removing residual free chlorine present in natural waters intended for human consumption. Two types of water were tested: mineral water and tap water. The tests showed that the phenomenon of chlorine adsorption on active carbon is affected by several operational parameters. Absorption efficiency increases with contact time, with a significant decrease in chlorine observed during the first 50 minutes, followed by stabilization after 2 hours. The pH of the treatment also plays a crucial role, since optimum adsorption performance has been recorded between pH 4 and 7. In addition, increasing the dose of active carbon made it possible to improve the absorption efficiency until the saturation threshold was reached. Gadila mineral water showed better absorption results than tap water. This result is due to the difference in dechlorination mechanisms in the two different mineralization environments.

Keywords: Activated carbon, natural waters, chlorine, adsorption, dechlorination.



Déclaration de correction de mémoire de master 2025

Référence du mémoire N°: / 2025 PV de soutenance N°: / 2025

Nom et prénom (en majuscule) de l'étudiant (e) : Ghachacha Radhia		لقب و إسم الطالب (ة) : دكتورة رادحاشا
La mention النقطة	Note (0/20) العلامة	L'intitulé de mémoire عنوان المذكرة
Etude du Pouvoir adsorbant du charbon actif dans l'élimination de chlore des eaux naturelles		

تصريح وقرار الأستاذ المشرف :

Déclaration : Je soussigné (e), YACRI Nabilia, (grade) M.C. à l'université de Biskra, avoir examiné intégralement ce mémoire après les modifications apportées par l'étudiant.	تصريح : أنا الممضى (ة) أستاذ دكتور نبيلية (الرببة) أمينة بيكري بجامعة بسكرة، أصرح بأنني راجحت محتوى هذه المذكرة كلها مراجعة دقيقة و هذا بعد التصحيحات التي أجرأها الطالب بعد المناقشة، وعليه أشهد بـ :
J'atteste que : * le document a été corrigé et il est conforme au modèle de la forme du département SNV * toutes les corrections ont été faites strictement aux recommandations du jury. * d'autres anomalies ont été corrigées	<ul style="list-style-type: none"> * المذكرة تتوافق بشكلها الحالي مع النموذج المعتمد لقسم حفظ الطبيعة والحياة. * المذكرة صحيحة وفقاً لكل توصيات لجنة المناقشة * تم تذكرة الكثير من الاختلالات المكتوبة بعد المناقشة

Décision : Sur la base du contenu scientifique, de degré de conformité et de pourcentage des fautes linguistiques, Je décide que ce mémoire doit être classé sous la catégorie						قرار : اعتماداً على درجة مطابقتها للمذكرة، على نسبة الأخطاء اللغوية وعلى المحتوى العلمي أقرر أن تصنف هذه المذكرة في الدرجة
acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien ممتاز	excellent ممتاز	exceptionnel متميز	
E	D	C	B	A	A+	



الأستاذ المشرف
Signature

التاريخ
2025 / 06 / 11

NB : Cette fiche doit être collée d'une façon permanente derrière la page de garde sur les copies de mémoire déposées au niveau de la bibliothèque universitaire



Déclaration de correction de mémoire de master 2025

Référence du mémoire N°: / 2025	PV de soutenance N°: / 2025
Nom et prénom(en majuscule) de l'étudiant (e) : Doriche Ouadja	
La mention T.Bien	Note(. / 20) العلامة
L'intitulé de mémoire	

تصريح وقرار الأستاذ المشرف: *

Déclaration : Je soussigné (e), YASRI Natacha, (grade) M.C.B., à l'université de Biskra, avoir examiné intégralement ce mémoire après les modifications apportées par l'étudiant.	تصريح: أنا الممضي (e) أستاذ بجامعة (الرتبة) أستاذ كلية والمشرف أصرح بأنني راجعت محتوى هذه المذكرة كلها مراجعة دقيقة و هذا بعد التصريحات التي أجرأها الطالب بعد المناقشة، وعليه أشهد بأن:
* le document a été corrigé et il est conforme au modèle de la forme du département SNV * toutes les corrections ont été faites strictement aux recommandations du jury. * d'autres anomalies ont été corrigées	* المذكرة تتوافق بشكلها الحالي مع النموذج المعتمد لقسم علوم الطبيعة والحياة. * المذكرة صحيحة وفقاً لكل توصيات لجنة المناقشة * تم تدارك الكثير من الاختلالات المكتشفة بعد المناقشة

Décision :		قرار :					
Sur la base du contenu scientifique, de degré de conformité et de pourcentage des fautes linguistiques, Je décide que ce mémoire doit être classé sous la catégorie		اعتماداً على درجة مطابقتها للنموذج ، على نسبة الأخطاء اللغوية وعلى المحتوى العلمي أقرر أن تصنف هذه المذكرة في الدرجة :					
acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien جداً جداً	excellent ممتاز	Mention ممتاز	exceptionnel متميز	
E	D	C	B	A		A+	



الأستاذ المشرف
.....

التاريخ
2025 / /

NB : Cette fiche doit être collée d'une façon permanente derrière la page de garde sur les copies de mémoire déposées au niveau de la bibliothèque universitaire