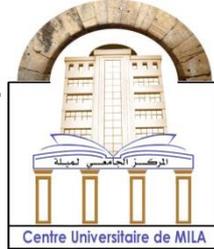


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N°Ref :

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Biologiques et Agricoles

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie Appliquée

Thème :

Élimination des ions durs par l'Amberlite IR120

Présenté par :

- **MERBAH Amal**
- **REZAIKI Roumaissa**

Devant le jury :

- KENNOUCHE. S	MCB	Président
- KHENNAOUI. B	MCA	Examineur
- BOURAS. O	MAA	Promotrice

Année Universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tous d'abord nous remercions Allah le puissant pour nous avoir donnés le courage et la Volonté d'achever ce travail

Nos plus vifs et sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à notre université boussouf –Mila, qui nous a procuré une bonne formation.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à madame **BOURAS OUASSILA**. Nous avons eu la chance de profiter de ses connaissances et remarques pertinentes et de sa disponibilité et de son attention qu'elle nous a apportée au cours de notre travail.

Veillez trouvez ici l'expression de notre profond respect et de toute notre reconnaissance.

Nos remerciements s'adressent à l'ensemble des membres du jury :

Monsieur **KENNOUCHE SALAH** président de jury et monsieur **KHENNAOUI BADIS** examinateur de ce mémoire, qui nous ont honoré d'être membres du jury de cette soutenance.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont Contribué à la réalisation de ce mémoire, les ingénieurs de laboratoire du Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf- Mila.

Nous remercions également tous les enseignants du département des Sciences de la Nature et de la Vie.

Nous avons le plaisir de remercier sincèrement toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

À mes très chers parents ;

***Fatiha Bioud, Omar** : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez, pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

*À ma chère sœur **Amina** et à mes chers frères **Ayoub, Soufyane**. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements spéciaux à **Siham, Rahma**, ainsi qu'à mon amie **Khadidja, Amina**.*

*Mes amies de mon parcours d'études et de résidence universitaire : **Afra, Aïcha, Mariem, Amal, Asma, Hayat, Rihan, Aïda, Soumia**, merci pour les moments et les souvenirs que nous avons partagés.*

À tous ceux qui sont chers à mon cœur et qui m'ont soutenu, que ce soit de près ou de loin.

Roumaïssa



Dédicace

À mes très chers parents ;

***Aissa, Mali Farid** : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez, pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

*À ma chère sœur **Maryam** et à mes chers frères **Mahdi**. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements spéciaux à **Mokhtar, Omayma, Youssef**.*

*Mes amies de mon parcours d'études et de résidence universitaire : **Amina, Rima**, merci pour les moments et les souvenirs que nous avons partagés.*

À tous ceux qui sont chers à mon cœur et qui m'ont soutenu, que ce soit de près ou de loin.

Amal

RESUME

L'étude de la dureté de l'eau a porté sur la concentration des minéraux solubles tels que les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), généralement formés lors du passage de l'eau à travers des dépôts de carbonates et d'autres minéraux, ce qui entraîne la dissolution de ces ions dans l'eau. La dureté de l'eau affecte considérablement la vie quotidienne et industrielle, pouvant causer des dépôts dans les tuyaux et les chaudières, ainsi que réduire l'efficacité des détergents. Les méthodes d'échange d'ions utilisent des résines cationiques pour adoucir l'eau, où l'eau dure est passée à travers une couche de résine chargée en ions sodium (Na^+). Au cours de ce processus, les ions calcium et magnésium sont retenus dans la résine et remplacés par des ions sodium, réduisant ainsi la dureté de l'eau.

L'efficacité de la résine Amberlite IR 120 dans l'échange d'ions a été étudiée, en particulier dans sa capacité à traiter les ions calcium et magnésium à double charge, comparativement aux ions sodium à simple charge. Les résultats ont montré que la résine Amberlite IR 120 présente une capacité d'échange ionique supérieure lorsqu'elle réagit avec les solutions de chlorure de calcium ou de chlorure de magnésium, libérant une quantité accrue d'ions hydrogène par rapport à la solution de chlorure de sodium.

Des échantillons d'eau dure ont été collectés dans différentes régions de la wilaya de Mila (Sbabikha, Aziza, Beni Oukden, Bab El Oued, Bardou, Belmarka, Dar El Hamra, Mshta Dar El echarif, Zareza, Tassadane), et l'effet de la résine Amberlite IR 120 sur ces échantillons a été testé. Les résultats ont montré l'efficacité de la résine dans la réduction de la dureté de l'eau et l'amélioration de sa qualité, où son utilisation a entraîné une diminution de la concentration des ions, par exemple à Sbabikha, Bouselah et Belmarka : avant le traitement, la dureté était de 25,84. 17,17 et 19,22 °F respectivement, la conductivité électrique était de 198,8. 515,6 et 271 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et le pH était de 7,52. 7,16 et 7,50. Après traitement, la dureté a été réduite à 1,14, 0,8 et 1,64 °F, la conductivité électrique est passée à 20,0. 21,0 et 23,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et enfin le pH à 7,35. 7,38 et 7,28.

En résumé, l'étude confirme l'efficacité des résines cationiques, en particulier de la résine Amberlite IR 120, dans le traitement de la dureté de l'eau et l'amélioration de ses propriétés, contribuant ainsi à la protection des équipements et à l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans diverses applications.

Mots clés : Échange d'ions, résine, dureté de l'eau, régénération, dessalement, traitement de l'eau.

ABSTRACT

The study focused on the hardness of water due to the concentration of soluble minerals such as calcium ions (Ca^{2+}) and magnesium ions (Mg^{2+}), typically formed as water passes through carbonate deposits and other minerals, leading to the dissolution of these ions in water. Water hardness significantly impacts daily life and industrial processes, potentially causing scale deposits in pipes and boilers, and reducing detergent efficiency. Ion exchange methods utilize cationic resins to soften water, where hard water is passed through a layer of resin charged with sodium ions (Na^+). During this process, calcium and magnesium ions are retained in the resin and exchanged with sodium ions, thereby reducing water hardness.

The effectiveness of Amberlite IR 120 resin in ion exchange was studied, particularly its ability to interact with double-charged calcium and magnesium ions compared to singly-charged sodium ions. Results showed that Amberlite IR 120 resin exhibits higher ion exchange capacity when reacting with calcium chloride or magnesium chloride solutions, releasing a greater amount of hydrogen ions compared to sodium chloride solution.

Samples of hard water were collected from various areas in the Mila province (Sbabikha, Aziza, Beni Oukden, Bab El Oued, Bardou, Belmarka, Dar El Hamra, Mshta Dar El echarif, Zareza, Tassadane), and the effect of Amberlite IR 120 resin on these samples was tested. The results showed the resin's effectiveness in reducing water hardness and improving water quality. For example, its use led to a decrease in ion concentration in Sbabikha, Bouselah, and Belmarka: before treatment, the hardness levels were 25,84, 17,17 and 19,22 °F respectively, electrical conductivity was 198,8, 515,6, and 271 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and pH was 7,52, 7,16 and 7,50. After treatment, hardness decreased to 1,14, 0,8, and 1,64 °F, electrical conductivity decreased to 20,0, 21,0 and 23,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and finally pH adjusted to 7,35, 7,38 and 7,28pH.

In summary, the study confirms the efficiency of cationic resins, especially Amberlite IR 120 resin, in treating water hardness and enhancing its properties, thus contributing to equipment protection and improving water use efficiency across various applications.

Key words: Ion exchange, resin, water hardness, regeneration, desalination, water treatment.

ملخص

تمت دراسة عسرة الماء بتركيز المعادن الذائبة فيه، مثل أيونات الكالسيوم ($+Ca2$) والمغنيسيوم ($+Mg2$)، والتي تنشأ غالبًا نتيجة مرور المياه عبر رواسب الكربونات والمعادن الأخرى، مما يؤدي إلى إذابة هذه الأيونات في الماء. تؤثر عسرة الماء بشكل كبير على الحياة اليومية والصناعية، حيث يمكن أن تتسبب في تكوين رواسب في الأنابيب والغلايات، وتقليل كفاءة المنظفات. تعتمد طرق التبادل الأيوني على استخدام راتنجات كاتيونية لتحلية المياه، حيث يتم تمرير الماء العسر عبر طبقة من الراتنج المشحون بأيونات الصوديوم ($+Na$). خلال هذه العملية، تُحتجز أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم في الراتنج، ويتم استبدالها بأيونات الصوديوم، مما يقلل من عسرة الماء.

تمت دراسة فعالية الراتنج Amberlite IR 120 في تبادل الأيونات، خاصةً في التعامل مع أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم ذات الشحنة المزدوجة، مقارنةً بأيونات الصوديوم ذات الشحنة المفردة. أظهرت النتائج أن الراتنج 120 Amberlite IR يتمتع بقدرة تبادل أيوني أعلى عند التفاعل مع أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم، نتيجة لإفرازه كمية أكبر من أيونات الهيدروجين عند تفاعله مع محاليل كلوريد الكالسيوم أو كلوريد المغنيسيوم، بالمقارنة مع محلول كلوريد الصوديوم.

تم جمع عينات من المياه العسرة من مناطق مختلفة في ولاية ميله (السيخية، عزيزة، بني وكدن، باب الواد، باردو، بو المرقة، دار الحمراء، مشتة دار الشريف، زارزة، تسدان) وتم اختبار تأثير الراتنج Amberlite IR 120 على هذه العينات. أظهرت النتائج فعالية الراتنج في تقليل عسرة الماء وتحسين جودة المياه، حيث أدى استخدامه إلى تناقص تركيز الأيونات مثلًا في السيخية، بوصولها، وبوالمركة : قبل المعالجة، العسرة المتحصل عليها 25,84. 17,17. 19,22 °F، الناقلية 198,8. 515,6. 271 μS/cm، درجة الحموضة 7,52. 7,16. 7,50 pH. بعد المعالجة، قيمة العسرة °F 1,14. 0,8. 1,64. الناقلية 20,0. - 21,0. - 23,7 μS/cm، وأخيرًا الحموضة 7,35. 7,38. 7,28 pH.

باختصار، تؤكد الدراسة على فعالية الراتنج الكاتيونية، وبالأخص الراتنج Amberlite IR 120، في معالجة عسر الماء وتحسين خصائصه، مما يساهم في حماية المعدات وتحسين كفاءة استخدام المياه في مختلف التطبيقات.

الكلمات المفتاحية: التبادل الأيوني، الراتنج، عسرة الماء، التجديد، تحلية المياه، معالجة المياه.

LISTE DES ABREVIATIONS

°F : Degré Français.

2NHR : Groupes mono-amine.

A⁻ : Indique les anions.

BBT : Bleu de bromothymol.

C⁺ : Indique un cation.

C₁₀ : Carbone numéro 10.

C₄ : Carbone numéro 4.

C_p : Capacité-massique.

C_v : Capacité volumique.

DVB : Divinylbenzène.

EDTA : L'acide éthylènediaminetétra-acétique.

éq/kg : Equivalent par kilogramme.

éq/l : Equivalent par litre.

ex⁻ : Anion échangeable.

ex⁺ : Cation échangeable.

méq^l⁻¹ : Milliéquivalent par litre.

mm : Unité de granulométrie

MF : Microfiltration.

ml/h : Millilitres par heure.

Na₂AlSi₃O₁₀ : Matériaux inorganiques.

NET : Noir ériochrome T.

NF : Nanofiltration.

Ni : Atome du Nickel.

NiCl₂ : Chlorure de nickel.

OI : Osmose inverse.

pH : Potentiel hydrogène.

R : Noyau organique.

R⁺ : Indique un polymère.

RSO₃Na : Résine sulfonique.

TDS: Total Dissolved Solids.

TH : Le titre hydrotimétrique.

UF : Ultrafiltration.

µs/cm : Micro Siemens par centimètre

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Plage de valeurs du titre hydrotimétrique en degrés français.....	5
Figure 02 : Représentation schématique d'un échangeur de cation.....	13
Figure 03 : Schéma d'une macromolécule de résine échangeuse d'ions	14
Figure 04 : Polymérisation du styrène et réticulation par le divinylbenzène	15
Figure 05 : Exemple de squelette polyacrylique	15
Figure 06 : Structure chimique d'une résine échangeuse de cations	16
Figure 07 : Structure chimique d'une résine échangeuse d'anions	18
Figure 08 : Schéma de régénération à contre-courant d'une colonne de décoloration au sein du complexe	24
Figure 09 : Les étapes de préparation des solutions.....	30
Figure 10 : Préparation d'une solution de NaCl.....	31
Figure 11 : Préparation d'une solution de NaOH.....	31
Figure 12 : Préparation d'une solution de CaCl ₂	32
Figure 13 : Préparation d'une solution de MgCl ₂	32
Figure 14 : Préparation d'une solution de CaCO ₃	33
Figure 15 : Préparation d'une solution de MgSO ₄	33
Figure 16 : Structure biochimique de l'acide éthylènediaminetétraacétique.....	34
Figure 17 : Préparation d'une solution d'EDTA.....	34
Figure 18 : Caractéristiques du Net	35
Figure 19 : Préparation d'une solution de Net.	35
Figure 20 : Etape pour préparer la solution de HCl.	36
Figure 21 : La colonne en verre.	37
Figure 22 : Méthode de régénération de la résine IR 120.	38
Figure 23 : Structure et couleur des différentes formes du BBT	39
Figure 24 : Étapes de la détermination de la capacité statique.	40
Figure 25 : Étapes de la détermination de la capacité dynamique.	44
Figure 26 : Multi parameter.	51
Figure 27 : pH-mètre.....	51
Figure 28 : Méthode de mesure du pH et Conductivité.	53
Figure 29 : Montage de dosage.	54
Figure 30 : Etapes pour déterminer la dureté de l'eau après traitement.	57
Figure 31 : Résultats pour la capacité statique et dynamique de la résine Amberlite IR 120	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Les caractéristiques de l'Amberlite IR 120	36
Tableau 02 : Les résultats expérimentaux (Cas : NaCl).	41
Tableau 03 : Les résultats expérimentaux (Cas : CaCl ₂).	42
Tableau 04 : Les résultats expérimentaux (Cas : CaCO ₃).....	42
Tableau 05 : Les résultats expérimentaux (Cas : MgCl ₂).	43
Tableau 06 : Les résultats expérimentaux (Cas : MgSO ₄).....	43
Tableau 07 : Valeurs de capacité dynamique.	45
Tableau 08 : Représente les résultats expérimentaux CaCl ₂	45
Tableau 09 : Représente les résultats expérimentaux MgCl ₂	46
Tableau 10 : Représente les résultats expérimentaux MgSO ₄	47
Tableau 11 : Représente les résultats expérimentaux NaCl.....	47
Tableau 12 : Représente les résultats expérimentaux CaCO ₃	48
Tableau 13 : Résultats expérimentaux représentent le taux d'humidité de la résine.	48
Tableau 14 : Les informations sur les échantillons.....	52
Tableau 15 : Les résultats expérimentaux.....	53
Tableau 16 : Les résultats réalisés.	55
Tableau 17 : Résultats expérimentaux.	56
Tableau 18 : Résultats expérimentaux.	57
Tableau 19 : Résultats de la détermination de la conductivité et le pH d'eau avant et après le traitement avec Amberlite IR 120.	60
Tableau 20 : Résultats de la détermination de la dureté d'eau avant et après le traitement avec Amberlite IR 120.....	62

Sommaire

RESUME

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LE SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE..... 1

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Fascicule 01 : La dureté de l'eau

I.1.1. Généralité sur La dureté.....	5
I.1.2. Types de la dureté	6
I.1.2.1. Dureté temporaire	6
I.1.2.2. Dureté permanente	6
I.1.3. Source de la dureté.....	6
I.1.4. Désagréments de l'eau dure	6
I.1.4.1. Sur le réseau de distribution.....	6
I.1.4.2. Du côté du consommateur	7
I.1.4.3. Eaux dure et la santé humaine	7
I.1.5. Adoucissement de l'eau	8
I.1.5.1. Technologies d'adoucissement de l'eau.....	8
I.1.6. Avantages adoucissement de l'eau	10
I.1.6.1. Sur le réseau de distribution.....	10
I.1.6.2. Du côté du consommateur	10

Fascicule 02 : les matériaux échangeurs d'ions

I.2.1. Historique.....	12
I.2.2. Définition et principe de l'échange d'ions.....	12
I.2.3. Résines échangeuses d'ions.....	13
I.2.3.1. Définition	13

I.2.4. Structure des résines échangeuses d'ions	14
I.2.4.1. Squelette polystyrénique	14
I.2.4.2. Squelette polyacrylique En polymérisant	15
I.2.4.3. Autres types de squelettes	15
I.2.5. Classification des résines échangeuse d'ions.....	16
I.2.5.1. Classification selon la nature du groupement fonctionnel	16
I.2.5.2. Classification selon la structure	19
I.2.5.3. Classification selon l'origine du matériau	19
I.2.6. Propriétés physico-chimiques des résines.....	20
I.2.6.1. Sélectivité d'une résine échangeuse d'ions.....	20
I.2.6.2. Gonflement d'une résine échangeuse d'ions.....	20
I.2.6.3. Capacité d'échange.....	20
I.2.6.4. Granulométrie	21
II.3.4.5. Densité	21
I.2.6.6. Stabilité et longévité	22
I.2.6.7. Rétention d'humidité	23
I.2.6.8. Régénération	23
I.2.7. Avantages et inconvénients des résines échangeuse d'ions.....	24
I.2.8. Domaines d'application des resines échangeuses d'ions.....	25

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II : MISE EN ŒUVRE DE LA RÉSINE

II.1. Préparation des solutions aqueuses par la dissolution et la dilution	29
II.1.1. Principe	29
II.1.2. Verreir et produits utilisés	29
II.1.3. Mode opératoire.....	29
II.2. Régénération de la résine cationique	36
II.2.1. Identification d'Amberlite IR 120	36
II.2.2. Propriétés de la résine IR120.....	36
II.2.3. Appareillage spécial	37

II.2.4. Verrerie et produits utilisés.....	37
II.2.5. Méthode de régénération de la résine IR120.....	37
II.3. Détermination de la capacité d'échange de la résines Amberlite IR – 120.....	38
II.3.1. Capacité d'échange.....	38
II.3.2. Détermination de la capacité statique de la résine IR 120.....	39
II.3.3 Détermination de la capacité dynamique de la résine IR 120	44
II.4. Taux d'humidité	48
CHAPITER III : EFICACITE DE LA RESINE	
III.1. Détermination des paramètres physico –chimique des échantillons (CO, PH).....	50
III.1.1. Conductivité	50
III.1.2. Potentiel hydrogène (pH)	50
III.1.3 Verrerie et produits utilisés	50
III.1.4 Appareillages d'analyse	50
III.1.5. Mode opératoire	53
III.2. Détermination la dureté de l'eau	54
III.2.1. Mode opératoire	54
III.3. Détermination des paramètres physiques –chimique des échantillons traités.....	55
III.3.1. Mode opératoire	55
III.4. Détermination de la dureté de l'eau traitée	56
III.4.1. Mode opératoire	56
CHAPITER IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION	
IV.1. Les résultats de la capacité d'échange de la résine Amberlite IR – 120.....	59
IV.2. Les résultats de la conductivité et pH de l'eau.....	60
IV.3. Résultats de Détermination de la dureté d l'eau	62
Conclusion.....	66
Références bibliographiques	68

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'élimination de la dureté de l'eau, également connue sous le terme d'adoucissement, est un processus essentiel pour améliorer la qualité de l'eau potable et préserver l'environnement. La dureté de l'eau est principalement causée par la présence de concentrations élevées en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). Bien que ces minéraux soient nécessaires à la santé humaine en quantités appropriées, leur excès dans l'eau peut poser divers problèmes tant pour la santé que pour l'environnement.

L'adoucissement de l'eau est crucial pour plusieurs raisons. D'un point de vue sanitaire, une eau dure peut entraîner des dépôts de tartre dans les canalisations et les appareils ménagers, réduisant ainsi leur efficacité et leur durée de vie. Les dépôts de tartre peuvent également obstruer les systèmes de distribution d'eau, augmentant les coûts de maintenance et les risques de pannes. De plus, la dureté de l'eau diminue l'efficacité des savons et des détergents, obligeant à utiliser des quantités plus importantes de ces produits pour obtenir un nettoyage efficace, ce qui peut conduire à une utilisation excessive de produits chimiques potentiellement nocifs.

Sur le plan de la santé, une eau excessivement dure peut avoir des effets négatifs sur certaines populations, notamment celles souffrant de maladies rénales ou cardiovasculaires. Une ingestion excessive de calcium et de magnésium peut aggraver ces conditions. En outre, le goût de l'eau dure peut-être désagréable pour certaines personnes, rendant la consommation d'eau potable moins attrayante et potentiellement insuffisante.

En ce qui concerne l'environnement, l'eau dure contribue à l'augmentation de l'utilisation de produits chimiques ménagers, entraînant une pollution accrue des eaux usées. De plus, les dépôts de tartre dans les systèmes industriels et domestiques peuvent entraîner une utilisation inefficace de l'énergie, augmentant ainsi l'empreinte carbone des ménages et des industries.

Pour réduire la dureté de l'eau, plusieurs méthodes ont été utilisées telles que la précipitation acide, la décarbonatation à la chaux, et la complexation. Les techniques modernes incluent les procédés à membranes et l'adoucissement électrochimique, avec une place particulière accordée à l'échange d'ions, où les ions calcium et magnésium sont remplacés par des ions sodium.

Nous avons concentré notre étude sur la technique d'échange, en particulier la résine cationique industrielle "**Amberlite IR-120**". Ce travail est reparti en quatre chapitres, dans le

premier nous présentons la synthèse bibliographique formé de deux fascicules, le premier fascicule concerne la dureté de l'eau, le deuxième présenté les généralités sur les résines échangeurs d'ions. Le deuxième chapitre, comporte une étude physico-chimique de la résine industrielle Amberlite IR 120, et dans le troisième chapitre nous présentons, le matériel et les procédés de l'efficacité de la résine étudiée. Le quatrième chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus, et en fin une conclusion générale.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Fascicule01 : La dureté de l'eau

Dans ce fascicule, nous offrons une vue d'ensemble sur la dureté de l'eau, les risques qu'elle représente pour les consommateurs et la population, ainsi que les techniques employées pour la traiter.

I.1.1. Généralité sur La dureté

La dureté fait référence à la teneur en calcium et en magnésium de l'eau. Ces deux éléments Altération à partir du substrat rocheux. La teneur en calcium est généralement supérieure à celle du magnésium dans les eaux souterraines. D'une manière générale, l'eau dure ne convient pas à un usage domestique car elle réduit considérablement l'efficacité de Savon. En agriculture, en revanche, l'eau dure aide le sol à maintenir une bonne structure grâce aux ponts calciques.

L'eau riche en calcium et en magnésium contient habituellement des quantités égales de Le bicarbonate ou carbonate, lui confère une alcalinité élevée. Les bicarbonates de calcium et de magnésium sont relativement peu solubles dans l'eau (Couture, 2006).Cependant, l'eau a parfois une dureté élevée mais une alcalinité élevée. Quand Le calcium et le magnésium sont présents dans l'eau sous forme de sulfates et de chlorures (Couture et Montérégie-Est, 2004).

La dureté de l'eau, caractérisée par son titre hydrotimétrique (TH), qui peut être exprimée en $\text{m}\text{éq l}^{-1}$ ou souvent en degrés français ($1^\circ\text{F} = 0,2 \text{ m}\text{éq l}^{-1}$), est responsable des entartrages (Dia et al., 2006).La figure 01 montre la Plage de valeurs du titre hydrotimétrique en degrés français.



Figure 01 : Plage de valeurs du titre hydrotimétrique en degrés français.

I.1.2. Types de la dureté

Il existe deux types de dureté de l'eau, la dureté temporaire et de dureté permanente :

I.1.2.1.Dureté temporaire

Est causée par une combinaison d'ions calcium et bicarbonate dans l'eau. Elle peut être éliminée en ajoutant de la chaux (hydroxyde de calcium) ou en faisant bouillir l'eau dans un récipient ouvert. L'ébullition favorise la formation de carbonate à partir de bicarbonate, puis le carbonate de calcium est précipité et par conséquent, l'eau de sortie refroidie est plus claire. L'eau de sortie refroidie est donc plus douce (**Tofighy et Mohammadi, 2011**).

I.1.2.2.Dureté permanente

Est généralement due à la présence de sulfates de calcium et de magnésium dans l'eau, qui deviennent plus solubles à mesure que la température augmente. De l'eau qui deviennent plus solubles à mesure que la température augmente. Par conséquent, la dureté permanente ne peut être éliminée par l'ébullition (**Tofighy et Mohammadi, 2011**).

I.1.3. Source de la dureté

Les principales sources naturelles de dureté de l'eau sont les ions métalliques polyvalents dissous dans les roches sédimentaires, les infiltrations et le ruissellement des sols. Le calcium et le magnésium, les deux principaux ions, sont présents dans de nombreuses roches sédimentaires, les plus courantes étant le calcaire et la craie. Ils sont également des constituants minéraux essentiels courants des aliments (**Akram et Rehman, 2018**).

I.1.4.Désagréments de l'eau dure

L'eau dure l'accompagne longtemps beaucoup de désagréments :

I.1.4.1. Sur le réseau de distribution

- La mise à l'échelle des pipelines peut entraîner une augmentation des coûts de pompage et une réduction de la capacité de distribution (**Bonvin et Membratec, 2006**).

- Cela peut conduire à une fréquence accrue des travaux de maintenance et de maintenance préventive par les régulateurs de réseau (**Bonvin et Membratec, 2006**).
- Peut compromettre le fonctionnement des appareils industriels, en raison de le dépôt de sels à la surface des appareils. Par conséquent, cela peut diminuer leur efficacité et augmenter la consommation d'énergie (**Muniz et al., 2020**).

I.1.4.2. Du côté du consommateur

- Le calcaire entraîne une perte d'efficacité des différents éléments chauffants (chaudières, lave-vaisselle, lave-linge, machines à café...).
- Consommation accrue de produits de lessive et durée de vie raccourcie des appareils électroménagers (**Bonvin et Membratec, 2006**).
- Les vêtements lavés avec de l'eau dure peuvent avoir l'aiternes et être rêches et irritants.
- Se baigner avec du savon dans une eau dure laisse un film collant de caillé de savon sur la peau, retour de la peau à son état normal légèrement acide et peut entraîner des irritations.
- Le caillé de savon sur les cheveux peut les rendre ternes, sans vie et difficiles à coiffer (**Deyet al., 2007**).

I.1.4.3. Eaux dure et la santé humaine

L'eau dure est très dangereuse pour la santé des êtres humains. Elle provoque de nombreuses maladies chez l'homme. il n'est pas sûre ile n'est pas potable, Des apports excessifs en calcium et en magnésium peuvent augmenter les risques d'ostéoporose, de néphrolithiase, de cancer colorectal, d'hypertension et d'accident vasculaire cérébral, de maladie coronarienne et de résistance à l'insuline et d'obésité. Résistance à l'insuline et l'obésité. La carence en magnésium a été impliquée dans la pathogenèse de l'hypertension, certaines études épidémiologiques et épidémiologiques et expérimentales démontrant une corrélation entre la tension artérielle et les niveaux de magnésium sérique. Cette eau dure contenant ces ions peut être traitée au niveau primaire à des fins domestiques (**Akram et Rehman, 2018**).

L'eau dure est associée à la dermatite atopique (eczéma) (**Walters et al., 2016**).

I.1.5. Adoucissement de l'eau

Il est une Méthode physico-chimique utilisée pour éviter l'accumulation de calcaire dans les conduites et les équipements de distribution d'eau (**Tezkratt et Belkessam, 2017**).

I.1.5.1. Technologies d'adoucissement de l'eau

Les technologies d'adoucissement de l'eau à grande échelle se répartissent en trois types selon le mécanisme d'élimination de la dureté (**Tang et al., 2021**).

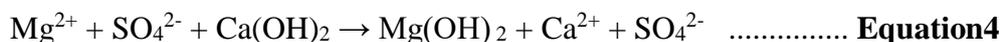
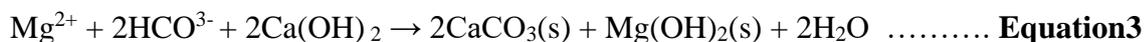
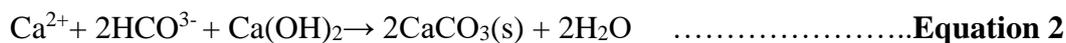
a) Précipitation

Les ions de dureté sont éliminés sous forme de minéraux solides par précipitation, par exemple : adoucissement à la chaux, à la soude et aux granulés (**Tang et al., 2021**).

➤ Adoucissement à la chaux

L'adoucissement à la chaux est la première méthode d'adoucissement de l'eau potable, qui est également une méthode d'adoucissement chimique. La procédure générale de traitement comprend : l'augmentation du pH à 11 pour la précipitation du Mg, la recarbonatation à pH=10 pour la précipitation du Ca ; enfin, l'ajustement du pH à environ 8 pour la distribution.

Pour l'élimination de la dureté due au carbonate de calcium, la chaux est le produit chimique couramment utilisé. Les équations de réaction sont énumérées ci-dessous :



Lorsque la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est ajoutée à l'eau, elle réagit d'abord avec le CO_2 et forme le précipité de carbonate de calcium (CaCO_3) (équation 1). Cette étape n'élimine pas la dureté (de l'eau). La deuxième étape est la conversion des espèces de bicarbonate en espèces de carbonate (équation 2), qui nécessite un pH d'environ 9,3). Pour l'élimination de la dureté magnésienne, un pH d'au moins 10,5 est nécessaire pour une précipitation efficace du $\text{Mg}(\text{OH})_2$ selon l'expérience pratique (équation 3). L'équation 4 indique que la dureté non carbonatée est également éliminée dans ce processus (**Shen, 2019**).

b) Séparation par membrane

Les ions de dureté sont séparés de l'eau à l'aide de membranes semi-perméables (**Tang et al., 2021**). Il existe quatre principaux procédés de traitement par membrane :

La microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI). Les technologies membranaires les plus populaires utilisées pour l'adoucissement de l'eau sont l'OI et la NF (**Shen, 2019**).

➤ Osmose inverse

L'osmose inverse est couramment utilisée pour la production d'eau ultra-pure et la réutilisation de l'eau. La membrane d'osmose inverse est non poreuse, tandis que la membrane de nanofiltration a des pores d'une taille inférieure à 2 nm. La membrane d'osmose inverse ayant des pores plus petits, elle nécessite une pression plus élevée et peut éliminer davantage d'ions et de molécules de petite taille. Par conséquent, l'osmose inverse n'élimine pas seulement les ions de dureté (ions bivalents), mais aussi certains composants monovalents, les contaminants inorganiques, les solides dissous totaux (TDS) et d'autres composants (**Shen, 2019**).

L'eau traitée par osmose inverse ne contient pratiquement pas d'espèces dissoutes. L'osmose inverse n'est pas seulement utilisée pour éliminer les impuretés de l'eau, mais aussi pour produire de l'eau potable à partir de l'océan et des eaux saumâtres (**Shen, 2019**).

c) Échange d'ions

L'adoucissement est l'application la plus courante pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine. Elle consiste généralement à remplacer les ions alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}), par des ions alcalins (Na^+). L'adoucissement est réalisé sur une résine acide forte sous forme Na^+ selon l'équilibre :



Dans cet équilibre l'indice (r) marque l'ion fixé sur la résine et l'indice (s) celui en solution. Lorsque l'équilibre est déplacé vers la droite et les ions Ca^{2+} se fixent sur la résine alors que les ions Na^+ passent en solution. Pour régénérer la résine, l'équilibre doit être déplacé vers la gauche et cela nécessite d'utiliser une solution saturée en sodium (**welté et al., 2009**).

I.1.6. Avantages adoucissement de l'eau

I.1.6.1. Sur le réseau de distribution

- Empêche la détérioration rapide des tuyaux de transport et des robinets d'eau.
- Empêche l'entartrage et la détérioration des tours de refroidissement, des unités de condensation et d'autres équipements délicats.
- Empêche l'encrassement des chaudières, radiateurs, évaporateurs, etc.
- Améliore considérablement l'efficacité thermique des systèmes d'échange de chaleur.
- Améliore les performances des savons et détergents industriel (**Romero, 2016**).

I.1.6.2. Du côté du consommateur

L'eau traitée présente de nombreux avantages par rapport à l'eau dure non traitée :

- Couverts et la verrerie sont plus propres et plus brillants.
- Les cheveux et la peau sont plus doux, plus propres et plus raffinés lorsqu'ils sont lavés avec de l'eau traitée.
- Une eau dure traitée réduit considérablement les tâches ménagères en éliminant l'accumulation de morceaux de savon.
- Une eau dure adoucie redonne une mousse abondante aux savons et shampooings, réduisant ainsi de 75% l'utilisation et les coûts de ces produits.
- Les tissus sont également plus doux sans les minéraux durs qui y sont piégés. Les tissus durent plus longtemps et la couleur blanche reste blanche sans cette couleur grise ternie causée par eau dure (**Romero, 2016**).

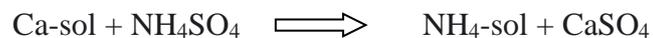
CHAPITRE I

Fascicule 02 : les matériaux échangeurs d'ions

Dans ce fascicule nous présenterons : Généralités sur les résines échangeuses d'ions, leurs propriétés fondamentales et applications

I.2.1. Historique

L'échange d'ions est une technique ancestrale essentielle dans le patrimoine culturel (**Kumar, 2013**), dont les premières observations ont été faites par l'agriculteur et entrepreneur anglais H.S. Thompson. Il a remarqué que le sulfate d'ammonium absorbé par les sols ne pouvait être éliminé par l'eau, et que celui-ci était converti en sulfate de calcium. Ce phénomène intrigant a été partagé avec Way (en 1850), chimiste consultant de la Royal Agricultural Society, qui a approfondi la compréhension en démontrant que le mécanisme sous-jacent était un échange d'ions impliquant les silicates complexes du sol. Ainsi, le processus observé par Thompson a été formulé comme suit (**Nachod et Jack, 1956**) :



En 1858, Hünenberg et Stohman expliquèrent le phénomène d'échange d'ions comme un processus chimique réversible et équilibré.

En 1903, Harms et Rümpler construisirent le premier échangeur d'ions industriel d'origine synthétique, ouvrant ainsi la voie à des applications pratiques de cette découverte (**Thompson, 1850 ; Way, 1850**).

Les composés ont été utilisés pour la première fois dans une usine industrielle de dessalement naturel de l'eau au Royaume-Uni en 1937, marquant ainsi le début de leur utilisation à grande échelle. Le domaine des échangeurs d'ions connaît un essor fulgurant en 1942 avec la synthèse de résines échangeuses de cations polystyrène sulfoné par Alelio, ce qui a révolutionné leur fabrication et leur efficacité. La première tentative d'utilisation de l'échange d'ions à des fins commerciales a été faite par Harm en 1896. Dans son brevet, Harm affirmait avoir mis au point un processus réussi utilisant un silicate d'échange de cations naturel pour éliminer le sodium et le potassium du jus de betterave à sucre. Cependant, les applications à grande échelle réussies de l'échange de cations ont été développées par Gans, qui a synthétisé des matériaux inorganiques de type $\text{Na}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$ dans lesquels le Na^+ était échangeable (**Nachod et Jack, 1956**).

I.2.2. Définition et principe de l'échange d'ions

L'échange d'ions est le processus réversible qui permet aux cations et aux anions d'être échangés entre les surfaces des minéraux et les solutions qui entrent en contact avec eux (**Carroll, 1959**), sans provoquer de changement permanent dans la structure du solide (**Wheaton**

et efevre, 2000). Les ions échangés contre une quantité équivalente d'autres ions de même signe lorsqu'ils entrent en contact avec une solution électrolytique sont appelés échangeurs d'ions. Ces échangeurs peuvent être des échangeurs de cations, qui transportent des cations, des échangeurs d'anions, qui transportent des anions, ou des échangeurs d'ions amphotères, qui permettent l'échange de cations et d'anions (Helfferich, 1962).

Ce processus résulte du remplacement des ions mobiles libres d'un solide, l'échangeur d'ions, par différents ions de charge similaire en solution. Pour faciliter cet échange, l'échangeur doit avoir une structure en réseau ouvert, organique ou inorganique, qui porte les ions et permet leur passage à travers elle (Zagorodni, 2006). La figure 02 Représentation schématique d'un exemple d'échangeur de cations.

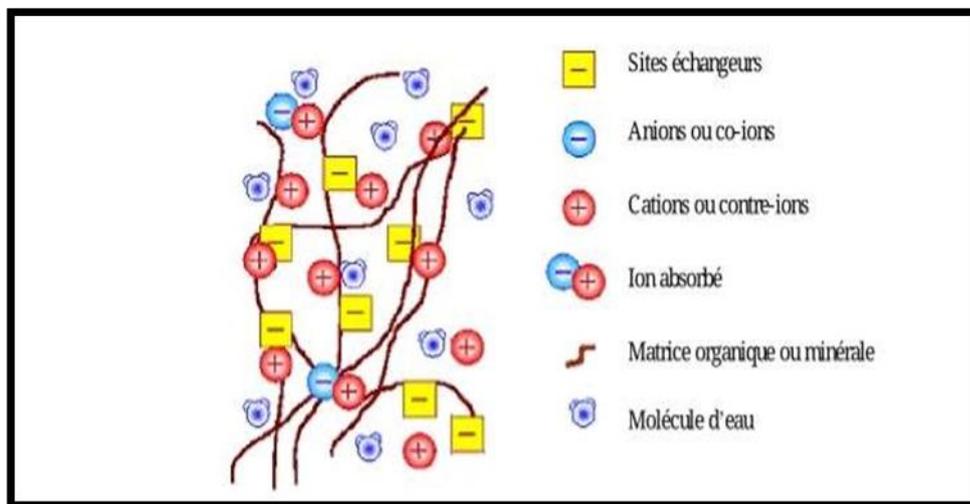


Figure 02 : Représentation schématique d'un échangeur de cation (Ghalloussi-Alloui, 2012).

I.2.3. Résines échangeuses d'ions

I.2.3.1. Définition

Les échangeurs d'ions sont généralement définis comme des matériaux solides insolubles qui transportent des cations ou des anions échangeables (Helfferich, 1962).

Elles se présentent sous la forme de particules sphériques, insolubles dans l'eau mais hydratées. Les résines sont constituées d'un réseau macromoléculaire tridimensionnel appelé matrice, qui contient des charges fixes qui sont des groupes fonctionnels et retient des ions mobiles et interchangeables de signes opposés par attraction électrostatique (Herve, 1977). La figure 03 montre la macromolécule de résine échangeuse d'ions.

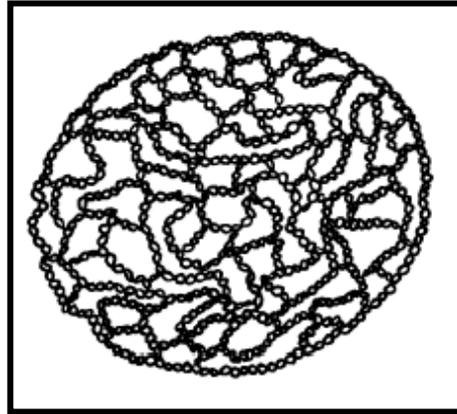


Figure 03 : Schéma d'une bille de la résine échangeuse d'ions

(Pure Water Handbook.1991)

I.2.4. Structure des résines échangeuses d'ions

Les différents types de squelette puis les groupes fonctionnels sont examinés :

I.2.4.1. Squelette polystyrénique

La polymérisation du styrène (ou vinylbenzène), sous l'influence d'un catalyseur d'activation, le plus souvent un peroxyde organique, produit un polystyrène linéaire, matière plastique malléable, transparente, soluble dans certains solvants, avec une température de ramollissement définie. Si une certaine proportion de divinylbenzène (DVB) est mélangée au styrène, le polymère se réticule et devient alors totalement insoluble (figure 04).

Dans la fabrication des résines échangeuses d'ions, la polymérisation se fait généralement en suspension. Des gouttelettes d'oligomère se forment dans ce milieu et croissent jusqu'à devenir des billes dures et sphériques de polymère (De dardel, 2015).

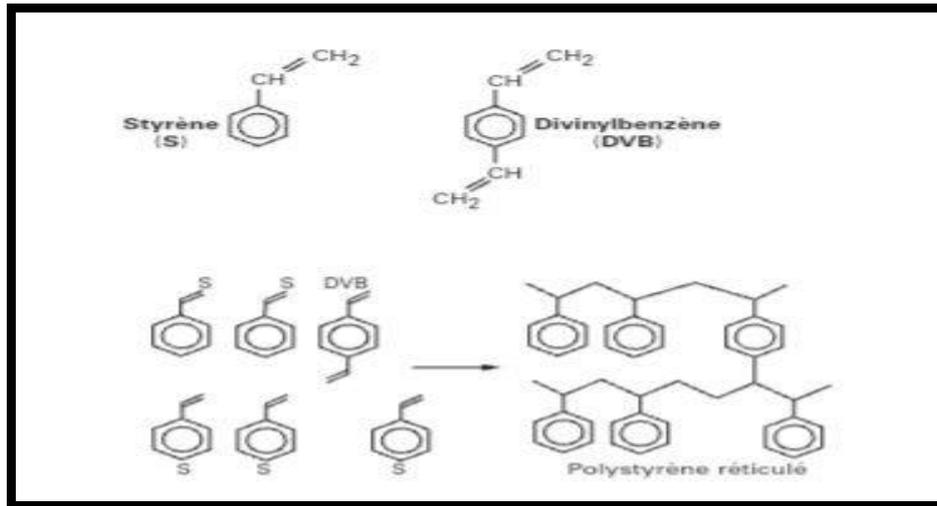


Figure 04 : Polymérisation du styrène et réticulation par le divinylbenzène (De dardel, 2015).

I.2.4.2. Squelette polyacrylique En polymérisant

Un acrylate, un méthacrylate ou de l'acrylonitrile que l'on peut réticuler avec du divinylbenzène (comme le styrène), on obtient par exemple le squelette de la figure 05 (De dardel, 2015).

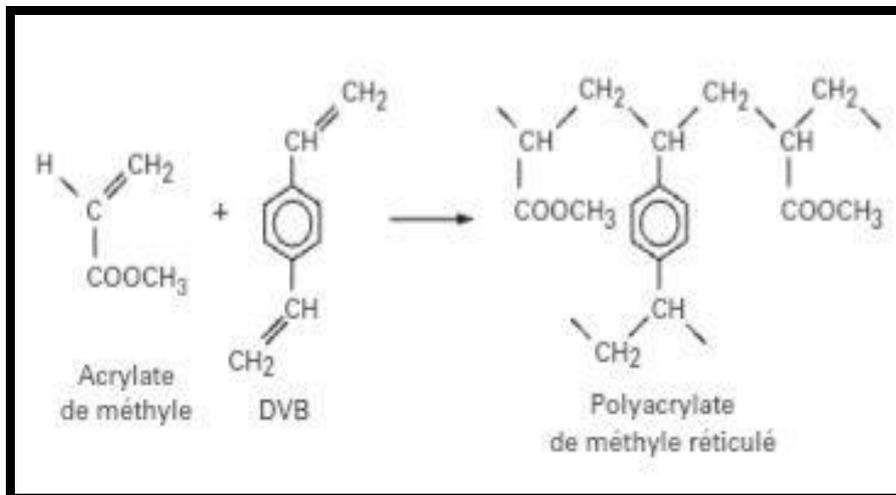


Figure 05 : Exemple de squelette polyacrylique (De dardel, 2015).

I.2.4.3. Autres types de squelettes

Les autres types sont moins courants, mais il faut citer :

- Les résines formophénoliques mentionnées dans l'historique.
- Les résines polyalkylamines obtenues à partir de polyamines.

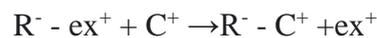
(Par exemple la diéthylènetriamine) par condensation avec de l'épichlorhydrine (De dardel, 2015).

I.2.5. Classification des résines échangeuse d'ions

I.2.5.1. Classification selon la nature du groupement fonctionnel

a) Résines échangeuses de cations

Dont les ions échangeables sont chargés positivement : Les résines échangeuses de cations sont Les résines échangeuses de cations sont préparées par copolymérisation de styrène et de divinylbenzène et comportent des groupes d'acide sulfonique (-SO₃H) introduits dans la plupart des anneaux benzéniques. Le mécanisme Le mécanisme du processus d'échange de cations peut être représenté par la réaction suivante (Vijay et Dr, 2014) :



Où R est un polymère de résine avec des sites SO₃ disponibles pour la liaison avec un cation échangeable (ex⁺), et C⁺ indique un cation dans la solution environnante à échanger (Figure 06) (Srikanth et al., 2010).

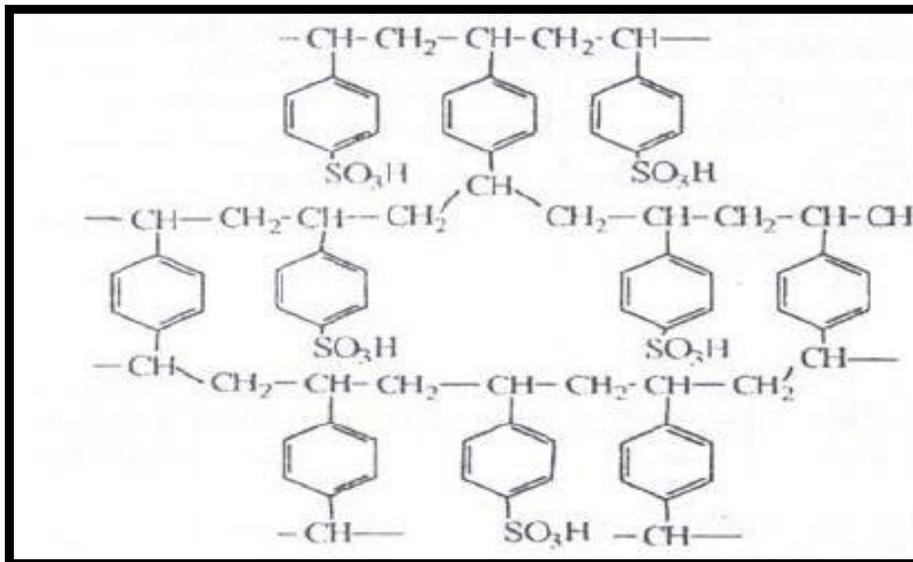
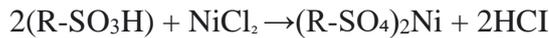


Figure 06 : Structure chimique d'une résine échangeuse de cations (Srikanth et al., 2010).

❖ Résines échangeuses de cations fortement acides

Ces résines se comportent de la même manière que les acides forts. Elles présentent une forte ionisation sous les formes acide (R-SO₃H) et saline (RSO₃Na) du groupe acide sulfonique (-SO₃H). Elles peuvent convertir un sel métallique en un acide équivalent par la réaction de l'équation :



Les formes hydrogène et sodium des résines acides fortes sont fortement dissociées, et le Na⁺ et le H⁺ échangeables sont facilement disponibles pour l'échange dans toute la gamme de pH. Par conséquent, la capacité d'échange des résines d'acide fort est indépendante du pH de la solution (**Bhalekar, 2004**).

Ces résines peuvent être employées sous deux formes : l'hydrogène pour une d'ionisation complète et le sodium pour l'adoucissement de l'eau (élimination du calcium et du magnésium). Pour régénérer la résine après épuisement, il faut utiliser une solution d'acide fort ou une solution de chlorure de sodium. La régénération avec de l'acide chlorhydrique (HCl) produit une solution concentrée de chlorure de nickel (NiCl₂) (**singh et al., 2007**).

❖ Résines échangeuses de cations faiblement acides

Les résines Cation Acide Faible (WAC) ont un comportement similaire à celui des acides faibles. Les résines cation-acides faibles sont disponibles sous forme d'hydrogène (R-COOH). Les résines cation acide faible peuvent être facilement régénérées avec une quantité stœchiométrique d'acide en raison de leur excellente capacité de liaison avec les ions hydrogène. Les résines de cation acide faible ont une capacité d'échange d'ions plus élevée lorsque le PH de la solution augmente. Les résines WAC sont inefficaces pour traiter les liquides acides. Les résines cationiques faiblement acides déminéralisent et désalcalinisent efficacement l'eau (**Varshney et al., 2003**).

b)

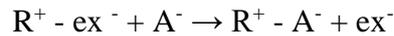
échangeuses d'anions

Résines

Les résines échangeuses d'anions possèdent des groupes fonctionnels chargés positivement qui échangent des ions négatifs. Elles sont fabriquées en chlorméthylant les

anneaux benzéniques du copolymère styrène-divinylbenzène, en y attachant des groupes (-CH₂Cl), puis en les faisant réagir.

Avec des amines tertiaires comme la triéthylamine. La figure 07 illustre la structure chimique d'une résine échangeuse d'anions. Le mécanisme de l'échange d'anions est illustré par la réaction suivante :



Où, R⁺ indique un polymère de résine avec un nombre de sites disponibles pour la liaison avec l'anion échangeable (ex-), et A⁻ indique les cations dans la solution environnante qui sont échangés (Srikanth et al., 2010).

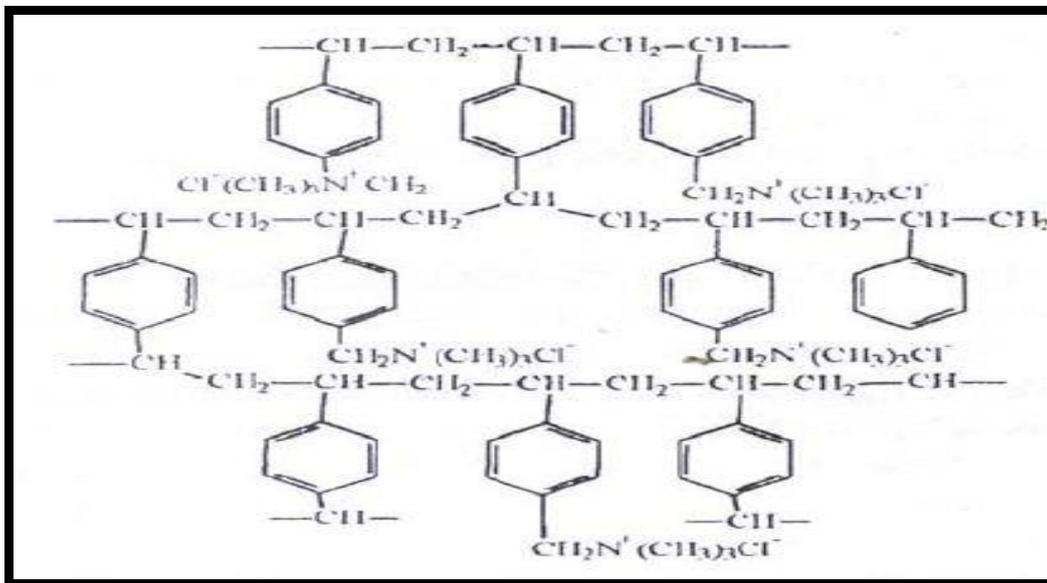


Figure 07 : Structure chimique d'une résine échangeuse d'anions (Srikanth et al., 2010).

Les résines échangeuses d'anions peuvent être classées en deux catégories, à savoir :

❖ **Echangeurs anioniques fortement basiques**

Qui contiennent le groupe ammonium quaternaire -N(CH₃)₃OH, présentent une basicité forte similaire à celle des alcalins caustiques comme le KOH et le NaOH. Ils sont complètement ionisés en solution et peuvent être utilisés sur une large plage de pH (7-14) (Carlino et Guilminot, 2020).

❖ **Echangeurs anioniques faiblement basiques**

Caractérisés par la présence de groupes amino primaires $-NH_2$ ou de groupes amino substitués en mono $-NHR$ et en bi $-NR_2$, ont un degré d'ionisation dépendant fortement du pH. Ils ne peuvent être utilisés que dans des solutions neutres ou acides (**Carlino et Guilminot, 2020**).

I.2.5.2. Classification selon la structure

Des résines peuvent être divisées en deux catégories principales :

Les résines de type gel et celles de type macroporeux. Bien que leurs structures de base soient similaires, étant toutes deux des structures macromoléculaires obtenues par copolymérisation de styrène et de divinylbenzène, leur principale différence réside dans leur porosité (**Guyot, 1981**).

a) Support gel

Les résines de type gel présentent une porosité naturelle résultant de la copolymérisation en suspension dans l'eau. En l'absence d'agent porogène, cela conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel qui présente une certaine porosité à l'état gonflé (**Guyot, 1981**).

b) Support macroporeux

Les résines de type macroporeux sont caractérisées par une porosité artificielle obtenue par la copolymérisation avec des substances porogènes telles que l'heptane, les acides gras saturés, les alcools ou polyalcools en C_4 à C_{10} , et les oligomères linéaires du styrène. Cette copolymérisation crée un réseau de canaux de grandes tailles appelées macropores dans la matrice de la résine. La taille et l'uniformité de ces pores peuvent varier en fonction de la nature et de la quantité des diluants utilisés lors du processus de copolymérisation (**Okay, 1988**).

I.2.5.3. Classification selon l'origine du matériau

a) Echangeurs minéraux

Les échangeurs minéraux peuvent être naturels ou artificiels. La plupart des échangeurs minéraux naturels sont des aluminosilicates cristallins (zéolites, argiles).

Les échangeurs minéraux artificiels ont les mêmes propriétés que les échangeurs naturels, mais préparés par précipitation sous forme de gel (**Runeau, 1977**).

b) Echangeurs organiques

Ils comprennent :

- Le charbon sulfoné : Ces agents d'échange très durables ont progressivement cédé la place aux Localisation du polystyrène sulfoné.
- La Résine synthétique : généralement résine de polystyrène sulfoné Plus utilisés car ils ont une plus grande capacité et des vitesses de commutation plus grandes important (Runeau, 1977).

I.2.6. Propriétés physico-chimiques des résines

I.2.6.1. Sélectivité d'une résine échangeuse d'ions

Comme la résine échangeuse d'ions fait intervenir des forces électrostatiques, la sélectivité dépend principalement de la charge relative et du rayon ionique des ions hydratés en concurrence pour un site d'échange et, dans une certaine mesure, de l'hydrophobie de l'ion concurrent (Vijay et Dr, 2014).

I.2.6.2. Gonflement d'une résine échangeuse d'ions

Le gonflement fait référence au changement de volume qui se produit lors du transfert d'un milieu à un autre. Le gonflement est causé par la pression osmotique à l'intérieur de l'échangeur d'ions contre la solution externe plus diluée, ce qui entraîne l'absorption du solvant (Harland, 1994).

La quantité d'eau absorbée est déterminée par la nature du groupe actif connecté, l'ion échangé sur le groupe et le degré de réticulation. Plus la réticulation augmente, plus la quantité d'eau retenue par l'échangeur d'ions diminue. Par conséquent, les échangeurs d'ions faiblement réticulés gonflent davantage que les résines fortement réticulées dans le même état ionique (Simon, 1991).

I.2.6.3. Capacité d'échange

La capacité d'échange d'un matériau échangeur d'ions représente le nombre de sites ioniques attachés qui peuvent être échangés par unité de masse de matière sèche ou par unité de

volume de matière humide. En effet, elle peut également être évaluée par le nombre d'équivalents échangés par gramme de matière sèche (**Simon, 1991**).

✓ Capacité total

La capacité d'échange totale d'une résine s'exprime en équivalents par unité de masse (ou de volume) et représente le nombre de sites actifs disponibles. Dans le cas des échangeurs en polystyrène, le nombre maximum de sites actifs correspond au « greffage » de groupes actifs par noyau benzénique.

La capacité est exprimée en éq/kg de résine sèche (capacité-masse C_p) ou en éq/L de résine humide (capacité-volume C_v) (**Arden et Dardel, 1986**).

✓ Capacité utile

Par définition, il s'agit de la fraction de la capacité totale réellement utilisée lors du processus d'échange d'ions. La capacité utile peut représenter une fraction plus ou moins grande de la capacité totale ; elle est déterminée par un certain nombre de paramètres (**Arden et Dardel, 1986**) :

- La concentration et le type d'ions à immobiliser.
- Flux osmotique.
- Température.
- La hauteur du lit de résine.

I.2.6.4. Granulométrie

Le choix de la granulométrie est un compromis entre vitesse de réaction d'échange et débit. En effet, plus la taille est petite, plus le débit est élevé, et des débits élevés nécessitent des particules plus grosses pour limiter les pertes de charge. Les diamètres courants de résine sont de 0,3 à 1,2 mm (**Arden et Dardel, 1986**).

II.3.4.5. Densité

La densité est un paramètre important car elle détermine le comportement hydraulique de la résine dans la colonne. La densité de chaque résine se situe dans les plages suivantes (**Zitouni, 2013**) :

- Échangeur de cations fortement acide 1, 18-1, 38.
- Échangeur de cations faiblement acide 1, 13-1, 20.
- Échangeur d'anions fortement basique 1.07-1.12.
- Échangeur d'anions faiblement basique 1.02-1.10.

I.2.6.6. Stabilité et longévité

Les résines doivent assurer plusieurs années de service. Leurs stabilités dans le temps sont données primordiales (Zitouni, 2013).

✓ Stabilité chimique du squelette

La stabilité chimique des résines industrielles est cruciale pour assurer leur efficacité à long terme. Les résines très réticulées, comme les résines macroporeuses, sont recommandées dans des environnements très oxydants pour prévenir la déréticulation (Zitouni, 2013).

Dans des conditions normales de traitement de l'eau, les résines peuvent maintenir leurs propriétés physico-chimiques pendant des années, voire jusqu'à vingt ans, sans dégradation significative (Zitouni, 2013).

✓ Stabilité des groupes actifs

Les groupes sulfoniques sont extrêmement stables. Cependant, les groupes ammonium des résines échangeuses d'anions sont sensibles à la température et à la chaleur (Zitouni, 2013).

La résine peut subir une décomposition appelée décomposition de HOFFMAN, qui peut transformer l'ammonium quaternaire (base forte) en amine tertiaire (base faible) ou même décomposer l'ensemble du groupe actif (Zitouni, 2013).

✓ Résistance au séchage

Le séchage et la réhydratation répétés endommagent la plupart des échangeurs de chaleur à gel. Les échangeurs de chaleur en gel doivent être maintenus humides (Zitouni, 2013).

✓ Stabilité osmotique

Lors de l'échange d'ions, le groupe actif de la résine subit des modifications, ce qui entraîne un changement dans la taille et la couche d'hydratation de l'ion fixé par rapport à l'ion

déplacé. Par exemple, lors du passage de la forme COOH à COONa, la bille de résine peut gonfler ou se contracter, générant ainsi des tensions connues sous le nom de forces osmotiques.

Ces forces varient en fonction des espèces ioniques présentes en solution et de leurs concentrations (De dardel, 2015).

I.2.6.7. Rétention d'humidité

Une fois activées, les résines portent des ions fixes et des ions mobiles. Ces ions sont toujours environnés de molécules d'eau au sein même des billes de résine. Cette capacité de rétention d'humidité des résines est une grandeur essentielle pour la compréhension des propriétés d'une résine échangeuse d'ions : cinétique, capacité d'échange et solidité de la résine en dépendent étroitement. On définit la rétention d'humidité h comme le rapport (Arden et Dardel, 1986):

$$h(\%) = \left(\frac{m_{\text{hydratée}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{hydratée}}} \right)$$

I.2.6.8. Régénération

Les résines des fournisseurs sont rincées et régénérées avant utilisation pour éliminer les produits de dégradation ayant pu se former lors du stockage ainsi que les produits résultant de la libération des composants de la résine précédemment retenus. Pour ce faire, la résine est placée dans une colonne en verre d'un diamètre intérieur égal à 1,5 cm et d'une hauteur d'environ 15 cm (soit un volume hydraté d'environ 26,5 ml). Les extrémités réglables de la colonne, qui minimisent le volume mort, sont reliées à une pompe péristaltique qui applique un débit constant de 200 ml/h, soit 7,5 volumes de litre par heure. Après rinçage avec 200 ml d'eau, passer 200 ml d'acide chlorhydrique à la concentration de 1 mol/l pour régénérer la résine et garantir son état initial (groupe d'échange sous forme de H^+). Enfin, une grande quantité d'eau ultra pure (généralement au moins 1 litre) est infiltrée à travers le lit de résine pour éliminer les traces d'acide résiduel de ce dernier. La résine est ensuite stockée dans l'eau dans la colonne et toujours rincée avec environ une centaine de millilitres d'eau ultra pure avant utilisation (Gressier, 2008).

❖ Types de régénération

- Système de régénération à co-courant

Il s'agit du système le plus simple dans lequel une résine est régénérée dans le même que le flux de service (vers le bas). La cuve est dotée d'un pour permettre l'expansion du lit de résine lit de résine lorsque le lavage à contre-courant est pour éliminer les solides en suspension et les solides en suspension et les fines de résine.

▪ Systèmes de régénération à contre-courant

Ces systèmes appliquent le régénérant dans la direction opposée au flux de service. Cela permet d'améliorer la qualité de l'eau (moins de fuites ioniques), d'augmenter l'efficacité des produits chimiques et de réduire les eaux usées. Pour obtenir des niveaux de fuite minimaux dans un système de résine régénérée à contre-courant, les ions contaminants doivent être tenus à l'écart de l'extrémité effluente de la colonne pendant la régénération et le rinçage (figure 09) (Wheaton et Lefevre, 2000).

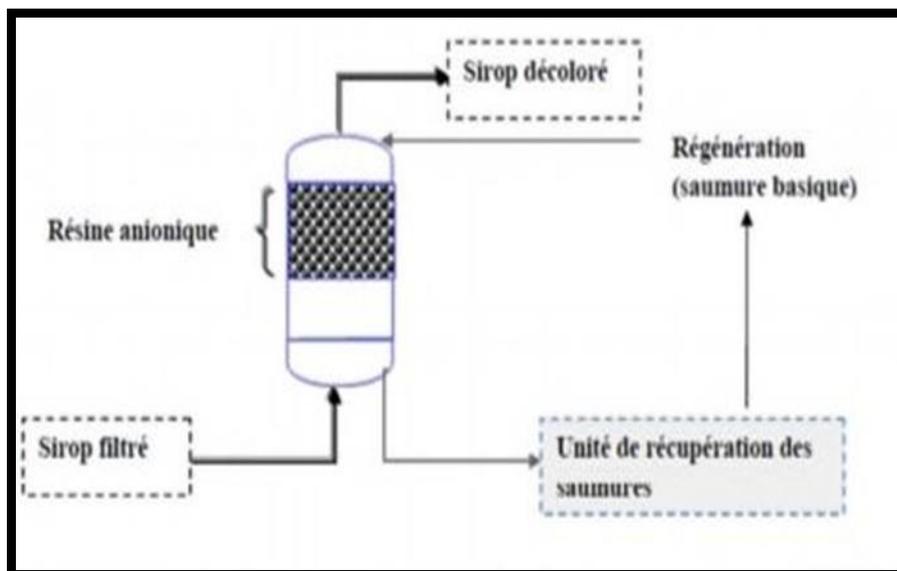


Figure 08 : Schéma de régénération à contre-courant d'une colonne de décoloration au sein du complexe (Bento et Sá, 1998).

I.2.7. Avantages et inconvénients des résines échangeuse d'ions

❖ Avantages

- La vitesse d'adsorption élevée.
- Sont la faible consommation d'énergie.
- Les échangeurs d'ions peuvent également fonctionner avec une faible pression d'eau (<https://www.zuiveringstechnieken.nl/ion-exchangers>).

- La régénération du lit donne une très longue durée de vie (inconvenient de l'acide et de la base nécessaires = coûts).
- Ce processus d'échange d'ions peut être utilisé comme une méthode simple pour produire une eau d'une très grande pureté (**Zitouni, 2013**).
- L'élimination sélective est possible en choisissant le bon échangeur d'ions.
- Une efficacité d'élimination élevée est possible pour les cations et les anion (**Sata, 2007**).

❖ Inconvénients

- La précipitation de sulfate de calcium obstrue les factures des résines et peut provoquer des blocages de tuyaux dans le système.
- L'adsorption de matières organiques peut réduire l'efficacité des résines, ce qui diminue la qualité de l'eau. En conséquence, le réservoir devient saturé et n'est plus utile pour l'échange d'ions, ce qui nécessite une recharge ou un traitement (**Al-Asheh et Aidan, 2020**).
- Souvent, une étape de pré-purification est nécessaire, comme l'aération de l'eau, la sédimentation et la filtration sur sable.
- L'efficacité peut être réduite en raison de l'encrassement, par exemple par l'entartrage minéral ou le colmatage de la surface (<https://www.zuiveringstechnieken.nl/ion-exchangers>).

I.2.8. Domaines d'application des résines échangeuses d'ions

- Adoucissement de l'eau potable et industrielle, y compris l'élimination de la dureté de l'eau due à la présence de sels alcalino-terreux ; par exemple, l'eau de lessive et de vaisselle à usage domestique et l'eau de chaudière.
- Décarbonation de l'eau, conçue pour éliminer ou réduire les bicarbonates dissous, adaptée à l'utilisation dans l'eau d'alimentation des petits circuits de réfrigération industriels ; récupération et purification des protéines des produits laitiers.
- Déminéralisation des eaux par échange d'ions, qui permet d'obtenir une eau de très grande pureté nécessaire à l'alimentation des eaux de chaudières haute et moyenne (**Monod, 1989**).
- Les résines échangeuses d'ions ont été utilisées avec succès dans le traitement des maladies du foie, de l'insuffisance rénale, des maladies urolithiques et des maladies professionnelles de la peau. Par exemple, le polystyrène sulfonate de sodium est une

résine échangeuse de cations sulfonique utilisée dans le traitement de l'hyperkaliémie et de l'insuffisance rénale aiguë. La phentéramine, une amine sympathomimétique, est indiquée pour une utilisation à court terme dans le traitement de l'obésité exogène dans le cadre d'un régime de réduction du poids utilisant la restriction calorique (**Irwin et Belaid, 1988**)

- Les systèmes d'échange d'ions conviennent aux médicaments très sensibles à la dégradation enzymatique, car ils offrent un mécanisme de protection (**odkin, 1993**).
- Préparation des produits chimiques : acide chlorhydrique, sulfate d'ammonium, etc.
- Les résines sont aussi utilisées comme catalyseurs de réaction, soit en phase gazeuse (synthèse de l'ammoniac, hydrogénation,...), soit en phase liquide (estérification, hydrolyse, hydratation) (**Amara, 2003**).

PARTIE

EXPERIMENTALE

CHAPITRE II

MISE EN ŒUVRE DE LA RÉSINE

Ce chapitre étudie les propriétés physico-chimiques de la résine Amberlite IR-120.

II.1. Préparation des solutions aqueuses par la dissolution et la dilution

II.1.1.Principe

La dissolution est un processus physique et chimique dans lequel un soluté se dissout dans un solvant pour former un mélange homogène (appelé solution). Formellement, la dissolution est définie comme le mélange de deux phases et la formation d'une nouvelle phase homogène.

Lors de la dissolution, les atomes, les ions ou les molécules du soluté se dispersent et interagissent avec les molécules du solvant. Cette interaction est appelée solvatation. Selon la nature du soluté et du solvant, la solvatation peut impliquer des interactions ion-dipôle, une liaison hydrogène ou une liaison de Van der Waals (**Iupac, 1997**).

II.1.2.Verreir et produits utilisés

❖ Verrerie

- Verre de montre.
- Fiole jaugée.
- Entonnoir.
- Pissette.
- Flacon.
- Spatule.
- Eprouvette.

❖ Produits utilisés

- Ethanol, Eau distillée, EDTA, HCl.
- MgSO_4 , NaOH, CaCO_3 , CaCl_2 , NaCl, Net.

II.1.3. Mode opératoire

Pour préparer une solution aqueuse par dissolution, à partir d'une matière solide:

Pour préparer une solution par dissolution, nous commençons par détermination de la substance à dissoudre (le soluté) et le solvant. Nous optons généralement pour l'eau comme solvant, bien que l'éthanol soit utilisé pour une solution de Net. Ensuite, nous calculons la masse du soluté en fonction de la concentration souhaitée (en molarité M), en utilisant la relation $m=C \times V \times M$, où C est la concentration, M est la masse molaire de soluté et V est le volume de la solution. La pesée du soluté se fait en plaçant un verre de montre sur une balance sensible, en tarant la balance, puis en pesant précisément la masse calculée en utilisant une spatule propre et

sèche. Pour la dissolution du soluté, nous ajoutons progressivement le solvant au soluté dans une fiole jaugée de 500 ml, en agitant continuellement jusqu'à dissolution complète. Une fois le soluté dissous, nous complétons le volume de la solution jusqu'au trait jaugé en ajoutant du solvant avec une pissette, en mélangeant bien après chaque ajout. Enfin, nous vérifions l'homogénéité de la solution pour nous assurer qu'il n'y a pas de dépôts ou de substances non dissoutes (Figure 09).

✓ **Stockage de la solution**

- Après la préparation de la solution, Elle est placée dans un flacon propre et hermétique et nous l'étiquetons avec les informations sur la solution, comme la concentration et la date de préparation.



Figure 09 : Les étapes de préparation des solutions.



Préparation d'une solution du chlorure de sodium NaCl (0.1N)



$$M_{\text{NaCl}} = M_{\text{Na}} + M_{\text{Cl}} = 23 + 35.5 = 58.5 \text{ g/mol.}$$

$$C = n / v \quad \Rightarrow \quad n = m / M$$

$$m = C \cdot V \cdot M = 0.1 \times 0.5 \times 58.5 = 2.93 \text{ g}$$

Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C = 0.1mol/l	V= 500 ml	M = 58.5 g/mol	m = 2.93 g



Figure 10 : Préparer une solution de NaCl.

➤ Préparation d'une solution de la soude caustique NaOH (0,1N)



Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C = 0.1 mol/l	V = 500 ml	M = 40 g/mol	m = 2g



Figure 11 : Préparer une solution de NaOH.

➤ Préparation d'une solution chlorure de calcium CaCl₂(0,1N: 0,05N)



Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C = 0.05 mol/l	V = 500 ml	M = 111 g/mol	m = 2,77g



Figure 12 : Préparer une solution de CaCl_2 .

➤ Préparation d'une solution chlorure de magnésium MgCl_2 (0,1N: 0,05N)



Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
$C = 0.05 \text{ mol/l}$	$V = 500 \text{ ml}$	$M = 95 \text{ g/mol}$	$m = 2,37 \text{ g}$



Figure 13 : Préparer une solution de MgCl_2 .

➤ Préparation d'une solution carbonate de calcium CaCO_3 (0,1N : 0,05N)

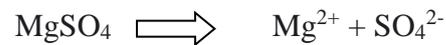


Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
$C = 0.05 \text{ mol/l}$	$V = 500 \text{ ml}$	$M = 100 \text{ g/mol}$	$m = 2,5 \text{ g}$



Figure 14 : Préparer une solution de CaCO₃.

➤ Préparation d'une solution carbonate de magnésium MgSO₄ (0,1N: 0,05N).



Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C= 0.05mol/l	V= 500ml	M=120.36g/mol	m=3.009g



Figure 15 : Préparer une solution de MgSO₄.

➤ Préparation d'une solution EDTA

L'EDTA est une poudre cristalline blanche, inodore et acide. Il est très peu soluble dans l'eau (0,02 g dans 100 ml à 22°C). Il est insoluble dans les acides et la plupart des solvants organiques, mais soluble dans les solutions caustiques et ammoniaquées. L'acide contenu dans ces solutions peut être précipité en ajoutant des acides minéraux, ce qui constitue une méthode de purification fréquente et simple.

EDTA : l'acide, ses sels et ses complexes Il fond vers 241-5°C, n'a pas de propriétés hygroscopiques et cristallise sans eau. Son poids moléculaire est de 292-25. La structure a déjà été donnée(Figure 16)(Flaschka, 1964).

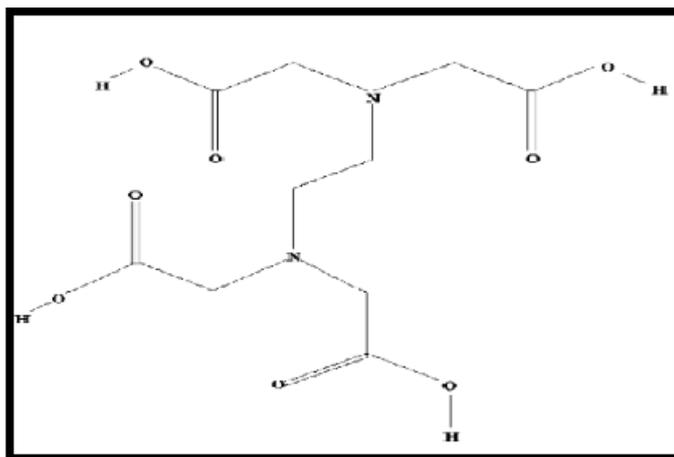


Figure 16 : Structure biochimique de l'acide éthylènediaminetétraacétique (Banfi, 2007).

Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C = 0.01 mol/l	V = 500 ml	M = 292.24 g/mol	m = 1.46 g



Figure 17 : Préparer une solution d'EDTA.

➤ Préparation d'une solution Net

NET est un composé azoïque cancérigène. Il est principalement utilisé comme indicateur dans les titrages complexes pour déterminer la dureté totale du calcium, du zinc et d'autres éléments dans l'eau, du magnésium et d'autres ions métalliques (Dave et al., 2011). Il est difficile de se biodégrader dans l'industrie textile (Gouder et al., 2016). La structure de la couleur noire de l'ériochrome T est donnée dans la (Figure 18).

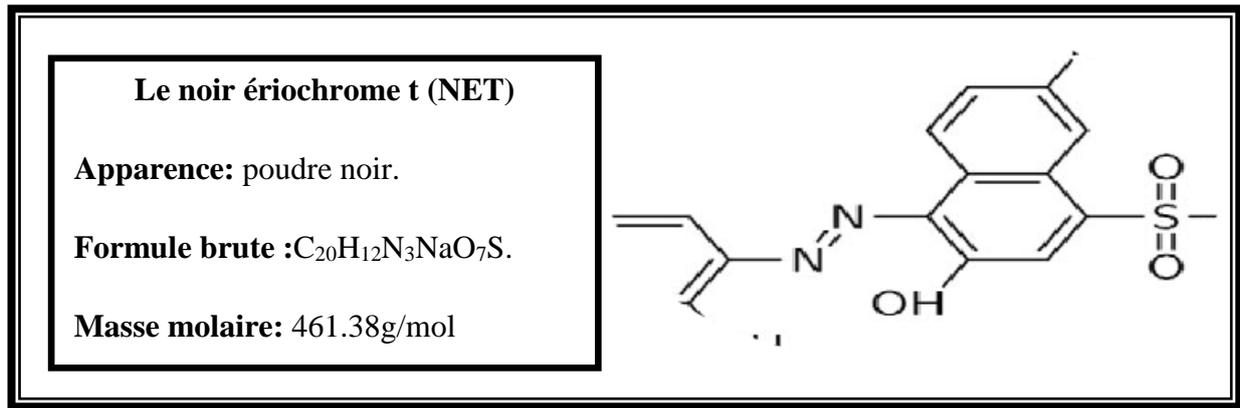


Figure 18 : Caractéristiques du Net (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/Eriochrom>).

Concentration	Volume	Masse molaire	Masse
C = 0.01 mol/l	V = 500 ml	M = 461.38g/mol	m = 0.50 g



Figure 19 : Préparer une solution de Net.

- **Préparation d'une solution aqueuse de l'acide fort HCl 5% diluée (à partir de HCl 37%, d=1.19), par la dilution**

Les solutions concentrées sont particulièrement corrosives. Leur manipulation nécessite de porter ou d'utiliser des équipements de protection individuels (gants, lunettes). Le travail sous hotte est impératif. Les dilutions s'effectuent toujours en versant l'acide dans l'eau. Cela permet d'éviter d'avoir des projections d'acide concentré lors de la dilution.

- La concentration molaire de la solution concentrée $C = \frac{10 \cdot d \cdot \rho}{M}$
- Par la loi du dilution : $C_1 V_1 = C_2 V_2$, on trouve $V_1 = C_2 V_2 / C_1$
- Sous l'hôte, On place un peu d'eau distillée dans une fiole jaugée de 500 ml. Avec une éprouvette on ajoute 20 ml de la solution commerciale. On agite puis on complète avec

de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. On bouche la fiole et on agite de nouveau pour homogénéiser la solution, mettre la solution dans un flacon étiqueté (Figure 20).



Figure 20 : Etape pour préparer la solution de HCl.

II.2.Régénération de la résine cationique

II.2.1. Identification d'Amberlite IR 120

Elle est une résine de type gel, elle est synthétisée par la polymérisation du styrène avec addition de 8% en masse, de divinylbenzène. Par ailleurs, elle est appliquée dans le traitement de l'eau, la séparation des métaux lourds, la séparation des amines acides, etc (Bouras, 2004).

II.2.2. Propriétés de la résine IR120

Tableau 01 : Les caractéristiques de l'Amberlite IR 120 (Aydin et al., 2017 ; Kocaoba, 2007).

Caractéristiques	Amberlite IR120
Gonflement	5 -7%
Réticulation	8%
Taux humidité	~ 54%
PH Utilisée	0 -14
Température maximum	120
Taille efficace	0.16 -0.45mm
Capacité d'échange	4.4meq/gr(Sec) 1.9meq/gr(humide)
Forme ionique	H ⁺
Groupe fonctionnelle	Acide Sulfonique
Matrice polymère	Styrène-DVB

II.2.3. Appareillage spécial

Dans notre étude, l'instrument expérimentale est constitué d'une colonne en verre, (Figure 21) de diamètre 2,5 cm est de capacité 100 ml, équipé d'un tampon de la laine de verre a pour but de retenir la résine. L'ampoule à décanter joue le rôle de réservoir pour les solutions traitées qui sont percoler à travers la résine (Bouras, 2004).



Figure 21 : La colonne en verre.

II.2.4. Verrerie et produits utilisés

❖ Verrerie

- Colonne. • Entonnoir. • Éprouvette. • Spatule.
- Burette. • Erlernmeyer. • Papier filter. • Barreau.
- Bécher. • Agitateur.

❖ Produits utilisés

- Eau distillée. • Amberlite IR 120. • Solution du BBT. • HCl.

II.2.5. Méthode de régénération de la résine IR120

Environ 60 ml de résine échangeuse d'ions sous forme Na^+ , sont introduits dans la colonne. On fait percoler 180 ml d'acide chlorhydrique à 5 %, à travers le lit de résine. Ce contact provoque un échange d'ions entre la résine et l'acide, alors que la résine libère les ions Na^+ pour capter les ions H^+ de l'acide, d'ailleurs le débit de l'effluent à raison d'une goutte par

seconde, puis on fait le rinçage de la résine à l'eau distillée jusqu'à pH neutre, on utilise pour cela le papier pH (Figure 22). Cette étape a été simulée par l'équation suivante (Bouras, 2004):

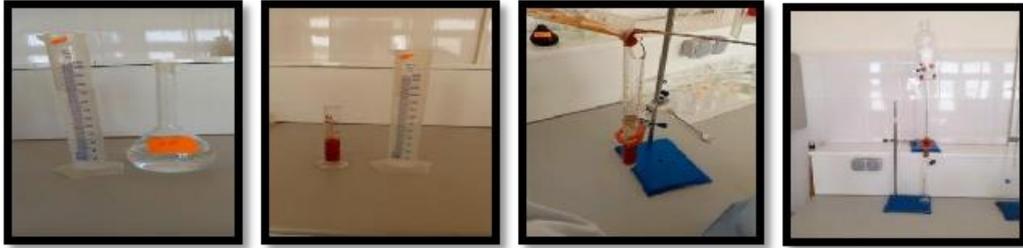


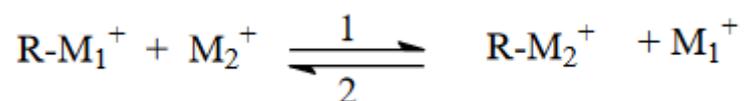
Figure 22 : Méthode de régénération de la résine IR 120.

II.3. Détermination de la capacité d'échange de cations de la résine

Amberlite IR – 120

II.3.1. Capacité d'échange

Le contact d'un échangeur d'ions (exemple : cationique), sous forme M_1^+ avec une solution aqueuse contient des ions M_2^+ , provoque un échange d'ions entre la résine et la solution traitée, la résine libère les ions M_1^+ pour capter les ions M_2^+ de la solution ; on explique cet équilibre par l'équation suivante :



Cet équilibre est décalé vers le sens 1, si les concentrations des ions M_2^+ dans la solution traitée est élevée, et se réalise un échange total des ions M_1 (fixé sur la résine) avec les ions M_2^+ qui existent dans la solution.

La capacité d'échange (ou le pouvoir d'échange), est le nombre d'équivalent gramme des ions susceptibles d'être fixés, par unité de masse de l'échangeur d'ions. Il existe deux types de capacité, le premier résulte de l'équilibre statique (capacité statique), le deuxième dans l'état d'un équilibre dynamique (la capacité dynamique).

La capacité d'échange de la résine est exprimée par l'équation suivante (Bouras, 2004) :

$$C = \left(\frac{C_e}{m_{sec}} \right) \cdot V_t$$

m_{sec} : est la masse de la résine.

V_t : est le volume total de la solution.

C_e : est la normalité de l'échantillon titré.

II.3.2. Détermination de la capacité statique de la résine IR 120

❖ L'indicateur BBT

Le bleu de bromothymol est un sulfone phtaléine, un composé chimique utilisé comme indicateur coloré dans les laboratoires de chimie. Il agit comme un monoacide, libérant un seul proton dans l'eau. Dans sa forme acide (IndH^+), le bleu de bromothymol produit une solution jaune dans l'eau, tandis que dans sa forme basique (Ind^{2-}), il donne une solution bleue. L'indicateur montre une teinte verte sensible dans un état d'équilibre entre ces deux formes à des pH intermédiaires. Les structures des formes acide et basique du bleu de bromothymol, ainsi que les couleurs des solutions aqueuses à différents pH, sont représentées sur la (Figure 23) (Piard, 2019).

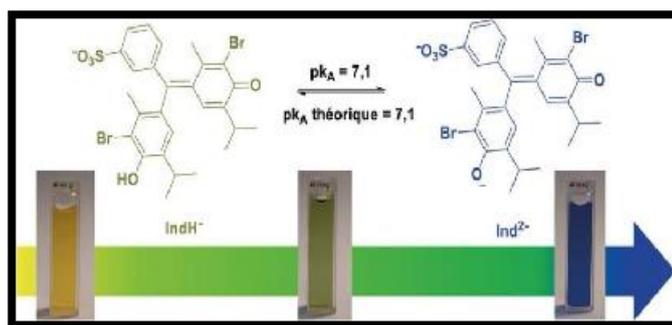


Figure 23 : Structure et couleur des différentes formes du BBT (Piard, 2019).

❖ Mode opératoire

- A l'aide l'éprouvette, mesurons 15 ml de la résine

- Nous versons la résine dans bécher, ajoutons 200 ml de solution de sodium et agitons à l'aide d'un agitateur pendant 30 minutes. Ensuite, laissons décanter le mélange et nous filtrons avec du papier filtre.
- Lavons la résine deux fois avec de l'eau distillée (50ml), en agitant pendant 10 minutes à chaque fois.
- Collectons le liquide flottant et plaçons la solution dans le même bécher.
- Titrons la solution acide obtenue, en utilisant la soude caustique NaOH avec quelques gouttes de BBT.
- Pour mesurer la masse sèche m_{sec} , pesons la résine régénérer, après un séchage dans l'étuve à 105°C pendant une heure (Bouras, 2004) (Figure 24).

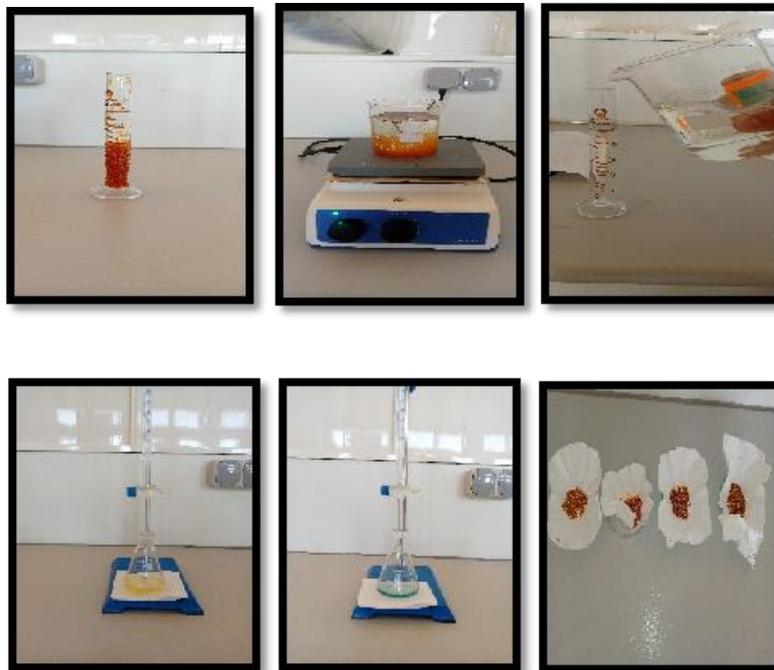


Figure 24 : Étapes de la détermination de la capacité statique.

La capacité statique est exprimée par l'équation suivante :

$$C = \left(\frac{C_e}{m_{sec}} \right) \cdot Vt$$

Avec :

C: La capacité d'échange de cations de la résine en méq/gr

M_{sec} : la masse de la résine sec = 5.57 gr

V_t : le volume total de la solution.

C_e : la normalité de l'échantillon titré.

V_e : le volume de l'échantillon titré.

N_b : la normalité de la base NaOH.

V_b : le volume de la base NaOH.

Tableau 02 : Les résultats expérimentaux (Cas : NaCl).

RSO ₃ H/NaCl							
Essais	Volume de l'échantillon (ml)	Volume de NaOH (ml)		Volume totale (ml)	Volumemoyen NaOH(ml)	Masse sec (g)	Capacité statique méq/gr
1	10 ml	4,6	Vert	300	4,73	5.57	2.54
2	10 ml	4,8	Vert				
3	10 ml	4,8	Vert				

De sachant que $V_t = 200\text{ml (NaCl)} + 2 \times 50\text{(ml) H}_2\text{O} = 300\text{ ml}$.

$$C = \frac{\left(\frac{0.1 \times 4.73}{10} \right)}{m \text{ sec}} \times 300 \times 10^{-3} = 2.54 \times 10^{-3} \text{ éq / gr} = 2.54 \text{ méq / gr}$$

La capacité statique $C = 2.54 \text{ méq/gr}$

De la même façon, on pourra également calculer la capacité d'échange de cations en utilisant à la place de NaCl, le CaCl₂ (0.1N) (voir le tableau 03).

Tableau 03 : Les résultats expérimentaux (Cas : CaCl₂).

RSO ₃ H/ CaCl ₂							
Essais	Volume de l'échantillon (ml)	Volume de NaOH (ml)		Volume totale (ml)	Volume moyen NaOH (ml)	Masse sec (g)	Capacité statique méq/gr
1	10 ml	5.8	Vert	300	5.7	5.57	3.07
2	10 ml	5.6	Vert				
3	10 ml	5.7	Vert				

De sachant que $V_t = 200\text{ml (CaCl}_2) + 2 \times 50\text{(ml) H}_2\text{O} = 300\text{ ml}$.

$$C = \frac{\left(\frac{0.1 \times 5.7}{10}\right)}{m \text{ sec}} \times 300 \times 10^{-3} = 3.07 \times 10^{-3} \text{ éq / gr} = 3.07 \text{ méq / gr}$$

La capacité statique $C = 3.07 \text{ méq / gr}$,

De la même façon, on pourra également calculer la capacité d'échange de cations en utilisant à la place de NaCl, le CaCO₃ (0.1N) Tableau 04.

Tableau 04 : Les résultats expérimentaux (Cas : CaCO₃).

RSO ₃ H/CaCO ₃							
Essais	Volume de l'échantillon (ml)	Volume de NaOH (ml)		Volume totale (ml)	Volume moyen NaOH (ml)	Masse sec (g)	Capacité statique méq/gr
1	10 ml	0.9	Vert	300	0.86	5.57	0.46
2	10 ml	0.8	Vert				
3	10 ml	0.9	Vert				

De sachant que $V_t = 200\text{ml (CaCO}_3) + 2 \times 50\text{(ml) H}_2\text{O} = 300\text{ ml}$.

$$C = \frac{\left(\frac{0.1 \times 0.86}{10}\right)}{m \text{ sec}} \times 300 \times 10^{-3} = 0.46 \times 10^{-3} \text{ éq / gr} = 0.46 \text{ méq / gr}$$

La capacité statique $C = 0.46$ méq/gr ; pour Amberlite IR 120.

De la même façon, on pourra également calculer la capacité d'échange de cations en utilisant à la place de NaCl, le $MgCl_2$ (0.1N) Tableau 05.

Tableau 05 : Les résultats expérimentaux (Cas : $MgCl_2$).

RSO ₃ H/ MgCl ₂							
Essais	Volume de l'échantillon (ml)	Volume de NaOH (ml)		Volume totale (ml)	Volume moyen NaOH (ml)	Masse sec (g)	Capacité statique méq/gr
1	10 ml	3.7	Vert	300	3.6	5.57	1.93
2	10 ml	3.8	Vert				
3	10 ml	3.5	Vert				

De sachant que $V_t = 200\text{ml} (MgCl_2) + 2 \times 50(\text{ml}) H_2O = 300$ ml.

$$C = \frac{\left(\frac{0.1 \times 3.6}{10}\right)}{m \text{ sec}} \times 300 \times 10^{-3} = 1.93 \times 10^{-3} \text{ éq / gr} = 1.93 \text{ méq / gr}$$

La capacité statique $C = 1.93$ méq/gr,

De la même façon, on pourra également calculer la capacité d'échange de cations en utilisant à la place de NaCl, le $MgSO_4$ (0.1N) (**Bouras, 2004**) (voir le tableau 06).

Tableau 06 : Les résultats expérimentaux (Cas : $MgSO_4$).

RSO ₃ H / MgSO ₄							
Essais	Volume de l'échantillon (ml)	Volume de NaOH (ml)		Volume totale (ml)	Volume Moyen NaOH (ml)	Masse sec (g)	Capacité statique méq/gr
1	10 ml	4.3	Vert	300	4.3	5.57	2.31
2	10 ml	4.3	Vert				
3	10 ml	4.2	Vert				

De sachant que $V_t = 200\text{ml} (MgSO_4) + 2 \times 50(\text{ml}) H_2O = 300$ ml.

$$C = \frac{\left(\frac{0.1 \times 4.3}{10}\right)}{m \text{ sec}} \times 300 \times 10^{-3} = 2.31 \times 10^{-3} \text{ éq / gr} = 2.31 \text{ méq / gr}$$

La capacité statique $C=2.31$ méq/gr, pour Amberlite IR 120.

II.3.3 Détermination de la capacité dynamique de la résine IR 120

❖ Mode opératoire (Bouras, 2004)

➤ Préparer la colonne échangeuse d'ions

- Nous lavons bien la colonne échangeuse d'ions avec de l'eau distillée.
- Nous introduisons 15 ml de la résine Amberlite IR-120 dans la colonne.

➤ Percolation de l'échantillon à travers le lit de la résine :

- A l'aide l'ampoule à décanter, Nous versons lentement 500 ml de solution à analyser, à travers le lit de la résine.

➤ Mesurons 15 ml de la solution préparée à l'aide d'une éprouvette.

➤ Titrage de la solution avec NaOH :

- Nous ajoutons 3 gouttes de l'indicateur BBT à l'échantillon. La couleur devient jaune.
- Nous titrons la solution en ajoutant goutte à goutte la solution de NaOH.
- Nous continuons le titrage jusqu'à la couleur de la solution devient vert (Figure25).



Figure 25 : Étapes de la détermination de la capacité dynamique.

Pour chaque essai on a une neutralisation : $N_e \cdot V_e = N_b \cdot V_b$

Titration N°1 : $N_{e1} \cdot V_{e1} = N_b \cdot V_{b1}$

Titration N°2 : $N_{e2} \cdot V_{e2} = N_b \cdot V_{b2}$

·
·
·
·
·

Titration N° 30 : $N_{e30} \cdot V_{e30} = N_b \cdot V_{b30}$

avec $N_{b1} = N_{b2} = \dots \dots \dots N_b = 0.1N$

$$(N_{e1} \cdot V_{e1} + N_{e2} \cdot V_{e2} + \dots \dots \dots N_{ei} \cdot V_{ei}) = N_b (V_{b1} + V_{b2} + \dots \dots + V_{bi})$$

$$C_{dy} = \frac{ne}{m_{sec}} = \frac{\sum ne(H^+)}{m_{sec}} = \frac{N_b}{m_{sec}} \sum_{i=1}^{30} V_{bi}$$

De la même façon, on pourra également calculer la capacité d'échange de cations, en utilisant à la place de NaCl, le CaCO₃, MgSO₄ et le MgCl₂. (Bouras, 2004)

Les résultats sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau 07 : Valeurs de capacité dynamique.

Masse sec(g)	NaCl		CaCl ₂		MgCl ₂		CaCO ₃		MgSO ₄	
	∑V _b (ml)	Capacité dynamique (meq/g)	∑V _b	C _d						
5.57	107.45	1.92	186.3	3.34	145.05	2.61	64.66	1.16	170.7	3.06

Tableau 08 : Représente les résultats expérimentaux CaCl₂.

CaCl ₂							
	V _ε (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)		V _ε (ml)	Couleur	[H ⁺] (mol/l)
1	51	Vert	0.34	16	4.0	Vert	0.026
2	16.4	Vert	0.109	17	3.4	Vert	0.0226
3	8.9	Vert	0.059	18	3.2	Vert	0.021
4	8.3	Vert	0.055	19	3.1	Vert	0.0206
5	7.8	Vert	0.052	20	2.7	Vert	0.018

6	7.7	Vert	0.051	21	2.5	Vert	0.016
7	7.6	Vert	0.05	22	2.2	Vert	0.0146
8	7.4	Vert	0.049	23	2.1	Vert	0.014
9	7.2	Vert	0.048	24	2.0	Vert	0.013
10	6.8	Vert	0.045	25	1.7	Vert	0.011
11	6.5	Vert	0.043	26	1.4	Vert	0.00933
12	5.5	Vert	0.0366	27	1.2	Vert	0.008
13	5.1	Vert	0.034	28	1.1	Vert	0.00733
14	4.8	Vert	0.032	29	0.5	Vert	0.00333
15	4.2	Vert	0.028	30	00	Vert	0.0

Tableau 09 : Représente les résultats expérimentaux $MgCl_2$.

MgCl ₂							
	V _é (ml)	Couleur	[H ⁺] (mol/l)		V _é (ml)	Couleur	[H ⁺] (mol/l)
1	46.5	Vert	0.31	16	3.0	Vert	0.02
2	17.2	Vert	0.114	17	2.7	Vert	0.018
3	7.7	Vert	0.051	18	2.4	Vert	0.016
4	6.9	Vert	0.046	19	2.1	Vert	0.014
5	5.5	Vert	0.0366	20	2.0	Vert	0.013
6	5.4	Vert	0.036	21	1.7	Vert	0.011
7	5.3	Vert	0.035	22	1.3	Vert	0.00866
8	4.9	Vert	0.0326	23	1.0	Vert	0.00666
9	4.8	Vert	0.032	24	0.9	Vert	0.006
10	4.7	Vert	0.031	25	0.4	Bleu	0.00266
11	4.2	Vert	0.028	26	0.3	Vert	0.002
12	3.7	Vert	0.024	27	0.2	Vert	0.00133
13	3.5	Vert	0.023	28	0.1	Vert	0.00066
14	3.4	Bleu	0.0226	29	0.05	Vert	0.00033
15	3.2	Vert	0.021	30	0	Vert	0.0

Tableau 10 : Représente les résultats expérimentaux $MgSO_4$.

MgSO₄							
	V _é (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)		V _é (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)
1	52.3	Vert	0.348	16	3.8	Vert	0.025
2	17	Vert	0.113	17	3.6	Vert	0.024
3	6.7	Vert	0.0446	18	3.5	Bleu	0.023
4	5.5	Vert	0.036	19	3.2	Vert	0.021
5	5.3	Vert	0.035	20	3.0	Bleu	0.02
6	5.2	Vert	0.0346	21	2.7	Vert	0.018
7	5.1	Vert	0.034	22	2.5	Vert	0.016
8	5.0	Vert	0.033	23	2.2	Vert	0.0146
9	5.0	Vert	0.033	24	2.1	Vert	0.014
10	4.9	Vert	0.0326	25	2.0	Vert	0.013
11	4.7	Vert	0.031	26	1.6	Vert	0.0106
12	4.5	Vert	0.03	27	0.8	Vert	0.00533
13	4.2	Vert	0.028	28	0.5	Vert	0.00333
14	4.0	Vert	0.0266	29	0.3	Vert	0.002
15	3.9	Vert	0.026	30	0	Vert	0.0

Tableau 11 : Représente les résultats expérimentaux NaCl.

NaCl							
	V _é (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)		V _é (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)
1	12.8	Vert	0.085	16	2.8	Vert	0.0186
2	7.6	Vert	0.05	17	2.5	Vert	0.016
3	6.8	Vert	0.045	18	2.2	Vert	0.014
4	6.7	Vert	0.044	19	1.8	Vert	0.012
5	6.5	Vert	0.043	20	1.4	Vert	0.00933
6	6.4	Vert	0.0426	21	1.2	Vert	0.008
7	6.3	Vert	0.042	22	1	Vert	0.0066
8	6.2	Vert	0.041	23	0.6	Vert	0.004
9	6.2	Vert	0.041	24	0.5	Vert	0.00333
10	5.9	Vert	0.039	25	0.4	Vert	0.00266
11	5.8	Vert	0.038	26	0.3	Vert	0.002

12	4.3	Vert	0.0286	27	0.2	Vert	0.00133
13	4.1	Vert	0.027	28	0.1	Vert	0.00066
14	3.5	Vert	0.023	29	0.05	Vert	0.00033
15	3.3	Vert	0.022	30	0	Vert	0.0

Tableau 12 : Représente les résultats expérimentaux CaCO₃.

CaCO ₃			
	V _é (ml)	Couleur	[H ⁺](mol/l)
1	56	Vert	0.37
2	3.1	Vert	0.0206
3	1.3	Vert	0.00866
4	1	Vert	0.00666
5	0.9	Vert	0.006
6	0.6	Vert	0.004
7	0.5	Vert	0.00333
8	0.3	Vert	0.002
9	0.2	Vert	0.00133
10	0.1	Vert	0.00066
11	0.05	Vert	0.00033
12	0.01	Vert	0.000

II.4. Taux d'humidité

Le séchage de la résine, à l'air n'élimine pas la totalité de l'eau à l'intérieur de chaque grain, cette quantité résiduelle peut être calculée par pesée avant et après séchage à l'étuve à 105°C tableau 13. Cette valeur est calculée de la relation suivante:

$$h(\%) = \left(\frac{m_{\text{hydratée}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{hydratée}}} \right)$$

Tableau 13 : Résultats expérimentaux représentent le taux d'humidité de la résine.

m _{hydratée} (gr)	m _{sec} (gr)	h(%)
50	24.37	51.26

CHAPITER III

EFICACITE DE LA RESINE

Dans ce chapitre traite de l'efficacité de la résine Amberlite IR-120 dans le traitement des eaux dures.

III.1. Détermination des paramètres physico-chimique des échantillons d'eaux à traiter (CO, pH, TH)

III.1.1. Conductivité

Est la mesure de la capacité d'un liquide à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la température et est liée à la concentration ainsi qu'à la nature des substances dissoutes. En général, les sels minéraux sont de bons conducteurs, tandis que la matière organique conduit peu. La conductivité d'une solution correspond à la mesure de la capacité des ions à transporter le courant électrique. Ce transport du courant électrique s'effectue par la migration des ions dans un champ électrique produit par un courant alternatif. Sa mesure se fait à l'aide d'une cellule de conductivité couplée à un conductivimètre, et la conductivité s'exprime en microsiemens par centimètre ($\mu\text{s/cm}$) (Ceaq, 2015)..

III.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H^+). Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés (De villers et al., 2005):

III.1.3 Verrerie et produits utilisés

❖ Verrerie

- Colonne, entonnoir, éprouvette, pissette, bécher, burette, erlenmeyer.

❖ Produits utilisés

- Amberlite IR 120, EDTA, NH_3 , Echantillons des eaux ; NET.

III.1.4 Appareillages d'analyse

❖ Multi paramètre

Est un appareil permettant la mesure de différents paramètres chimiques comme la mesure de pH ou de conductivité. L'appareil change de mode en fonction de la sonde qui lui est connectée. Compact et portable, cet appareil permet des mesures rapides et fiables, en laboratoire comme à l'extérieur (Figure 26)(Behdenna, 2022).

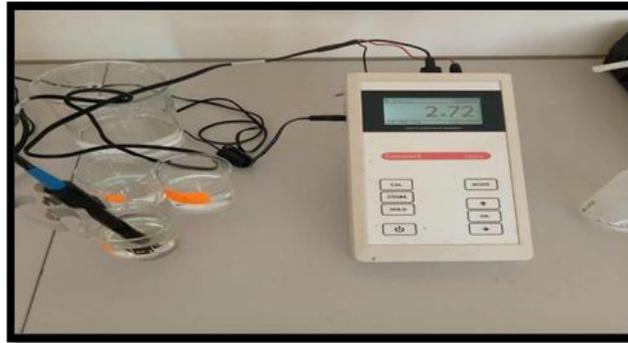


Figure 26 : Multi paramètre.

❖ Le pH-mètre

C'est un appareil électronique utilisé pour mesurer le pH (pH ou alcalinité) d'un liquide spécifique. Il se compose généralement d'une électrode spéciale (électrode de verre) connectée à une balance électronique et affiche le numéro de pH (Figure 27) (**Behdenna, 2022**).



Figure 27 : PH-mètre.

Tableau 14 : Les informations sur les échantillons.

Echantillon	Région	Les observations
01	Ferdjioua (Sbikhia)	Cette eau a un goût salé et une couleur jaune clair, elle n'est pas adaptée à la consommation ou à l'utilisation pour le lavage.
02	Bouslah (Bab alwad)	Cette eau consomme beaucoup de savon et ne produit pas de mousse, donc elle n'est pas appropriée pour la consommation ou la cuisson.
03	Tassadane	Lorsqu'il est utilisé pour l'irrigation, les plantes se flétrissent et meurent. Il n'est pas recommandé pour la consommation ou le lavage.
04	Beinan (Bardou)	Lorsque l'on arrose les plantes avec cette eau, on remarque clairement leur croissance, mais elle n'est pas adaptée à la consommation.
05	Mila (belmarka)	Les eaux sont impropres à la consommation et ne produisent pas de mousse, ce qui entraîne une consommation excessive de savon.
06	Mechta dar echrif. Tassadane	Lorsque l'on arrose les plantes avec cette eau, on remarque clairement leur croissance, mais elle n'est pas adaptée à la consommation.
07	Dar elhemra. Beinan	Cette eau n'est pas potable en raison de son mauvais goût, mais elle est excellente pour l'arrosage des plantes où nous remarquons clairement leur croissance. De plus, elle ne produit pas de mousse et consomme beaucoup de savon.
08	Ferdjioua (bni wekden)	Les eaux sont impropres à la consommation et ne produisent pas de mousse, ce qui entraîne une consommation excessive de savon.
09	Ain elbida aharich (aziza)	Les eaux sont impropres à la consommation et ne produisent pas de mousse, ce qui entraîne une consommation excessive de savon.
10	Zareza	Lorsque l'on arrose les plantes avec cette eau, on remarque clairement leur croissance, mais elle n'est pas adaptée à la consommation.

III.1.5. Mode opératoire

Après avoir allumé le pH-mètre et ajusté les paramètres, nous versons environ 50 ml de l'échantillon dans un bécher. Nous plaçons ensuite l'électrode du pH-mètre dans le bécher et la remuons légèrement en attendant l'apparition de la lecture sur l'appareil. Une fois la lecture affichée, nous l'enregistrons puis nous rinçons l'électrode avec de l'eau distillée (Figure 28).

- Pour mesurer la conductivité, nous utilisons un appareil multi-paramètres de la même manière.
- Les autres échantillons sont ensuite testés de la même manière précédente. Les résultats sont regroupés au tableau 15.



Figure 28 : Méthode de mesure du pH et la Conductivité.

Tableau 15 : Les résultats expérimentaux.

Echantillon	pH solution	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	7.52	198.8
2	7.16	515.6
3	7.11	2.71
4	6.79	1439.6
5	7.50	271
6	7.03	2.32
7	6.55	3.49
8	7.35	1027
9	7.30	892
10	7.85	2.04

III.2. Détermination la dureté de l'eau

III.2.1. Mode opératoire

❖ Titration de l'eau traitée avec EDTA

- Introduisons 25 ml d'eau à traiter dans un erlenmeyer (100 ml), avec 0,5 ml de solution tampon (10) pour ajuster le pH, puis nous ajoutons 0.5 ml de NH_3 .
- Nous ajoutons 3 gouttes de l'indicateur NE T à l'échantillon. La couleur devient rouge en présence d'ions calcium et magnésium.
- Nous titrons l'échantillon en ajoutant lentement la solution d'EDTA. Nous continuons le titrage jusqu'à ce que la couleur de la solution passe de rouge au bleu (Figure 29).

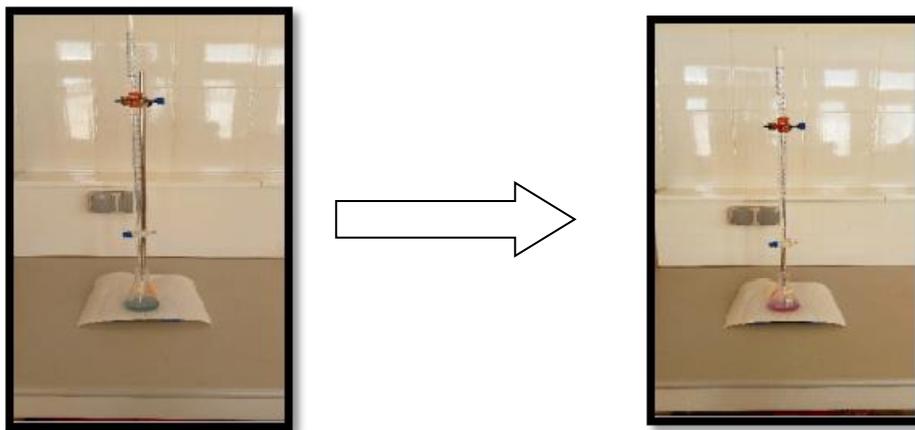


Figure 29 : montage de dosage.

Mesure le TH et la concentration de (Mg^{2+} , Ca^{2+}) :

$$TH = \frac{1000(C_{\text{edta}} \cdot V_{\text{edta}})}{V_{\text{échantillon}}}$$

$$\text{On a: } n_{\text{EDTA}} = n_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+})}$$

$$N_{\text{EDTA}} = N_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+})}$$

$$C \cdot V_{\text{EDTA}} = C \cdot V_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+})}$$

$$C_1 \cdot V_{\text{eq EDTA}} = C_2 \cdot V_2 (\text{eau})$$

Donc :

$$C = C_1 \cdot V_{\text{eq}} / V_{2\text{eau}}$$

C_1 : la concentration de solution EDTA.

V_2 : le volume de l'échantillon d'eau.

C_2 : la concentration totale de calcium et magnésium.

Tableau 16 : Les résultats obtenus

Echantillon	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	V _{eq} (ml)	C (Mg ²⁺ , Ca ²⁺) (mol/ l)	TH (°F)
01	64.7	64.5	64.6	25.84 × 10 ⁻³	25.84
02	43.4	42.1	42.93	17.17 × 10 ⁻³	17.17
03	03.2	03.6	3.4	1.36 × 10 ⁻³	1.36
04	08	07.3	07.65	3.06 × 10 ⁻³	03.06
05	48.2	47.9	48.05	19.22 × 10 ⁻³	19.22
06	08.3	08.2	08.25	3.3 × 10 ⁻³	03.3
07	28.5	28.5	28.5	11.4 × 10 ⁻³	11.4
08	19.4	19.5	19.45	7.78 × 10 ⁻³	07.78
09	24.9	24.7	24.8	9.92 × 10 ⁻³	09.92
10	06.6	07.6	07.1	2.84 × 10 ⁻³	02.84

III.3. Détermination des paramètres physiques –chimique des échantillons traités

III.3.1.Mode opératoire

❖ Préparer la colonne échangeuse d'ion

- Nous rinçons la colonne avec de l'eau distillée.
- Nous introduisons 15 ml de la résine Amberlite IR-120 dans la colonne.

❖ Passer l'échantillon à travers le lit de la résine :

- Nous versons lentement d'échantillon d'eau à analyser à travers le lit de la résine dans la colonne.
- Nous collectons l'eau traitée dans un bécher (Figure 30).

- Nous lisons les valeurs de pH et la conductivité CO de la même manière que la méthode précédente (mentionnée paragraphe III.1.5) tableau 17.

Tableau 17 : Les Résultats expérimentaux.

Echantillon	pH solution	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	7.35	-20.9
2	7.38	-21.0
3	7.27	-17.46
4	7.37	-21.6
5	7.28	-23.7
6	7.38	-22.5
7	7.38	-21.6
8	7.32	-22.6
9	7.36	-21.6
10	7.39	-21.6

III.4. Détermination de la dureté de l'eau traitée

III.4.1. Mode opératoire

- Nous rinçons la colonne avec de l'eau distillée.
- Nous introduisons 15 ml de la résine dans la colonne.
- Nous versons lentement 90 ml d'échantillon d'eau à traiter à travers le lit de la résine. A l'aide l'éprouvette, nous mesurons 25 ml de l'eau traitée (Figure 31).
- Nous mesurons ensuite le TH de la même manière que la méthode précédente (mentionnée au paragraphe III.2.1) tableau 18.

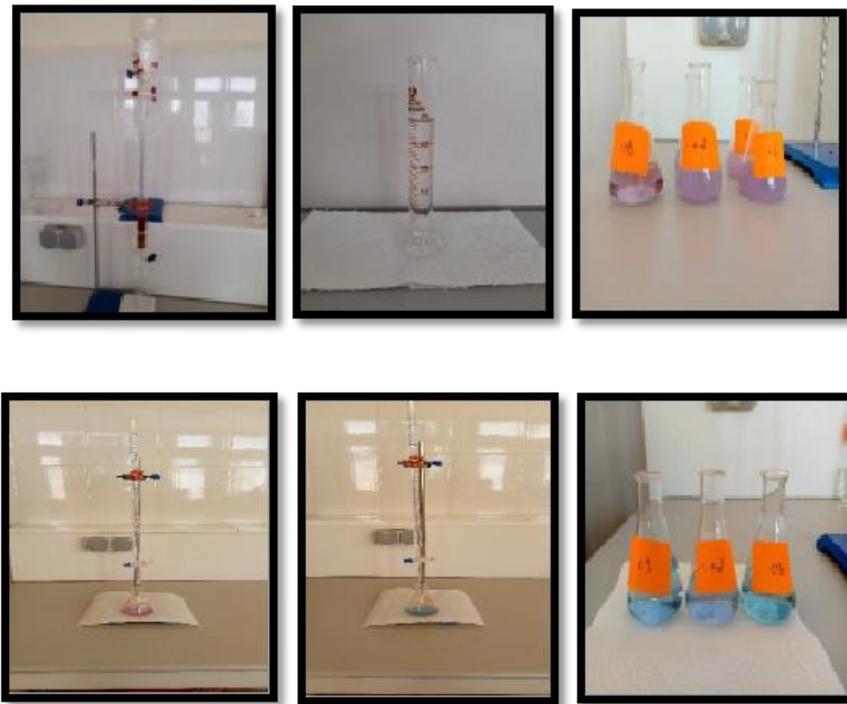


Figure 30 : Etapes pour déterminer la dureté de l'eau après traitement.

Tableau 18 : Résultats expérimentaux.

Echantillon	V1 (ml)	V2 (ml)	Vé (ml)	C ($Mg^{2+}Ca^{2+}$) (mol/l)	TH (°F)
01	2.8	2.9	2.85	1.14×10^{-3}	1.14
02	2	2	2	0.8×10^{-3}	0.8
03	2	2	2	0.8×10^{-3}	0.8
04	3	3.1	3.05	1.22×10^{-3}	1.22
05	4.1	4.1	4.1	1.64×10^{-3}	1.64
06	8.3	8.2	8.25	3.3×10^{-3}	3.3
07	3.8	3.7	3.75	1.5×10^{-3}	1.5
08	2.3	2.3	2.3	0.92×10^{-3}	0.92
09	1.1	1.1	1.1	0.44×10^{-3}	0.44
10	2.7	3	2.85	1.14×10^{-3}	1.14

CHAPTER IV
RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Les résultats de Détermination de la capacité d'échange de la Résine Amberlite IR 120

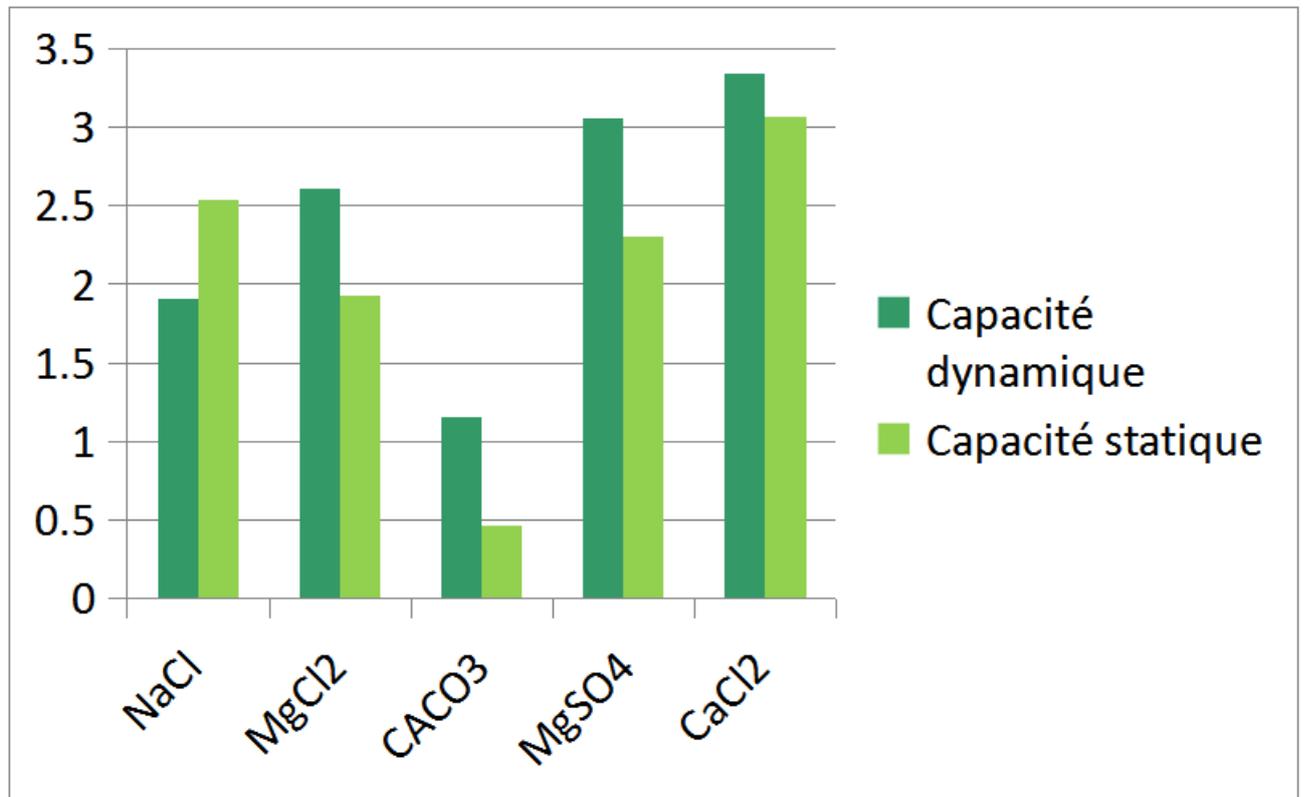


Figure 31 : Résultats pour la capacité statique et dynamique de la résine Amberlite IR 120.

Interprétation les résultats

- D'après les résultats obtenus, il est clair que la résine présente une capacité dynamique et statique plus élevée lorsqu'elle est dans un état bivalent (Ca^{2+} , Mg^{2+}) par rapport à un état univalent (Na^+). De plus, nous avons observé que la capacité dynamique de la résine est supérieure à sa capacité statique dans la même solution.
- Dans le cas de la résine échangeuse d'ions fortement acide, la capacité dynamique et statique dépend de plusieurs facteurs, notamment :
- Charge ionique : Les ions bivalents portent une charge de deux, tandis que les ions monovalents portent une charge unique. Les résines échangeuses d'ions ont une capacité accrue à retenir les ions à charge plus élevée en raison de forces électrostatiques plus fortes.

- Taille de l'ion : Les ions bivalents sont souvent de plus petite taille ou ont une répartition de charge plus dense, ce qui facilite leur capture dans les sites d'échange ionique sur la résine.
- Concentration et diffusion : Les ions monovalents se diffusent plus rapidement dans la solution, ce qui peut réduire leur efficacité de rétention sur la résine par rapport aux ions bivalents. En conséquence, la capacité dynamique des ions bivalents est plus élevée par rapport aux ions monovalents lors du passage de solutions ioniques à travers la résine.
- La capacité dynamique de la résine est plus grande que sa capacité statique car la capacité dynamique mesure la capacité de la résine à absorber et à retirer les ions d'une solution en mouvement, assurant ainsi un renouvellement continu de la surface de la résine et une interaction continue avec la solution. Dans un système dynamique, il y a un flux continu de solution à travers la résine, ce qui augmente les chances d'interaction entre les ions et la surface active de la résine, améliorant ainsi l'efficacité de l'échange ionique.

En revanche, la capacité statique mesure la capacité de la résine dans un état d'équilibre stationnaire, où il n'y a pas de flux continu de solution. Dans cette situation, les réactions ioniques sont limitées par la diffusion des ions dans la solution stationnaire et leur capacité à atteindre la surface de la résine. Cela signifie que les ions peuvent atteindre un équilibre avec la surface de la résine plus rapidement, mais avec une efficacité moindre car les ions éloignés de la surface active peuvent ne pas participer efficacement à l'interaction.

IV.2. Les résultats de la conductivité et du pH des échantillons à traiter

Tableau 19 : les valeurs de la conductivité et pH d l'eau avant et après le traitement avec Amberlite IR 120.

Echantillon	Avant		Après	
	pH solution	Conductivité	pH solution	Conductivité
1	7.52	198.8	7.35	-20.9
2	7.16	515.6	7.38	-21.0
3	7.11	2.71	7.27	-17.46
4	6.79	1439.6	7.37	-21.6
5	7.50	271	7.28	-23.7
6	7.03	2.32	7.38	-22.5
7	6.55	3.49	7.38	-21.6
8	7.35	1027	7.32	-22.6

9	7.30	892	7.36	-21.6
10	7.85	2.04	7.39	-21.6

❖ Interprétation les résultats

D'après les résultats obtenus, nous avons observé que les valeurs de conductivité étaient élevées et que le pH était déséquilibré dans les échantillons avant traitement. Après traitement avec la résine Amberlite IR120, nous avons constaté une diminution des valeurs de conductivité à des niveaux négatifs et un équilibre du pH atteignant environ 7,35.

a) Avant le traitement par l'Amberlite IR120

La présence d'ions calcium et magnésium dans l'eau dure affecte sa capacité de conduire l'électricité de plusieurs façons :

- Augmentation de la conductivité ionique : Les ions calcium et magnésium portent des charges positives, facilitant ainsi leur mouvement dans le milieu aqueux. Cela signifie que l'eau dure transporte plus d'ions positifs pouvant conduire l'électricité de manière plus importante.
- Impact sur la structure de l'eau : Les ions calcium et magnésium réagissent avec les molécules d'eau, régulant ainsi leur structure moléculaire. Cet effet peut rendre l'eau plus ordonnée et organisée, augmentant ainsi sa capacité à transporter les charges électriques de manière plus efficace.
- Effet sur le pH : Les ions calcium et magnésium peuvent affecter l'équilibre des ions hydrogène dans l'eau, ce qui à son tour affecte le pH. Les variations de PH peuvent affecter la conductivité électrique de manière multiple et complexe, car les changements de pH peuvent affecter les charges de surface des substances présentes dans le milieu, et donc leur capacité à conduire le courant électrique.

b) Après le traitement par la résine Amberlite IR120

Après le passage de l'eau dure à travers la résine, un échange ionique se produit entre les sels minéraux lourds présents dans l'eau (comme le calcium et le sodium) et les ions positifs dans la résine, qui sont souvent des ions hydrogène. Cet échange ionique élimine les sels minéraux lourds de l'eau et les remplace par des ions hydrogène.

Ce processus entraîne plusieurs effets qui contribuent à la diminution de la conductivité et du pH de l'eau dure :

- Réduction du taux de sels minéraux : Une fois que les ions calcium et sodium ont été échangés contre des ions hydrogène, la teneur en sels minéraux de l'eau diminue. Ces sels minéraux jouaient un rôle dans l'augmentation de la conductivité et du pH de l'eau. Par conséquent, la réduction du taux de sels minéraux diminue la capacité de l'eau à transporter le courant électrique et conduit à une diminution du pH.
- Modification de l'équilibre ionique : Lorsque les sels minéraux sont éliminés et remplacés par des ions hydrogène, cela entraîne un changement dans l'équilibre des ions dans l'eau. Ce changement peut affecter la capacité de l'eau à transporter les charges électriques et donc influencer le pH.

IV.3. Résultats de Détermination de la dureté d'eau

Tableau 20 : Résultats de la dureté d'eau avant et après le traitement avec Amberlite IR 120.

	Avant			Après		
	V _é (ml)	C (Mg ²⁺ ,Ca ²⁺) (mol/l)	TH (°F)	V _é (ml)	C (Mg ²⁺ ,Ca ²⁺) (mol/l)	TH(°F)
1	64.6	25.84 × 10 ⁻³	25.84	2.85	1.14 × 10 ⁻³	1.14
2	42.93	17.17 × 10 ⁻³	17.17	2	0.8 × 10 ⁻³	0.8
3	3.4	1.36 × 10 ⁻³	1.36	2	0.8 × 10 ⁻³	0.8
4	07.65	3.06 × 10 ⁻³	03.06	3.05	1.22 × 10 ⁻³	1.22
5	48.05	19.22 × 10 ⁻³	19.22	4.1	1.64 × 10 ⁻³	1.64
6	08.25	3.3 × 10 ⁻³	03.3	8.25	3.3 × 10 ⁻³	3.3
7	28.5	11.4 × 10 ⁻³	11.4	3.75	1.5 × 10 ⁻³	1.5
8	19.45	7.78 × 10 ⁻³	07.78	2.3	0.92 × 10 ⁻³	0.92
9	24.8	9.92 × 10 ⁻³	09.92	1.1	0.44 × 10 ⁻³	0.44
10	07.1	2.84 × 10 ⁻³	02.84	2.85	1.14 × 10 ⁻³	1.14

❖ Interprétation des résultats

Après avoir effectué l'expérience en laboratoire et analysé les résultats, nous avons remarqué une diminution du volume d'EDTA après traitement avec la résine Amberlite IR120 par rapport au volume avant traitement. De plus, une diminution de la valeur de TH a été observée après le traitement .

- Valeurs élevées du volume de l'EDTA et de TH lors du calibrage de l'eau dure :

- Des valeurs élevées de volume d'EDTA et de TH lors du calibrage de l'eau dure sont observées. L'EDTA se lie aux ions calcium et magnésium présents dans l'eau dure. À mesure que la dureté de l'eau augmente, indiquant des niveaux plus élevés de calcium et de magnésium, davantage d'EDTA est nécessaire pour chélater ces ions, ce qui entraîne un volume d'EDTA plus élevé.
- La dureté totale (TH) est un indicateur de la quantité totale d'ions métalliques alcalino-terreux dans l'eau, notamment le calcium et le magnésium. Par conséquent, une augmentation de la proportion de ces ions dans l'eau se traduit par une augmentation de la valeur de TH.
- Diminution des valeurs de l'EDTA et de TH après le passage de l'eau à travers le lit de la résine Amberlite IR 120.
- La réduction des valeurs de l'EDTA et de la TH après le passage de l'eau à travers le lit de la résine Amberlite IR 120 peut être expliquée comme suit :

La résine Amberlite IR 120 contient des ions sodium et agit en éliminant les ions calcium et magnésium de l'eau, réduisant ainsi sa dureté. Une fois que l'eau traverse la résine, ces ions calcium et magnésium sont éliminés, ce qui signifie que moins d'EDTA est nécessaire pour chélater ces métaux dans l'eau. Par conséquent, le volume total d'EDTA utilisé diminue. De plus, comme la proportion de calcium et de magnésium diminue dans l'eau, cela entraîne une réduction de la valeur de la dureté totale (TH).

En résumé, la résine Amberlite IR 120 purifie l'eau en éliminant les ions responsables de sa dureté, ce qui réduit à la fois la quantité d'EDTA nécessaire et la valeur de la TH après traitement.

CONCLUSION

Conclusion

Ce mémoire a démontré que le processus d'élimination des ions durs des eaux souterraines à l'aide de la résine Amberlite IR 120 s'avère très efficace pour améliorer la qualité de l'eau. L'étude a confirmé la capacité de ce matériau à éliminer efficacement les ions responsables de la dureté, tels que le calcium et le magnésium, en faisant une solution adaptée pour divers usages des eaux souterraines.

Les résultats montrent que le processus d'échange d'ions est non seulement efficace mais aussi économique et respectueux de l'environnement par rapport aux méthodes traditionnelles. L'efficacité de cette élimination dépend de plusieurs facteurs, notamment la concentration des ions durs, la quantité de résine utilisée et la durée de contact. De plus, la facilité de régénération de la résine Amberlite IR 120 renforce sa durabilité, permettant une utilisation prolongée sans nécessiter de remplacements fréquents.

Sur la base de ces résultats, il est recommandé de déployer largement la technologie d'échange d'ions pour traiter les eaux souterraines dans les régions confrontées à des problèmes de dureté. Cette étude peut également servir de point de départ pour des recherches futures visant à améliorer cette technologie et à élargir son utilisation pour l'élimination d'autres types de polluants de l'eau.

En conclusion, la technologie d'échange d'ions représente une option prometteuse dans le domaine du traitement des eaux. Son application pourrait grandement contribuer à résoudre les problèmes de pénurie d'eau douce et à améliorer la qualité de vie, et l'agriculture dans de nombreuses régions de notre pays l'Algérie.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Akram, S., & Rehman, F. (2018).** Hardness in drinking-water, its sources, its effects on humans and its household treatment. *J Chem Appl*, 4(1), 1-4.
- Al-Asheh, S., & Aidan, A. (2020).** A comprehensive method of ion exchange resins regeneration and its optimization for water treatment. *Promising techniques for wastewater treatment and water quality assessment*, 163-176.
- Amara, M. (2003).** *Matériaux échangeurs d'ions: sélectivité et spécificité: application à la séparation des ions* (Doctoral dissertation), 31p.
- Arden, T. V., et de Dardel, F. (1986).** Opérations Chimiques Unitaires, Echanges d'ions. Techniques de l'Ingénieur.
- Aydin, Ö., Özmetin, C., Korkmaz, M., & Fil, B. A. (2017).** A semiempirical kinetic model for removal of iron (Fe³⁺) from saturated boric acid solution by ion exchange using amberlite IR-120 resin. *Particulate Science and Technology*, 35(5), 505-511.
- Banfi, G., Salvagno, G. L., & Lippi, G. (2007).** The role of ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) as in vitro anticoagulant for diagnostic purposes, 566p.
- Behdenna, K., & Gheriani, H. (2022).** Adoucissement des eaux Souterraine chaud (Cas de la Région d'Ouargla), 29-30.
- Bento, L. S. M., & Sá, S. (1998).** Study of HMW compounds in sugar liquors from carbonation and ion-exchange resins using gel permeation chromatography with an evaporative light scattering detector, 233-247.
- Bhalekar, M., Avari, J. G., & Jaiswal, S. B. (2004).** Cation-exchanger in pharmaceutical formulation. *Indian J Pharma Educ*, 38, 184-8.
- Bonvin, E., & Membratéc, S. A. (2011).** L'adoucissement centralisé par osmose inverse, 591-593.

- Borodkin, S. (1993).** Ion exchange resins and sustained release. *Encyclopedia of pharmaceutical technology*, 8, 203-216.
- Borodkin, S. (1993).** Ion exchange resins and sustained release. *Encyclopedia of pharmaceutical technology*, 8, 203-216.
- Bouras, O., & Haouam, A. (2004).** Synthèse et étude physico-chimique des complexes échangeurs d'ions, 37-47.
- Carlino, M., & Guilminot, E. (2020).** Utilisation des résines échangeuses d'ions pour le nettoyage d'objets métalliques archéologiques ou historiques. Étude préliminaire pour le nettoyage des objets en alliage cuivreux. In *CeROArt. Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art* (No. 12). Association CeROArt asbl, 2p.
- Carroll, D. (1959).** Ion exchange in clays and other minerals. *Geological Society of America Bulletin*, 70(6), 749-779.
- CEAEQ. (2015).** Détermination de la conductivité: méthode électrométrique, MA. 115–Cond. 1.1, rév. 1 (Determination of Conductivity: Electrometric Method, MA. 115–Cond. 1.1, rev. 1) 5-9.
- Couture, I. (2006).** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. In *Colloque sur l'irrigation, L'eau, Source de Qualité et de Rendement*, 13 (17).
- Couture, I., & Montérégie-Est, M. A. P. A. Q. (2004).** Analyse d'eau pour fin d'irrigation. *AGRI. VISION*, 8p.
- Dave, P. N., Kaur, S., & Khosla, E. (2011).** Removal of Eriochrome black-T by adsorption on to eucalyptus bark using green technology., 18, 53-60.
- De dardel, F. (2015).** Échange d'ions-Principes de base. *Technique de l'Ingénieur*.
- De Villers, J., Squilbin, M., & Yourassowsky, C. (2005).** Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général. Fiche, 2, 158-162.
- Degrément, A. (1989).** Memento Technique de l'Eau (9th. ed), 65-72.

Dey, D., Herzog, A., & Srinivasan, V. (2007). Chemical precipitation: water softening. *Michigan State University, East Lansing*, 2-4.

Flaschka, H. A. (1964). EDTA titrations : An introduction to theory and practice (2nd. ed). Elsevier, 16p.

Ghalloussi-Alloui, R. (2012). *Contribution à l'étude du vieillissement de membranes échangeuses d'ions utilisées dans les procédés d'électrodialyse pour l'industrie agroalimentaire* (Doctoral dissertation, Paris Est), 12p.

Gouder, A., Nekkaa, W., & Guouadjlia, M. (2016). Adsorption d'un colorant noir ériochrome t sur un semiconducteur oxyde de zinc, 37p.

Guyot, A., & Bartholin, M. (1982). Design and properties of polymers as materials for fine chemistry. *Progress in Polymer Science*, 8 (3), 277-331.

Harland, C. E. (1994). Ion exchange: Theory and practice* (2nd ed.). Royal Society of Chemistry ,29p.

Helferich, F. (1962). Theories of ion-exchange column performance: A critical study. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1(8), 14-15.

Hervé, D. (1977). Les échangeurs d'ions en hydrométallurgie. Service Statistique et Documentation, Paris, 109p.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/Eriochrom>

<https://www.zuiveringstechnieken.nl/ion-exchangers>

Irwin, W. J., & Belaid, K. A. (1988). Drug-delivery by ion-exchange. Hydrolysis and rearrangement of ester pro-drugs of propranolol. *International journal of pharmaceutics*, 46(1-2), 57-67.

Kocaoba, S. (2007). Comparison of Amberlite IR 120 and dolomite's performances for removal of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1-2), 488-496.

Kumar, S., & Jain, S. (2013). History, introduction, and kinetics of ion exchange materials. *Journal of chemistry*, 2013(1).

Muniz, G. L., Duarte, F. V., & Rakocevic, M. (2020). Assessment and optimization of carbonated hard water softening with moringa oleifera seeds. *Desalin. Water Treat*, 173, 156-165.

Nachod, F. C., & Schubert, J. (1956). ION EXCHANGE TECHNOLOGY (1st ed.). Academic Press, 120-121.

Okay, O. (1988). Styrene-divinylbenzene copolymers. VII. Stability of the porous structures formed in toluene cyclohexanol mixtures. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics*, 157(1), 15-21.

Piard, J., BI, R., BRION, A., PERRIN, R., & ENS, P. (2019). Utilisation d'un tampon universel pour l'étude d'indicateurs colorés acido-basiques (par spectrophotométrie UV-visible). *Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 113(1014), 559-599.

Pure Water Handbook, 1991, 2^o Edition; Ed. Osmonics, Inc.; USA, 42p.

Romero, Á. F. M. (2016). Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua. *Dominio de las Ciencias*, 2(4), 334-345.

Royal Society of Chemistry. Shen, L. (2019). *Drinking Water Softening/Scale Prevention Technology Assessment and Performance of Template Assisted Crystallization* (Master's thesis, University of Waterloo), 7-14.

Rumeau, M. (1977). Les échangeurs d'ions dans le traitement des eaux et la récupération des résidus, 5, 211-220.

Sata, T. (2007). Ion exchange membranes: Preparation, characterization, modification and application, 25-26.

Singh, I., Rehni, A. K., Kalra, R., Joshi, G., Kumar, M., & Aboul-Enein, H. Y. (2007). Ion exchange resins: Drug delivery and therapeutic applications. *Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences*, 32(2), 91.

Srikanth, M. V., Sunil, S. A., Rao, N. S., Uhumwangho, M. U., & Murthy, K. R. (2010). Ion-exchange resins as controlled drug delivery carriers. *Journal of Scientific Research*, 2(3), 597.

Tang, C., Rygaard, M., Rosshaug, P. S., Kristensen, J. B., & Albrechtsen, H. J. (2021). Evaluation and comparison of centralized drinking water softening technologies: Effects on water quality indicators. *Water Research*, 203, 117-439.

Thompson, H. S. (1850). On the adsorbent power of soils. *Journal of the Royal Agricultural Society (Great Britain)*, 11, 68-74.

Tofighy, M. A., & Mohammadi, T. (2011). Permanent hard water softening using carbon nanotube sheets. *Desalination*, 268(1-3), 208-213.

TS. M. L'eau mai. APA.Sanghavi, N. M., Kamath, P. R., & Amin, D. S. (1988). Ion exchange resins as matrices for controlled drug release. *Indian Drugs*, 26(1), 27-32.

Varshney, K. G., Gupta, P., & Tayal, N. (2003). Synthesis, characterization and applications of a new phase of crystalline and mercury selective acrylamide cerium (IV) phosphate: A novel fibrous ion exchanger. *Indian Journal of Chemistry Section A*, 42(1), 89-93.

Vijay, S., & Dr, C. (2014). Ion exchange resins and their applications. *Journal of Drug Delivery & Therapeutics*, 4(4), 115-123.

Walters, R. M., Anim-Danso, E., Amato, S. M., Capone, K. A., Mack, M. C., Telofski, L. S., & Mays, D. A. (2016). Hard water softening effect of a baby cleanser. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 339-345.

Way, J. T. (1850). *On the power of soils to absorb manure*, 313p (vol. 11).

Welté, B., Autugelle, Ch., Boudenne, J., Chambon, P., Montiel, A., Pontié, M., & Rumeau, M. (2009). L'ANSES: Lignes directrices pour l'évaluation des échangeurs d'ions utilisés pour le traitement d'eau destinée à la consommation humaine, 25(14-15).

Wheaton, M., & Lefevre, L. J. (2000). *Dow Liquid Separations: Fundamentals of Ion Exchange*. LENNTECH, 6p.

Zagorodni, A. A. (2006). *Ion exchange materials: Properties and applications* (1st ed.). Elsevier, 5-13.

Zitouni, W. (2013). *L'influence de la technique d'échange d'ion sur l'amélioration de la qualité des eaux épurée de la STEP d'Ain El Houtz* (Doctoral dissertation), 55-56.

