



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور-الجلفة

Université Ziane Achour – Djelfa

كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Agronomie

Option :Eau et Environnement



Thème

Étude comparative des paramètres physico-chimiques
des eaux de la source Hadjr El Melh et celles de
quelques autres eaux des sources consommées dans la
région de Djelfa

Présenté par : Touati Warda

Devant le jury :

Président : M. BOUTHELJAOUI .F	M.C.A	(Univ. Djelfa)
Promoteur : M. CHIEB.T	M.C.A	(Univ. Djelfa)
Examineur: M. BAKHTI M.Z	M.A.A	(Univ. Djelfa)
Examinatrice : Mme BRAHIMI .S	M.C.A	(Univ. Djelfa)

Remerciement

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadrant, M. Chieb T., pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et d'enrichir cette étude par leurs remarques et suggestions.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du département Agronomie (Eau et Environnement) pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon parcours universitaire.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenue, encouragée et accompagnée de près ou de loin dans l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) – Unité de Djelfa, pour nous avoir accueillis au sein de son laboratoire et pour avoir mis à notre disposition les moyens techniques nécessaires à la réalisation des analyses physico-chimiques de cette étude. Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble du personnel de l'ANRH pour leur disponibilité, leur professionnalisme, leurs précieux conseils ainsi que leur accompagnement tout au long de ce travail.

Dédicace

À ma chère mère,

À la plus grande bénédiction qu'Allah m'ait accordée, à la femme qui a été ma force dans les moments de faiblesse, mon espoir dans les moments difficiles et ma lumière lorsque les chemins s'assombrissaient. Ce que je suis aujourd'hui n'est qu'une partie du fruit de tes sacrifices, de ta patience et de tes prières qui m'ont accompagnée à chaque étape de ma vie. Maman, c'est à toi seule que je dédie cette réussite, en témoignage de mon amour et de ma gratitude infinie.

À mon père, que Dieu lui accorde Sa miséricorde,

Papa, qu'Allah t'accorde Sa vaste miséricorde, t'accueille dans Son Paradis et fasse de ta tombe un jardin parmi les jardins du Paradis. Bien que tu nous aies quittés alors que j'étais encore petite, ta présence demeure dans mon cœur à chaque instant.

À mes chers frères (Mohamed, Tayeb, Yacine et Abderrahmane),

Vous êtes mon soutien après Allah et la source de ma force et de ma détermination. Merci pour chaque geste de soutien et pour chaque moment où vous avez été à mes côtés. Votre présence dans ma vie est une bénédiction inestimable dont je remercie Allah chaque jour. Merci de m'avoir fait sentir que je n'étais pas seulement votre sœur, mais aussi une fille entourée de votre affection, de votre protection et de votre amour.

À ma chère sœur Narimane,

À la compagne de mes jours, à celle qui a toujours été proche de mon cœur dans les moments de joie comme dans les moments de peine, merci d'avoir toujours été une source de sérénité et d'affection sincère. Je prie Allah de te garder comme une bénédiction dans ma vie et de remplir tous tes jours de joie et de bonheur.

À ma chère amie Oumaima,

À celle que je considère comme la belle compensation qu'Allah m'a offerte, et la compagne de route qui a toujours été à mes côtés. Tu as été la source d'espoir à laquelle je puisais ma force lorsque la fatigue m'envahissait. Merci d'avoir été présente à chaque étape de ce parcours et de m'avoir offert un soutien et une affection inoubliables.

Qu'Allah te récompense généreusement, comble ton cœur de bonheur ici-bas et dans l'au-delà, et préserve notre affection pour toujours.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce moment...Je vous dédie ce modeste travail en reconnaissance de votre soutien et de votre affection. Cette réussite n'aurait pas été possible sans la grâce d'Allah, puis sans votre présence à mes côtés et vos sincères prières

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction 1

Partie bibliographique

chapitre I

généralité sur l'eau et les eaux de sources

I.1. Généralité sur l'eau	7
I.1.1. Répartition de l'eau sur la terre	7
I.1.2. Cycle de l'eau	8
I.2. L'eau potable	9
I.3. Les eaux de source	10
I.3.1. Différents types d'eaux de source	11
I.3.1.1. Source gravitaire	11
I.3.1.2. Source artésienne	11
I.3.1.3. Source thermale	11
I.3.2. Origine et genèse des eaux de source	11
I.3.2.1. Recharge des aquifères et infiltration des eaux météoriques	11
I.3.2.2. Circulation souterraine et processus hydro-géochimiques	11
I.3.2.3. Mécanismes d'émergence des sources	12
I.3.3. Facteurs influençant la qualité des eaux de source	12
I.3.3.1. Facteurs géologiques	12
I.3.3.2. Facteurs hydrogéologiques	12
I.3.3.3. Facteurs climatiques	13
I.3.3.4. Facteurs biologiques	13
I.3.3.5. Facteurs anthropiques	13
I.4. Eaux embouteillées	13
I.4.1. Classification des eaux embouteillées	13
I.4.1.1. Les eaux minérales naturelles embouteillées	14
I.4.1.2. Les eaux de source embouteillées	14

I.4.2. Processus de conditionnement et contrôle de la qualité des eaux embouteillées	14
I.4.2.1. Captage et contrôle initial de la ressource	14
I.4.2.2. Traitement éventuel et contrôle de conformité	14
I.4.2.3. Conditionnement hygiénique et contrôle microbiologique	15
I.4.2.4. Étiquetage	15
I.5. Les Paramètres de qualité de l'eau potable	16
I.5.1. Les Paramètres organoleptiques	16
I.5.1.1. Couleur	16
I.5.1.2. Odeur	16
I.5.1.3. Goût	16
I.5.2. Les Paramètres physico-chimiques	16
I.5.2.1. La température	16
I.5.2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)	17
I.5.2.3. La conductivité électrique (CE)	17
I.5.2.4. La turbidité	18
I.5.2.5. Résidu sec à 180 °C	18
I.5.3. Les Paramètres de minéralisation globale	19
I.5.3.1. Calcium (Ca ²⁺)	19
I.5.3.2. Magnésium (Mg ²⁺)	19
I.5.3.3. Chlorure (Cl ⁻)	19
I.5.3.4. bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	19
I.5.3.5. Sodium (Na ⁺)	20
I.5.3.6. Potassium (K ⁺)	20
I.5.3.7. Sulfate (SO ₄ ²⁻)	20
I.5.3.8. Titre Hydrotimétrique (TH)	20
I.5.4. Les Paramètres de pollution	21
I.5.4.1. Ammonium (NH ₄ ⁺)	21
I.5.4.2. Nitrate (NO ₃ ⁻)	21
I.5.4.3. Nitrite (NO ₂ ⁻)	21
I.5.4.4. Orthophosphates(PO ₄ ³⁻)	22
I.6. Les normes de qualité de l'eau potable	22

Partie pratique
chapitre II
Matériels et méthodes

II.1. Présentation de la zone d'étude	25
II.1.1. Situation géographique de la source Hadjr El Melh	25
II.1.2. Géologie du site de Hadjr El Melh	26
II.1.3. Végétation du site de Hadjr El Melh	26
II.1.4. Hydrologie	27
II.2. Présentation des autres eaux de source étudiées	27
II.3. Échantillonnage des eaux	28
II.3.1. Présentation des échantillons	28
II.3.2. Prélèvement et conservation de l'échantillon de Hadjr El Melh	28
II.3.3. Laboratoire d'analyse (ANRH)	29
II.4. Les Analyses réalisées sur l'eau de la source Hadjr El Melh	29
II.4.1. Analyses des paramètres physico-chimique :	29
II.4.1.1. La température	29
II.4.1.2. Détermination du pH	30
II.4.1.3. Détermination du conductivité Électrique	31
II.4.1.4. Détermination du Turbidité	32
II.4.1.5. Détermination du Résidu Sec à 180 °C	33
II.4.2. Analyses des paramètres minéralisation globale	35
II.4.2.1. Dosage de Calcium (Ca^{2+})	35
II.4.2.2. Dosage de Magnésium (Mg^{2+})	37
II.4.2.3. Dosage de chlorure (Cl^-)	38
II.4.2.4. Dosage de bicarbonate (HCO_3^-)	41
II.4.2.5. Détermination du sodium et potassium	42
II.4.2.6. Dosage de Sulfate SO_4^{2-}	44
II.4.3. Analyses des paramètres de pollution	47
II.4.3.1. Dosage de l'ammonium (NH_4^+)	47
II.4.3.2. Dosage de OrthoPhosphate	49
II.4.3.3. Détermination Matières Organiques (mg/l O ₂)	50
II.4.3.4. Dosage de Nitrite	52
II.4.3.5. Dosage de Nitrate (NO_3^-)	53

chapitre III
Résultats et discussion

III.1. Résultats et discussion des analyses des paramètres physico-chimiques	57
III.1.1. Le PH	57
III.1.2. Le résidu sec à 180 °C	59
III.2. Résultats et discussion des analyses des paramètres minéralisation globale	61
III.2.1. Calcium (Ca ²⁺)	61
III.2.2. Magnésium (Mg ²⁺)	63
III.2.3. Sodium (Na ⁺)	65
III.2.4. Potassium (K ⁺)	67
III.2.5. Chlorure (Cl ⁻)	68
III.2.6. Sulfate (SO ₄ ²⁻)	70
III.2.7. Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	72
III.3. Résultats et discussions des analyses des Paramètres de pollution	74
III.3.1. Nitrite (NO ₂ ⁻)	74
III.3.2. Nitrate (NO ₃ ⁻)	76
III.4. Résultats et discussions des analyses des autres paramètres de l'eau de la source Hadjr El Melh	77
III.5. Appréciation globale de la qualité de la source de Hadjr El Melh	79
Conclusion:	82
Références bibliographique:	85
Annexes	90

Liste des Figures

Figure 01 : Géométrie de la la molécule H ₂ O.....	07
Figure 02 : Répartition de l'eau sur terre.....	08
Figure 03 : Cycle de l'eau.....	09
Figure 04 : Exigences des 3 types d'eau potable.....	10
Figure 05 : Formation et typologie des sources naturelles.....	12
Figure 06 : modèle d'étiquette d'une bouteille d'eau.....	15
Figure 07 : Localisation géographique de la zone d'étude.....	25
Figure 08 : certains aspects géologiques de la région.....	26
Figure 09 : la couverture végétale de la région.....	27
Figure 10 : photo de la source Hadjr El Melh.....	29
Figure 11 : Détermination du pH à l'aide d'un pH-mètre.....	31
Figure 12 : Détermination du Conductivité à l'aide d'un Conductivitémètre.....	32
Figure 13 : Appareille de Turbiditémètre.....	33
Figure 14 : Mésure de résidu sec.....	34
Figure 15 : Détermination du calcium par titrage à l'EDTA.....	36
Figure 16 : Détermination du magnésium par titrage à l'EDTA.....	38
Figure 17 : Détermination des chlorures par titrage à nitrate d'argent.....	40
Figure 18 : Détermination du bicarbonate.....	42
Figure 19 : Solutions étalons filles pour le Sodium Na ⁺ et K ⁺	43
Figure 20 : Photomètre de flamme.....	44
Figure 21 : Préparation de l'échantillon pour le dosage de sulfate.....	47
Figure 22 : Préparation de l'échantillon pour le dosage del'ammonium.....	48
Figure 23 : Préparation de l'échantillon pour le dosage de O-Phosphate.....	50
Figure 24 : Préparation de l'échantillon pour le dosage des Matières Organiques.....	52
Figure 25 : Préparation de l'échantillon pour le dosage de nitrite.....	53
Figure 26 : Préparation de l'échantillon pour le dosage nitrate (NO ₃ ⁻).....	55
Figure 27 : Comparaison des valeurs du PH des différentes eaux de source étudiées.....	58
Figure 28 : Comparaison des valeurs du résidu sec des différentes eaux de source étudiées....	60
Figure 29 : Comparaison des valeurs du calcium (Ca ²⁺) des différentes eaux de source étudiées.....	62

Figure30: Comparaison des valeurs du magnésium (Mg^{2+}) des différentes eaux de source étudiées.....	64
Figure 31 : Comparaison des valeurs du sodium (Na^+) des différentes eaux de source étudiées.....	65
Figure32 : Comparaison des valeurs du potassium (K^+) des différentes eaux de source étudiées.....	67
Figure 33 : Comparaison des valeurs de chlorure (Cl^-) des différentes eaux de source étudiées.....	70
Figure 34 : Comparaison des valeurs de sulfate (SO_4^{2-}) des différentes eaux de source étudiée.....	71
Figure 35 : Comparaison des valeurs de bicarbonate (HCO_3^-) des différentes eaux de source étudiées.....	73
Figure 36 : Comparaison des valeurs de nitrite (NO_2^-) des différentes eaux de source étudiées.....	75
Figure 37 : Comparaison des valeurs de nitrate (NO_3^-) des différentes eaux de source étudiées.....	76

Liste des tableaux

Tableau 01 : Classification des eaux selon leur potentiel hydrogène(pH).....	17
Tableau 02 : Classification des eaux selon la conductivité électrique	17
Tableau 03 : Classification des eaux en fonction de la turbidité	18
Tableau 04 : Classification des eaux selon le résidu sec à 180 °C	18
Tableau 05 : Classification des eaux selon les valeurs du titre hydrométrique	21
Tableau 06 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimique pour l'eau potable.....	22
Tableau 07 : Les autres sources utilisé et leur localisation	27
Tableau 08 : Tableau de réactifs utilisé dans le dosage de calcium	35
Tableau 09 : Tableau de réactifs utilisé dans le dosage de magnésium.....	37
Tableau 10 : Tableau des réactifs utilisés pour le dosage de chlorures	39
Tableau 11 : Tableau de réactifs utilisé dans le dosage de(HCO ₃ ⁻) et (CO ₃ ²⁻).....	41
Tableau 12 : Tableau de Solution Mère du sodium et potassium	42
Tableau 13 : Tableau de réactifs utilisé dans le dosage de Sulfate	44
Tableau 14 : Tableau de la gamme d'étalonnagedans le dosage de Sulfate	45
Tableau 15 : Tableau de la dilution appropriée selon la conductivité	46
Tableau 16 : Tableau de la gamme d'étalonnagedans le dosagede l'ammonium	48
Tableau 17 : les Valeurs du PH des différentes eaux de source étudiées.	57
Tableau 18 : les Valeurs du résidu secà 180 °C des différentes eaux de source étudiées.	59
Tableau 19 : les Valeurs du calcium (Ca ²⁺) des différentes eaux de source étudiées	61
Tableau 20 : les Valeurs du magnésium (Mg ²⁺) des différentes eaux de source étudiées	63
Tableau 21 : les Valeurs du sodium (Na ⁺) des différentes eaux de source étudiées	65
Tableau 22 : les Valeurs du potassium (K ⁺) des différentes eaux de source étudiées.	67
Tableau 23 : les Valeurs de chlorure (Cl ⁻) des différentes eaux de source étudiées	69
Tableau 24 : les Valeurs de sulfate (SO ₄ ²⁻) des différentes eaux de source étudiées	71
Tableau 25 : les Valeurs de bicarbonate (HCO ₃ ⁻) des différentes eaux de source étudiées	72
Tableau 26 : les Valeurs de nitrite (NO ₂ ⁻) des différentes eaux de source étudiées	74
Tableau 27 : les Valeurs de nitrate (NO ₃ ⁻) des différentes eaux de source étudiées	76
Tableau 28 : Les déférents valeurs de paramètres étudiée sur l'eau de Hadjr El Maleh	78

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

C° : Degré Celsius

Ca²⁺ : Calcium

CE : Conductivité Électrique

Cl⁻ : Chlorure

EDTA : Acide éthylènediaminetétraacétique

HCO₃⁻ : Bicarbonate

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

K⁺ : Potassium

L : Litre

m : Mètre

m² : Mètre carré

mg/L : Milligramme par litre

Mg²⁺ : Magnésium

mL : Millilitre

Na⁺ : Sodium

NH₄⁺ : Ammonium

NO₂⁻ : Nitrite

NO₃⁻ : Nitrate

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

pH : Potentiel Hydrogène

PO₄³⁻ : Orthophosphate

q.s.p. : Quantité suffisante pour

SO₄²⁻ : Sulfate

TA : Titre Alcalimétrique

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

TDS : Total Dissolved Solids

TH : Titre Hydrotimétrique

μS/cm : Microsiemens par centimètre

km : Kilomètre

km² : Kilomètre carré

% : Pourcentage



Introduction

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable à la vie et au maintien des écosystèmes. Elle joue un rôle fondamental dans le développement des activités humaines, agricoles, industrielles et socio-économiques. Dans les régions arides et semi-arides, où les précipitations sont souvent insuffisantes et irrégulières, les ressources en eaux souterraines représentent une source essentielle d'approvisionnement. La préservation de leur qualité et leur gestion rationnelle sont devenues des préoccupations majeures dans un contexte marqué par l'accroissement de la demande en eau et les changements environnementaux **(OMS, 2004)**.

Les eaux de source constituent une partie importante des ressources hydriques souterraines. Elles résultent de l'émergence naturelle des eaux infiltrées dans le sous-sol après leur circulation à travers différentes formations géologiques. Au cours de leur parcours, ces eaux subissent de nombreuses interactions avec les roches encaissantes, ce qui influence directement leur composition chimique et leurs caractéristiques physiques. Ainsi, la qualité des eaux de source dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature lithologique du terrain, les conditions climatiques, la profondeur des nappes, le temps de résidence de l'eau dans le sous-sol ainsi que les activités anthropiques susceptibles d'altérer leur composition **(Appelo et Postma, 2005 ; Bouderbala et al., 2015)**.

L'étude des paramètres physico-chimiques constitue une étape essentielle dans l'évaluation de la qualité des eaux. Ces paramètres comprennent notamment la température, le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique, la salinité, la dureté totale, les solides dissous totaux ainsi que les principaux ions majeurs présents dans l'eau. Leur détermination permet d'apprécier le degré de minéralisation des eaux, de caractériser leur faciès hydrochimique et d'évaluer leur aptitude à différents usages, notamment la consommation humaine, l'irrigation et l'abreuvement du bétail

La wilaya de Djelfa, située dans la région des Hauts Plateaux algériens, se caractérise par un climat semi-aride et par l'existence de nombreuses ressources hydriques souterraines exploitées pour les besoins de la population locale. Parmi ces ressources figurent plusieurs sources naturelles dont les eaux sont utilisées quotidiennement à des fins domestiques et parfois agricoles. Cependant, les caractéristiques physico-chimiques de ces

eaux peuvent varier d'une source à une autre en raison des différences géologiques, hydrogéologiques et environnementales propres à chaque site.

La source de Hedjr El Melh représente l'une des sources naturelles les plus connues de la région. Située dans un contexte géologique particulier, elle suscite un intérêt croissant de la part des habitants et des chercheurs en raison de ses caractéristiques naturelles. Toutefois, malgré son importance locale, les informations scientifiques relatives à la qualité physico-chimique de ses eaux demeurent limitées. De même, les études comparatives portant sur les eaux de cette source et celles d'autres sources de la région de Djelfa restent relativement rares.

Dans ce contexte, la réalisation d'une étude comparative apparaît nécessaire afin de mieux comprendre les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la source Hedjr El Melh et de les comparer à celles de quelques autres eaux de sources consommées dans la région de Djelfa. Une telle démarche permet non seulement d'évaluer la qualité des eaux étudiées mais également d'identifier les éventuelles similitudes ou différences liées aux conditions géologiques et environnementales locales. Les résultats obtenus peuvent constituer une base de données utile pour la gestion durable des ressources hydriques et pour d'éventuelles études futures dans la région.

- Le présent travail a pour objectifs principaux :

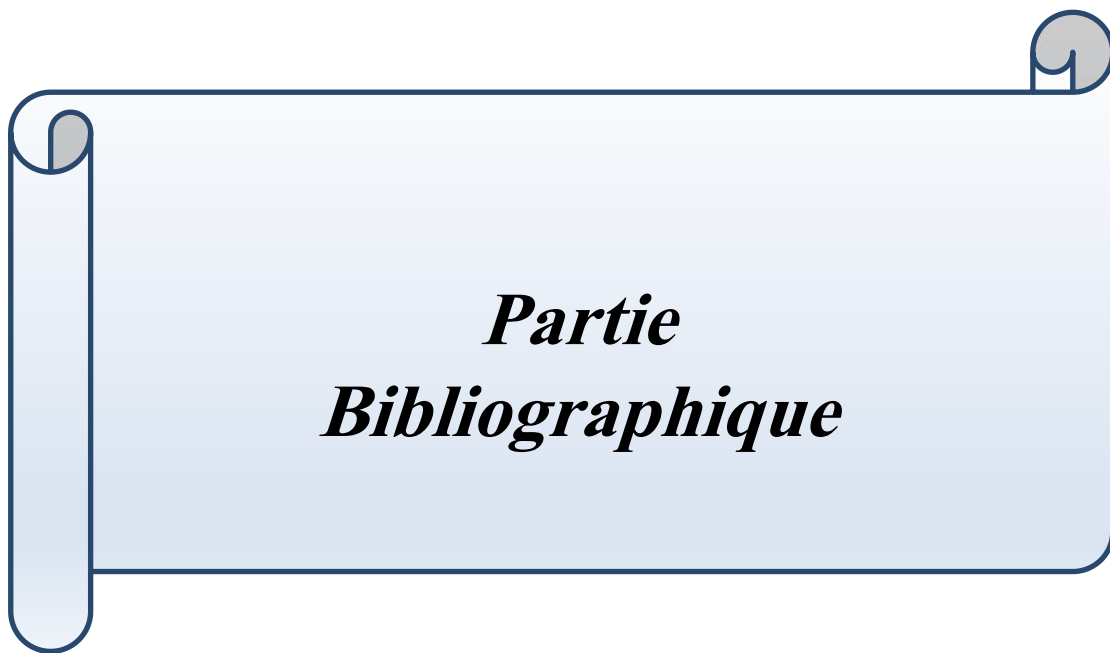
- Déterminer les paramètres physico-chimiques des eaux de la source Hedjr El Melh
- Comparer ces paramètres avec ceux de quelques autres eaux de source de la région de Djelfa.
- Évaluer la qualité des eaux étudiées à travers les normes de référence nationales et internationales .
- Mettre en évidence l'influence des facteurs géologiques et environnementaux sur les caractéristiques des eaux analysées.

Ce travail est divisé en trois chapitres : le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique portant sur l'eau, les eaux de source ainsi que les principaux paramètres physico-chimiques utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Le deuxième chapitre présente la zone d'étude, le matériel utilisé et la méthodologie adoptée pour les analyses. Le troisième chapitre expose les résultats obtenus ainsi que leur discussion. Enfin, une

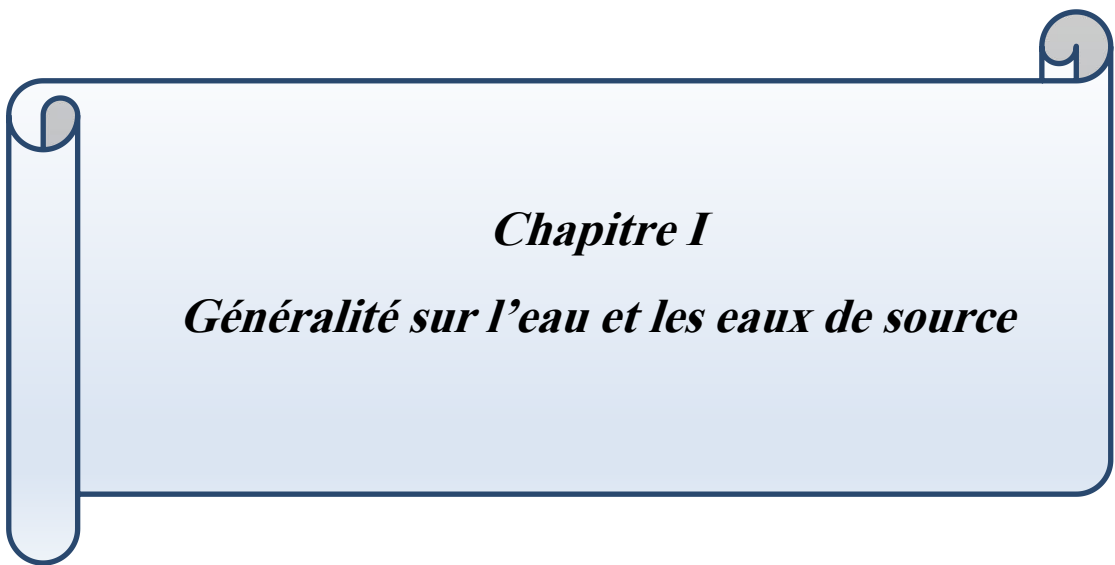
conclusion générale est proposée, résumant les principaux résultats et ouvrant des perspectives de recherche.

À travers ce travail, nous espérons contribuer à une meilleure connaissance des ressources hydriques naturelles de la région de Djelfa et participer à leur valorisation. Cette étude constitue également une contribution scientifique susceptible d'enrichir les données disponibles sur les eaux de source locales et de fournir des informations utiles pour leur préservation et leur exploitation rationnelle.

Partant de là, la problématique de ce travail se formule comme suit : quelles sont les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la zone d'étude et dans quelle mesure ces caractéristiques reflètent-elles la qualité de l'eau ainsi que son aptitude à la consommation humaine selon les normes en vigueur ?



***Partie
Bibliographique***



Chapitre I
Généralité sur l'eau et les eaux de source

Dans ce chapitre, seront présentées les notions générales relatives à l'eau, à l'eau potable et aux eaux de source, ainsi que les principaux paramètres utilisés pour l'évaluation de la qualité des eaux. Une attention particulière sera accordée aux caractéristiques physico-chimiques des eaux de source ainsi qu'aux différents facteurs susceptibles d'influencer leur composition et leur qualité.

I.1. Généralité sur l'eau

L'eau est une substance chimique essentielle à la vie et constitue l'un des principaux éléments des écosystèmes terrestres. Sa molécule, de formule chimique H_2O , est composée de deux atomes d'hydrogène liés à un atome d'oxygène par des liaisons covalentes, formant un angle de $104,5^\circ$ (fig1). Grâce à sa forte polarité et à la présence de liaisons hydrogène entre ses molécules, l'eau possède un important pouvoir dissolvant lui permettant de dissoudre de nombreuses substances minérales et organiques. Elle existe dans la nature sous trois états physiques (solide, liquide et gazeux), selon les conditions de température et de pression. à l'état pur, elle est incolore, inodore et insipide, et présente des propriétés physico-chimiques particulières qui lui confèrent un rôle essentiel dans les processus biologiques et environnementaux.(Blancher, 1972)

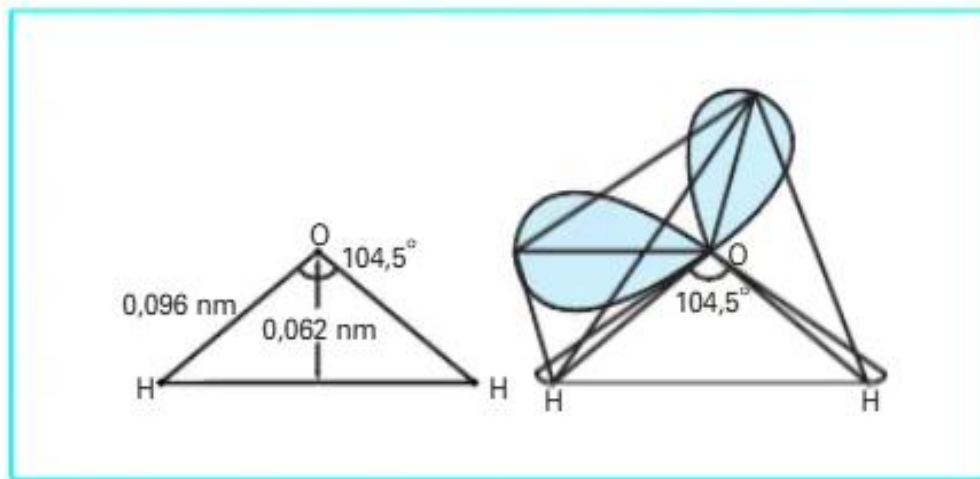


Figure 1 :Géométrie de la la molécule H_2O (Boeglin, 2009).

I.1.1. Répartition de l'eau sur la terre

Les ressources en eau de la planète sont estimées à environ 1,4 milliard km^3 . Toutefois, leur répartition est très inégale, puisque les eaux salées représentent près de 97,5 % du volume total, tandis que les eaux douces n'en constituent qu'environ 2,5 %, soit près de 35

millions de km³. La majeure partie de ces eaux douces est stockée sous forme de glaciers et de neiges permanentes (69,5 %), suivie des eaux souterraines (30,1 %). En revanche, seule une faible fraction est présente dans les lacs et les rivières (0,27 %) ou dans d'autres réservoirs, tels que l'atmosphère, l'humidité des sols et les zones humides (0,13 %). (UNESCO, 2006). (Figure 02).

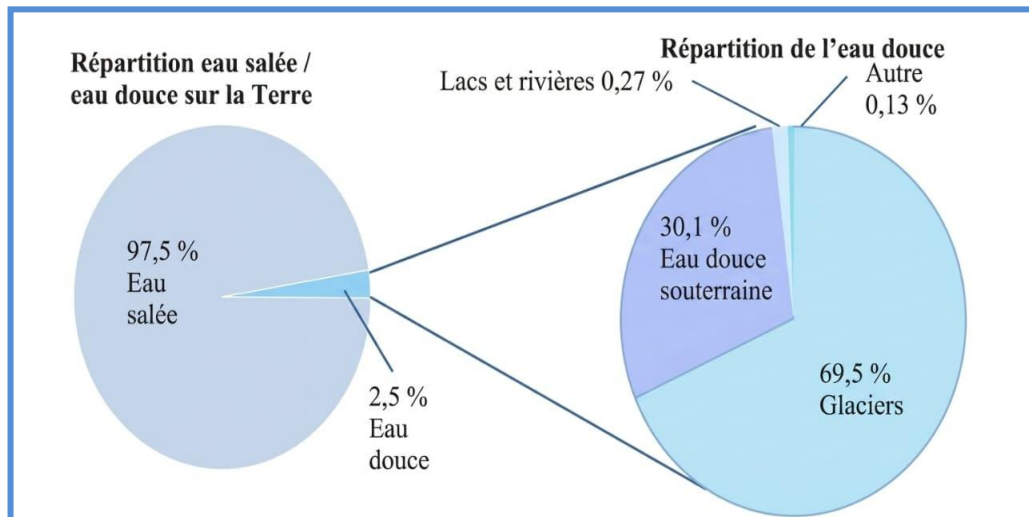


Figure 02 : Répartition de l'eau sur terre (Morel, 2007).

I.1.2. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est un processus naturel continu qui assure la circulation permanente de l'eau entre l'atmosphère, les océans, les continents et les eaux souterraines. Bien que l'eau change continuellement d'état (liquide, solide et gazeux), la quantité totale d'eau présente dans l'hydrosphère demeure pratiquement constante depuis son apparition sur Terre. Sous l'effet de l'énergie solaire, l'eau s'évapore des océans, des lacs et des cours d'eau, puis se condense dans l'atmosphère pour former les nuages. Les précipitations alimentent ensuite les sols, les cours d'eau et les nappes souterraines. Une partie de cette eau est absorbée par les végétaux puis restituée à l'atmosphère par évapotranspiration, tandis que le reste s'écoule vers les rivières et les océans ou s'infiltre dans le sous-sol. Ainsi, le cycle hydrologique maintient un équilibre permanent entre les phénomènes d'évaporation, de condensation, de précipitation, de ruissellement et d'infiltration, assurant le renouvellement continu des ressources en eau. (Maurel, 2006). (Figure 03).

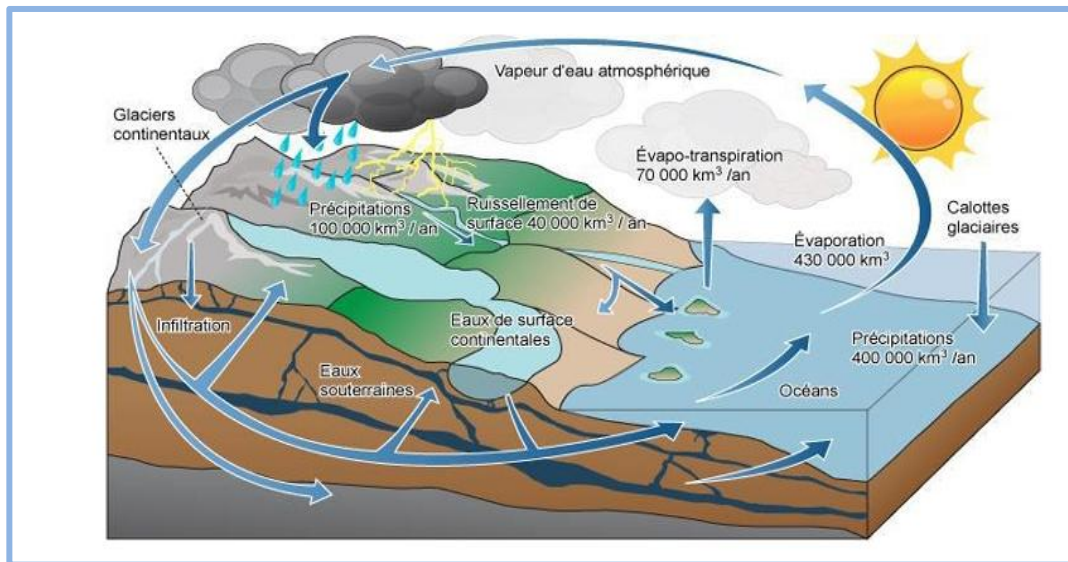


Figure 03 : Cycle de l'eau (CIE, 2013).

I.2. L'eau potable

L'eau potable est une eau apte à être consommée par les êtres vivants sans présenter de risque pour la santé. Elle doit être exempte de tout micro-organisme pathogène et de toute substance toxique susceptible de nuire à la santé humaine, (Bliefert et Perraud, 2001). Assurer l'accès à une eau potable conforme aux normes de qualité constitue un défi mondial. Le corps humain a besoin d'environ 2,5 litres d'eau par jour, en raison de son rôle essentiel dans le transport des nutriments, l'élimination des déchets et le maintien de l'équilibre électrolytique au niveau cellulaire. Cependant, la contamination de l'eau potable par des substances chimiques ou des micro-organismes peut entraîner de graves effets sur la santé. Souvent, cette contamination n'est détectée qu'après la survenue de crises sanitaires se manifestant par des maladies d'origine hydrique pouvant être mortelles. C'est pourquoi l'eau destinée à la consommation humaine est soumise à des normes strictes et prédéfinies afin de garantir sa sécurité (Taleb, 2005). Elle peut être distribuée sous différentes formes notamment comme eau du robinet, eau conditionnée (eau minérale naturelle ou eau de source, plate ou gazeuse) ou encore par citerne pour certains usages industriels (Hubert, J. 2010). (Figure 04)

	<i>Eau du robinet</i>	<i>Eau de source</i>	<i>Eau minérale naturelle</i>
<i>origine</i>	multiples : lacs, rivières, nappes phréatiques, etc..	souterraine	souterraine
<i>protection naturelle</i>	---	obligatoire	obligatoire
<i>traitements chimiques</i>	traitements de potabilisation (plus désinfection chimique pour transport)	aucun traitement de potabilisation	aucun traitement de potabilisation
<i>composition minérale</i>	variable	pas nécessairement stable	obligatoirement stable
<i>effet reconnu sur la santé</i>	---	---	effet favorable à la santé reconnu par l'Académie de Médecine

Figure 04: Exigences des 3 types d'eau potable (CSEM, 2008).

I.3. Les eaux de source

Les eaux de source sont des eaux souterraines naturelles qui émergent spontanément à la surface du sol lorsque le niveau de la nappe phréatique recoupe la topographie ou à travers des fractures et des failles géologiques, sans aucune intervention artificielle d'extraction. Elles constituent l'exutoire naturel des aquifères et représentent une composante essentielle du cycle hydrogéologique des eaux souterraines. En raison de leur origine souterraine, elles sont naturellement potables sur les plans microbiologique et chimique et ne doivent subir aucun traitement susceptible de modifier leur composition ou leurs caractéristiques microbiologiques. Seuls certains traitements physiques limités sont autorisés, à condition qu'ils n'altèrent pas leurs caractéristiques naturelles. (Degremont, 2005)

Selon le décret n° 45 du 18 juillet 2004 en vigueur en Algérie, l'article 3 stipule que les eaux de source sont des eaux présentées dans leur état naturel tel qu'elles émergent du sous-sol, conditionnées directement dans des récipients destinés à la consommation humaine ou acheminées par des conduites menant directement à ces récipients (JORA, 2004).

I.3.1. Différents types d'eaux de source

I.3.1.1. Source gravitaire

La source gravitaire apparaît lorsque la surface piézométrique d'un aquifère recoupe la surface topographique. L'eau s'écoule naturellement sous l'effet de la gravité, sans pression particulière. Son débit dépend généralement de la recharge de l'aquifère et des précipitations (Fetter et Kremer, 2022).

I.3.1.2. Source artésienne

La source artésienne est alimentée par un aquifère captif confiné entre deux couches imperméables. Sous l'effet de la pression hydrostatique, l'eau peut remonter spontanément à la surface lorsque le niveau piézométrique dépasse le niveau du terrain (Hiscock et Bense, 2014)

I.3.1.3. Source thermale

Les sources thermales proviennent d'eaux souterraines circulant à grande profondeur, où elles sont réchauffées par le gradient géothermique terrestre avant de réapparaître à la surface. Elles se distinguent par une température plus élevée que celle des eaux souterraines ordinaires (Custodio et Llamas, 1983). (Figure 05)

I.3.2. Origine et genèse des eaux de source

I.3.2.1. Recharge des aquifères et infiltration des eaux météoriques

Les eaux de source résultent principalement de l'infiltration des eaux météoriques (pluies, neiges et autres précipitations). Elles peuvent également être alimentées par les pertes d'eau des oueds, des cours d'eau et des plans d'eau de surface qui s'infiltrent dans les formations géologiques perméables du sous-sol. Sous l'effet de la gravité, ces eaux percolent à travers les sols et les roches jusqu'à atteindre les zones saturées, où elles alimentent les aquifères souterrains (Hiscock et Bense, 2014).

I.3.2.2. Circulation souterraine et processus hydro-géochimiques

Au cours de leur circulation dans le sous-sol, les eaux subissent divers processus physiques et chimiques, notamment la filtration naturelle et la dissolution des minéraux présents dans les roches traversées. Ces interactions contrôlent la composition chimique de

l'eau et déterminent son degré de minéralisation. La nature lithologique des terrains, le temps de résidence dans l'aquifère et les conditions hydrogéologiques locales influencent directement les caractéristiques physico-chimiques des eaux de source (Appelo et Postma, 2005).

I.3.2.3. Mécanismes d'émergence des sources

L'émergence d'une source se produit lorsque la nappe souterraine rencontre la surface du terrain ou lorsqu'une couche imperméable oblige l'eau à ressortir naturellement. Le débit des sources varie en fonction de l'alimentation de l'aquifère, des précipitations et des caractéristiques géologiques du bassin versant (Appelo et Postma, 2005). (Figure 05)

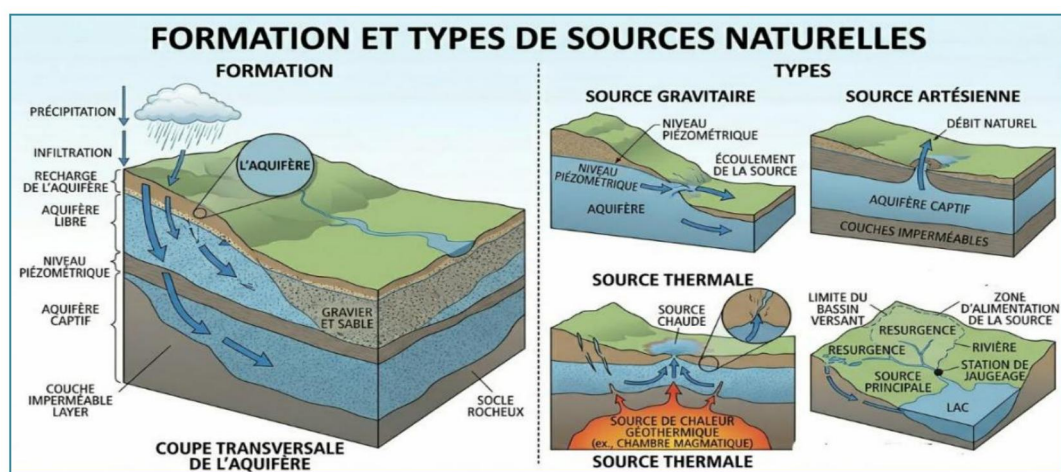


Figure 05 : Formation et typologie des sources naturelles (CIE, 2013)

I.3.3. Facteurs influençant la qualité des eaux de source

I.3.3.1. Facteurs géologiques

La lithologie du bassin aquifère contrôle directement la minéralisation de l'eau. Les formations carbonatées (calcaires, dolomies) enrichissent l'eau en calcium et bicarbonates, tandis que les formations évaporitiques augmentent les teneurs en sulfates et chlorures (Castany, 1982).

I.3.3.2. Facteurs hydrogéologiques

La porosité, la perméabilité des roches et la profondeur de circulation influencent le temps de contact eau-roche et donc le degré de minéralisation. Une circulation lente favorise une dissolution plus importante des éléments minéraux (Castany, 1982)

I.3.3.3. Facteurs climatiques

Les précipitations assurent la recharge des nappes, tandis que les variations climatiques influencent le débit des sources. La température peut également modifier la solubilité de certains sels dissous (UNESCO, 2012).

I.3.3.4. Facteurs biologiques

Les sols peuvent contenir des micro-organismes susceptibles de migrer vers les nappes en cas de filtration insuffisante. Cependant, la filtration naturelle réduit généralement la charge microbiologique des eaux souterraines (WHO, 2017).

I.3.3.5. Facteurs anthropiques

Les activités agricoles (nitrates, pesticides), industrielles et urbaines constituent les principales sources de contamination des eaux souterraines. Ces pollutions peuvent altérer durablement la qualité des eaux de source (WHO, 2017).

I.4. Eaux embouteillées

L'eau en bouteille est une eau destinée à la consommation humaine, issue de sources naturelles protégées ou de nappes souterraines, puis conditionnée dans des récipients hermétiquement fermés selon des conditions d'hygiène strictes afin de préserver sa qualité originelle. Elle est commercialisée comme une eau potable prête à la consommation. Selon son type, elle peut faire l'objet de traitements autorisés par la réglementation afin d'améliorer sa qualité ou de garantir sa conformité aux normes sanitaires, sans altérer ses caractéristiques essentielles. Ces eaux se distinguent également par le fait que les informations figurant sur l'étiquette reflètent les caractéristiques physico-chimiques réelles de l'eau, telles que la composition minérale et les valeurs analytiques. (Canellas, 1995)

I.4.1. Classification des eaux embouteillées

Les eaux embouteillées se répartissent principalement en deux catégories selon leur origine et leurs caractéristiques physico-chimiques. Cette classification permet de distinguer les différents types d'eaux commercialisées. (Canellas, 1995)

I.4.1.1. Les eaux minérales naturelles embouteillées

Les eaux minérales naturelles proviennent de sources souterraines protégées et se caractérisent par une composition minérale stable et constante, leur conférant des propriétés spécifiques reconnues. (Lafforgue, 2025)

I.4.1.2. Les eaux de source embouteillées

Les eaux de source sont également d'origine souterraine et doivent être conformes aux normes de potabilité, mais leur composition minérale peut varier sans nécessiter une stabilité constante. (Canellas, 1995)

I.4.2. Processus de conditionnement et contrôle de la qualité des eaux embouteillées

Le processus de mise en bouteille des eaux embouteillées comprend plusieurs étapes encadrées par la réglementation sanitaire afin de garantir la qualité et la sécurité du produit depuis la source jusqu'au consommateur.

I.4.2.1. Captage et contrôle initial de la ressource

L'eau est captée à partir de sources naturelles protégées ou de nappes souterraines conformément aux exigences réglementaires en vigueur. Cette étape est accompagnée d'un contrôle initial de la qualité de la ressource afin de vérifier sa conformité aux normes sanitaires avant son exploitation. (CSEM, 2008)

I.4.2.2. Traitement éventuel et contrôle de conformité

Selon le type d'eau, certains traitements physiques autorisés par la réglementation peuvent être appliqués (filtration, aération), sans altérer ses caractéristiques essentielles. Des contrôles de qualité sont réalisés pour s'assurer que les traitements appliqués respectent la composition et la potabilité de l'eau. (Constant et Hawili, 2011)

I.4.2.3. Conditionnement hygiénique et contrôle microbiologique

L'eau est conditionnée dans des bouteilles stérilisées dans des conditions strictes d'hygiène, conformément aux normes sanitaires. Un contrôle microbiologique est effectué afin de garantir l'absence de contamination lors de l'embouteillage. (Musy et Higy, 2011)

Les bouteilles sont immédiatement scellées afin d'éviter toute contamination externe. Cette étape constitue une phase d'assurance qualité garantissant l'intégrité du produit fini. (Rio, 2006)

I.4.2.4. Étiquetage

Chaque bouteille doit comporter une étiquette réglementée indiquant les informations essentielles telles que :

- l'origine de l'eau,
- la composition physico-chimique,
- la date de mise en bouteille,
- et les valeurs analytiques garantissant la conformité du produit. (Figure 06)(JORA, 2000)

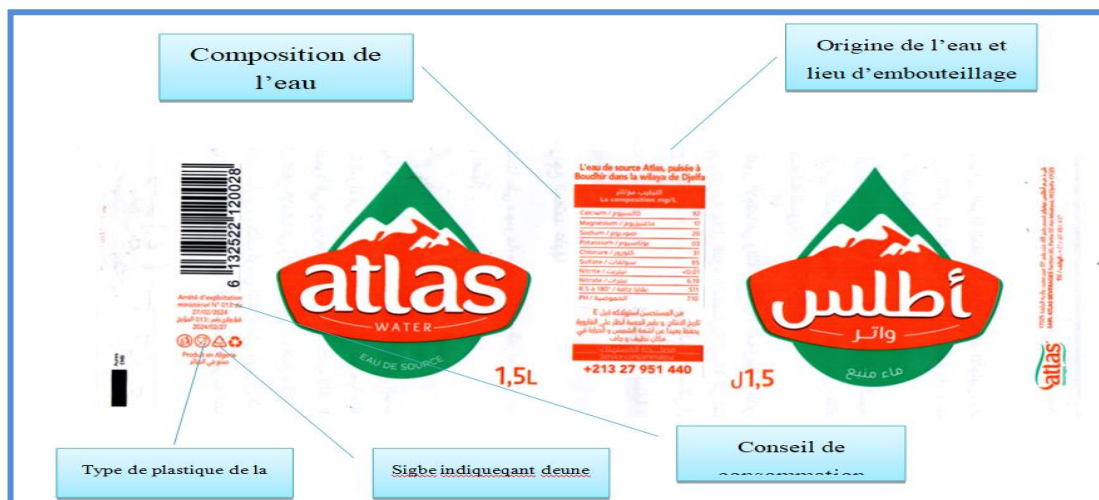


Figure 06 :modèle d'étiquette d'une bouteille d'eau (Réalisée par l'auteure , 2026)

I.5. Les Paramètres de qualité de l'eau potable

I.5.1. Les Paramètres organoleptiques

I.5.1.1. Couleur

La couleur de l'eau est une caractéristique liée à la présence de substances dissoutes ou en suspension. Elle peut être une couleur vraie, due aux substances dissoutes, ou une couleur apparente, due aux matières en suspension. Elle peut également avoir une origine naturelle (fer, manganèse, humus) ou être causée par la pollution, l'activité industrielle ou le phénomène d'eutrophisation. **(Rodier et al., 2005)**

I.5.1.2. Odeur

Toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition. L'odeur peut être définie comme : l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles. La qualité de cette sensation particulière est provoquée par chacune de ces substances **(Rodier et al., 2005)**

I.5.1.3. Goût

Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique perçues lors de la consommation de l'eau dans la bouche.

La saveur est l'ensemble des sensations résultant de la stimulation des bourgeons gustatifs par des substances solubles **(Rodier et al., 2005)**.

I.5.2. Les Paramètres physico-chimiques

I.5.2.1. La température

La température est un paramètre physique fondamental de l'eau. Elle influence la solubilité des sels et des gaz ainsi que la vitesse des réactions chimiques et biologiques. Une augmentation de 10 °C peut accélérer ces réactions d'un facteur de 2 à 3. La température de l'eau dépend principalement des conditions climatiques et peut également être affectée par les rejets d'eaux usées chaudes **(Tardat-Henry et Beaudry, 1992)**.

I.5.2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène (pH) est un paramètre physico-chimique fondamental qui traduit le caractère acide, neutre ou alcalin d'une eau. Il dépend de la concentration en ions hydrogène (H^+) et influence de nombreux équilibres chimiques ainsi que la solubilité de certaines substances minérales. De ce fait, le pH constitue un indicateur essentiel pour la caractérisation et l'évaluation de la qualité des eaux. (Rodier et al., 2009).

Tableau01: Classification des eaux selon leur potentiel hydrogène (pH) (Degremont, 2005).

Valeur du Ph	Classification
PH < 7	l'eau est acide
PH = 7	l'eau est neutre
PH > 7	l'eau est basique

I.5.2.3. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est définie comme la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Elle est directement liée à la concentration des ions dissous dans l'eau. Sa valeur augmente avec la teneur en sels minéraux dissous ainsi qu'avec l'élévation de la température. Elle s'exprime en microsiemens par centimètre ($\mu S/cm$) et est généralement mesurée à une température de référence de 25 °C afin de standardiser et de comparer les résultats. (Rodier, 2005).

Tableau02: Classification des eaux selon la conductivité électrique (Rodier et al., 2009).

Conductivité $\mu S/cm$	Minéralisation
0-100	Minéralisation très faible
100-200	Minéralisation faible
200-333	Minéralisation moyenne accentuée
333-666	Minéralisation accentuée
666-1000	Minéralisation importante
>1000	Minéralisation élevée

I.5.2.4. La turbidité

La turbidité est l'un des paramètres physiques importants pour l'évaluation de la qualité des eaux. Elle traduit la diminution de la transparence de l'eau due à la présence de particules en suspension telles que les argiles, les particules de silice, les matières organiques et les micro-organismes. La turbidité est étroitement liée à la limpidité de l'eau et s'exprime en unité de turbidité néphélométrique (NTU) (Miquel, 2003)

Tableau03:Classification des eaux en fonction de la turbidité(Rodier et al., 2005)

La turbidité	Classification
NTU<5	Eau Claire
5<NTU<30	Eau légèrement trouble
NTU>50	Eau trouble

I.5.2.5. Résidu sec à 180 °C

Le résidu sec est la masse des substances minérales et organiques non volatiles qui restent après l'évaporation complète d'un échantillon d'eau et son séchage à une température déterminée. Il constitue un indicateur de la teneur globale de l'eau en matières dissoutes et permet d'apprécier son degré de minéralisation. Il est généralement exprimé en mg/L. (Rodier et al., 2009).

Tableau04:Classification des eaux selon le résidu sec à 180 °C (Rodier et al., 2009).

Résidu sec à 180 °C (mg/L)	Classification
< 50	Très faiblement minéralisée
50 – 500	Faiblement minéralisée
500 – 1500	Moyennement minéralisée
> 1500	Riche en sels minéraux

I.5.3. Les Paramètres de minéralisation globale

I.5.3.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium (Ca^{2+}) est un élément alcalino-terreux abondamment présent dans la nature, notamment au sein des formations calcaires riches en carbonates. Sa présence dans les eaux résulte principalement de l'altération et de la dissolution des roches traversées. Il représente l'un des principaux ions responsables de la dureté de l'eau. Ainsi, une teneur élevée en calcium confère à l'eau un caractère dur, tandis qu'une faible concentration est généralement associée à une eau douce. (Tardat-Henry et Beaudry, 1992).

I.5.3.2. Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium (Mg^{2+}) est un élément alcalino-terreux naturellement présent dans les eaux. Il provient principalement de la dissolution des roches riches en magnésium, notamment la magnésite et la dolomite. Avec le calcium, il participe à la minéralisation et à la dureté de l'eau. Bien que le magnésium soit un élément essentiel pour l'organisme, des teneurs élevées peuvent altérer les qualités organoleptiques de l'eau en lui conférant un goût amer (Tardat-Henry et Beaudry, 1992).

I.5.3.3. Chlorure (Cl^-)

Le chlorure (Cl^-) figurent parmi les principaux anions présents dans les eaux naturelles. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des formations géologiques salifères ainsi que des apports d'origine naturelle ou anthropique. Les chlorures participent à la minéralisation de l'eau et constituent un indicateur important de sa composition chimique. Des teneurs élevées peuvent altérer les qualités organoleptiques de l'eau en lui conférant un goût salé et favoriser les phénomènes de corrosion (Tardat-Henry et Beaudry, 1992)

I.5.3.4. bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates (HCO_3^-) représentent les anions majeurs dans de nombreuses eaux naturelles. Ils proviennent principalement de la dissolution du dioxyde de carbone et des roches carbonatées telles que le calcaire et la dolomie. Les bicarbonates jouent un rôle important dans le maintien de l'équilibre acido-basique et contribuent significativement à l'alcalinité des eaux (Degremont, 2005).

I.5.3.5. Sodium (Na^+)

Le sodium (Na^+) est l'un des cations les plus répandus dans les eaux naturelles, qu'elles soient souterraines ou de surface. Sa présence est liée à la dissolution de diverses formations géologiques et à certains apports naturels ou anthropiques. À des concentrations élevées, il peut altérer les qualités organoleptiques de l'eau en lui conférant un goût saumâtre (Rodier, 2005).

I.5.3.6. Potassium (K^+)

Le potassium (K^+) est un élément largement présent dans les roches magmatiques et les minéraux argileux. Malgré son abondance dans la croûte terrestre, ses concentrations dans les eaux naturelles demeurent généralement faibles en raison de la faible mobilité de cet ion et de son implication dans de nombreux processus géochimiques. Dans les eaux souterraines, sa teneur dépasse rarement 10 mg/L (Zerluth et Gienger, 2006).

I.5.3.7. Sulfate (SO_4^{2-})

Le sulfate (SO_4^{2-}) sont des anions très solubles présents dans les eaux naturelles sous forme de soufre dissous. Leur origine peut être géologique ou atmosphérique, mais ils peuvent également provenir des activités humaines, notamment de l'utilisation d'engrais sulfatés. À des concentrations élevées, les sulfates peuvent altérer les qualités organoleptiques de l'eau en lui conférant un goût désagréable (Degremont, 1978).

I.5.3.8. Titre Hydrotimétrique (TH)

Le titre hydrotimétrique (TH), ou dureté totale, traduit la teneur de l'eau en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). Il résulte principalement de la dissolution des roches carbonatées, telles que le calcaire et la dolomie, lors du passage de l'eau à travers les formations géologiques. La dureté de l'eau est donc étroitement liée à sa composition minérale et constitue un indicateur important de ses caractéristiques physico-chimiques. La classification des eaux selon les valeurs du TH est présentée dans le tableau suivant. (Rodier et al., 2009).

Tableau 5: Classification des eaux selon les valeurs du titre hydrométrique (Rodier et al., 2009).

Titre Hydrométrique (TH) (°f)	Classification
0 à 7	Très douce
7 à 15	Eau douce
15 à 30	Moyennement douce
30 à 40	Dure
> 40	Très dure

I.5.4. Les Paramètres de pollution

I.5.4.1. Ammonium (NH₄⁺)

L'ammonium (NH₄⁺) est un composé azoté présent dans les eaux naturelles à la suite de la dégradation des matières organiques par l'activité microbienne. Des teneurs élevées en ammonium peuvent révéler une contamination d'origine domestique, agricole ou industrielle (Rodier et al., 2009).

I.5.4.2. Nitrate (NO₃⁻)

Le nitrate (NO₃⁻) constitue la forme oxydée la plus stable de l'azote et représente généralement l'espèce azotée dominante dans les eaux naturelles. Ils proviennent du cycle naturel de l'azote ainsi que de l'oxydation biologique des composés azotés. Leur présence dans les eaux peut également être liée aux activités agricoles, aux rejets d'eaux usées et aux effluents d'origine animale (Tardat-Henry et Beaudry, 1992).

I.5.4.3. Nitrite (NO₂⁻)

Le nitrite (NO₂⁻) sont généralement présents à de faibles concentrations dans les eaux naturelles, car ils représentent une forme intermédiaire du cycle de l'azote. Ils résultent principalement de la réduction microbienne des nitrates ou de l'oxydation incomplète de l'ammonium. Leur présence peut traduire une pollution récente ou un déséquilibre des processus biologiques dans le milieu aquatique (Tardat-Henry et Beaudry, 1992).

I.5.4.4. Ortho phosphates (PO₄³⁻)

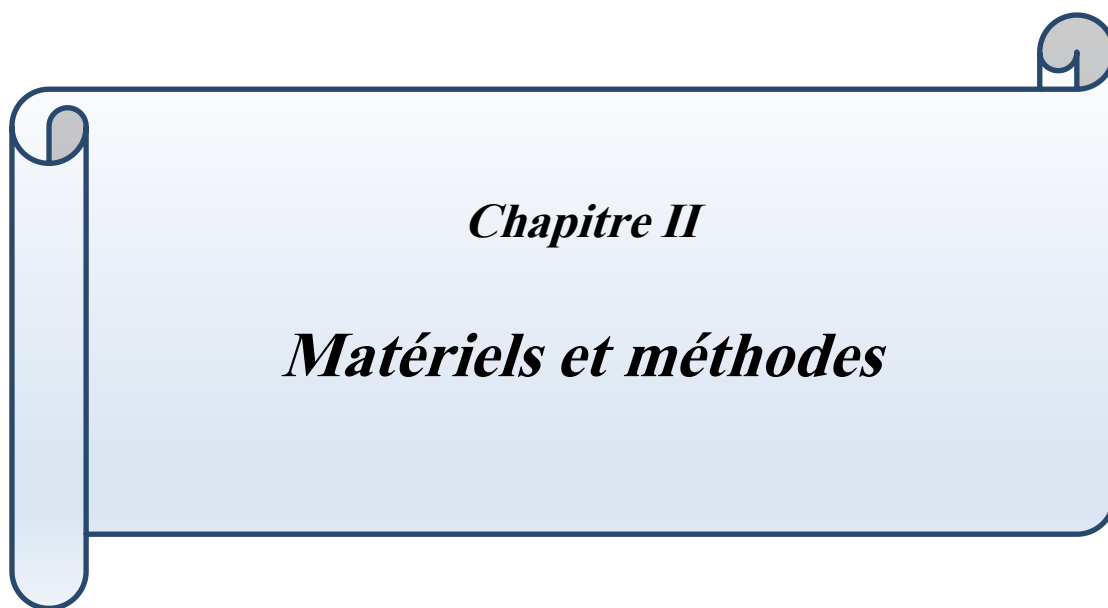
Les Orthophosphates dans l'eau se réfèrent aux composés phosphorés solubles contenant un seul groupe phosphate (PO₄³⁻). Ils sont généralement présents sous forme de phosphates inorganiques dissous, notamment les phosphates monobasiques (HPO₄²⁻) et les phosphates dibasiques (H₂PO₄⁻), qui résultent souvent de l'activité humaine comme l'agriculture, le traitement des eaux usées, et l'utilisation de détergents (WHO, 2011).

I.6. Les normes de qualité de l'eau potable

Tableau 06: Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimique pour l'eau potable (JORA, 2011 ; OMS, 2004)

Paramètre	Unité	Normes Algérienne	Normes OMS
Température	°C	25	25
PH	Unité PH	6,5-8,5	6.5_9
Conductivité	Us/cm	<2800	<2100
Turbidité	NTU	<5	<2,5
Résidu sec	Mg/L	<2000	<1500
Dureté total (TH)	Mg/L	<500	<500
Calcium	Mg/L	<200	<270
Magnésium	Mg/L	<150	<50
Sodium	Mg/L	<200	<150
Potassium	Mg/L	<12	<20
Sulfate	Mg/L	<400	<400
Chlorure	Mg/L	<500	<250
Nitrate	Mg/L	<50	<50
Nitrite	Mg/L	<0,1	<0,1
Phosphate	Mg/L	<0,5	<0,5
Ammonium	Mg/L	<0,5	<0,5
Matières organique	Mg/L	<3	<3.5





Chapitre II

Matériels et méthodes

Ce chapitre présente le matériel et les méthodes adoptés dans cette étude. Il décrit brièvement la zone d'étude de Hadjr El Melh ainsi que les modalités de prélèvement et de conservation des échantillons d'eau. Il expose également les méthodes analytiques utilisées pour déterminer les paramètres physico-chimiques et les indicateurs de qualité des eaux, en précisant les équipements, les réactifs et les protocoles appliqués afin d'assurer la fiabilité des résultats obtenus.

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Situation géographique de la source Hadjr El Melh

Le site de Hadjr El Melh (Hadjr El Melh) est situé au nord de la ville de Djelfa, à environ 25 km, le long de la route reliant Djelfa à Alger, dans la commune d'Aïn Maâbed(Figure 07).Il s'inscrit dans le bassin du Zahrez El Gharbi.

Ses coordonnées géographiques sont approximativement 34°50'00" de latitude Nord et 3°05'00" de longitude Est, avec une altitude estimée à environ 1083 m au-dessus du niveau de la mer, ce qui traduit son caractère topographique élevé (Beddal et al., 2022)

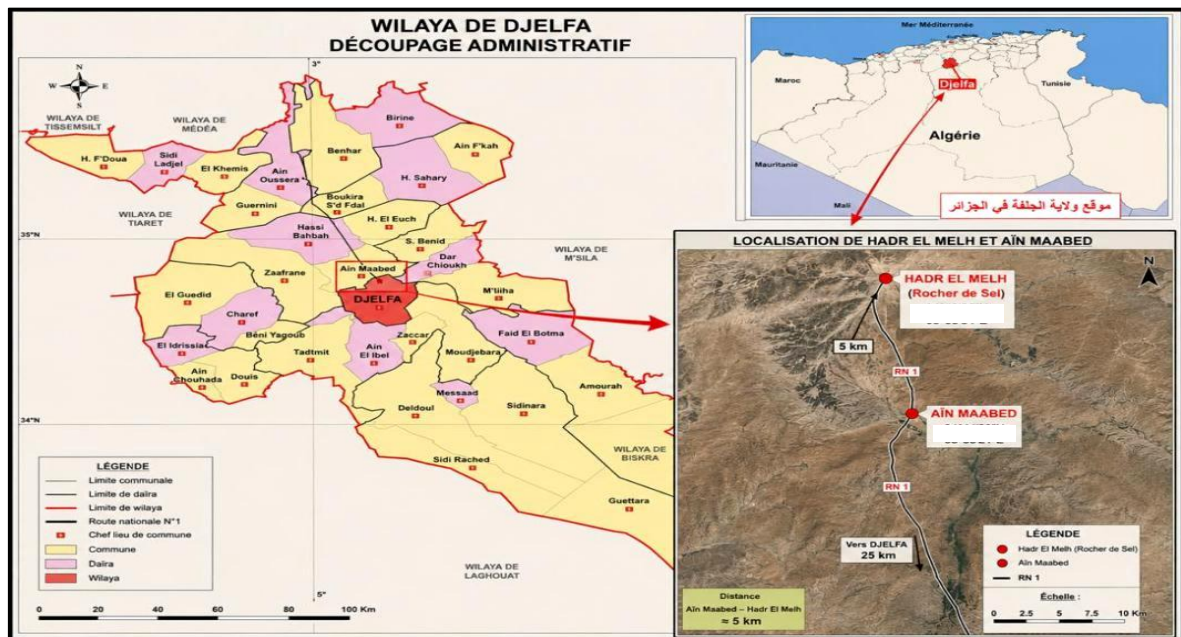


Figure 07: Localisation géographique de la zone d'étude(Aïn Maâbed – Hadje El Melh) Réalisée par l'auteure a l'aide de(Google Earth, 2026) et (A.N.A.T., 2013)

II.1.2. Géologie du site de Hadjr El Melh

Le site de Hadjr El Melh correspond à un affleurement rocheux d'âge triasique, dont la hauteur atteint environ 110 mètres. Cette formation géologique est dominée par des dépôts évaporitiques, principalement constitués de sel gemme (rock salt), d'argiles salées (saltmud) ainsi que de gypse (gypsum).

Cette composition minéralogique témoigne du caractère évaporitique de la région et de l'importance des processus de dépôt salin dans la formation de ce paysage géologique. (Beddal et al., 2022). (Figure 08)



Figure 08: certains aspects géologiques de la région (Hadjr El Melh)

(photo personnelle, 2026)

II.1.3. Végétation du site de Hadjr El Melh

Le site présente une couverture végétale très faible (Figure 09), voire quasi absente au niveau de la masse saline. On n'y observe que quelques touffes limitées d'alfa, ainsi que quelques arbustes résistants tels que le tamaris (Tamarisk), capables de s'adapter aux conditions salines extrêmes. (Beddal et al., 2022)



Figure 09: la couverture végétale de la région. (photo personnelle, 2026)

II.1.4. Hydrologie

Le site est caractérisé par la présence de plusieurs vallées contenant des cours d’eau permanents ou temporaires, notamment dans les zones à forte pente, où ces écoulements réapparaissent après les épisodes de pluie. On observe également des dépressions allongées qui incluent des segments de l’oued El Malah, lequel traverse le site d’est en ouest, contribuant ainsi au drainage des eaux de surface dans la région.(Beddal et al., 2022)

II.2. Présentation des autres eaux de source étudiées

Tableau07 :Les autres sources utilisées et leur localisation

Les autres source utilisé	La localisation
Messâad	El Houheï, wilaya de Messâad.
Atlas	d’Aïn Maâbed (wilaya de Djelfa).
Ain Bouglez	Ain Bouglez(wilaya d’El Tarf).
Gueriïoune	OuledGacem (wilaya Oum El Bouaghi).
El Aryaf	Akbou (wilaya de Béjaïa)
Texanna	Texanna,(wilaya de Jijel).

II.3. Échantillonnage des eaux

II.3.1. Présentation des échantillons

Dans le cadre de cette étude comparative, l'échantillon d'eau de la source Hadjr El Melh a été retenu comme échantillon principal et a fait l'objet d'analyses physico-chimiques réalisées au laboratoire afin de déterminer ses principales caractéristiques de qualité.

Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à ceux de plusieurs eaux de source destinées à la consommation humaine et commercialisées dans la région de Djelfa, à savoir Atlas, Messaad, Bouglaz, Texanna, El Aryaf et Guerioune. Cette comparaison a été réalisée à partir des données physico-chimiques figurant sur les étiquettes des bouteilles de ces eaux, utilisées comme références, afin de mettre en évidence les similitudes et les différences entre la composition de l'eau de la source Hadjr El Melh et celle des eaux de source consommées dans la région.

II.3.2. Prélèvement et conservation de l'échantillon de Hadjr El Melh

L'échantillon d'eau de la source Hadjr El Melh a été prélevé directement à l'émergence de la source dans une bouteille propre et stérile d'une capacité de 1,5 L, afin de garantir sa représentativité et d'éviter toute contamination éventuelle. Avant le prélèvement, la bouteille a été rincée à plusieurs reprises avec l'eau de la source afin d'éliminer toute impureté susceptible d'influencer les caractéristiques de l'échantillon. Le prélèvement a été effectué dans le respect des règles d'hygiène et des bonnes pratiques de manipulation, puis la bouteille a été immédiatement fermée de manière hermétique après son remplissage. Le prélèvement a été réalisé le 11 mai 2026 au niveau de la source Hadjr El Melh, située dans la commune d'Aïn Maâbed (wilaya de Djelfa). La date et le lieu du prélèvement ont été soigneusement enregistrés, et le volume prélevé a été jugé suffisant pour la réalisation de l'ensemble des analyses physico-chimiques prévues.

Après le prélèvement, l'échantillon a été transporté directement au laboratoire et conservé au réfrigérateur afin de maintenir une température stable et de préserver ses caractéristiques physico-chimiques. Les analyses ont été effectuées dans un délai de 24 heures après le prélèvement, afin d'assurer la fiabilité et la précision des résultats obtenus.



Figure10 :photo de la source Hadjr El Melh (photopersonnelle, 2026)

II.3.3. Laboratoire d'analyse (ANRH)

Les analyses physico-chimiques des échantillons ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de la wilaya de Djelfa, qui est un laboratoire public spécialisé dans le contrôle et l'évaluation de la qualité des ressources en eau. Ce laboratoire effectue l'analyse de différents types d'eaux (Annexe01), notamment les eaux superficielles, les eaux souterraines ainsi que les eaux de consommation conditionnées, conformément aux normes techniques et aux protocoles en vigueur dans le domaine du contrôle de la qualité de l'eau

II.4. Les analyses réalisées sur l'eau de la source Hadjer El Melh

II.4.1. Analyses des paramètres physico-chimique

II.4.1.1. La température

La température Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz. Pour Détermination la température on utilise le thermomètre, les Déterminations sont obtenues directement en degré Celsius(Rodier et al, 2005)

II.4.1.2. Détermination du pH

II.4.1.2.1. Principe

Le pH est déterminé par Détermination électrométrique à l'aide d'un pH-mètre muni d'une électrode de verre. La Détermination repose sur la différence de potentiel entre l'électrode de Détermination et l'électrode de référence, proportionnelle à l'activité des ions H^+ dans l'échantillon. (Rodier et al, 2009)

II.4.1.2.2. Matériels et réactifs

- pH-mètre électronique avec Électrode combinée (verre/référence)
- Solutions tampons de calibration (pH 4,01 ; 7,00)
- Agitateur magnétique
- Bécher propre
- Eau distillée
- Papier absorbant non pelucheux

II.4.1.2.3. Mode opératoire

A. Étalonnage de l'appareil

Le pH-mètre est mis en marche et l'électrode est rincée à l'eau distillée puis essuyée délicatement. L'étalonnage est réalisé avec les solutions tampons pH 7,00 puis pH 4,00 sous agitation douce jusqu'à stabilisation des lectures.

B. Mesure de l'échantillon

Au début de la Détermination, 100 mL de l'échantillon ont été versés dans un bécher propre préalablement rincé à l'eau distillée, puis le bécher a été placé sur l'agitateur magnétique en assurant une légère agitation. Ensuite, l'électrode a été rincée à l'eau distillée et immergée dans l'échantillon sans toucher les parois du bécher. On a attendu la stabilisation de la lecture avant de relever la valeur du pH. (Figure 11.)



Figure 11:Détermination du pH à l'aide d'un pH-mètre(photo personnelle, 2026)

II.4.1.3. Détermination de la conductivité Électrique

II.4.1.3.1. Principe

La conductivité électrique représente la capacité d'une eau à conduire le courant électrique, en relation directe avec la concentration en sels dissous ionisés (cations et anions). Elle est mesurée à l'aide d'un conductimètre, basé sur le passage d'un courant alternatif entre deux électrodes immergées, et exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm à une température de référence de 25 °C. (Rodier et al., 2009)

II.4.1.3.2. Matériels et réactifs

- Conductimètre avec Sonde de conductivité
- Solution étalon 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25 °C
- Agitateur magnétique
- Eau distillée
- Verrerie de laboratoire

II.4.1.3.3. Mode opératoire

A. Étalonnage de l'appareil

Le conductimètre est mis sous tension, puis la sonde est rincée et séchée délicatement. L'étalonnage est réalisé en immergeant la sonde dans la solution étalon (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

jusqu'à stabilisation de la lecture, puis validation de la valeur de référence. La sonde est ensuite rincée avant utilisation.

B. Mesure de l'échantillon

Un volume d'environ 100 mL d'échantillon est placé dans un bécher propre et rincé à l'eau distillée, puis soumis à une légère agitation. La sonde est rincée, immergée dans l'échantillon sans contact avec les parois, et la lecture est relevée après stabilisation de la valeur affichée. (Figure 12.)

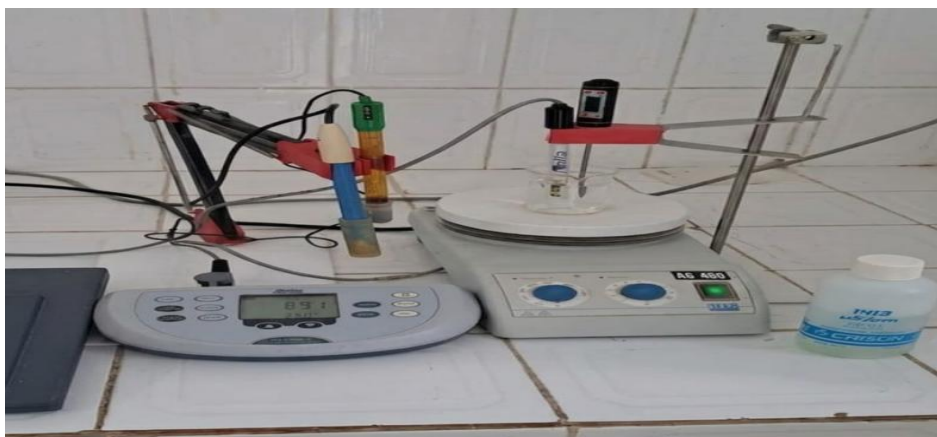


Figure 12 : Détermination du conductivité à l'aide d'un conductivimètre (photo personnelle, 2026)

II.4.1.4. Détermination du turbidité

II.4.1.4.1. Principe

La turbidité est un paramètre physico-chimique qui exprime le degré de transparence de l'eau, lié à la présence de particules en suspension (argiles, matières organiques, micro-organismes...). Elle est mesurée par diffusion de la lumière à l'aide d'un turbidimètre et exprimée en NTU (Nephelometric Turbidity Units). (Rodier et al., 2009)

II.4.1.4.2. Matériels et réactifs

- Turbidimètre
- Cuvettes de turbidité propres et transparentes
- Solutions étalons pour l'étalonnage (0.02 NTU, 10 NTU, 100 NTU et 1760 NTU).
- Eau distillée
- Verrerie de laboratoire

II.4.1.4.3. Mode opératoire

A. Étalonnage de l'appareil

Le turbidimètre est mis en marche puis laissé à stabilisation. L'étalonnage est effectué à l'aide de solutions étalons adaptées (0.02, 10, 100 et 1760 NTU) afin d'ajuster l'appareil aux valeurs de référence.

B. Mesure de l'échantillon

L'échantillon est homogénéisé par agitation douce, puis la cuvette est rincée et remplie sans formation de bulles d'air, avant de procéder à la mesure après stabilisation de la lecture. Deux mesures ont été réalisées : la première immédiatement après agitation (0.33 NTU) et la seconde après un repos d'une heure sans agitation (0.22 NTU). (Figure 07)



Figure 13: Appareil de turbidimètre (photo personnelle, 2026)

A: Turbidité eau brut(ntu)

B: Turbidité eau déc (ntu)

II.4.1.5. Résidu Sec à 180 °C

II.4.1.5.1. Principe

Le résidu sec correspond à la quantité de matières dissoutes contenues dans l'eau. Il est obtenu après évaporation d'un volume déterminé d'eau et dessiccation du résidu à 180 °C. La masse du résidu est déterminée par pesée différentielle. Le résidu sec est exprimé en milligrammes par litre (mg/L). (Rodier et al, 2009)

II.4.1.5.2. Matériels utilisé

- Coupelle en aluminium
- fiole jaugée pour Mesurer 100 mL d'échantillon
- Étuve réglée à 180 °C
- Balance analytique de précision. .
- Dessiccateur

II.4.1.5.3. Mode opératoire

Une coupelle propre et sèche est d'abord pesée pour déterminer la masse initiale. Ensuite, 100 mL d'échantillon sont mesurés et versés dans la coupelle. L'échantillon est évaporé puis séché à 180 °C pendant 4 heures jusqu'à dessiccation complète. Après refroidissement dans un dessiccateur, la coupelle est de nouveau pesée afin d'obtenir la masse finale. Le résidu sec est calculé par différence entre les deux masses (Rodier et al., 2009) (figure 14)

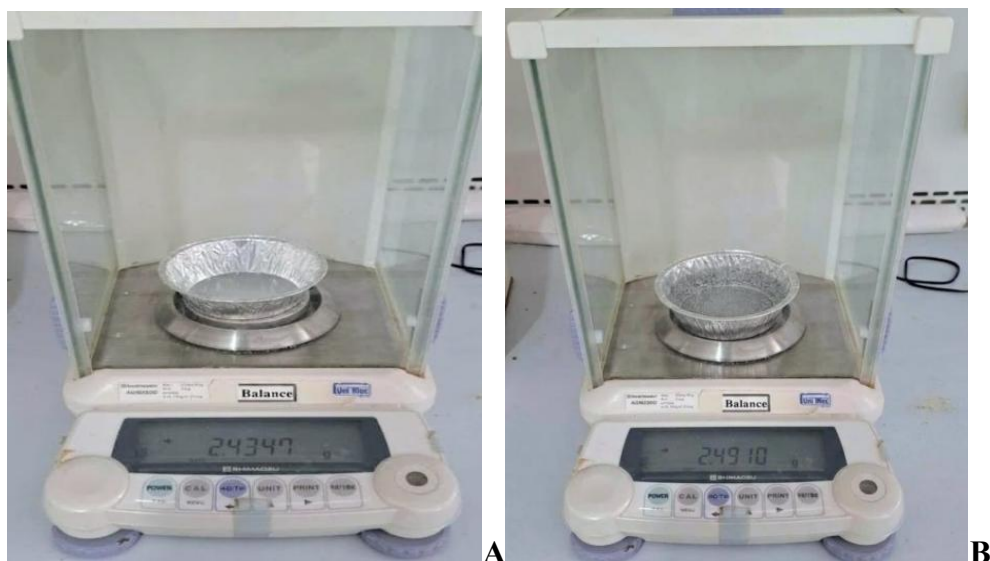


Figure 14: Mesure du résidu sec (photo personnelle, 2026)

A: Pesée initiale de la capsule vide

B: Pesée finale de la capsule après séchage

II.4.2. Analyses des paramètres minéralisation globale

II.4.2.1. Dosage de Calcium (Ca^{2+})

II.4.2.1.1. Le Principe

La teneur en calcium est déterminée par titrage complexométrique à l'EDTA en milieu fortement alcalin (NaOH)

Les ions Ca^{2+} forment un complexe stable avec l'EDTA. Le point d'équivalence est indiqué par le murexide, avec un changement de couleur du rose au violet. (Rodier et al, 2009)

II.4.2.1.2. Réactifs et matériel

A. Réactifs

Tableau 08 : Tableau de réactifs utilisé dans le dosage de calcium

Solution	Préparation
NaOH 2 mol/l	8g de NaOH dans de l'eau distillée q.s.p 100ml
EDTA 0.01 mol/l	3.725g d'EDTA dans de l'eau distillée q.s.p 1000ml
Solution étalon CaCO_3 0.01mol/l	1g de CaCO_3 séché 2h/150°C, dissous dans HCl 4mol/l, q.s.p 1000ml
Murexide (indicateur solide)	0.2g de Murexide + 100g de NaCl finement broyés ensemble

B. Matériel Utilisé :

- Agitateur magnétique
- Verrerie de laboratoire

II.4.2.1.3. Mode Opérateur

A. Dosage l'échantillon

Après étalonnage de la solution d'EDTA à l'aide d'une solution étalon de carbonate de calcium (CaCO_3) de concentration 0,01 mol/L, et vérification de la précision de la standardisation, un volume de 50 mL de l'échantillon est prélevé et introduit dans un bécher. Ensuite, 2 mL de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) ainsi que 0,2 g d'indicateur murexide sont ajoutés. La solution présente initialement une coloration rose, puis le titrage est effectué avec la solution d'EDTA sous agitation continue jusqu'au virage de la couleur du rose au violet, correspondant au point d'équivalence. Le volume d'EDTA consommé à ce point est alors relevé.(Figure 15)

B.Calcul

- La concentration en calcium, en mg/l , est donnée par la formule suivante :

$$\text{Ca}^{2+}(\text{mg/L}) = \frac{1000 \times 40,08 \times C \times V1}{V2}$$

V1: volume en ml, de la solution d'EDTA utilisé pour le dosage

V2: le volume, en ml, d'échantillon dosé (en général 50ml)

C: concentrations en mol/l de la solution d' EDTA (0.01mole/l)

40,08 : masse molaire du calcium (g/mol)

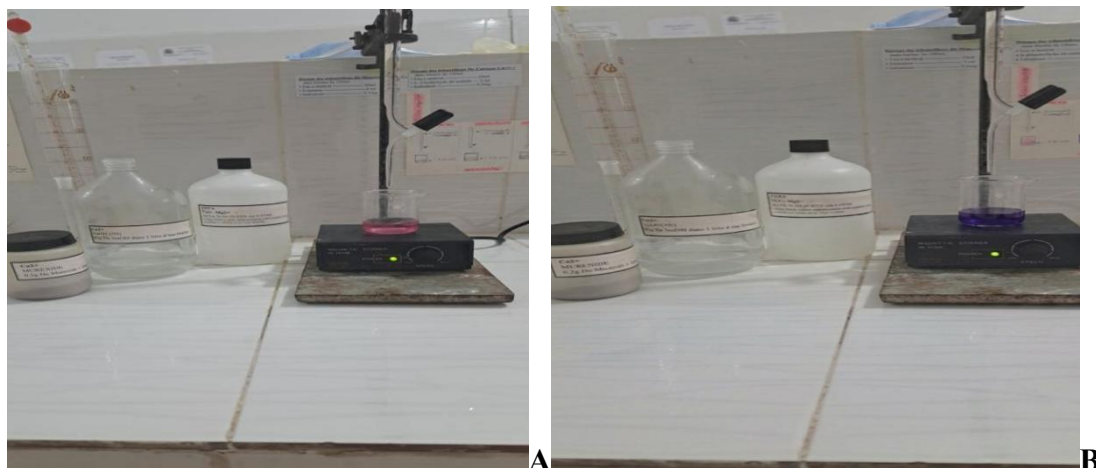


Figure 15: Détermination du calcium par titrage à l'EDTA (photo personnelle.2026)

A: Avant le titrage

B: Après le titrage

II.4.2.2. Dosage de Magnésium (Mg^{2+})

II.4.2.2.1. Le Principe :

Le magnésium est déterminé par dosage complexométrique à l'EDTA à pH 10, où des complexes se forment avec Ca^{2+} et Mg^{2+} selon un rapport 1:1. Le point d'équivalence est indiqué par le NET avec un changement de couleur du rouge vineux au bleu, et sa concentration est calculée par différence entre la dureté totale et la concentration en calcium. (Rodier et al., 2009)

II.4.2.2.2. Réactifs et matériels Utilisé :

A. Réactifs

Tableau 9 : tableau de réactifs utilisé dans le dosage de magnésium

Solution	Préparation
EDTA 0.01 mol/l	3.725g d'EDTA dans eau distillée q.s.p 1000ml
Solution tampon pH=10	67.5g NH_4Cl + 570ml NH_3 25% + 5g EDTA + eau q.s.p 430ml
Solution tampon diluée (1/10)	10ml de tampon dilués dans 100ml d'eau distillée
NET (indicateur solide)	1g Noir Eriochrome T + 100g NaCl finement broyés
Solution étalon $CaCO_3$ 0.01mol/l	1g $CaCO_3$ séché 2h/150°C, dissous dans HCl 4mol/l, q.s.p 1000ml

B. Matériel

- Agitateur magnétique
- Verrerie de laboratoire

II.4.2.2.3. Mode Opérateur

A. Dosage des échantillons

Après la standardisation de la solution d'EDTA à l'aide d'une solution étalon de carbonate de calcium ($CaCO_3$) à une concentration de 0,01 mol/L, et vérification de la précision de la titration, un volume de 50 mL de l'échantillon est prélevé et introduit dans

un bécher. Ensuite, 4 mL de solution tampon à pH 10 ainsi que 0,2 g d'indicateur Noir Ériochrome T (NET) sont ajoutés. La solution prend une coloration violette caractéristique, puis le titrage est effectué à l'aide de la solution d'EDTA sous agitation continue jusqu'au changement de couleur du violet au bleu, indiquant le point d'équivalence. Le volume d'EDTA consommé à ce point est relevé et utilisé pour les calculs ultérieurs (Figure 16)

B.Calcul

- La concentration en magnésium, en mg/l, est donnée par la formule suivante :

$$C(Mg^{+2}) = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 24.3 \times 1000}{PE} \text{ (Mg/L)}$$

- V_2 = volume d'EDTA pour le dosage $Ca^{2+} + Mg^{+2}$ (ml)
- V_1 = volume d'EDTA utilisé pour le dosage du Ca seul (ml)
- C = concentration EDTA = 0.01 mol/l
- 24.3 = masse molaire du magnésium
- PE = prise d'essai = 50ml

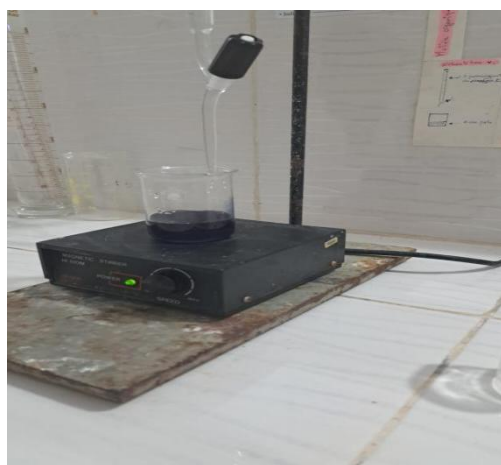


Figure 16:Détermination du magnésium par titrage à l'EDTA (**photo personnelle, 2026**)

A:Avant le titrage

B: Apres le titrage

II.4.2.3. Dosage de chlorure (Cl⁻)

II.4.2.3.1. Principe

Les ions chlorure sont déterminés par titrage au nitrate d'argent ($AgNO_3$) en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4) comme indicateur. Les chlorure précipitent sous forme de chlorure d'argent ($AgCl$) et, après leur consommation totale, l'excès d'ions argent réagit

avec les ions chromate pour former un précipité rouge brique de chromate d'argent (Ag_2CrO_4), indiquant le point d'équivalence. Le dosage est réalisé dans un milieu de pH compris entre 5 et 9. (Rodier et al., 2009)

II.4.2.3.3. Réactifs et Matériel

A. Réactifs :

Tableau10: Tableau de réactifs utilisés pour le dosage des chlorure

Solution	Préparation
Solution de nitrate d'argent AgNO_3 0.01N	1.6987g de AgNO_3 dans eau distillée q.s.p 1000ml
Indicateur coloré K_2CrO_4 10%	10g de K_2CrO_4 dans eau distillée q.s.p 100ml
Solution étalonde chlorures Cl^- à 71mg/l	0.107g de NH_4Cl dans eau distillée q.s.p 1000ml

B. Matérielles

- Agitateur magnétique
- Verrerie de laboratoire

II.4.2.3.4. Mode Opérateur

A. Dosage des échantillons

Un volume de 50 mL de l'échantillon d'eau à analyser a été prélevé, puis deux gouttes de l'indicateur chromate de potassium (K_2CrO_4) ont été ajoutées, donnant une coloration jaune à la solution. La solution a ensuite été titrée à l'aide d'une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) à 0,01 N jusqu'à l'apparition d'une coloration brun rougeâtre persistante, indiquant le point final du titrage. (Figure 17)

B. Calcule

- La concentration en chlorures en mg/l, est donnée par la formule suivante :

$$\text{- Formule Générale : Cl(mg/l)} = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times M_{\text{Cl}}}{PE} = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times 0.01 \times 35.5 \times F \times 1000}{5}$$

- Formule Simplifiée : $Cl^{-}(\text{mg/ l}) = V_{AgNO_3} \times 71 \times F$

Où :

- V_{AgNO_3} : Volume d'AgNO₃ nécessaire pour le dosage de l'échantillon.
- N_{AgNO_3} : Normalité d'AgNO₃.
- $M_{Cl^{-}}$: Masse des chlorures.
- F : facteur de correction du titre d'AgNO₃.
- PE : prise d'essai.

Pour le F :

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

$$F = \frac{1}{V_{AgNO_3}}$$

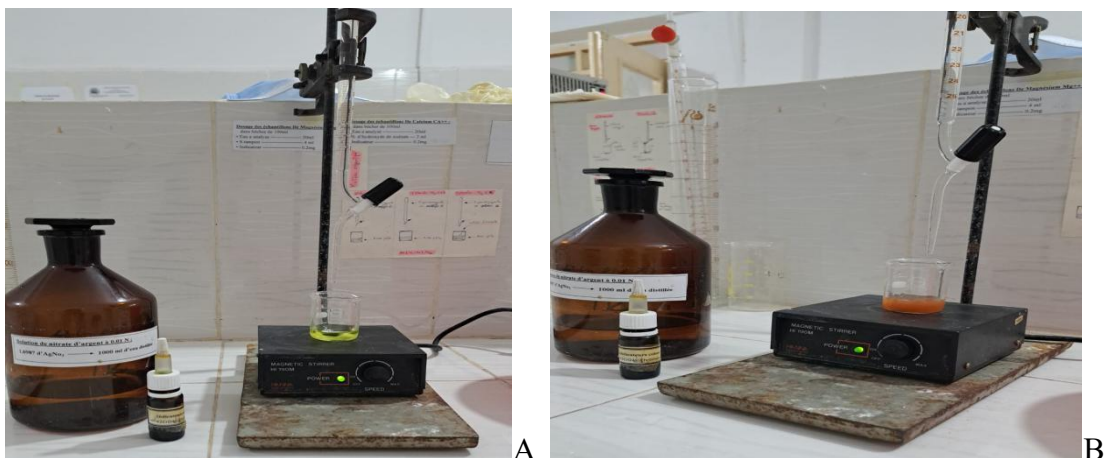


Figure 17 :Détermination des chlorure par titrage à nitrate d'argent (**photo personnelle, 2026**)

A: Avant le titrage

B: Apres le titrage

II.4.2.4. Dosage de bicarbonate (HCO_3^-)

II.4.2.4.1. Principe

La détermination de bicarbonate et repose sur un titrage acido-basique à l'aide d'une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) de normalité connue. Le suivi du dosage est réalisé à l'aide d'un pH-mètre : les carbonates sont neutralisés jusqu'à pH 8,2, tandis que les bicarbonates sont neutralisés jusqu'à pH 4,5. (Rodier et al., 2009)

II.4.2.4.2. Réactifs et Matériel

A. Réactifs

Tableau 11: tableau de réactifs utilisé dans le dosage de (HCO_3^-)

Solution	Préparation
H_2SO_4 0.1N	2.8ml de H_2SO_4 concentré dans 1 litre d'eau distillée
H_2SO_4 0.01N	Diluer 100ml de H_2SO_4 0.1N dans 500ml d'eau distillée, compléter à 1000ml

B. Matériel :

- pH-mètre
- Agitateur magnétique
- Verrerie de laboratoire

II.4.2.4.3. Mode opératoire

A. Dosage des échantillons

Un volume de 20 mL d'échantillon est introduit dans un bécher placé sur agitateur magnétique, puis le pH initial est mesuré à l'aide du pH-mètre. Le titrage est effectué avec la solution d' H_2SO_4 0,01 N jusqu'à l'obtention d'un pH de 4,5, et le volume d'acide consommé (V_2) est relevé. Lorsque le pH initial de l'échantillon est supérieur à 8,2, le volume d'acide nécessaire pour atteindre pH 8,2 (V_1) est également enregistré. (Figure 18)

B. Calcul

$$[\text{CO}_3^{2-}] = V_1 \times 60 \text{ mg/L}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = V_2/2 \times 61 \text{ mg/L}$$

- (61 = Masse molaire de HCO₃)
- Pour les solutions qui ont un pH > 8,2 prenez tout le volume versé pour les bicarbonates soit: (V_i + V₂)



Figure 18:Détermination du bicarbonate(photo personnelle, 2026)

II.4.2.5. Détermination du sodium et potassium

II.4.2.5.1. Principe

Le dosage simultané du sodium (Na⁺) et du potassium (K⁺) est réalisé à partir d'un même échantillon à l'aide d'un photomètre à flamme.(Rodier et al., 2009)

II.4.2.5.2. Réactifs et Matériel

A. Réactifs

Tableau12 :Solution Mère du sodium et potassium

Solution	Préparation
Solution mère K ⁺ -100 ppm	0.19g de KCl dans eau distillée q.s.p 1000ml
Solution mère Na ⁺ - 10,000 ppm	25.42g de NaCl dans eau distillée q.s.p 1000ml

B. Matériel :

- Photomètre de flamme
- Verrerie de laboratoire (Annexe 05)
- Spectrophotomètre (Annexe 06)

II.4.2.5.3. Mode Opérateur**A. Préparation des solutions étalon pour le Potassium K^+**

Dans une serie de fioles jaugées de 100ml , Introduire respectivement les volumes : 2,5 ,10 , 20 , 30ml de solution de la solution mère de K, correspondant respectivement Suivates : 2,5 , 10 ,20 , 30 ppm (annotation manuscrite : aux concentrations)

B. Préparation des solutions étalons pour le Sodium Na^+

Dans une serie de fioles jaugées de 100ml , Introduire respectivement les volumes : 0,1. 0,5 .1 .2 .3ml de solution de la solution mère de Na, correspondant respectivement(Figure 19)

suivantes : 10 . 50 . 100 .200 . 300 ppm (annotation manuscrite : aux concentrations)



Figure 19 :Solutions étalons filles pour le Sodium Na^+ et K^+ (photo personnelle, 2026)

C. Préparation et dosage de l'échantillon

Le photomètre à flamme (Figure 20) est mis en marche et laissé en fonctionnement jusqu'à stabilisation. L'appareil est ensuite réglé à l'aide de l'eau distillée utilisée comme solution témoin. L'étalonnage est réalisé à partir des solutions étalons préparées, dont les mesures permettent l'établissement de la courbe d'étalonnage. L'échantillon à analyser est alors introduit dans l'appareil , une dilution appropriée est effectuée si

nécessaire. La concentration en sodium ou en potassium est déterminée par lecture directe sur l'appareil ou à partir de la courbe d'étalonnage. Les résultats sont exprimés en mg/L.

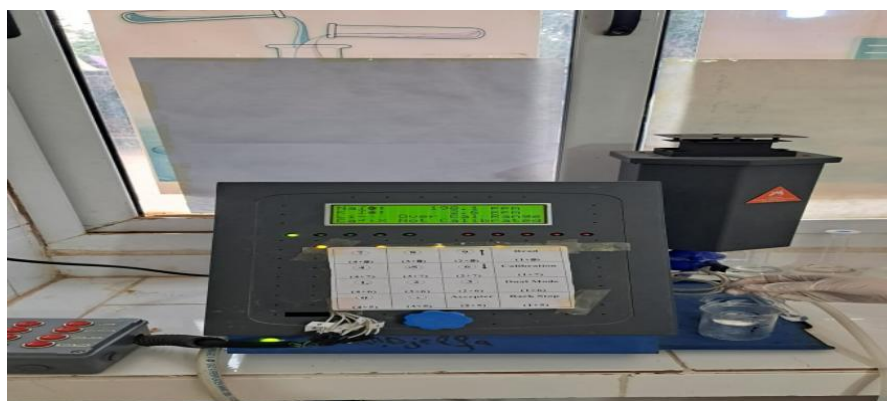


Figure 20:Photomètre de flamme(photo personnelle, 2026)

II.4.2.6. Dosage de Sulfate SO_4^{2-}

II.4.2.6.1. Le Principe

Les ions sulfates de l'échantillon réagissent avec le chlorure de baryum pour former un précipité de sulfate de baryum (BaSO_4) en milieu acide. Le Tween 20 stabilise la suspension obtenue. La turbidité produite est mesurée à 650 nm par spectrophotométrie, puis la concentration en sulfates est déterminée à l'aide d'une courbe d'étalonnage.(Rodier et al., 2009).

II.4.2.6.2. Réactifs et Solutions

Tableau13: tableau de réactifs utilisé dans le dosage des Sulfates

Réactif	Préparation	Rôle
HCl (acidechlorhydrique)	10 mL HCl concentré + 100 mL eau distillée	Acidifier le milieu pour éviter la formation d'autres précipités
BaCl ₂ ·2H ₂ O + Tween20	5g BaCl ₂ ·2H ₂ O dans un peu d'eau distillée + 2,5 mL Tween 20, compléter à 50 mL, agiter quelques secondes	Précipiter les sulfates et stabiliser la turbidité
Solution mère SO_4^{2-} (150 mg/L)	0,2219g Na ₂ SO ₄ dans 1000 mL eau distillée	Solution d'étalonnage pour la gamme

II.4.2.6.3. Matériel

- Spectrophotomètre réglé à 650 nm et Cuves de Détermination.
- Verrerie de laboratoire courante.
- Conductimètre pour déterminer la dilution éventuelle des échantillons.

II.4.2.6.4. Mode Opérateur

A. Préparation de la gamme d'étalonnage

Tableau14: tableau de la gamme d'étalonnage dans le dosage des Sulfates

- Dans 7 fioles jaugées de 50 mL :

Fiole	Solution étalon (mL)	Eau distillée (mL)
Témoin	0	50
1	1	49
2	3	47
3	5	45
4	7	43
5	9	41
6	10	40

- Ajouter à chaque fiole :

- 1 mL d'acide chlorhydrique à 10 %.
- 5 mL de solution de chlorure de baryum stabilisée.
- Agiter doucement

B. Préparation de l'échantillon**Tableau15:** Tableau de la dilution appropriée selon la conductivité

- Choisir la dilution appropriée selon la conductivité :

Conductivité	Dilution		
0_500	50 /50	25 /50	10 / 50
500_1000	25 /50	10 /50	5 /50
1000_1500	10 /50	5 /50	5 /50
1500_2000	5 /50	2,5 / 50	1 /50
2000_2800	2,5 /50	2 /50	1 / 50
> 2800	2 /50	1 /50	0,5 / 50

Trois fioles sont préparées à partir de l'échantillon d'eau après une dilution appropriée en fonction de sa conductivité. Dans chaque fiole, on ajoute successivement 1 mL d'acide chlorhydrique et 5 mL de solution de chlorure de baryum stabilisée. Le mélange est agité soigneusement puis laissé au repos pendant au moins 15 minutes afin de permettre le développement de la turbidité. Après une nouvelle agitation, la mesure est effectuée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 650 nm dans les mêmes conditions que celles utilisées pour l'étalonnage. La concentration en ions sulfates est ensuite déterminée à partir de la courbe d'étalonnage et exprimée en mg/L en tenant compte du facteur de dilution appliqué à l'échantillon.(Figure 21)



Figure 21 :Préparation de l'échantillon pour le dosage de sulfate(photo personnelle, 2026)

II.4.3. Analyses des paramètres de pollution

II.4.3.1. Dosage de l'ammonium (NH_4^+)

II.4.3.1.1. Principe

Le dosage de l'ammonium (NH_4^+) est réalisé par une méthode colorimétrique basée sur la formation d'un composé coloré après l'ajout des réactifs appropriés. L'intensité de la coloration est mesurée à une longueur d'onde de 655 nm, puis la concentration en ammonium est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage.(Rodier et al., 2009)

II.4.3.1.2. Réactifs

A. Réactif 1:Acide dichloroisocyanurique (2g)et Hydroxyde de sodium (NaOH)(32g) et H_2O distillée. q.s.p (1000 ml)

B. Réactif 2 (coloré) :Tartrate de sodium(130g)et Salicylate de sodium (130 g)et Nitroprussiate de sodium (0,97g)et H_2O distillée. q.s.p(1000 ml)

C. Solution mère (Azote ammoniacal) :- Dissoudre 3.819 g de NH_4Cl dans une fiole de 1 L et ajuster au trait avec H_2O distillée.

D. Solution fille: 1 mL Solution mère dans 1 litre eau distillée

II.4.3.1.3. Appareillage

- Verrerie de laboratoire courante.

- Spectrophotomètre

II.4.3.1.4. Mode Opérateur

A. Préparation gamme d'étalonnage

Tableau16: tableau de la gamme d'étalonnage dans le dosage de l'ammonium

Fiole	solution fille (mL)	Eau distillée	Réactif I	Réactif II
Témoin	0	50	4	4
1	1	compléter à 50	4	4
2	2,5	compléter à 50	4	4
3	5	compléter à 50	4	4
4	25	compléter à 50	4	4
5	40	compléter à 50	4	4

B. Préparation de l'échantillon

L'échantillon ainsi que les solutions de la gamme d'étalonnage sont préparés dans des fioles jaugées de 50 mL. On ajoute successivement 4 mL du réactif I et 4 mL du réactif II, puis le volume est complété à l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Après un temps de réaction de 1 h 30 min permettant le développement de la coloration, la lecture est effectuée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 650 nm. (Figure 22)

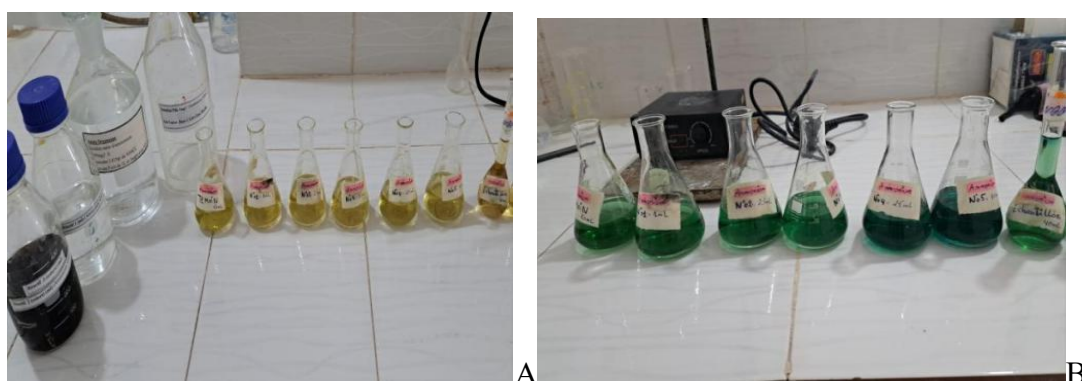


Figure 22: Préparation de l'échantillon pour le dosage de l'ammonium (photo personnelle, 2026)

A: Avant le titrage

B: Après le titrage

II.4.3.2. Dosage de OrthoPhosphate

II.4.3.2.1. Principe

Le molybdate d'ammonium $\text{Mo}_7(\text{NH}_4)_4\text{H}_2\text{O}$ réagit en milieu acide en présence de phosphate en donnant un complexe phosphomolybdique qui réduit par l'acide ascorbique développe une coloration bleue (bleu de molybdène) susceptible d'un dosage colorimétrique. (Rodier et al., 2009)

II.4.3.2.2. Réactifs

A. Solution d'acide Ascorbique : Acide ascorbique (10g), et Eau distillée q.s.p (1000ml)

B. Solution De molybdate d'ammonium

- **Solution A**: Molybdate d'ammonium (25g) et Eau distillée q.s.p (100ml)

- **Solution B**: Acide sulfurique (280ml) et Eau distillée q.s.p (400ml) et

Après refroidissement, mélanger les solutions a et b puis compléter avec de l'eau distillée à 1000ml

C. Solution Mère de Phosphate (PO_4^{3-}) À 1g/l: Phosphate dihydrogénopotassique KH_2PO_4 (1.432g) et Eau distillée q.s.p (1000ml)

D. Solution fille : Solution mère de Phosphate à 1g/l (10ml) et Eau distillée q.s.p (1000ml) QSP

II.4.3.2.3. Mode Opérateur

Une gamme d'étalonnage est préparée dans des fioles jaugées de 50 mL en introduisant respectivement 15 ; 10 ; 7,5 ; 5 ; 2,5 et 20 mL de la solution fille dans les fioles S1 à S6. Le volume est ensuite complété à 50 mL avec de l'eau distillée.

II.4.3.2.4. Préparation de la gamme d'étalonnage et l'échantillon

Un volume de 20 mL de chaque solution étalon, de l'échantillon et de la solution témoin est transféré dans des tubes à essai séparés. Le réactif est préparé en mélangeant 15 mL d'acide ascorbique avec 45 mL de solution de molybdate d'ammonium. Ensuite, 5 mL de ce mélange sont ajoutés à chaque tube, suivis d'une agitation soignée afin d'assurer une homogénéisation complète. Les solutions sont laissées au repos pendant 10 à 30

minutes pour permettre le développement de la coloration, puis l'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 880 nm contre la solution témoin. (Figure 23)

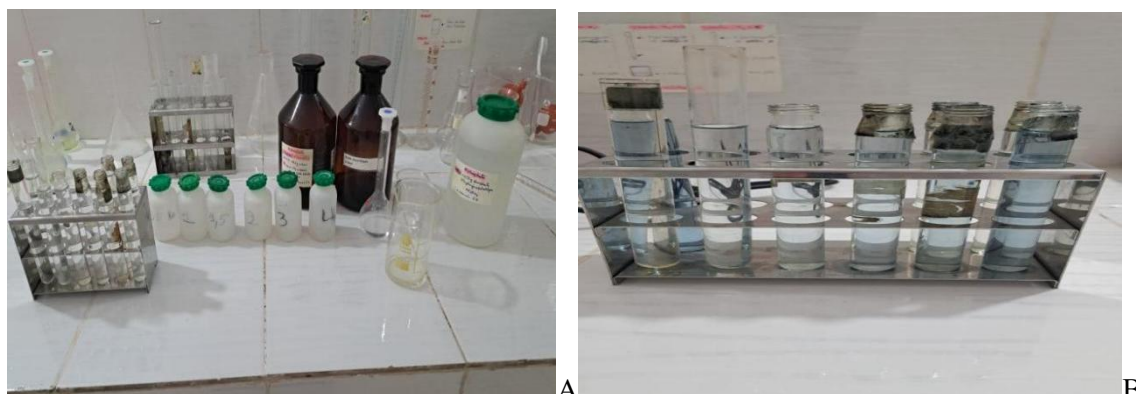


Figure 23 :Préparation de l'échantillon pour le dosage de OrthoPhosphate(**photo personnelle, 2026**)

A: Avant le titrage

B: Apres le titrage

II.4.3.3. Détermination des Matières Organiques (mg/l O₂)

II.4.3.3.1. Le Principe

La méthode repose sur l'oxydation des matières organiques présente dans l'échantillon d'eau par le permanganate de potassium (KMnO₄) en milieu acide (H₂SO₄) et à une température contrôlée de 98°C. La quantité de KMnO₄ consommée est proportionnelle à la teneur en matière organique de l'échantillon. Le résultat est exprimé en mg d'O₂ par litre (mg/L O₂). (Rodier et al., 2009)

II.4.3.3.2. Réactifs

A - Solution mère de permanganate de potassium à 20mmol/l:

- KMnO₄ (3.2g) et H₂O distillée q.s.p (1000ml)
- Porter la solution à 90-95°C pendant 2H refroidir et laisser reposer au moins 2 jours
Conserver dans une bouteille en verre brun

B - Solution étalon de permanganate de potassium à 2mmol/l:

Solution de KMnO₄ à 20mmol/l (100ml) et H₂O distillée q.s.p (1000ml)

C - Solution mère Oxalate de sodium à 0.05mole/l:

- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (6.7g) séché à 120°C pendant 2h et H_2O distillée q.s.p (1000ml) .Cette solution est stable 6 mois à l'obscurité

D - Solution étalon Oxalate de sodium à 5mmole/l :

- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ à 0.05mole/l (100mL) et H_2O distillée q.s.p (1000ml)

E - Solution d'acide sulfurique 2mole/l :

Ajouter lentement et avec précaution 110 mL d'acide sulfurique (1,84 g/mL) à 500 mL d'eau. Ensuite, ajouter progressivement la solution de permanganate de potassium à 0,01 N jusqu'à l'apparition persistante d'une légère coloration rose, puis compléter le volume à 1000 mL.

II.4.3.1.3. Appareillage

- Verrerie de laboratoire
- Tubes à essai etiquettes
- Bain-marie ou bloc chauffant maintenu à 98°C

II.4.3.3.4. Mode Opérateur

Deux tubes sont préparés, le premier contenant 25 mL d'eau distillée (témoin) et le second 25 mL de l'échantillon à analyser, puis placés dans un bain-marie à 98°C . On ajoute à chaque tube 5 mL d'acide sulfurique (H_2SO_4) et on maintient les tubes pendant 10 minutes. Ensuite, 5 mL de solution de permanganate de potassium (KMnO_4) sont ajoutés, puis les tubes sont maintenus à 98°C pendant 10 minutes supplémentaires. Après cette étape, 5 mL d'oxalate de sodium sont ajoutés afin de réduire l'excès de permanganate, puis les tubes sont retirés du bain-marie.

Le titrage est réalisé à l'aide de la solution étalon de KMnO_4 jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistante. Le volume consommé pour l'échantillon est noté V_1 et celui du témoin V_0 . Pour la vérification du titre du permanganate, 5 mL d'oxalate de sodium sont ajoutés au témoin, puis un nouveau titrage est effectué et le volume consommé est noté V_2 . Les résultats sont considérés valides lorsque $V_0 < 0,3 \text{ mL}$ et $V_2 \leq 5 \text{ mL}$.(Figure24)

La teneur en matière organique est calculée selon la relationsuivante : $\text{MO (mg/L O}_2\text{)}=16\times(V_1-V_0) /V_2$.



Figure 24:Préparation de l'échantillon pour le dosage des matières Organiques (**photo personnelle, 2026**)

A:Avant le titrage

B: Apres le titrage

II.4.3.4. Dosage Nitrite

II.4.3.4.1. Le Principe

Le nitrite (NO_2^-) réagissent avec le sulfanilamide et la naphtyléthylènediamine en milieu acide pour former un composé coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en nitrites et est mesurée au spectrophotomètre. (**Rodier et al., 2009**)

II.4.3.4.2. Réactifs Et Solutions

A. Ractfis:Le réactif est préparé dans une fiole jaugée de 100 mL en ajoutant 15 mL d'acide phosphorique (85 %) à environ 20 mL d'eau, puis en dissolvant 1 g de sulfanilamide et 0,05 g de naphtyléthylènediamine. Le volume est ensuite ajusté à 100 mL avec de l'eau distillée.

B.Solution mère des Nitrites (500mg/l No_2^-) :Peser, 0.3780g de Na No_2 dans 500ml d'eau distillée.

c.Solution fille des Nitrites (5mg/l No_2^-) :Verser, 2.5ml de solution mère dans 250ml d'eau distillée.

II.4.3.4.3. Mode opératoire

A. Préparation Gamme d'étalonnage

dans des fiole de 50ml verser respectivement (1ml , 2ml , 3ml, 4ml, 5ml). Correspondent a des concertation (0.1mg/l, 0.2mg/l, 0.3mg/l, 0.4mg/l, 0.5mg/l).

B. Préparation de l'échantillon

On introduit 50 mL de l'échantillon à analyser dans une fiole jaugée de 50 mL, puis on ajoute 1 mL du réactif et on homogénéise soigneusement le mélange. Après un temps de réaction de 30 minutes permettant le développement de la coloration, la lecture est effectuée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 540 nm.(Figure 25)

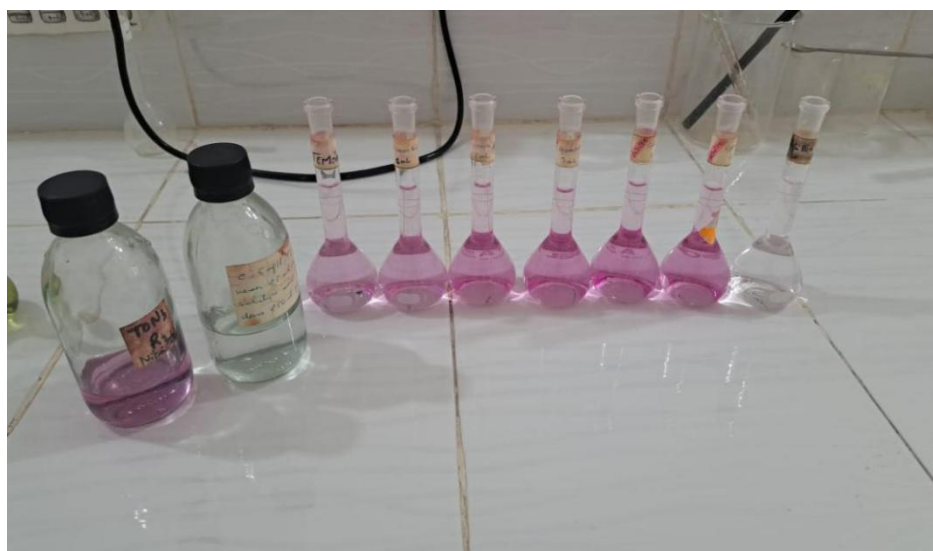


Figure 25:Préparation de l'échantillon pour le dosage de Dosage Nitrite(**photo personnelle, 2026**)

II.4.3.5. Dosage de Nitrate (NO_3^-)

II.4.3.5.1. Principe

Le nitrate sont réduits en nitrites par l'hydrazine en milieu alcalin en présence de sulfate de cuivre. Les nitrites formés réagissent avec l'acide sulfanilique et l' α -naphthylamine pour former un composé coloré dont l'absorbance est mesurée à 520 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en nitrates.(**Rodier et al., 2009**)

II.4.3.5.2. Réactifs et solutions

A. Solutions mères

- Solution de soude 1 N : 40 g de soude dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution de sulfate de cuivre : 2,6 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ et 40 mL d'acide sulfurique 1 N dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution d'hydrazine 0,1 M : 13 g de $\text{H}_2\text{N-NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution d'acide sulfanilique : 5 g d'acide sulfanilique et 20 mL d'HCl concentré dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution d' α -naphtylamine : 1 g d' α -naphtylamine et 40 mL d'HCl concentré dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution d'EDTA : 5 g d'EDTA dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.
- Solution d'acétate de sodium : 272 g de $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dans l'eau distillée q.s.p. 1 L.

B. Solutions filles

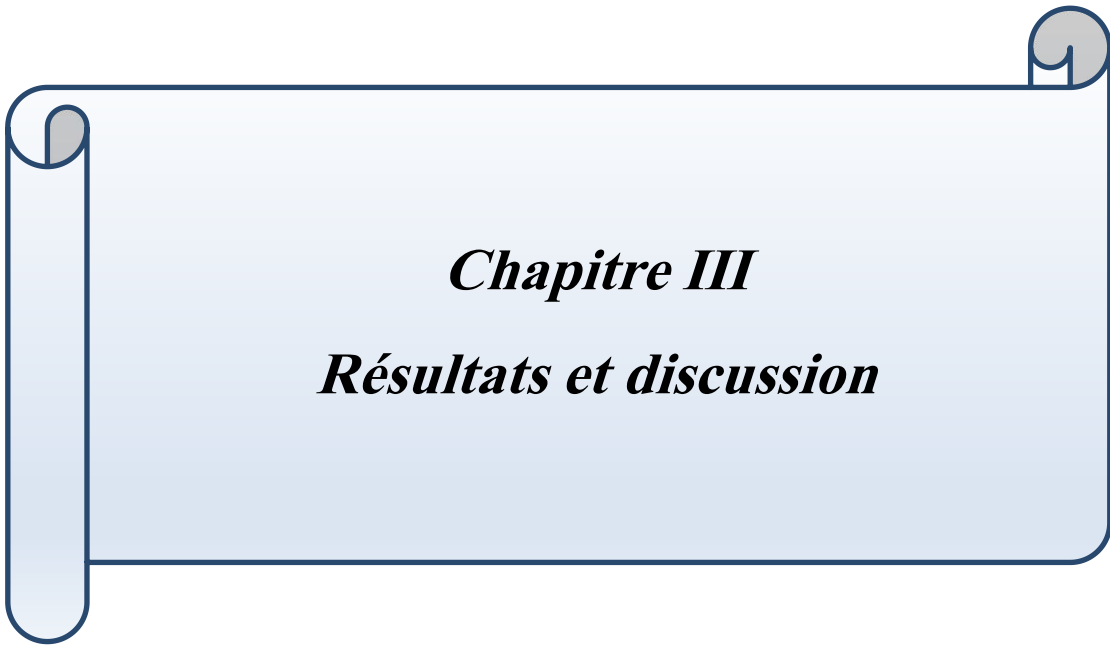
- Mélange réducteur : 25 mL de solution de sulfate de cuivre et 25 mL de solution d'hydrazine dans l'eau distillée q.s.p. 1000 mL.
- Solution de soude 0,05 M : Diluer 50 mL de la solution de soude 1 M dans 1 L d'eau distillée.
- Mélange colorant : 10 mL d'acétone, 20 mL d'acide sulfanilique, 20 mL d'EDTA, 20 mL d'acétate de sodium, 20 mL d' α -naphtylamine, puis eau distillée q.s.p. 1000 mL.

II.4.3.5.3. Mode opératoire

Introduire 10 mL de l'échantillon dans un flacon en verre brun de 100 mL. Ajouter 5 mL de solution de soude à 0,05 M puis agiter. Ajouter 5 mL du mélange réducteur et homogénéiser. Laisser reposer pendant 1 heure afin d'assurer la réduction des nitrates en nitrites. Ajouter ensuite 40 mL du mélange colorant, agiter soigneusement puis laisser la coloration se développer dans l'obscurité pendant 15 minutes. Mesurer l'absorbance à 520 nm à l'aide d'un spectrophotomètre et déterminer la concentration en nitrates à partir de la courbe d'étalonnage réalisée dans les mêmes conditions expérimentales.(Figure 26)



Figure26:Préparation de l'échantillon pour le dosage nitrate (NO_3^-)(photo personnelle, 2026)



Chapitre III
Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats des analyses physico-chimiques, des paramètres de minéralisation et des indicateurs de pollution de l'eau de la source Hadjar El Melh, en les comparant à ceux d'autres eaux de source commercialisées en Algérie. Cette étude comparative permet d'évaluer la qualité de l'eau étudiée, d'identifier les variations observées entre les différentes sources et de vérifier leur conformité aux normes de potabilité recommandées par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS). Les résultats obtenus sont ensuite discutés afin de mettre en évidence l'influence des caractéristiques géologiques et environnementales sur la composition des eaux étudiées

III.1. Résultats et discussion des analyses des paramètres physico-chimiques

III.1.1. Le PH

Les résultats des mesures du pH des différentes eaux de source étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh ainsi que les autres eaux embouteillées, sont présentés dans le tableau 01 et illustrés par la figure 01. Les valeurs du pH varient entre 6,87 et 7,75. L'échantillon de Hadjr El Melh présente la valeur la plus élevée (7,75) par rapport aux autres échantillons, tandis que l'échantillon de Boughlaz enregistre la valeur la plus faible (6,87). Les autres sources présentent des valeurs intermédiaires, à savoir Messad (7,13), Atlas (7,10), Taxana (7,00), Guerioune (7,28) et Aryaf (7,70). D'une manière générale, toutes les valeurs mesurées restent conformes à l'intervalle recommandé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), fixé entre 6,5 et 9,0.

Tableau17: Valeurs du PH des différentes eaux de source étudiées.

Les sources	La valeur de PH
Hadjr El Melh	7.75
Messad	7.13
Texanna	7.00
Boglez	6.87
Atles	7.10
Ariaf	7.70
Geurioune	7.28
La valeur de OMS	6.5 - 9

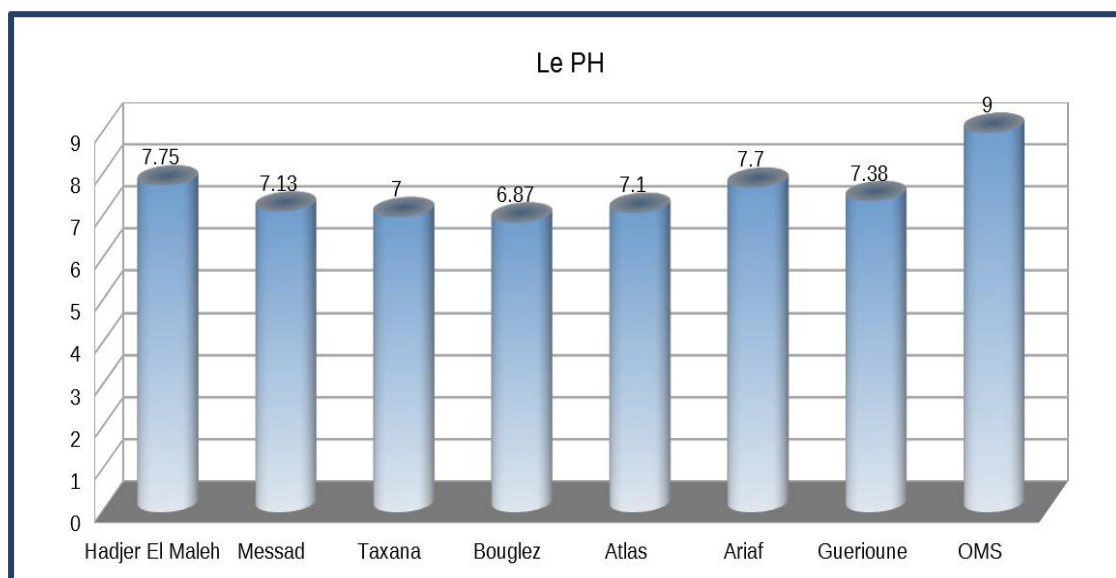


Figure 27: Comparaison des valeurs du PH des différentes eaux de source étudiées.

Le potentiel hydrogène (pH) des eaux étudiées présente une faible variabilité, avec des valeurs comprises entre 6,9 et 7,75, indiquant un caractère neutre à légèrement alcalin. Cette homogénéité traduit une stabilité géochimique des systèmes aquifères et reflète le contrôle exercé par le système carbonaté–bicarbonaté ($\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$), qui régule l'équilibre acido-basique des eaux souterraines à travers les interactions eau–roche (**Freeze et Cherry, 1979**).

La valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de la source de Hadjer El Melh (7,75). Cette légère alcalinité peut être attribuée à la dissolution des formations carbonatées et dolomitiques, favorisant l'enrichissement en ions bicarbonates et l'augmentation du pH. (**Appelo et Postma, 2005**)

En revanche, les autres sources (Messad, Atlas, Taxana, Guerioune et Aryaf et Bouglez) présentent des valeurs très proches, ce qui reflète une similitude dans les processus d'interaction entre l'eau et les formations géologiques, avec de faibles variations dues à la nature des roches et au temps de résidence de l'eau dans les aquifères. (**Brassington, 2013**)

La source de Hammam Charef affiche une valeur légèrement plus faible (6,9), pouvant être liée à des conditions hydrogéologiques spécifiques, notamment une composition lithologique différente et un degré d'interaction eau–roche distinct, influençant localement l'équilibre acido-basique. (**Ben Cheikh, 2012**)

Du point de vue sanitaire, toutes les valeurs enregistrées restent conformes aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (6,5–8,5), ce qui confirme la potabilité de ces eaux et leur stabilité chimique. (OMS, 2004)

Ainsi, les variations observées du pH restent faibles et s'expliquent principalement par les différences dans la nature des formations géologiques et le degré d'interaction eau–roche, tandis que le système chimique global des eaux demeure homogène. (Freeze et Cherry, 1979)

III.1.2. Le résidu sec à 180 °C

Les résultats des mesures du résidu sec des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 23 et la figure 28, montrent que les valeurs varient entre 140 et 611 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Boughlaz (140 mg/L), qui représente la valeur la plus faible, Taxana (150 mg/L), Aryaf (276 mg/L), Guerioune (475 mg/L), Atlas (511 mg/L), Hadjr El Melh (563 mg/L) et Messad (611 mg/L), qui représente la valeur la plus élevée. Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (<1500).

Tableau 18: les valeurs du résidu sec à 180 °C des différentes eaux de source étudiées.

Les sources	Résidu sec (mg/L)
Hadjr El Melh	563
Messad	611
Texanna	150
Boglez	140
Atles	511
Ariaf	276
Geurionue	475
La valeur de OMS	<1500

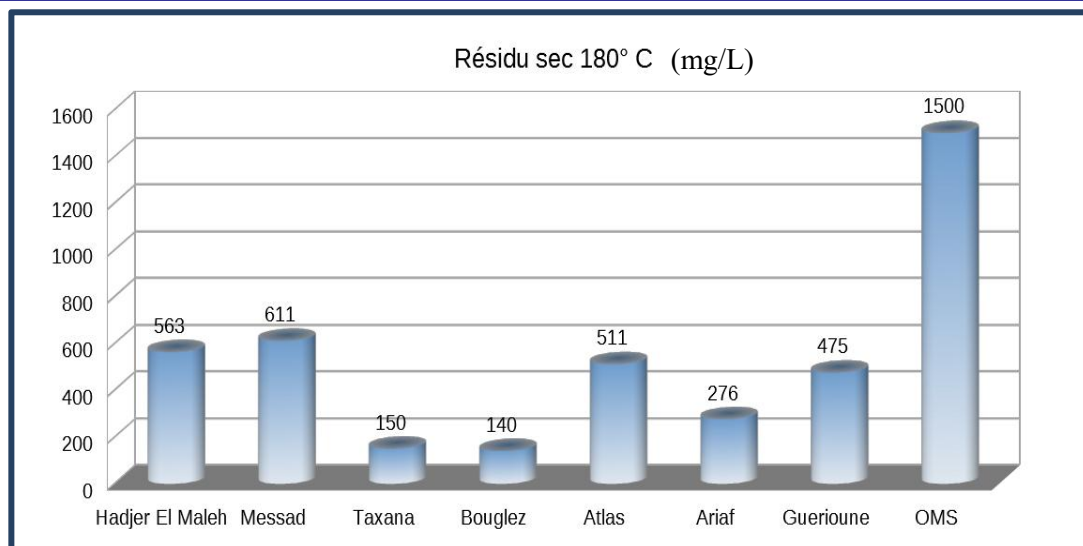


Figure 28: Comparaison des valeurs du résidu sec des différentes eaux de source étudiées.

Le résidu sec présente une variation comprise entre 140 et 611 mg/L, traduisant un degré de minéralisation globalement faible à modéré selon les sources. Cette variabilité reflète principalement l'influence des interactions eau-roche, de la nature des formations géologiques et des conditions de circulation des eaux souterraines, notamment le temps de résidence et le renouvellement des aquifères (Domenico et Schwartz, 1998)

Des valeurs relativement élevées sont observées au niveau de Messaad (611 mg/L) et de Hadjer El Melh (563 mg/L), ce qui indique une minéralisation plus importante liée à des conditions favorisant la dissolution des minéraux et un temps de contact plus prolongé entre l'eau et les roches encaissantes (Todd et Mays, 2005).

Les autres sources (Bouglaz, Takssana, Aryaf, Grioune et Atlas) présentent des valeurs proches, traduisant des conditions hydrochimiques globalement similaires et une faible variabilité des processus d'interaction eau-roche (Hem, 1989).

La source de Hammam Charef enregistre la valeur la plus élevée (910 mg/L), ce qui peut être attribué à des caractéristiques hydrogéologiques spécifiques, notamment la profondeur des aquifères et des conditions favorisant une minéralisation plus marquée. (Ben Cheikh, 2012)

Du point de vue sanitaire, toutes les valeurs restent inférieures à la limite recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé (1500 mg/L(OMS, 2004),confirmant la potabilité des eaux étudiées.

III.2. Résultats et discussion des analyses des paramètres minéralisation globale

III.2.1. Calcium (Ca^{2+})

Les résultats des mesures du calcium (Ca^{2+}) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 24 et illustrés par la figure 29, montrent que les valeurs varient entre 4,6 et 92 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Boughlaz (4,6 mg/L), qui représente la valeur la plus faible, Hadjr El Melh (10 mg/L), Taxana (30 mg/L), Aryaf (65,6 mg/L), Guerioune (72 mg/L), Messad (79 mg/L) et Atlas (92 mg/L), qui représente la valeur la plus élevée. Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (270 mg/L).

Tableau 19 : les valeurs du calcium (Ca^{2+}) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Calcium (Ca^{2+})mg/L
Hadjr El Melh	10
Messad	79
Texanna	30
Boglez	4.6
Atles	92
Aryaf	65.6
Geurioune	72
La valeur de OMS	<270

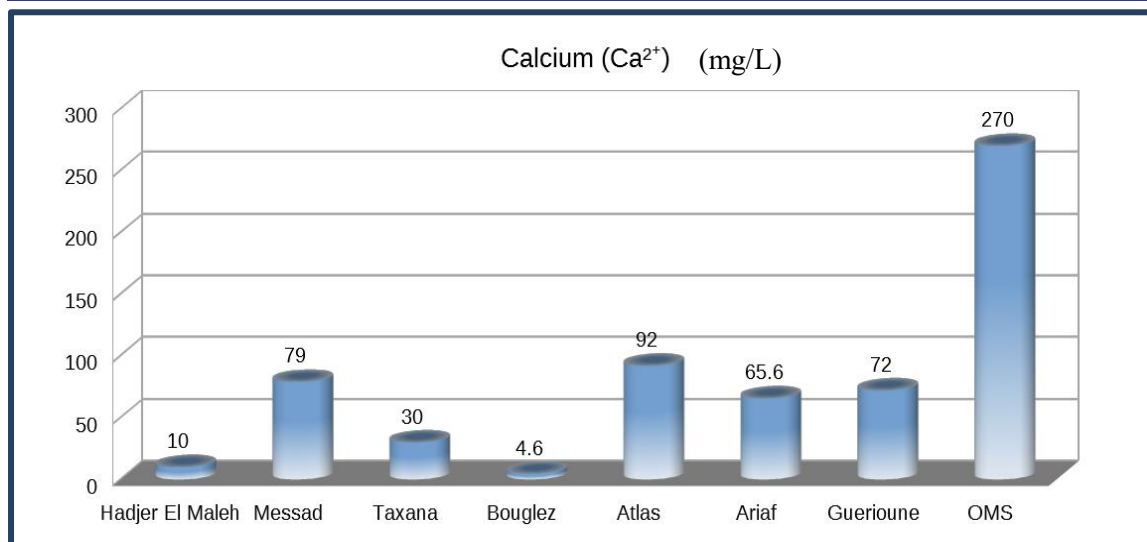


Figure 29: comparaison des valeurs du calcium (Ca²⁺) des différentes eaux de source étudiées

La variabilité des concentrations en calcium (Ca²⁺) reflète principalement les différences de minéralisation contrôlées par la nature des formations géologiques et les processus d'interaction eau-roche. Le calcium provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies), sous l'influence des conditions hydrogéochimiques et du temps de résidence des eaux souterraines. (Langmuir, 1997)

La source de Hadjar El Melh présente une faible teneur en calcium (10 mg/L), indiquant un contact limité avec les formations carbonatées et un temps de résidence relativement court, insuffisant pour favoriser une dissolution significative. Cette observation est renforcée par l'absence de magnésium (0 mg/L), suggérant que la minéralisation de cette eau est dominée par d'autres ions dissous, notamment le sodium. (Drever, 1997)

Les autres sources affichent des concentrations plus élevées et variables, comprises entre 4,6 mg/L (Bouglaz) et 92 mg/L (Atlas), traduisant des contrastes liés à la lithologie, au degré de dissolution des minéraux et aux conditions d'écoulement des eaux souterraines. (Fitts, 2013)

Ces résultats sont cohérents avec les travaux réalisés en Algérie, qui rapportent des concentrations comparables dans les eaux souterraines de l'Est algérien (10–90 mg/L). Ces études confirment le rôle déterminant des formations carbonatées dans la minéralisation

des eaux, les régions calcaires présentant généralement des teneurs plus élevées en calcium.(Kherici et al, 2012)

Sur le plan sanitaire, les valeurs restent inférieures à la norme de l'OMS (270 mg/L), confirmant la potabilité des eaux étudiées(OMS, 2004). Les concentrations modérées en calcium sont considérées comme favorables sur le plan nutritionnel, tandis que les faibles teneurs traduisent une minéralisation limitée sans risque sanitaire direct.

III.2.2. Magnésium (Mg^{2+})

Les résultats des mesures du magnésium (Mg^{2+}) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau25 et illustrés par la figure 30, montrent que les valeurs varient entre 0 et 27 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (0 mg/L), Boughlaz (3,75 mg/L), Aryaf (6,8 mg/L), Taxana (9,1 mg/L), Atlas (17 mg/L), Messad (27 mg/L) et Guerioune (27 mg/L). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (50 mg/L).

Tableau20 :les valeurs du magnésium (Mg^{2+}) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Magnésium (Mg^{2+})mg/L
Hadjr El Melh	00
Messad	27
Texanna	9.1
Boglez	3.75
Atlas	17
Aryaf	6.8
Geurioune	27
La valeur de OMS	<50

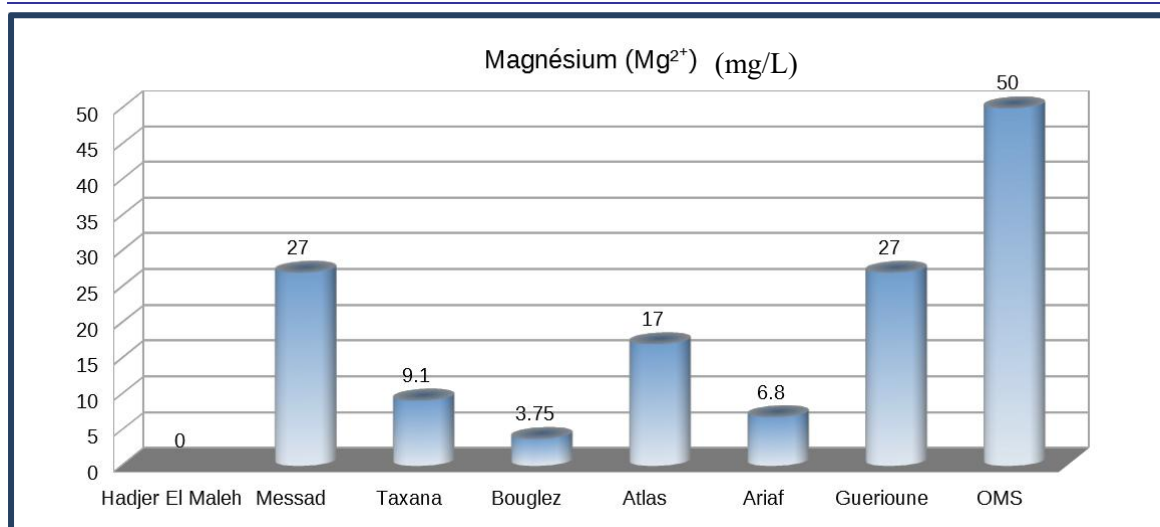


Figure 30: Comparaison des valeurs du magnésium (Mg²⁺) des différentes eaux de source étudiées

La variabilité des concentrations en magnésium (Mg²⁺) observée dans les eaux étudiées traduit des différences liées à la lithologie des aquifères traversés et à la nature des interactions eau–roche. Le magnésium est principalement issu de la dissolution des minéraux magnésiens, notamment la dolomie et certains silicates magnésiens, et sa libération dépend des conditions hydrochimiques et du temps de circulation des eaux souterraines. **(Stumm et Morgan, 1996)**

Les concentrations mesurées varient entre 0 et 27 mg/L, restant largement inférieures à la valeur guide de l'OMS (50 mg/L). La source de Hadjar El Melh présente une absence totale de magnésium (0 mg/L), confirmant un système faiblement influencé par les formations dolomitiques et une minéralisation globale réduite. À l'inverse, les valeurs les plus élevées enregistrées à Messad et Guerioune (27 mg/L) indiquent une interaction plus marquée avec des formations riches en minéraux magnésiens. **(Schwartz, 1998)**

Sur le plan sanitaire, le magnésium constitue un élément essentiel au bon fonctionnement physiologique de l'organisme, notamment dans la régulation neuromusculaire et cardiovasculaire. Les concentrations observées restent compatibles avec les recommandations internationales, confirmant l'aptitude de ces eaux à la consommation humaine. **(WHO, 2022)**

III.2.3. Sodium (Na^+)

Les résultats des mesures du sodium (Na^+) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 26 et illustrés par la figure 31, montrent que les valeurs varient entre 11 et 181,1 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (181,1 mg/L) qui représente la valeur la plus élevée, Messad (50 mg/L), Taxana (11 mg/L), Boughlaz (29 mg/L), Atlas (20 mg/L), Aryaf (28,5 mg/L) et Guerioune (11 mg/L). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (150 mg/L).

Tableau 21 : les valeurs du sodium (Na^+) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Sodium (Na^+) mg/L
Hadjr El Melh	181.1
Messad	50
Texanna	11
Boglez	29
Atles	20
Aryaf	28.5
Geurioune	11
La valeur de OMS	<150

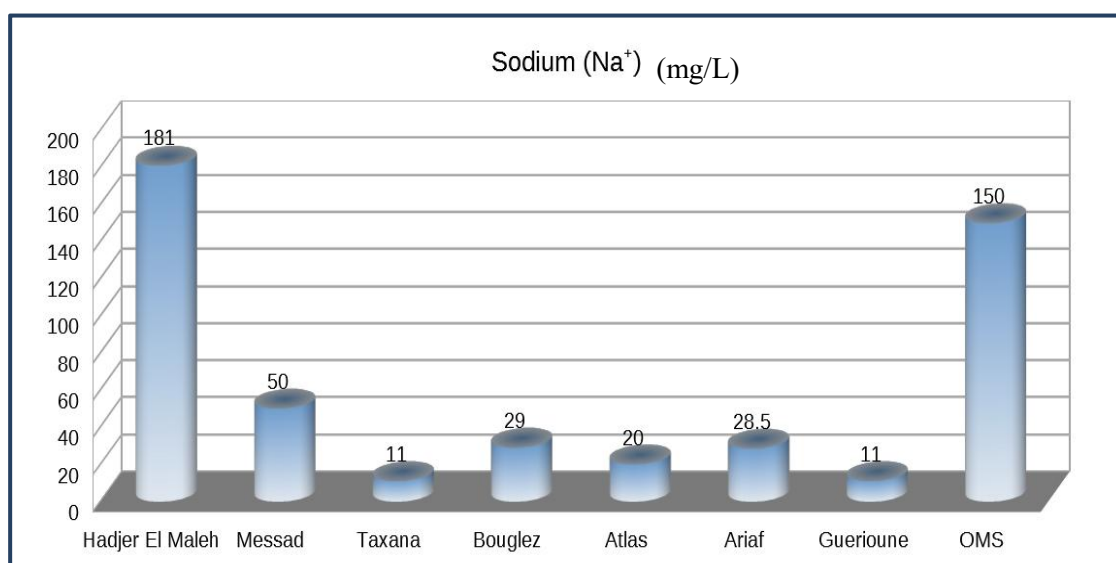


Figure 31: Comparaison des valeurs du sodium (Na^+) des différentes eaux de source étudiées

La variabilité des concentrations en sodium (Na^+) reflète les caractéristiques géochimiques et hydrogéologiques des aquifères. Le sodium provient principalement de la dissolution des minéraux qui en contiennent, tels que l'halite et les feldspaths, ainsi que des processus d'échange ionique au sein des aquifères. Par ailleurs, les conditions climatiques arides et les taux d'évaporation élevés peuvent contribuer à l'augmentation de sa concentration dans les eaux, en particulier dans les zones influencées par des formations salines. **(Gibbs, 1970)**

Les résultats montrent des concentrations contrastées, avec une valeur maximale enregistrée à Hadjar El Melh (181,1 mg/L), dépassant la valeur guide de l'OMS (150mg/L pour sodium dans l'eau de boisson selon recommandations de santé). Cette enrichissement en sodium indique une influence marquée des formations salines et des processus de dissolution évaporitiques, typiques des environnements arides et semi-arides, Cette situation est cohérente avec la faible minéralisation en calcium et magnésium observée dans cette source, suggérant une dominance des apports sodiques dans la chimie de l'eau. **(Darling et Gooddy, 2006)**

Les autres sources présentent des concentrations plus faibles, comprises globalement entre 11 et 50 mg/L, traduisant une influence limitée des formations salines et une prédominance des processus de circulation dans des aquifères carbonatés ou silicatés. **(Oren et Yechieli, 2015)**

Ces résultats sont également en accord avec ceux de **(Saibi et al, 2013)**, qui ont mené une étude portant sur 26 sources situées dans l'Ouest et le Sud de l'Algérie, où les concentrations en sodium variaient entre 13 et 197 mg/L. Cette variabilité reflète une forte hétérogénéité du degré de minéralisation des eaux souterraines et leur sensibilité aux conditions géologiques et hydrochimiques. Ces valeurs incluent la concentration de la source de Hajar El Melh (181,1 mg/L), ce qui confirme une similitude des processus de minéralisation et l'influence des formations salines sur la composition chimique des eaux.

Sur le plan sanitaire, le sodium joue un rôle physiologique essentiel dans l'équilibre hydrique et la transmission nerveuse. Toutefois, des concentrations élevées peuvent être défavorables pour les personnes sensibles au sodium, notamment en cas d'hypertension. Les eaux étudiées restent globalement conformes aux recommandations internationales, à

l'exception de la source de Hadjar El Melh qui nécessite une attention particulière en raison de sa teneur élevée.(WHO,2022)

III.2.4. Potassium (K^+)

Les résultats des mesures du potassium (K^+) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 27 et illustrés par la figure 32, montrent que les valeurs varient entre 1 et 4,20 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (4,20 mg/L) qui représente la valeur la plus élevée, Messad (2 mg/L), Taxana (1 mg/L), Boughlaz (1 mg/L), Atlas (3 mg/L), Aryaf (1,9 mg/L) et Guerioune (2 mg/L). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (20 mg/L) à pare Hadjr El Melh (181.1)

Tableau22: les valeurs du potassium (K^+) des différentes eaux de source étudiées.

Les sources	Potassium (K^+)mg/L
Hadjr El Melh	4.20
Messad	2
Texanna	1
Boglez	1
Atlas	3
Aryaf	1.9
Geurioune	2
La valeur de OMS	<20

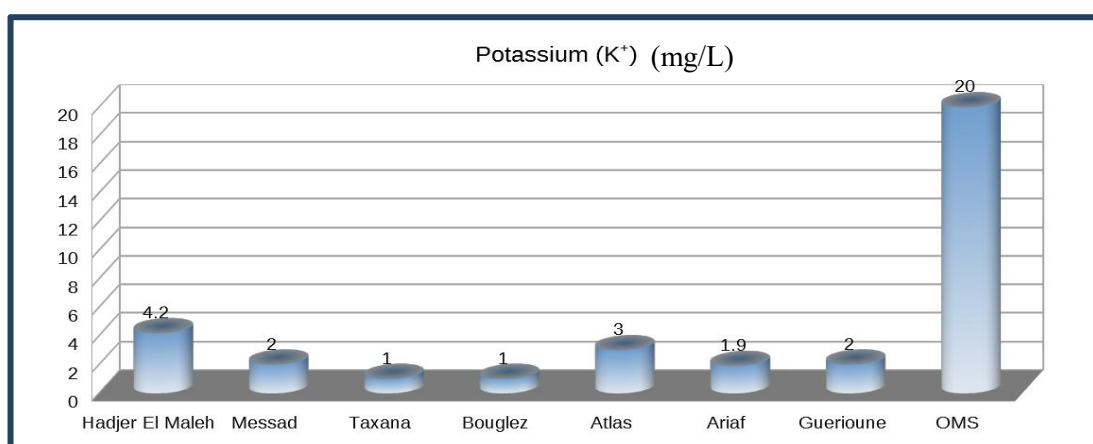


Figure 32: Comparaison des valeurs du potassium (K^+) des différentes eaux de source étudiées

La variabilité observée des concentrations en potassium (K^+) reflète des différences limitées du point de vue géochimique entre les eaux étudiées. Le potassium est généralement présent à de faibles concentrations dans les eaux souterraines, en raison de son incorporation dans les minéraux silicatés et de sa forte fixation par adsorption sur les minéraux argileux, ce qui limite son transfert vers les eaux souterraines. **(Rao, 2018)**

Les résultats montrent que les concentrations en potassium varient entre 1 et 4,20 mg/L. Les sources de Taxana et Bouglez présentent les valeurs les plus faibles (1 mg/L), tandis que la source Hadjar El Melh enregistre la valeur la plus élevée (4,20 mg/L). La source Atlas présente une concentration de 3 mg/L. La teneur relativement faible en potassium observée dans les différentes eaux étudiées indique une contribution limitée des formations géologiques à l'enrichissement en cet élément, contrairement au sodium. Cette situation s'explique par la faible mobilité du potassium et sa tendance à rester fortement fixé dans les structures minérales. **(Mondal et Singh, 2011)**

Ces résultats sont conformes aux principes hydrochimiques décrits dans la littérature, qui soulignent que le potassium demeure généralement à de faibles concentrations dans les eaux souterraines en raison de sa fixation dans les minéraux argileux et feldspathiques

Sur le plan sanitaire, toutes les valeurs mesurées restent largement inférieures à la valeur guide recommandée pour l'eau potable (20 mg/L), **(OMS, 2004)** ce qui confirme la bonne qualité des eaux étudiées vis-à-vis de ce paramètre.

III.2.5. Chlorure (Cl^-)

Les résultats des mesures de chlorure (Cl^-) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 28 et illustrés par la figure 33, montrent que les valeurs varient entre 21 et 51 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (51 mg/L) qui représente la valeur la plus élevée, Messad (40 mg/L), Taxana (28,4 mg/L), Boughlaz (30 mg/L), Atlas (31 mg/L), Aryaf (37 mg/L) et Guerioune (21 mg/L). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (250 mg/L).

Tableau23: les valeurs des chlorures (Cl^-) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Chlorures (Cl^-)mg/L
Hadjr El Melh	51
Messad	40
Texanna	28.4
Boglez	30
Atles	31
Aryaf	37
Geurione	21
La valeur de OMS	<250

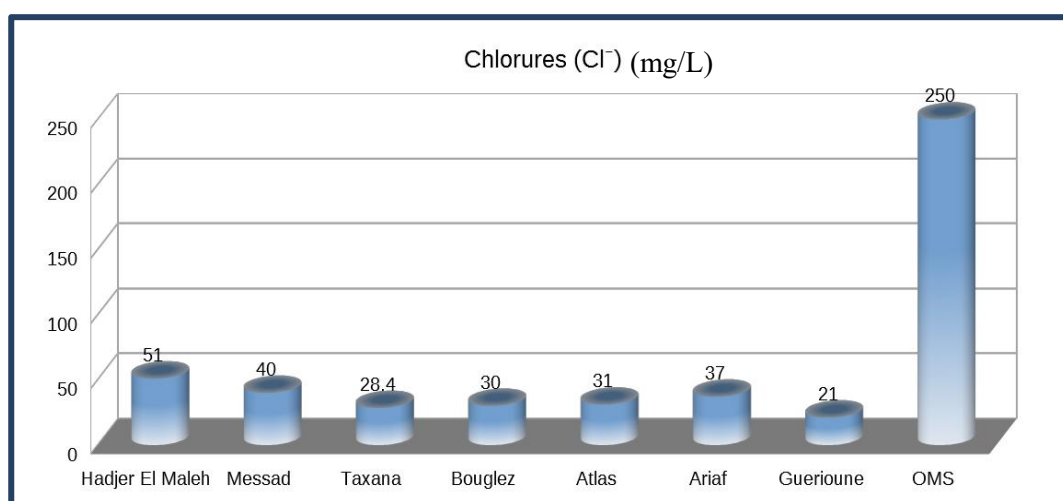


Figure 33: Comparaison des valeurs de chlorure (Cl^-) des différentes eaux de source étudiées

Le chlorure (Cl^-) est considéré comme l'un des principaux ions présents dans les eaux souterraines et constitue un indicateur important du degré de salinité ainsi que de l'influence des formations géologiques sur leur composition chimique. En raison de son caractère conservatif, sa présence est principalement liée à la dissolution des formations évaporitiques, notamment l'halite, ainsi qu'à l'effet de l'évaporation dans les régions arides et semi-arides (Oren et Yechieli, 2015).

La source de Hadjr El Melh présente la concentration la plus élevée (51 mg/L), traduisant l'influence des formations salines de la région. Les autres sources affichent des teneurs comprises entre 21 et 40 mg/L, ce qui témoigne d'une minéralisation modérée et de différences dans les conditions d'interaction eau-roche.

Ces résultats concordent avec plusieurs études réalisées en Algérie, qui rapportent des concentrations en chlorures généralement comprises entre 15 et 70 mg/L selon la nature des formations géologiques et le degré de minéralisation des eaux souterraines.

es résultats sont en accord avec plusieurs études réalisées en Algérie. (Kherici, 2012) a montré que les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines de l'Est algérien varient généralement entre 15 et 60 mg/L selon les formations géologiques. (Achou, 2002) a également démontré que l'augmentation des chlorures est fortement liée à la présence de formations évaporitiques et aux anciennes zones de dépôt salin. Par ailleurs, (Mebrouk et al, 2014) ont rapporté des valeurs comprises entre 20 et 70 mg/L dans différentes eaux souterraines, en fonction des caractéristiques hydrogéologiques et du degré d'interaction avec le substratum.

Du point de vue sanitaire, toutes les valeurs mesurées demeurent largement inférieures à la valeur guide de (l'OMS, 2004) (250 mg/L), confirmant la bonne qualité des eaux étudiées vis-à-vis de ce paramètre.

III.2.6. Sulfate (SO_4^{2-})

Les résultats des mesures de sulfate (SO_4^{2-}) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 29 et illustrés par la figure 34, montrent que les valeurs varient entre 10 et 158 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Boughlaz (10 mg/L), Taxana (11 mg/L), Guerioune (11 mg/L), Aryaf (75 mg/L), Atlas (85 mg/L), Hadjr El Melh (154 mg/L) et Messad (158 mg/L) qui représente la valeur la plus élevée). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (400 mg/L).

Tableau24 :les valeurs de sulfate (SO_4^{2-}) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Sulfates (SO_4^{2-}) mg/l
Hadjr El Melh	154
Messad	158
Texanna	11
Boglez	10
Atlas	85
Aryaf	75
Geurioune	11
La valeur de OMS	<400

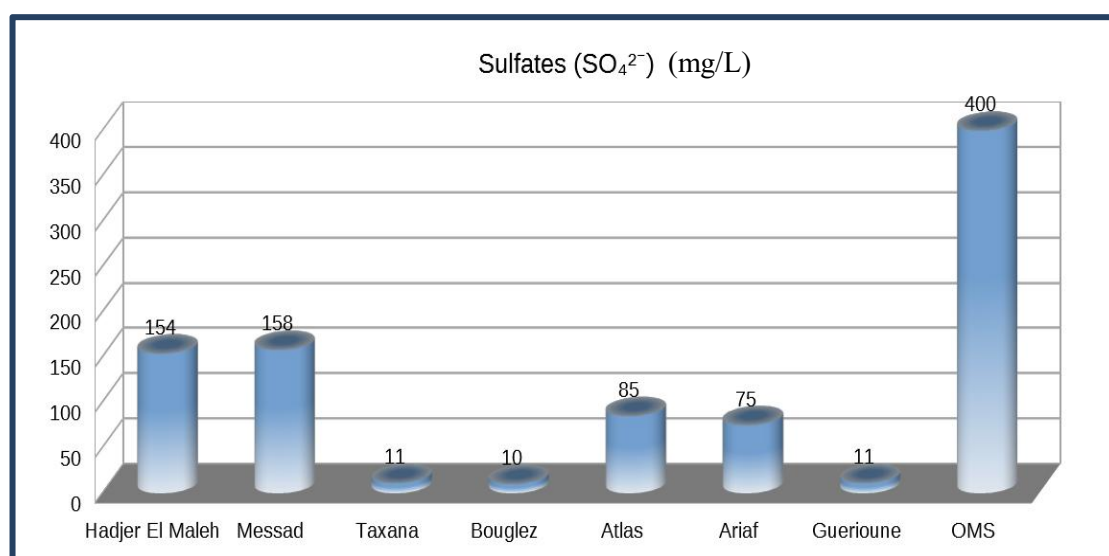


Figure 34: Comparaison des valeurs de sulfate (SO_4^{2-}) des différentes eaux de source étudiée

Les concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) dans les eaux étudiées varient en fonction de plusieurs facteurs géochimiques et hydrogéologiques. Les sulfates représentent des ions majeurs dans les eaux souterraines et proviennent essentiellement de la dissolution de minéraux évaporitiques, notamment le gypse et l'anhydrite, ainsi que de l'oxydation des minéraux sulfurés présents dans les formations géologiques. Leur teneur dépend également des conditions d'oxydoréduction, du temps

de résidence de l'eau dans les aquifères et de la nature des formations lithologiques traversées. (Rivett et al, 2008)

Dans ce contexte, les eaux de la zone de Hadjar El Melh présentent des teneurs relativement élevées en sulfates, ce qui s'explique par la présence de formations évaporitiques riches en gypse, favorisant la dissolution et l'enrichissement des eaux en SO_4^{2-} (Zhang et Shen, 2020). Les autres sources étudiées présentent des concentrations plus modérées, traduisant une moindre influence des formations gypseuses et une prédominance des formations carbonatées, ce qui met en évidence une variation significative des conditions géologiques et hydrochimiques entre les différents aquifères.

Sur le plan sanitaire, le sulfate ne présente pas de toxicité majeure aux concentrations faibles à modérées. Toutefois, des teneurs élevées peuvent entraîner un effet laxatif et altérer le goût de l'eau. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande une valeur guide de 250 mg/L, basée principalement sur des critères organoleptiques et des effets digestifs potentiels (OMS, 2004). Ainsi, les valeurs observées dans cette étude restent globalement conformes aux normes de potabilité.

III.2.7. Bicarbonate (HCO_3^-)

Les résultats des mesures de bicarbonate (HCO_3^-) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 30 et illustrés par la figure 35, montrent que les valeurs varient entre 60 et 336 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Taxana (60 mg/L), Aryaf (234,24 mg/L), Hadjr El Melh (244 mg/L), Messad (275 mg/L) et Guerioune (336 mg/L).

Tableau 25: les valeurs de bicarbonate (HCO_3^-) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Bicarbonates (HCO_3^-) mg/l
Hadjr El Melh	244
Messad	275
Texanna	60
Aryaf	234.24
Geurioune	336
La valeur de OMS	-

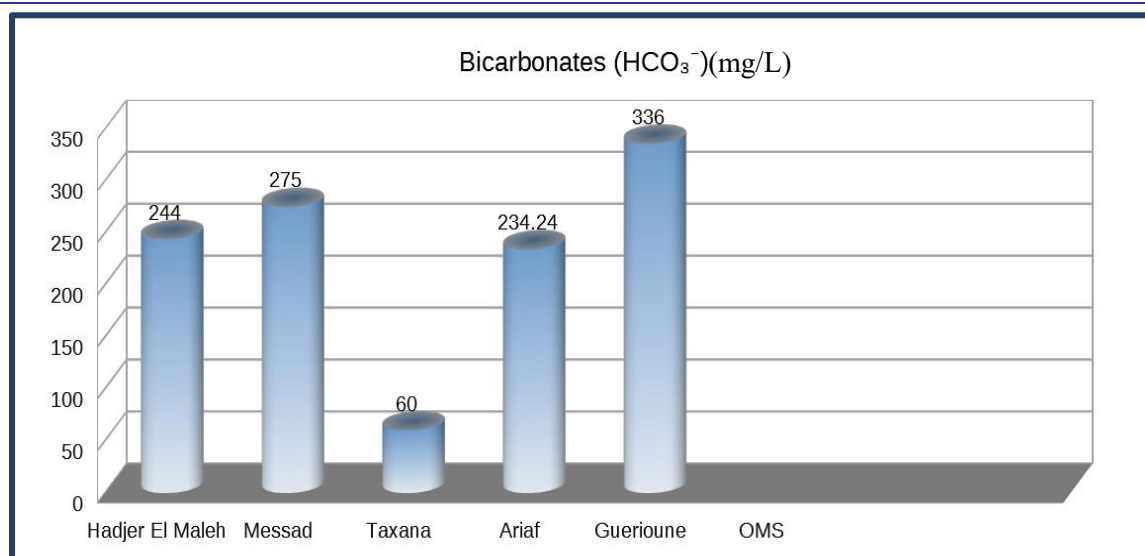


Figure 35: Comparaison des valeurs de bicarbonate (HCO_3^-) des différentes eaux de source étudiées .

Le bicarbonate (HCO_3^-) constitue l'un des principaux anions des eaux souterraines et jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre chimique des milieux aquatiques. Leur présence résulte principalement de la dissolution des minéraux carbonatés sous l'action du dioxyde de carbone présent dans le sol, ce qui influence directement le degré de minéralisation des eaux (**Lloyd et Heathcote, 1985**).

Les résultats obtenus montrent que l'eau de la source Hadjar El Melh présente une concentration de 244 mg/L. Des variations importantes sont observées entre les autres eaux étudiées, avec des valeurs de 275 mg/L pour Messad, 234,4 mg/L pour Aryaf, 60 mg/L pour Taxana et 336 mg/L pour Guerioune. Ces différences traduisent la diversité des contextes géologiques ainsi que les conditions de circulation et de renouvellement des eaux souterraines.

Dans les régions semi-arides, l'augmentation des teneurs en bicarbonates est généralement associée à une durée de résidence plus importante des eaux et à une intensification des processus géochimiques responsables de leur minéralisation (Mazor, 2004 ; Subba Rao, 2006). Des études récentes indiquent également que les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines sont fortement influencées par les conditions climatiques et la nature des formations géologiques traversées (**Lapworth et al, 2017**).

Sur le plan sanitaire, les bicarbonates ne présentent pas de risque particulier pour la santé humaine aux concentrations habituellement rencontrées dans les eaux destinées à la

consommation. Ils contribuent au maintien de la stabilité chimique de l'eau et participent à son pouvoir tampon naturel (WHO, 2022).

III.3. Résultats et discussion des analyses des Paramètres de pollution

III.3.1. Nitrite (NO_2^-)

Les résultats de mesure de nitrite (NO_2^-) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 31 et illustrés par la figure 36, montrent que les valeurs varient entre 0 et 0,06 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (0 mg/L), Taxana (0 mg/L), Messad (< 0,01 mg/L), Atlas (< 0,01 mg/L), Aryaf (0,01 mg/L), Guerione (< 0,01 mg/L) et Boughlaz (0,06 mg/L), la plupart des valeurs restent inférieures ou égales à la valeur recommandée par l'OMS (< 0,01 mg/L), avec une légère dépassement observé pour Boughlaz (0,06 mg/l)

Tableau 26: les valeurs de nitrite (NO_2^-) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Nitrite (NO_2^-) mg/l
Hadjr El Melh	00
Messad	<0.01
Texanna	00
Boglez	0.06
Atles	<0.01
Aryaf	0.01
Geurione	<0.01
La valeur de OMS	<0.01

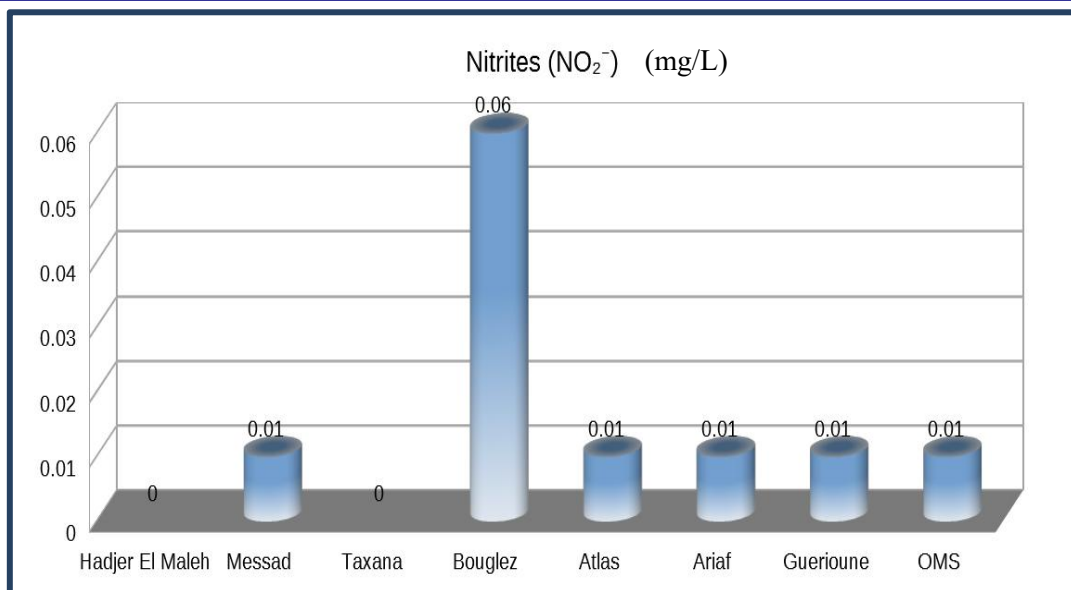


Figure 36: Comparaison des valeurs de nitrite (NO₂⁻) des différentes eaux de source étudiées

La variabilité des concentrations en nitrite (NO₂⁻) traduit l'influence des processus biogéochimiques et des éventuelles sources de contamination azotée sur les eaux étudiées. Les nitrites sont des composés transitoires du cycle de l'azote, rapidement transformés en nitrates dans des conditions favorables à l'oxydation, ce qui explique leur faible persistance dans les eaux souterraines (**Canter, 1997**).

Les résultats montrent que l'eau de la source Hadjar El Melh ne contient pas de nitrites (0 mg/L), tandis que des teneurs très faibles ont été enregistrées dans les autres eaux étudiées : 0,01 mg/L à Messad et Aryaf, 0 mg/L à Taxana, des valeurs inférieures à 0,01 mg/L à Atlas et Guerioune, et une concentration de 0,06 mg/L à Bouglez. Malgré ces différences, l'ensemble des valeurs demeure très faible.

Selon plusieurs études, l'augmentation des concentrations en nitrites est généralement associée aux activités agricoles, aux rejets domestiques ou à des perturbations récentes du milieu aquatique (**Ward et al, 2018**). Les faibles teneurs observées suggèrent donc une faible influence des sources de pollution azotée sur les eaux analysées.

Sur le plan sanitaire, les concentrations mesurées restent largement inférieures aux valeurs recommandées pour les eaux destinées à la consommation humaine, ce qui témoigne d'une bonne qualité des eaux étudiées (**UEPA, 2018**).

III.3.2. Nitrate (NO_3^-)

Le résultat de mesure de nitrate (NO_3^-) des eaux étudiées, incluant l'échantillon de la source Hadjr El Melh et les autres eaux embouteillées, présentés dans le tableau 32 et illustrés par la figure 37, montrent que les valeurs varient entre 0 et 20,2 mg/L. Les valeurs enregistrées sont les suivantes : Hadjr El Melh (0 mg/L), Taxana (0 mg/L), Messad (2,3 mg/L), Aryaf (2,7 mg/L), Atlas (6,19 mg/L), Bouglaz (9 mg/L) et Guerioune (20,2 mg/L). Toutes les valeurs restent inférieures à la valeur recommandée par l'OMS (50 mg/L).

Tableau 27: les valeurs de nitrate (NO_3^-) des différentes eaux de source étudiées

Les sources	Nitrate (NO_3^-) mg/l
Hadjr El Melh	00
Messad	2.3
Texanna	00
Bouglez	09
Atles	6.19
Aryaf	2.7
Geurioune	20.2
La valeur de OMS	<50

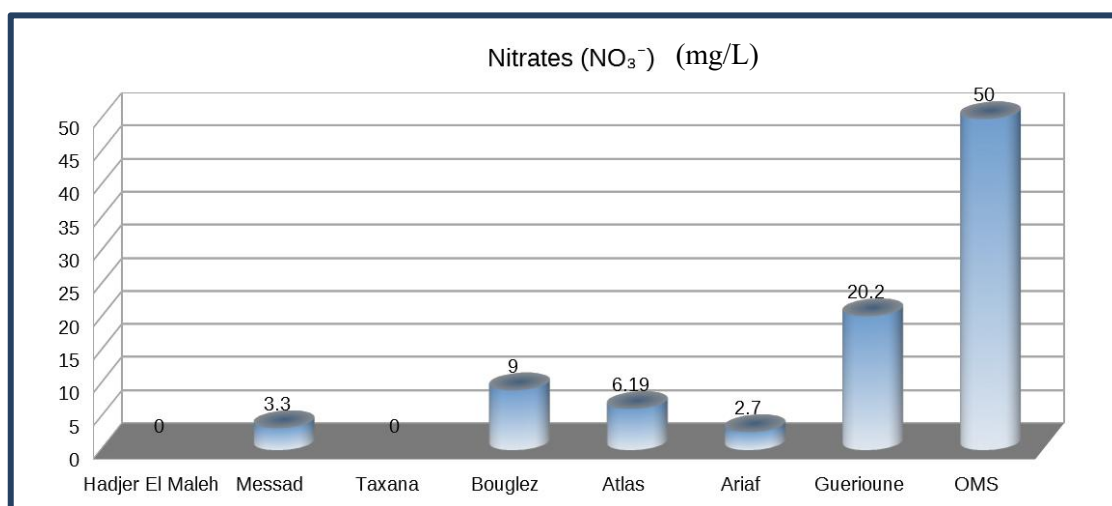


Figure 37 : Comparaison des valeurs de nitrate (NO_3^-) des différentes eaux de source étudiées

Le nitrate (NO_3^-) constitue la forme la plus stable de l'azote dans les eaux souterraines en milieu oxydant. Leur présence résulte principalement de l'oxydation des

composés azotés, notamment l'ammonium (NH_4^+) et les nitrites (NO_2^-). L'augmentation de leurs concentrations est généralement associée aux activités agricoles, à l'utilisation des fertilisants et à l'infiltration des eaux usées vers les aquifères (Spalding et Exner, 1993).

Les résultats obtenus montrent des variations entre les différentes eaux étudiées. La concentration la plus élevée est enregistrée à Guerioune (20,1 mg/L), suivie de Bouglez (9 mg/L) et Atlas (6,19 mg/L). Des valeurs plus faibles sont observées à Messad (2,3 mg/L) et Aryaf (2,7 mg/L), tandis qu'aucun nitrate n'a été détecté dans les eaux de Hadjar El Melh et de Taxana. Malgré ces différences, l'ensemble des concentrations demeure inférieur à la valeur guide de 50 mg/L recommandée pour les eaux destinées à la consommation humaine (**European Commission, 2020**).

Les teneurs relativement plus élevées observées à Guerioune, et dans une moindre mesure à Bouglez et Atlas, pourraient être liées à l'influence des activités agricoles ou à l'apport de matières organiques azotées. À l'inverse, les faibles concentrations enregistrées dans les autres sources traduisent une faible pression anthropique et la prédominance des processus naturels qui caractérisent les eaux souterraines (**Nolan et Hitt, 2006 ; Wakida et Lerner, 2005**).

Sur le plan sanitaire, des concentrations excessives en nitrates peuvent favoriser leur transformation en nitrites dans l'organisme et provoquer des effets indésirables, notamment chez les nourrissons. Cependant, les valeurs mesurées dans cette étude restent largement conformes aux recommandations internationales, ce qui témoigne d'une bonne qualité des eaux étudiées (**Ward et al, 2018**).

III.4. Résultats et discussion des analyses des autres paramètres de l'eau de la source Hadjr El Melh

Les paramètres complémentaires analysés dans l'eau de Hajar El Melh regroupent des données physico-chimiques, de minéralisation et de pollution, en précisant que ces résultats concernent uniquement cette eau en raison de l'absence de données pour les autres sources étudiées. Sur le plan physico-chimique, la conductivité électrique est de 0,89 mS/cm, tandis que la turbidité reste faible avec 0,33 NTU pour l'eau brute et 0,22 NTU pour l'eau décantée, traduisant une eau relativement claire et peu chargée en matières en suspension. En ce qui concerne la minéralisation globale, le titre hydrotimétrique (TH) est de 3 °F et le titre alcalimétrique complet (TAC) est de 20 °F, tandis que le titre

alcalimétrique (TA) est nul (0 °F), ce qui indique une eau faiblement dure et dont l'alcalinité est principalement liée aux bicarbonates. Enfin, les paramètres de pollution montrent une concentration en ammonium (NH_4^+) de 0,09 mg/L, une teneur en phosphates (PO_4^{3-}) inférieure à 0,01 mg/L, ainsi que des matières organiques atteignant 9,71 mg/L O_2 , reflétant globalement une faible contamination d'origine anthropique. (Tableau 33)

Tableau28: Les différents valeurs de paramètres étudiée sur l'eau de Hadjer El Maleh

Catégorie	Paramètre	Valeur	Les valeurs de OMS (OMS.2004)
Paramètres physico-chimiques	Conductivité électrique (mS/cm)	0,89	< 2100
	Turbidité eau brute (NTU)	0,33	<2,5
	Turbidité eau déc (NTU)	0,22	<2,5
Paramètres de Minéralisation globale	TH (°F)	3	-
	TAC (°F)	20	-
	TA (°F)	0	-
Paramètres de pollution	Ammonium (NH_4^+) (mg/L)	0,09	<0,5
	O-Phosphates (PO_4^{3-}) (mg/L)	< 0,01	<0,5
	Matières organiques (mg/L O_2)	0,71	<3,5

Les paramètres complémentaires analysés dans l'eau de Hajar El Melh regroupent des données physico-chimiques, de minéralisation et de pollution. Il convient de préciser que ces résultats concernent uniquement cette source, en raison de l'absence de données pour les autres eaux étudiées.

Sur le plan physico-chimique, la conductivité électrique enregistrée (0,89 mS/cm) indique une minéralisation modérée, traduisant une faible teneur en sels dissous et une faible interaction avec les formations géologiques fortement minéralisées. Cette valeur est

comparable à celles rapportées dans plusieurs aquifères du Nord algérien, où les eaux peu anthropisées présentent des conductivités faibles à modérées (**Benabbas et al, 2016**).

La turbidité présente des valeurs faibles (0,33 NTU pour l'eau brute et 0,22 NTU pour l'eau décantée), traduisant une eau claire et peu chargée en matières en suspension. Ces résultats sont conformes aux travaux de (**Boudoukha et al, 2016**), qui ont montré que les eaux souterraines bien protégées présentent généralement une faible turbidité, souvent inférieure à 1 NTU.

Concernant la minéralisation, le titre hydrotimétrique (TH = 3 °F) indique une eau très douce, pauvre en calcium et magnésium. Le titre alcalimétrique complet (TAC = 20 °F) associé à un titre alcalimétrique nul (TA = 0 °F) montre que l'alcalinité est principalement contrôlée par les bicarbonates, sans présence significative de carbonates libres. Ce comportement est typique des eaux souterraines en équilibre avec les formations carbonatées (**Kherici, 2012**).

Pour les paramètres de pollution, les concentrations mesurées restent faibles : ammonium ($\text{NH}_4^+ = 0,09 \text{ mg/L}$), orthophosphates ($<0,01 \text{ mg/L}$) et matières organiques ($0,71 \text{ mg/L O}_2$), traduisant une faible contamination d'origine anthropique. Des résultats similaires ont été rapportés par Hem (1985), qui a montré que les eaux souterraines protégées présentent généralement de faibles concentrations en nutriment

III.5.Appréciation globale de la qualité de la source de Hajar El Melh

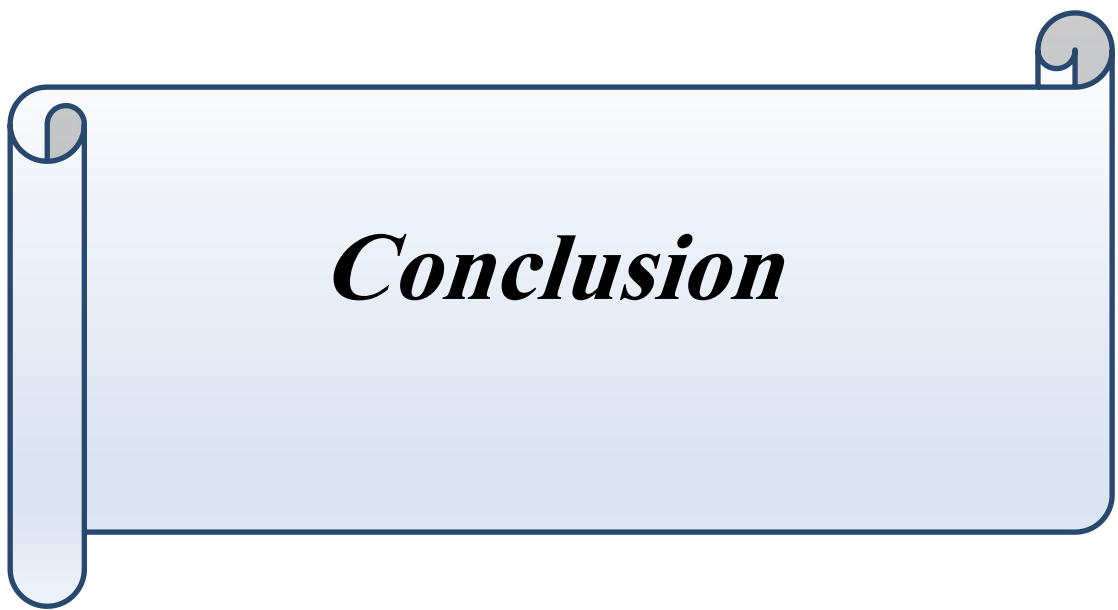
Les eaux de la source de Hajar El Melh présentent des caractéristiques hydrochimiques qui reflètent leur nature géologique particulière. Elles se distinguent par une minéralisation moyenne caractérisée principalement par des teneurs relativement élevées en sodium, sulfates et bicarbonates, ainsi qu'une faible turbidité et une quasi-absence des paramètres de pollution. tels que les nitrates, les nitrites, l'ammonium et la matière organique, ce qui indique une bonne qualité physico-chimique et une relative pureté. Cette composition s'explique par la domination des facteurs géologiques, notamment les formations salines locales, qui contrôlent la nature des sels dissous sans influence anthropique significative (**Appelo et Postma, 2005**).

Sur le plan sanitaire, ces eaux sont considérées comme potables. Elles se caractérisent par une composition chimique légère, ce qui les rend peu contraignantes pour le système

urinaire et non agressives pour les reins. La faible concentration en polluants chimiques et azotés réduit également les risques sanitaires liés aux eaux contaminées, ce qui leur confère une bonne qualité en termes de sécurité sanitaire (OMS, 2004). Toutefois, cette pureté s'accompagne d'une faible minéralisation, ce qui limite leur apport en éléments minéraux essentiels tels que le calcium et le magnésium ; elles sont donc considérées comme des eaux sûres mais relativement pauvres sur le plan nutritionnel.

Par ailleurs, une teneur en sodium légèrement élevée est observée par rapport à certaines autres sources, avec des valeurs proches de la limite guide de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2004). Cela nécessite une certaine prudence lors d'une consommation régulière, en particulier pour les personnes souffrant d'hypertension artérielle, car une consommation excessive de sodium peut contribuer à la rétention hydrique et à l'augmentation de la pression artérielle.

De manière générale, les eaux de la source de Hajar El Melh peuvent être classées comme des eaux naturelles de bonne qualité et à stabilité chimique, reflétant un équilibre entre pureté et faible teneur minérale, et illustrant clairement une forte influence des facteurs géologiques plutôt que des activités humaines, tout en restant conformes aux normes de potabilité en vigueur.



Conclusion

La présente étude a permis de réaliser une évaluation comparative des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la source Hadjr El Melh et de quelques autres eaux de source de la région de Djelfa, dans le but d'apprécier leur qualité et de mettre en évidence l'influence des facteurs géologiques et environnementaux sur leur composition.

Les résultats obtenus ont montré que les eaux étudiées présentent des différences de composition d'une source à une autre, reflétant la diversité des formations géologiques traversées ainsi que les conditions hydrogéologiques propres à chaque site. Les valeurs du pH indiquent des eaux globalement neutres à légèrement alcalines. De même, les paramètres de minéralisation, notamment le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les chlorures, les sulfates et les bicarbonates, révèlent des degrés de minéralisation variables selon les sources étudiées.

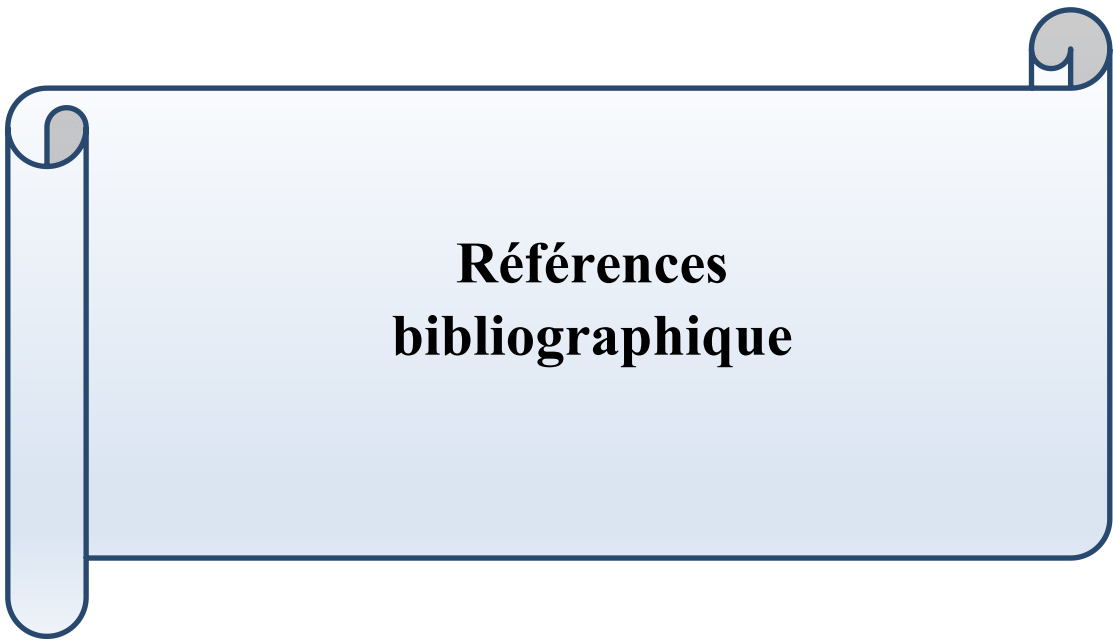
La source Hadjr El Melh se distingue par une composition minérale particulière, fortement influencée par la présence de formations évaporitiques riches en sel gemme et en gypse. Cette spécificité géologique explique les concentrations observées de certains ions dissous et confère à cette eau des caractéristiques qui la différencient des autres eaux analysées.

Par ailleurs, les teneurs en nitrates et en nitrites demeurent faibles et conformes aux normes de potabilité recommandées, ce qui traduit une faible influence des activités anthropiques et l'absence d'une contamination azotée significative. D'une manière générale, la majorité des paramètres étudiés se situent dans les limites admissibles fixées par les normes nationales et internationales relatives aux eaux destinées à la consommation humaine.

Cette étude a également confirmé que la qualité des eaux de source est étroitement liée aux interactions entre l'eau et les formations géologiques, au temps de résidence des eaux souterraines ainsi qu'aux conditions environnementales locales. Ces résultats soulignent l'importance de préserver ces ressources hydriques naturelles, qui constituent un patrimoine essentiel pour la région de Djelfa.

Enfin, la mise en place d'un programme de surveillance régulière, associant des analyses physico-chimiques et microbiologiques, apparaît indispensable afin de garantir la

pérennité de la qualité de ces eaux et d'assurer leur exploitation rationnelle et durable. Cette étude constitue ainsi une base scientifique pouvant servir de référence à de futurs travaux portant sur la protection et la valorisation des ressources hydriques de la région de Djelfa.



**Références
bibliographique**

Références bibliographique

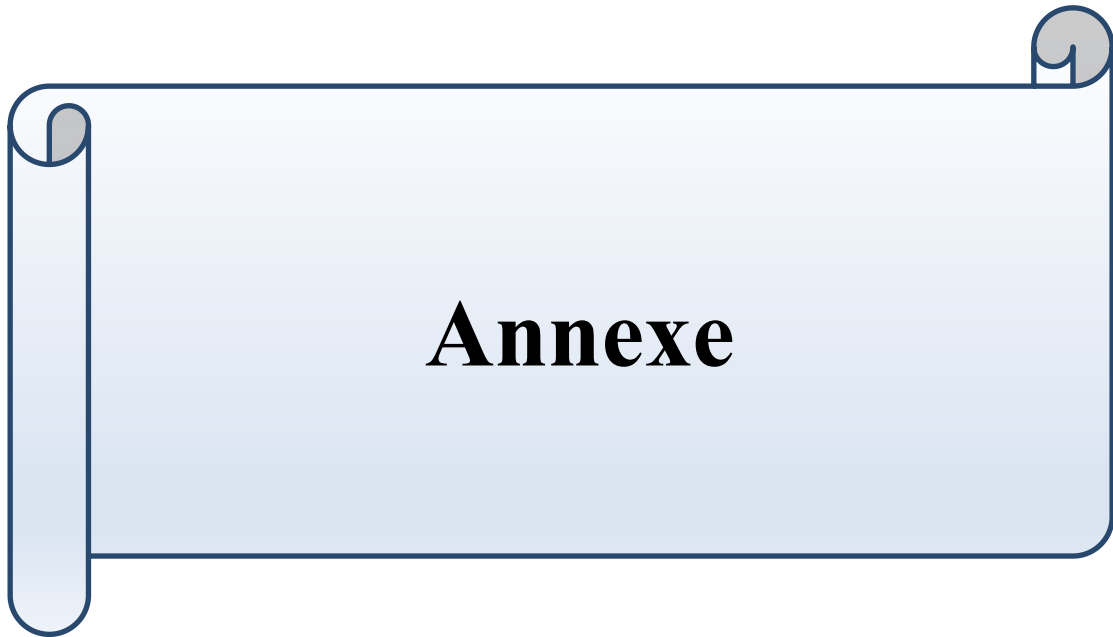
1. Achour, S. (2002). Elimination du cadmium par adsorption sur bentonite sodique et calcique. Journal du laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface, Université de Biskra.
2. Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire (A.N.A.T.). (2013). Atlas territorial de la wilaya de Djelfa. Alger, Algérie.
3. Appelo, C. A. J., et Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). CRC Press, Boca Raton, USA
4. Beddal, A., Boutaiba, S., Laassami, A., Hamaidi, F., et Enache, M. (2022). *Characterization by polyphasic approach of some indigenous halophilic archaea of Djelfa's rock salt "Hadjr El Melh", Algeria*. Iranian Journal of Microbiology.
5. Ben Cheikh, R. (2012). Hydrochimie des eaux souterraines en milieu semi-aride. Mémoire de Magister, Université d'Alger, Algérie.
6. Benabbas, C., et al. (2016). Étude de la qualité des eaux souterraines en Algérie. *Journal Algérien des Sciences de l'Eau*, 9(1), 45–60
7. Blancher, G. (1972). *Abrégé de médecine préventive et d'hygiène*. Masson et Cie, Paris.
8. Bliefert, C., et Perraud, R. (2001). *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets*. De Boeck Université, Bruxelles.
9. Boeglin, J.-C. (2009). *Propriétés des eaux naturelles*. Techniques de l'Ingénieur, Traité Environnement, G1 110.
10. Brassington, R. (2013). *Field Hydrogeology* (3rd ed.). Wiley-Blackwell, Chichester, United Kingdom.
11. Canellas, J. (1995). *Au sujet de la définition et de la réglementation des eaux minérales naturelles*. *La Houille Blanche*, n° 2. Grenoble : SHF.
12. Canellas, J. (2000). *Au sujet de la définition et de la réglementation des eaux minérales naturelles*. Université de Bordeaux, France.
13. Canter, L. W. (1997). *Nitrate in Groundwater*. CRC Press, Boca Raton, USA.
14. Castany, G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris.
15. Centre d'Information sur l'Eau (CIE). (2013). *Le cycle naturel de l'eau*. France.

16. Chambre Syndicale des Eaux Minérales (CSEM). (2008). *L'eau minérale naturelle : un produit naturel et protégé, une industrie responsable, un emballage recyclable*. Paris : CSEM.
17. Constant, F., et Hawili, N. (2011). Les eaux embouteillées. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 46(1), 40–50.
18. Custodio, E., et Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (2e éd.). Editorial Omega, Barcelona.
19. Darling, W. G., et Gooddy, D. C. (2006). *The hydrogeochemistry of methane: Evidence from English groundwaters*. *Chemical Geology*, 229(4), 293–312
20. Degrémont. (2005). *Mémento technique de l'eau* (10e éd.). Technique & Documentation Lavoisier, Paris.
21. Domenico, P. A., et Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York, USA.
22. Drever, J. I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall, USA.
23. Fetter, C. W., et Creamer, D. K. (2022). *Applied Hydrogeology* (5th ed.). Waveland Press, Long Grove, Illinois.
24. Fitts, C. R. (2013). *Groundwater Science* (2nd ed.). Academic Press, San Diego, California USA.
25. Freeze, R. A., et Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
26. Ghodbane, M., Boudoukha, A., et Benaabidate, L. (2016). Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 57(32), 14858–14868.
27. Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088–1090.
28. Google Earth . 2026. Google Earth. Disponible sur : <https://earth.google.com/> (consulté le 03/06/2026).
29. Hem, J. D. (1989). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. (3rd ed.). U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2254.
30. Hiscock, K. M., et Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology: Principles and Practice* (2e éd.). John Wiley & Sons, Chichester.
31. Hubert, J. (2010). Quelles eaux de boisson faut-il consommer? *Progrès en Urologie*, 20(11), 806–809.

32. Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). (2000). *Journal officiel d'août 2000*. Alger : République Algérienne Démocratique et Populaire.
33. Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). (2011). *Décret exécutif relatif aux normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine*. Alger : République Algérienne Démocratique et Populaire.
34. Kherici, N., et al. (2012). Hydrochimie des eaux souterraines en Algérie. Université de Constantine, Algérie.
35. Lafforgue, H. (2025). *Les eaux minérales naturelles*. HAL Open Archive, hal-05065621.
36. Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
37. Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Okotto-Okotto, J., Pedley, S., Stuart, M. E., Tijani, M. N., et Wright, J.(2017). Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 1093–1116
38. Lloyd, J. W., et Heathcote, J. A. (1985). *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction*. Clarendon Press, Oxford, UK.
39. Maurel, A. (2006). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce* (2e éd.). Tec et Doc (Lavoisier), Paris.
40. Mebrouk, N., et al. (2014). Groundwater quality assessment in Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 1–15.
41. Mercier, J. (2000). *Le grand livre de l'eau*. La Reconnaissance du Livre, Paris.
42. Miquel, G. (2003). *Rapport sur la qualité de l'eau et l'assainissement en France*. Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST), Paris.
43. Mondal, N. C., et Singh, V. S. (2011). Hydrochemical processes in groundwater systems. *Environmental Earth Sciences*, 62, 123–134.
44. Morel, J. (2007). *Les ressources en eau sur Terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature*. Note de synthèse, LEPII, UMR 5252 CNRS–UPMF, Grenoble, France.
45. Moumouni Djermakoye, M. H. (2005). *Caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et impacts sur les eaux de surface et les eaux souterraines*. Thèse de doctorat, Université de Bamako, Bamako, Mali.

46. Musy, A., et Higy, C. (2011). *Hydrology: A Science of Nature*. CRC Press / Taylor & Francis Group, Boca Raton .
47. Nolan, B. T., et Hitt, K. J. (2006). Vulnerability of groundwater to nitrate contamination in the United States. *Environmental Science & Technology*, 40(24), 7834–7840.
48. Oren, O., et Yechieli, Y. (2015). Groundwater salinization processes. *Hydrogeology Journal*, 23, 1–16.
49. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2006). *Water: A Shared Responsibility. The United Nations World Water Development Report 2*. Paris : UNESCO.
50. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2012). *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. Paris : UNESCO.
51. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2004). *Guidelines for Drinking-water Quality* (3e éd.). Genève : OMS.
52. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4e éd.). Genève : OMS.
53. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. Genève : OMS.
54. Rao, N. S. (2018). Groundwater quality in arid and semi-arid regions. *Applied Water Science*, 8, 1–16.
55. Rio, B. (2006). *L'eau et la vie*. guide pratique. Éditions du Dauphin, Paris.
56. Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N. et Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, 42(16), 4215–4232.
57. Rodier, J., Legube, B., et Merlet, N. (2009). *L'Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 9e édition. Paris : Dunod. 1579 p.
58. Saibi, H., et al. (2013). Hydrogeological characteristics of Algerian aquifers. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1–12.
59. Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York
60. Stumm, W., et Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley, New York.

61. Taleb, S. (2005). *Confrontation des normes algériennes des eaux potables aux directives de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS)*. Actes du Congrès international « De l'eau pour le développement durable dans le bassin méditerranéen », Alger.
62. Tardat-Henry, M. H., et Beaudry, J. P. (1992). *Chimie des eaux*. Éditions Le Griffon d'argile, Sainte-Foy, Québec.
63. Todd, D. K., et Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). Wiley, USA.
64. Ward, M. H., et al. (2018). Drinking water nitrate and health effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), 1557.
65. World Health Organization (OMS). (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). WHO Press, Geneva.
66. Zerluth, J., et Gienger, M. (2006). *L'eau et ses secrets : nature et action de l'eau pour une eau de qualité*. Éditions Désiris, Paris.
67. Zhang, Y., et Shen, Y. (2020). Hydrochemical evolution of groundwater. *Journal of Hydrology*, 588, 125089.



Annexe 01

Tableau de bulletin d'analyse de l'eau Hadjr El Melh

Paramètres physico-chimiques	Résultats	Valeur Maximale Admissible
PH		
Conductivité (ms/cm)		
Turbidité eau brute (ntu)		
Tubidité eau déc (ntu)		
Résidu Sec à 180° (mg/l)		
Méniralisation globale	Résultats	Valeur Maximale Admissible
Calcium ca ⁺⁺ (mg/l)		
Magnésium Mg ⁺ (mg/l)		
Sodium Na ⁺ (mg/l)		
Potassium K ⁺ (mg/l)		
Chlorure Cl ⁻ (mg/l)		
Sulfate SO ₄ ^{— —} (mg/l)		
Bicarbonate HCO ₃ (mg/l)		
Carbonate CO ₃ ^{— —} (mg/l)		
TH (°f)		
TAC(°f)		
TA(°f)		
Paramètres de pollution	Résultats	Valeur Maximale Admissible
Ammonium NH ₄ ⁺ (mg/l)		
Nitrite NO ₂ ⁻ (mg/l)		
Nitrate NO ₃ ⁻ (mg/l)		
O. Phosphates PO ₄ ^{— — —} (mg/l)		
Matières Organiques (mg/l)		

Annexe 02

Tableau de bulletin d'analyse des autres sources utilisé

Les paramètres	Messad	Atlas	Bougles	Aryaf	Geurione
PH					
Résidu Sec à 180° (mg/l)					
Calcium(mg/l)					
Magnésium(mg/l)					
Sodium (mg/l)					
Potassium (mg/l)					
Chlorure (mg/l)					
Sulfate (mg/l)					
Nitrite (mg/l)					
Nitrate(mg/l)					
Bicarbonate(mg/l)					
Les paramètres					
PH					
Résidu Sec à 180° (mg/l)					
Calcium(mg/l)					
Magnésium(mg/l)					
Sodium (mg/l)					
Potassium (mg/l)					
Chlorure (mg/l)					
Sulfate (mg/l)					

Annexe 04



Figure :Matériel de verrerie de laboratoire utilisé(photo personnelle, 2026)

Annexe 05



Figure :Étuve réglée à 180 °C (photo personnelle, 2026)

Annexe 06



Figure : Apraille de Spectrophotomètre (photo personnelle, 2026)

Étude comparative des paramètres physico chimique des eaux de source Hadjr El Melh et celles de quelques autres eaux de sources de la région de Djelfa

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse comparative des paramètres physico-chimiques des eaux de la source Hadjr El Melh et de quelques autres eaux de source de la région de Djelfa afin d'évaluer leur qualité et leur conformité aux normes de potabilité. Les paramètres étudiés comprennent le pH, le résidu sec, les principaux ions minéraux ainsi que les nitrates et les nitrites. Les résultats obtenus ont mis en évidence des variations liées aux caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des différents sites. La source Hadjr El Melh se distingue par une minéralisation particulière influencée par la présence de formations évaporitiques riches en sel gemme et en gypse. Globalement, les eaux étudiées présentent une bonne qualité physico-chimique et la majorité des paramètres analysés demeure conforme aux normes de potabilité. Cette étude souligne l'importance d'un suivi régulier afin de préserver durablement ces ressources hydriques.

Mots clé : Hadjr El Melh ,Djelfa , eau de source , paramètres physico-chimiques ,qualité des eaux

Comparative study of the physicochemical parameters of Hadjr El Melh spring waters and those of some other spring waters in the Djelfa region

Abstract

This study presents a comparative analysis of the physicochemical parameters of water from the Hadjr El Melh spring and several other spring waters in the Djelfa region, in order to assess their quality and compliance with drinking water standards. The studied parameters include pH, total dissolved solids, major mineral ions, as well as nitrates and nitrites. The results revealed variations related to the geological and hydrogeological characteristics of the investigated sites. The Hadjr El Melh spring is characterized by a specific mineral composition influenced by evaporitic formations rich in rock salt and gypsum. Overall, the studied waters show good physicochemical quality, and most of the analyzed parameters comply with drinking water standards. This study highlights the importance of regular monitoring to sustainably preserve these water resources.

Keywords: Hadjr El Melh, Djelfa, spring water, physicochemical parameters, water quality

دراسة مقارنة للخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه ينابيع حجر الملح وبعض مياه الينابيع الأخرى في منطقة الجلفة.

الملخص

تتناول هذه الدراسة التحليل المقارن للخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه منبع حجر الملح وبعض مياه الينابيع الأخرى في منطقة الجلفة، بهدف تقييم جودتها ومدى مطابقتها للمعايير صلاحية مياه الشرب. شملت المعايير المدروسة كلاً من الرقم الهيدروجيني، و البقايا الجافة، والأيونات المعدنية الرئيسية، بالإضافة إلى النترات والنترات. أظهرت النتائج وجود اختلاف اتمرتبطة بالخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية للمواقع المدروسة. وتميزت مياه منبع حجر الملح بتركيب معدني خاص متأثر بوجود تكوينات تبخرية غنية بالملح الصخري والجبس.

وبصفة عامة، أظهرت المياه المدروسة جودة فيزيائية وكيميائية جيدة، كما أن معظم المعايير المحللة كانت مطابقة لمعايير صلاحية مياه الشرب. وتبرز هذه الدراسة أهمية المتابعة الدورية والمستمرة للحفاظ على هذه الموارد المائية وضمان استدامتها.

الكلمات المفتاحية: حجر الملح, الجلفة, مياه الينابيع, الخصائص الفيزيائية والكيميائية, جودة المياه

/