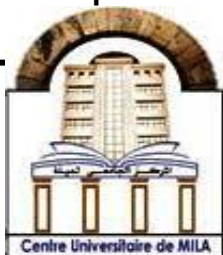


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N°Ref :.....



Centre Universitaire Abdelhafid BOUSOUF-Mila
Institut des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Ecologie et Environnement
Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de
Master
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Ecologie et Environnement
Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Thème

**Contribution à l'étude physico-chimique et bactériologique
des eaux souterraines de la wilaya de Mila
(El Maarat, Sidi Abdelmalek et Ayoune Soltane)**

Elaboré et présenté par :

- **BELHADJ Soumia**

Devant le jury :

Présidente :	DJEDDI Hamssa	(MCB)	C U M
Examineur :	MERZOUG Seyf Eddine	(MCA)	C U M
Promotrice :	BOUNAB Nourhane Amani	(MCB)	C U M

Année Universitaire : 2024/2025





Remerciement

Nos plus vifs remerciements vont aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail :

Madame DJEDDI Hamssa, présidente du jury, pour le temps précieux qu'elle a consacré à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour ses observations judicieuses et ses encouragements.

Monsieur MERZOUG Seyf Eddine, examinateur de ce travail, pour l'attention qu'il a portée à ce travail, ses remarques pertinentes et ses suggestions constructives, qui ont contribué à en enrichir la qualité.

Je remercie également **Madame BOUNAB Nourhane Amani**, mon encadreuse, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, ses conseils avisés et son encadrement précieux tout au long de ce travail. Son expertise et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie sincèrement le personnel de l'**ADE de Mila** pour les informations précieuses qu'ils m'ont fournies. Leur collaboration m'a permis de mieux comprendre certains aspects techniques et contextuels essentiels à ma recherche.



Dédicace

Sur la douceur de l'accomplissement, les années ont passé et la fatigue des jours s'est dissipée. J'offre ce succès, avant tout, à moi-même, à cette âme ambitieuse qui a commencé avec un rêve et a atteint la réussite.

Avec tout mon amour, je dédie ce travail à mon père, mon héros, mon soutien inébranlable, celui qui a toujours cru en moi et n'a cessé de m'encourager. Qu'Allah te garde pour nous.

À ma mère, mon refuge, ma lumière, celle dont les prières ont accompagné chacun de mes pas. Ma tendresse éternelle, ma fierté, mon paradis sur terre.

À mes piliers, mes frères Oussama, Abdelrahim, Yacine, et ma sœur Chaima, pour leur amour, leur aide et leur présence constante.

À tous ceux qui m'ont soutenue, de près ou de loin, à mes amies fidèles, belles de cœur et d'esprit, compagnonnes de route et d'épreuves.

Et enfin, à celui ou celle qui a cru en soi : « Qui dit j'en suis capable, réussit. Louange à Dieu ».

Soumia

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Résumé

ملخص

Abstract

Introduction 1

Partie théorique

CHAPITRE I : Généralité sur l'eau

1. Définition et importance de l'eau	3
1.1. Définition de l'eau	3
1.2. Importance de l'eau pour les êtres vivants	4
1.3. Répartition de l'eau sur la planète	4
1.4. Répartition de l'eau en Algérie	6
2. Les différentes formes de l'eau	6
2.1. Eau de surface	7
2.2. Eau souterraine	8
2.3. Eau atmosphérique	9
3. Le cycle de l'eau	10
3.1. Évapotranspiration	10
3.2. Condensation	11
3.3. Précipitations	11
3.4. Ruissellement	12
3.5. Infiltration	12
4. Normes de qualité de l'eau et potabilité	13
4.1. Paramètres organoleptiques	13
4.2. Paramètres physico-chimiques	15
4.2. Paramètres bactériologiques	22
4.3. Cadre réglementaire international et national	25
5. Principales sources anthropiques de pollution des eaux souterraines	27
5.1. Assainissement domestique inadéquat	27
5.2. Rejets industriels non contrôlés	27

5.3. Agriculture intensive	28
5.4. Élevage intensif et abattoirs	28
5.5. Réservoirs et infrastructures souterraines défaillantes.....	28
6. Impacts de la pollution des eaux souterraines	29
7. Traitement de l'eau	29
7.1. Traitement des gaz dissous.....	29
7.2. Filtres au charbon actif.....	29
7.3. Échange d'ions pour les nitrates	30
7.4. Adoucissement et désinfection.....	30
7.5. Chloration et fluoration.....	30

CHAPITRE II : Description de la zone d'étude

1. Présentation de la wilaya de Mila.....	31
1.1. Délimitation territoriale de la wilaya de Mila	31
2. Les caractéristiques géologiques	32
2.1. Géologie	32
2.2. Relief.....	32
2.3. Pédologie.....	33
2.4. Climatologie.....	33
2.5. Température.....	34
2.6. Précipitation	35
3. La synthèse climatique	36
3.1. Diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen.....	36
3.2. L'indice pluviométrique d'Emberger	37

Partie pratique

CHAPITRE III : Matériel et Méthodes

1. Lieu de stage.....	42
2. Nature et période de prélèvement	42
3. Prélèvement de l'eau à analyser	43
4. Echantillonnage	43
5. Transport des échantillons	44
6. Les analyses physico-chimiques.....	44
6.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	45
6.2. Température.....	46
6.3. Conductivité électrique (CE)	46
6.4. Dureté totale (TH).....	46
6.5. Sulfates (SO_4^{2-})	48

6.6. Fer (Fe^{2+})	49
6.7. Matière organique (M.O)	50
6.8. Nitrates (NO_3^-)	51
6.9. Alcalinité	52
6.10. Chlorures (Cl^-)	53
6.11. Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+})	54
6.12. Résidu sec (R.S)	55
6.13. Solides dissous totaux (TDS) et salinité (SAL)	56
7. Analyses bactériologiques	57
7.1. La méthode de filtration sur membrane	58

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

1. Les résultats des analyses physicochimiques	51
1.1. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	51
1.2.La conductivité électrique.....	52
1.3.Dureté totale (TH).....	54
1.4.Sulfates (SO_4^{2-})	55
1.5.Fer (Fe^{2+})	56
1.6.Matière organique (M.O)	56
1.7.Nitrates (NO_3^-)	57
1.8.Alcalinité.....	58
1.9.Chlorures (Cl^-).....	59
1.10. Calcium (Ca^{2+}).....	60
1.11. Magnésium (Mg^{2+}).....	61
1.12. Résidu sec (R.S)	62
1.13. Phosphate (PO_4^{3-})	63
2. Comparaison des analyses physico-chimiques.....	64
3. Les paramètres bactériologiques	66
3.1. Résultats des analyses des coliformes totaux, <i>E. coli</i> et des streptocoques fécaux	66
3.2. Comparaison des analyses bactériologiques	68
Conclusion.....	70
Références bibliographiques	

Liste des Figures

Figure 1 : Eaux de surface	8
Figure 2 : Les eaux souterraines	9
Figure 3 : L'eau atmosphérique	10
Figure 4 : Cycle hydrologique de l'eau	13
Figure 5 : <i>E. coli</i>	22
Figure 6 : Coliformes fécaux	23
Figure 7 : Les entérocoques.....	23
Figure 8 : <i>Salmonelles</i>	25
Figure 9 : Carte de situation géographique de la wilaya de Mila.....	31
Figure 10 : Carte du relief de la wilaya de Mila.....	33
Figure 11 : Variation des températures moyennes mensuelles observées durant la période (2015-2020).....	35
Figure 12 : Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain-Tin (2015-2020).....	36
Figure 13 : Diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen.....	37
Figure 14 : Situation de la région de Mila dans le climagramme d'Emberger.....	39
Figure 15 : Les régions d'étude Hamala, Terrai bainen, Oued Endja	43
Figure 16 : La mesure du pH.....	45
Figure 17 : La mesure de conductivité	46
Figure 18 : Teneur du pH de l'eau des 03 sources étudiées	52
Figure 19 : Teneur de la conductivité de l'eau des 03 sources étudiées.....	53
Figure 20 : Teneur de la dureté totale de l'eau des 03 sources étudiées.....	54
Figure 21 : Teneur du sulfate de l'eau des 03 sources étudiées.....	55
Figure 22 : Teneur du fer de l'eau des 03 sources étudiées	56
Figure 23 : Teneur de la matière organique de l'eau des 03 sources étudiées.....	57
Figure 24 : Teneur du nitrate de l'eau des 03 sources étudiées	58
Figure 25 : Teneur du Alcalinité de l'eau des 03 sources étudiées.....	59
Figure 26 : Teneur du chlorure de l'eau des 03 sources étudiées	60
Figure 27 : Teneur du calcium de l'eau des 03 sources étudiées.....	61
Figure 28 : Teneur du magnésium de l'eau des 03 sources étudiée	62
Figure 29 : Teneur du résidu sec de l'eau des 03 sources étudiées	63

Figure 30 : Teneur du phosphate de l'eau des 03 sources étudiées	64
---	----

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Inventaire des réserves mondiales d'eau	5
Tableau 2 : Typologie comparative des principaux systèmes aquifères et leurs caractéristiques hydrogéologiques	9
Tableau 3 : Classification des eaux naturelles selon leur pH et impacts associés.....	15
Tableau 4 : Espèces chimiques responsables de l'alcalinité selon le pH	18
Tableau 5: Les normes bactériologiques de l'eau selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes algériennes (NA 6368).....	26
Tableau 6: Normes de qualité physico-chimique de l'eau potable selon les normes Algériennes et OMS.....	27
Tableau 7: Moyenne mensuelle des températures (Station d'Ain-Tin ; 2015-2025).....	34
Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles (Station d'Ain-Tin ; 2015-2025).....	36
Tableau 9: Données climatiques mensuelles (station de Aïn-Tin, 2015–2025)	37
Tableau 10: Nature et période de prélèvement	42
Tableau 11: Les paramètres de la qualité des eaux.....	45
Tableau 12 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau provenant des trois sources	51
Tableau 13 : Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique	53
Tableau 14 : Qualité de l'eau en fonction de la dureté totale	54
Tableau 15 : Les résultats des analyses physicochimiques obtenus des trois sources de références au cours des années 2024 et 2025	65
Tableau 16 : Résultats des analyses bactériologiques des eaux étudiées	67
Tableau 17 : Les résultats de l'analyse bactériologique des trois sources de références au cours des années 2024 et 2025	68

Liste des Abréviations

- **ADE** : Algérienne des Eaux
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **°C** : Degré Celsius
- **CE** : Conductivité Électrique
- **Cl⁻** : Chlorure
- **Ca²⁺** : Calcium
- ***E. coli*** : *Escherichia coli*
- **Fe²⁺** : Fer
- **g** : Gramme
- **hm³** : Hectomètre cube
- **hg** : Hectogramme
- **km** : Kilomètre
- **h** : Heure
- **H₂O** : Eau
- **HCO₃⁻** : Alcalinité (Bicarbonate)
- **H₂SO₄** : Acide sulfurique
- **K₂CrO₄** : Chromate de potassium
- **l** : Litre
- **m** : Mètre
- **m³** : Mètre cube
- **ml** : Millilitre
- **mg** : Milligramme
- **min** : Minute
- **Mg²⁺** : Magnésium
- **nm** : Nanomètre
- **NO₃⁻** : Nitrate
- **NO₂⁻** : Nitrite
- **NaCl** : Chlorure de sodium
- **NaOH** : Hydroxyde de sodium
- **NTU** : Unité de Turbidité Néphélométrique
- **P** : Précipitation

- **pH** : Potentiel d'Hydrogène
- **PO₄³⁻** : Phosphates
- **R.S** : Résidus Secs
- **SO₄²⁻** : Sulfates
- **s** : Seconde
- **S/C** : Simple Concentration
- **SS** : *Salmonella-Shigella*
- **TA** : Titre Alcalimétrique
- **TAC** : Titre Alcalimétrique Complet
- **T** : Température
- **TH** : Dureté Totale
- **TGEA** : Tryptone Glucose Extract Agar
- **UFC** : Unité Formant Colonie
- **μS/cm** : Microsiemens par centimètre
- **V** : Volume
- **%** : Pourcentage
- **>** : Supérieur à
- **<** : Inférieur à

Résumé

L'étude menée dans la région de Mila évalue la qualité de l'eau de trois sources (El Maarat, Sidi Abdelmalek et Ayoun Soltane) à travers des analyses physico-chimiques et bactériologiques, en se référant aux normes de l'OMS et aux normes standards Algériens.

Les données indiquent une eau globalement de bonne qualité sur le plan physico-chimique. Les paramètres analysés révèlent :

- Un pH neutre à légèrement alcalin,
- Une conductivité en baisse à Ayoun Soltane,
- Une dureté totale élevée mais conforme aux normes,
- Des teneurs acceptables en sulfates, fer, matière organique et nitrates.

Cependant, des concentrations élevées en nitrates à Ayoun Soltane suggèrent une pollution d'origine agricole.

Les sources de Sidi Abdelmalek et El Maarat respectent les limites microbiologiques. En revanche, celle d'Ayoun Soltane présente une contamination fécale, avec la présence d'*Escherichia coli* et d'entérocoques intestinaux, indiquant une pollution récente probablement liée aux activités humaines.

La qualité physico-chimique des eaux des trois sources étudiées apparaît globalement satisfaisante, la présence de contamination bactérienne à Ayoun Soltane soulève des préoccupations sanitaires importantes. Ces résultats mettent en évidence la nécessité de mettre en place des mesures de protection des captages et de surveillance renforcée, afin d'identifier et de maîtriser les sources de pollution et de garantir ainsi la salubrité de l'eau potable

Mots clés : analyse physico-chimique, analyse bactériologique, région de Mila, pollution, El Maarat, Sidi Abdelmalek, Ayoun Soltane.

ملخص

أُجريت هذه الدراسة في منطقة ميلة بهدف تقييم جودة مياه ثلاث ينابيع (المعرة، سيدي عبد المالك و عيون السلطان) من خلال تحاليل فيزيائية-كيميائية وبكتريولوجية، بالاعتماد على معايير منظمة الصحة العالمية والمعايير الجزائرية القياسية.

تشير البيانات إلى أن المياه عموماً ذات جودة جيدة من الناحية الفيزيائية والكيميائية، حيث أظهرت

النتائج ما يلي:

- درجة حموضة (pH) متعادلة إلى قلوية خفيفة،
- انخفاض في التوصيلية الكهربائية في عيون السلطان،
- قساوة كلية مرتفعة لكنها تبقى ضمن المعايير المقبولة،
- نسب مقبولة من الكبريتات، الحديد، المواد العضوية والنترات.

ومع ذلك، تم تسجيل تركيزات مرتفعة من النترات في عيون السلطان، مما يشير إلى تلوث زراعي

محتمل.

أما من الناحية الميكروبيولوجية، فمصدر سيدي عبد المالك و المعرة يحترمان المعايير، بينما أظهرت عينات عيون السلطان وجود تلوث برازي، مع رصد بكتيريا *Escherichia coli* و *Enterococcus*، مما يدل على تلوث حديث يرجح أن يكون ناتجاً عن أنشطة بشرية.

تظهر الخصائص الفيزيوكيميائية لمياه الينابيع الثلاثة المدروسة جودة مرضية بشكل عام، إلا أن التلوث البكتيري الموجود في منبع عيون السلطان يثير مخاوف صحية كبيرة. وتبرز هذه النتائج الحاجة إلى اتخاذ إجراءات خاصة لحماية مصادر المياه، وذلك من خلال تحديد مصادر التلوث والحد منها وبالتالي ضمان سلامة المياه الصالحة للشرب.

الكلمات المفتاحية: التحليل الفيزيائي-الكيميائي، التحليل البكتريولوجي، منطقة ميلة، التلوث، المعرات، سيدي عبد المالك، عيون السلطان.

Abstract

The study conducted in the Mila region assesses the water quality of three springs (El Maarat, Sidi Abdelmalek, and Ayoune Soltane) through physicochemical and bacteriological analyses, based on WHO guidelines and Algerian national standards.

The data indicate that the water is generally of good physicochemical quality. The analyzed parameters show :

- A neutral to slightly alkaline pH,
- A decrease in conductivity at Ayoune Soltane,
- High total hardness, but within acceptable limits,
- Acceptable levels of sulfates, iron, organic matter, and nitrates.

However, high nitrate concentrations at Ayoune Soltane suggest agricultural pollution.

The Sidi Abdelmalek and El Maarat spring complies with microbiological standards. In contrast, the Ayoune Soltane spring shows fecal contamination, with the presence of *Escherichia coli* and intestinal enterococci, indicating recent pollution likely linked to human activities.

The physical and chemical quality of the water from the three studied springs appears generally satisfactory. However, the bacterial contamination detected in the Sultan Spring raises significant health concerns. These findings highlight the need to implement preventive measures in water catchment areas and enhance monitoring to identify and control sources of contamination, ensuring safe drinking water.

Keywords: physico-chemical analysis, bacteriological analysis, Mila region, pollution, El Maarat, Sidi Abdelmalek, Ayoune Soltane.

Introduction

Introduction

L'eau constitue un élément vital pour la vie, un facteur déterminant pour le développement socio-économique et un indicateur sensible des équilibres environnementaux. Elle est au cœur des préoccupations scientifiques et politiques à l'échelle mondiale, notamment face aux pressions croissantes dues au changement climatique, à la croissance démographique et aux activités humaines (UNESCO, 2019). En zones méditerranéennes semi-arides comme en Algérie, la disponibilité et la qualité de l'eau deviennent des enjeux majeurs pour la durabilité des écosystèmes et la sécurité hydrique des populations (Meddi & Hubert, 2003).

En Algérie, les ressources en eau sont inégalement réparties dans l'espace et dans le temps, avec une pression particulièrement forte sur les ressources de surface et souterraines dans les régions agricoles et densément peuplées (Meddi & Hubert, 2003 ; Remini, 2010). La wilaya de Mila, située dans le Nord-Est Algérien, offre un cadre géographique et hydrologique intéressant à étudier. Elle se caractérise par une diversité morphologique et géologique marquée, influençant fortement le régime des eaux de surface et la dynamique des nappes souterraines (Bessaoud, 2013 ; ANRH, 2017).

La région présente un relief varié — alternant montagnes, plaines et vallées — ainsi qu'un climat de type méditerranéen semi-aride à subhumide, avec des précipitations irrégulières qui posent des défis majeurs en matière de gestion des eaux (ONM, 2023). En plus de ses oueds saisonniers, la wilaya de Mila abrite des retenues collinaires, des barrages comme celui de Beni Haroun (l'un des plus grands du pays), et de nombreuses nappes phréatiques, qui jouent un rôle essentiel dans l'alimentation en eau potable et l'irrigation (ANBT, 2022).

Dans ce contexte, une problématique centrale se pose : comment les caractéristiques naturelles de la région de Mila influencent-elles la disponibilité et la qualité des ressources en eau, et quels sont les principaux défis à relever pour assurer une gestion durable de cette ressource dans un environnement soumis à de multiples pressions ?

Le présent travail vise ainsi à caractériser les paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau potable d'origine souterraine de la région de Mila. Une attention particulière est accordée à l'identification des facteurs influençant la recharge des nappes et à l'évaluation des risques liés à la dégradation de la ressource hydrique.

Cette étude se veut une contribution à l'amélioration de la connaissance scientifique de la région, et à la mise en place d'approches durables de gestion intégrée des ressources en eau dans un territoire en mutation.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres :

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur l'eau.

Chapitre II : Description de la zone d'étude.

Chapitre III : Matériel et méthodes qui contiennent la présentation du lieu de stage et les méthodes d'analyses utilisées pour la réalisation de ce travail.

Chapitre IV : Résultats et discussion qui comporte les résultats obtenus et leur discussion.

Et enfin, une conclusion générale.

PARTIE THÉORIQUE

Chapitre I :

Généralités sur l'eau

1. Définition et importance de l'eau

1.1. Définition de l'eau

L'eau, ressource indispensable à la vie, revêt une importance capitale sur les plans historique, géographique et biologique. Les premières civilisations humaines se sont établies à proximité des cours d'eau, tirant profit de cette ressource vitale pour leur développement. Occupant près de deux tiers de la surface terrestre, l'eau est omniprésente, et sa présence conditionne l'existence de la vie. Sans elle, aucune forme de vie n'est possible (**Diallo, 2015**). En effet, les grands foyers de civilisation tels que la Mésopotamie, l'Égypte ancienne ou encore la vallée de l'Indus ont tous prospéré grâce à l'accès à des sources d'eau douce, élément clé pour l'agriculture et la stabilité sociale (**Gleick, 1993**).

D'un point de vue scientifique, l'eau est un liquide incolore, inodore et sans saveur à température ambiante. Classée par les Anciens parmi les quatre éléments fondamentaux aux côtés de la terre, du feu et de l'air, elle est le principal constituant des êtres vivants, représentant environ 70 % de leur masse corporelle. Cette forte teneur en eau chez les êtres vivants s'explique par ses propriétés physico-chimiques particulières, comme sa polarité moléculaire, sa capacité solvante à dissoudre de nombreuses substances et sa chaleur thermique élevée, qui lui permet de jouer un rôle clé dans la régulation thermique (**Chaplin, 2001 ; Lehninger et al., 2017**).

Cependant, bien que l'eau recouvre une grande partie de notre planète, seule une infime partie est accessible à la consommation humaine. En effet, 97 % de l'eau terrestre est salée et se trouve dans les océans, tandis que les 3 % restants correspondent à l'eau douce. Parmi cette eau douce, environ 68,3 % est immobilisée sous forme de glace dans les glaciers, et seulement 31,4 % est disponible sous forme liquide dans les nappes phréatiques, les lacs, les rivières et la biosphère. Une quantité encore plus réduite existe sous forme de vapeur dans l'atmosphère (**Ziana et Célia, 2020**). De plus, selon le rapport de l'**UNESCO (2021)**, moins de 1 % de l'eau douce mondiale est directement exploitable pour l'usage humain direct, ce qui accentue les enjeux liés à la gestion durable de cette ressource, particulièrement dans les régions arides comme l'Afrique du Nord.

À cela s'ajoute la problématique croissante du changement climatique, qui affecte non seulement la répartition géographique des ressources hydriques, mais aussi leur qualité. Les

sécheresses prolongées, l'augmentation de l'évaporation et la pollution des nappes phréatiques constituent des défis majeurs à la gestion de l'eau (FAO, 2020 ; IPCC, 2022).

1.2. Importance de l'eau pour les êtres vivants

L'eau est un élément vital pour tous les êtres vivants, puisqu'elle joue un rôle fondamental dans le maintien de la vie. Chez l'être humain, elle est essentielle à des fonctions biologiques telles que la nutrition, la respiration, la circulation sanguine, l'excrétion et la reproduction (Çepel, et Ergün, 2003). Elle sert de milieu de dissolution pour les nutriments facilitant le transport et la dissolution des vitamines et minéraux, contribue à la thermorégulation, soutient le fonctionnement des reins et protège les organes en servant d'amortisseur. De plus, elle assure l'hydratation cutanée, à l'élimination des toxines et à la métabolisation des nutriments en énergie. Environ 80 à 90 % du sang humain et 75 % des muscles sont composés d'eau (Pimentel, et *al.*, 2004).

Chez les végétaux, l'eau est absorbée au niveau des racines et participe activement à la transpiration végétale, participant ainsi au cycle hydrologique. A plus grande échelle, l'eau représente un habitat critique pour de nombreuses espèces animales et végétales, et favorise le maintien de la biodiversité dans les écosystèmes terrestres et aquatiques (Akin et Akin, 2007).

1.3. Répartition de l'eau sur la planète

La Terre contient environ 1386 milliards de kilomètres cubes (km³) d'eau. Cette quantité se répartit de manière très inégale : environ 97 % de cette eau se trouve dans les mers et les océans sous forme d'eau salée, impropre à la consommation directe, à l'usage domestique, industriel ou agricole. Seuls 3 % de l'eau terrestre correspondent à de l'eau douce. Parmi cette eau douce (United States Geological Survey, 2019) :

- 66,7 % sont stockés sous forme de glaciers, calottes polaires et neiges permanentes ;
- 30,1 % constituent les nappes phréatiques et eaux souterraines ;
- Seulement 0,3 % correspondent aux eaux de surface, présentes dans les lacs, rivières, zones humides (marécages, tourbières), directement accessibles ;
- Les 0,9 % restant se répartissent entre la vapeur d'eau, l'humidité du sol et une très faible proportion sous forme d'eau contenue dans la biomasse (plantes, animaux, micro-organismes).

Si toute l'eau terrestre était regroupée en une sphère, celle-ci aurait un diamètre d'environ 1385 km, soit un volume infime par rapport à celui de la Terre (**United States Geological Survey, 2019**).

Tableau 1 : Inventaire des réserves mondiales d'eau (Balasubramanian, 2015)

Réservoirs hydriques	Volume (millions de km ³)	Pourcentage du total	Taux de renouvellement (km ³ /an)
Océans et mers	1 370	94,19 %	452
Glaciers et calottes polaires	24	1,65 %	3
Eaux souterraines	60	4,12 %	12
Eaux de surface (lacs, rivières, marécages)	0,2812	0,019 %	39
Humidité du sol	0,083	0,0057 %	—
Vapeur atmosphérique	0,014	0,00096 %	—
Eau biologique (Biosphère)	0,0011	0,000075 %	—

Le temps de résidence de l'eau varie considérablement selon les compartiments hydrologiques :

- Très rapide pour l'eau atmosphérique (8 jours en moyenne),
- Rapide pour les eaux fluviales (16 jours),
- Intermédiaire pour les lacs (de quelques années à plusieurs décennies),
- Lent pour les nappes phréatiques (de plusieurs décennies à siècles),
- Exceptionnellement long pour les glaciers et aquifères profonds (jusqu'à plusieurs millénaires) (**Balasubramanian, 2015**).

Cette disparité s'explique par l'intensité variable des flux hydrologiques entre les différents réservoirs naturels.

À titre d'exemple, le volume d'eau qui s'évapore chaque année des océans équivaut à environ 30 fois le contenu de l'ensemble des rivières terrestres, illustrant l'intensité des échanges dans le cycle court de l'eau. Ces durées correspondent à des estimations moyennes - les temps de résidence réels peuvent varier localement en fonction des conditions climatiques et géologiques. Ces différences de dynamique apparaissent clairement lorsqu'on compare les

taux de renouvellement annuels (**Tableau 1**) de 452 km³/an pour les océans contre seulement 3 km³/an pour les glaciers.

1.4. Répartition de l'eau en Algérie

L'Algérie connaît une répartition spatiale et temporelle inégale de ses ressources en eau. En effet, 80 % des ressources hydriques se trouvent au nord du pays, dans les zones côtières et telliennes, qui ne représentent qu'environ 12 % de la superficie totale, tandis que les régions sahariennes, qui couvrent près de 80 % du territoire, ne disposent que de 20 % des ressources en eau (**ANRH, 2021**). Cette disparité régionale s'accroît sous l'effet combiné de plusieurs facteurs : la variabilité climatique, une pluviométrie généralement inférieure à 400 mm/an, et la surexploitation des nappes phréatiques, particulièrement dans les zones agricoles du sud. En matière d'origine des ressources, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement (environ 70 %), devant les eaux de surface qui sont majoritairement stockées dans des barrages (**ANBT, 2020**).

Cette situation pose d'importants défis pour la gestion durable des ressources hydriques, notamment :

- La nécessité d'une meilleure redistribution via des transferts d'eau entre régions.
- Le renforcement des infrastructures (dessalement, barrages, réseaux d'irrigation).
- La préservation des nappes phréatiques face à la surexploitation et à la salinisation.

2. Les différentes formes de l'eau

L'eau, ressource vitale mais inégalement répartie, représente un enjeu stratégique pour l'humanité. Dès l'Antiquité, cette importance a conduit à l'établissement des premières villes le long des cours d'eau, garantissant ainsi un approvisionnement constant (**Ngô & Régent, 2004**).

Si les besoins biologiques minimaux s'élèvent à environ 2,5 L d'eau par jour et par personne (**OMS, 2020**), la consommation réelle dans les sociétés industrialisées dépasse largement ce seuil, pouvant atteindre plusieurs centaines de litres quotidiennement par habitant lorsque l'on considère l'ensemble des usages (domestiques, agricoles et industriels).

Les réserves naturelles se présentent sous trois formes principales (**Degremont, 2005**) :

- Les eaux souterraines (issues de l'infiltration dans les nappes phréatiques) ;
- Les eaux de surface stagnantes (lacs, barrages, étangs) ;
- Les eaux courantes (rivières, fleuves).

2.1. Eau de surface

Les eaux de surface comprennent les eaux *lotiques* (en mouvement) : rivières, fleuves, ainsi que les eaux *lenticques* (stagnantes) : lacs naturels, étangs, retenues artificielles (barrages) (Boeglin, 2006). Elles peuvent résulter de l'émergence de nappes phréatiques sous forme de sources, ou bien du ruissellement pluvial (Cardot, 1999).

- Les cours d'eau sont caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère en mouvement permanent, ainsi qu'une vitesse d'écoulement variable (Boeglin, 2006).
- Les plans d'eau stagnants, qu'ils soient naturels ou artificiels, présentent quant à eux une faible agitation en surface, une profondeur parfois importante et un temps de résidence élevé de l'eau (Boeglin, 2006).

La composition chimique de ces eaux est influencée par la nature géologique des terrains traversés lors de leur parcours à travers le bassin versant (Monod, 1989 ; Boeglin, 2006 ; Habila, 2008). Ces eaux contiennent souvent une forte proportion de gaz dissous (O_2 , CO_2) (Cardot, 1999).

Les eaux superficielles présentent plusieurs caractéristiques spécifiques :

- De fortes variations saisonnières (et parfois journalières) de paramètres physiques tels que la température ($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), la turbidité (liée aux précipitations) et la coloration (matière organique dissoute).
- Des concentrations élevées en matières solides (10-500 mg/L), souvent sous forme colloïdale ou finement dispersées.
- Un développement significatif du phytoplancton (algues), du zooplancton, et plus généralement d'une vie aquatique active selon les conditions environnementales.
- La présence fréquente de matières organiques naturelles, issues de la décomposition des végétaux ou animaux morts.
- Une grande vulnérabilité à la pollution d'origine urbaine, industrielle ou agricole. Ces eaux sont souvent sujettes à des micropollutions minérales ou organiques, parfois toxiques, et contiennent également des substances azotées et phosphorées responsables de phénomènes d'eutrophisation (Boeglin, 2006).

En raison de cette fragilité, les eaux de surface sont généralement de qualité microbiologique et chimique inférieure. Elles sont souvent contaminées et nécessitent un traitement rigoureux avant tout usage domestique (**Drissi, 2008**).



Figure 1 : Eaux de surface (Decrouy, 2022)

2.2. Eau souterraine

Les eaux souterraines constituent la plus grande réserve d'eau douce liquide sur Terre, représentant environ 60 % des eaux continentales, jouant un rôle central dans le maintien du cycle hydrologique et le maintien des écosystèmes (**Shiklomanov, 1993 ; Roux, 1995**). Elles sont stockées dans :

- Formations poreuses (sables, grès).
- Roches fissurées (calcaires, basaltes).
- Systèmes karstiques (réseaux de dissolution).

Leur écoulement annuel est estimé à près de 12000 milliards de m³, soit environ 30 % du débit fluvial mondial. Le temps de renouvellement de ces ressources varie considérablement : il peut atteindre jusqu'à 5000 ans (aquifères fossiles), mais se réduit à 300 ans en moyenne pour les nappes superficielles les plus dynamiques (**Roux, 1995**). Ces eaux constituent la plus grande réserve d'eau douce liquide, utilisée non seulement pour l'approvisionnement en eau potable, mais aussi pour les usages agricoles, industriels et énergétiques (**Bensaoula et al., 2007**). Selon **Margat et van der Gun (2013)**, les eaux souterraines assurent plus de 50 % de l'eau potable mondiale et plus de 40 % des besoins en irrigation. Elles agissent comme tampon hydrique lors des sécheresses.

Le **Tableau 2** présente une typologie des systèmes aquifères mettant en évidence leur vulnérabilité différentielle aux anthropiques (**Custodio et Llamas, 1996**).

Tableau 2 : Typologie comparative des principaux systèmes aquifères et leurs caractéristiques hydrogéologiques

Type	Caractéristiques	Exemple
Libre	Niveau piézométrique variable, vulnérable à la pollution	Nappe de la Mitidja (Algérie)
Captive	Eau sous pression entre couches imperméables	Continental Intercalaire
Alluviale	Alimentation par les rivières, risque de salinisation	Vallée du Cheliff
Phréatique	Peu profonde, sensible aux sécheresses	Plaines côtières

Toutefois, leur sur exploitation, la pollution d'origine agricole (nitrates, pesticides) et industrielle (métaux lourds, hydrocarbures), ainsi que la salinisation, posent de sérieux défis à leur durabilité (UNESCO, 2022).

Selon le 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (IPCC, 2023), la recharge naturelle des nappes phréatiques en région méditerranéenne pourrait diminuer de 15 à 30 % d'ici 2050.



Figure 2 : Les eaux souterraines (Roussel, 2020)

2.3. Eau atmosphérique

L'eau atmosphérique, bien que ne représentant que 0,001 % du stock hydrique terrestre, joue un rôle pivot dans le cycle hydrologique. Principalement présente sous forme de vapeur d'eau, issue de l'évaporation des océans, des surfaces terrestres, de la transpiration des plantes et de la sublimation des glaces, elle circule dans l'atmosphère pendant environ 8 à 10 jours avant de se condenser. Cette condensation, qui survient lorsque l'air atteint 100 % d'humidité relative, donne naissance aux nuages, formés de fines gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace, et aux précipitations (pluie, neige, grêle, bruine, etc.) lorsque ces particules atteignent une taille

critique (**Panin, 1987**). La rosée et le givre sont d'autres manifestations de cette condensation au contact de surfaces froides. De plus, l'eau atmosphérique se matérialise également par un brouillard, qui correspond à une accumulation de très fines gouttelettes en suspension près du sol, et peut être dû à divers processus comme le refroidissement radiatif ou l'advection (**Bony, 2015**). Bien que ne représentant que 0,001 % de l'eau terrestre, l'eau atmosphérique est essentielle à la reconstitution des réserves d'eau douce, par les précipitations, et joue un rôle énergétique majeur dans l'atmosphère grâce à la libération de chaleur latente lors de la condensation (**Panin, 1986**).



Figure 3 : L'eau atmosphérique (Fuhrmann, 2020)

3. Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau sur Terre est estimé à environ 1,386 milliard de km³, dont 97,2 % sont contenus dans les océans (**USGS, 2023**). Cette eau participe à un cycle hydrologique permanent (**Duvignaud, 1980**). Ce processus continu permet à l'eau de changer d'état physique et de se déplacer à travers différents réservoirs naturels (**Touchart, 2003**). Il mobilise les grands compartiments du climat global : l'atmosphère, les océans, les sols, les eaux douces et la biosphère (**Drissi, 2008**). Ce cycle est également fortement influencé par les activités humaines, telles que la déforestation, l'urbanisation et le changement climatique, qui modifient les flux d'eau à l'échelle locale et globale (**Trenberth et al., 2011 ; UNESCO, 2021**).

3.1. Évapotranspiration

Ce processus, appelé évapotranspiration, désigne la combinaison d'évaporation depuis les surfaces hydriques et la transpiration végétale. Sous l'effet du rayonnement solaire (apportant ~2500 kJ/kg pour l'évaporation), plusieurs mécanismes entrent en jeu :

- Evaporation : depuis les océans (71 % du total), lacs et rivières.
- Transpiration : rejet de vapeur d'eau par les stomates des plantes (**Drissi, 2008 ; Boeglin, 2006**).

Ce processus représente environ 60-65 % du retour de l'eau vers l'atmosphère terrestre et joue un rôle climatique dans la régulation de la température et de l'humidité de l'air (**Oki & Kanae, 2006**).

En région méditerranéenne, l'évapotranspiration réelle atteint 1200 mm/an dans les zones forestières, contre 400 mm/an en milieu aride (**Drissi, 2008**).

3.2. Condensation

La vapeur d'eau atmosphérique se condense autour de noyaux de condensation (aérosols naturels ou anthropiques) lorsque la température atteint le point de rosée. Ce processus, crucial pour la formation des nuages, est influencé par la concentration en noyaux de condensation et les conditions atmosphériques (**Boeglin, 2006**). La condensation représente le passage critique entre l'état gazeux et liquide/solide dans le cycle hydrologique.

3.3. Précipitations

La vapeur d'eau atmosphérique se condense autour de noyaux de condensation (aérosols) pour former des nuages, donnant lieu à différents types de précipitations :

- Pluie : gouttes d'eau de diamètre $> 0,5$ mm.
- Neige : cristaux de glace hexagonaux.
- Grêle : particules de glace de diamètre > 5 mm.

Ces précipitations sont la principale source d'eau douce renouvelable (80% des apports naturels), bien que leur répartition soit fortement influencée par le climat (variations climatiques saisonnières) et le relief (effet orographique) (**Boeglin, 2006**). Selon les données du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (**IPCC, 2022**), les régimes de précipitations deviennent de plus en plus variables avec le réchauffement climatique (+7 % d'intensité des précipitations par °C de réchauffement), exacerbant les périodes de sécheresse dans certaines régions et augmentant les risques d'inondations dans d'autres. En Méditerranée, les modèles prévoient une réduction de 15-30 % des précipitations annuelles d'ici 2050, mais une augmentation de 40 % de l'intensité des épisodes pluvieux extrêmes (**MedECC, 2023**).

3.4. Ruissellement

Le ruissellement correspond à la fraction des précipitations (généralement 30-60 %) qui s'écoule en surface vers les réseaux hydrographiques (**Boeglin, 2006**). Ce processus hydrologique est influencé par la nature des sols, le type de couverture végétale, et le degré d'urbanisation, qui peut amplifier les risques d'inondation et de pollution des eaux de surface (**Falkenmark & Rockström, 2004**).

3.5. Infiltration

L'infiltration désigne le processus par lequel une fraction des précipitations (typiquement 5-40 %) pénètre dans le sol sous l'effet de la gravité et des forces capillaires. Ce mécanisme obéit à la loi de Darcy, avec une vitesse variable selon : la texture du sol, la pente topographique et l'humidité initiale.

Ce processus joue un rôle crucial dans la régénération des écosystèmes terrestres. Il permet de réhydrater les sols et d'alimenter les nappes phréatiques ainsi que les rivières souterraines (**Geny et al., 1992 ; Boeglin, 2006**). Cette étape est essentielle pour la recharge des aquifères, qui fournissent 30 % de l'eau potable mondiale (**Margat & Van der Gun, 2013**).

Dans le Sahara algérien, l'infiltration ne dépasse pas 2 % des précipitations (soit < 5 mm/an), contre 25 % dans l'Atlas tellien (**ANRH, 2023**).

La **Figure 4**, illustre les principales étapes de ce cycle, mettant en évidence les échanges dynamiques entre les différents compartiments (eaux de surface, eaux souterraines, nuages, etc.).

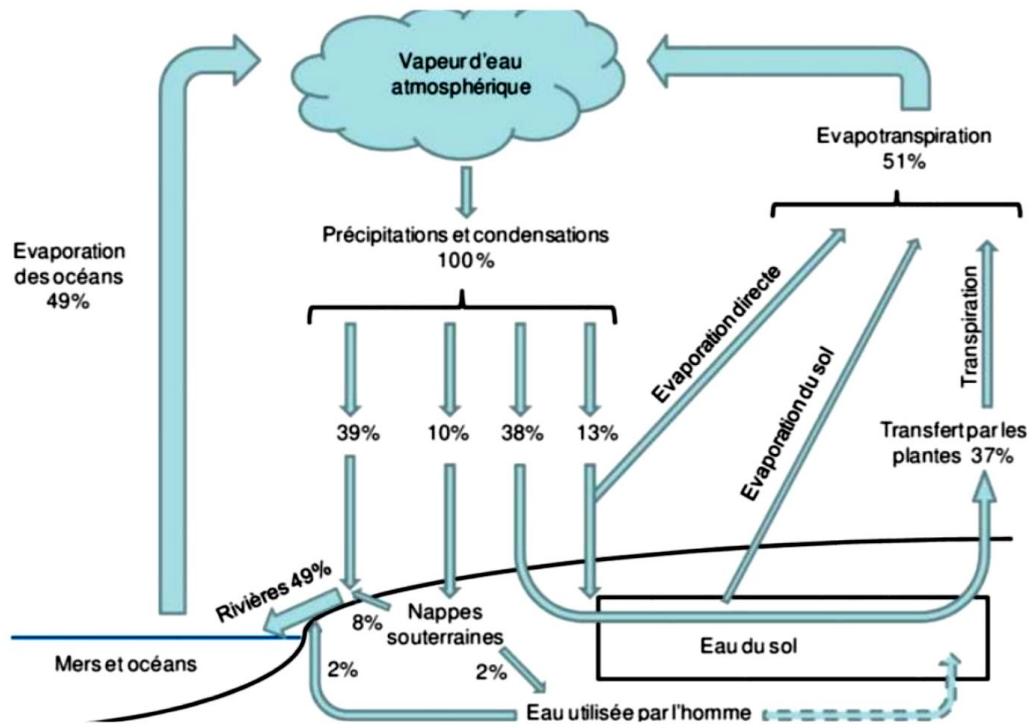


Figure 4 : Cycle hydrologique de l'eau (Juery, 2002)

4. Normes de qualité de l'eau et potabilité

Une eau est considérée potable lorsqu'elle est destinée à la consommation humaine et répond à des exigences strictes de qualité, tant sur le plan organoleptique, physico-chimique que bactériologique, garantissant l'absence de risque sanitaire (OMS, 2022). Pour être qualifiée de potable, une eau doit satisfaire aux critères suivants :

4.1. Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques concernent les caractéristiques sensorielles de l'eau telles que la couleur, le goût, l'odeur et la turbidité, qui influencent directement son acceptabilité par les consommateurs. Bien que ces paramètres ne posent généralement pas de risques sanitaires directs, ils peuvent révéler la présence de contaminants chimiques ou microbiologiques, ou encore un traitement inadéquat (WHO, 2022).

Une eau potable doit ainsi être claire, inodore et sans goût particulier. Toute anomalie perceptible peut provoquer une méfiance du public, voire un refus de consommation (Bartram & Ballance, 1996).

4.1.1. Couleur

La couleur de l'eau peut être apparente (visible à l'œil nu) ou vraie (liée uniquement aux substances dissoutes, après filtration). Elle est généralement exprimée en unités de platine-cobalt (UPC) selon l'échelle de Hazen. Une couleur anormale est souvent liée à la présence de matières organiques naturelles (acides humiques), de fer, manganèse, ou à des effluents industriels ou domestiques (**Rodier, 2009**).

Selon l'**OMS (2022)**, la couleur ne devrait pas excéder 15 UPC pour une eau destinée à la consommation humaine, bien qu'une valeur inférieure à 5 UPC soit préférable pour une acceptabilité optimale.

4.1.2. Gout et odeurs

Le goût et l'odeur de l'eau sont des indicateurs sensibles de qualité, mais souvent subjectifs. Ils peuvent être causés par (**Dieter et al., 2018**) :

- Des **substances naturelles** (algues, matières organiques) ;
- Des **composés chlorés** utilisés pour la désinfection ;
- Des **contaminants chimiques** (phénols, hydrocarbures, solvants) ;
- Ou des **activités microbiennes** dans les conduites ou les réservoirs.

Les compounds responsables (tels que le géosmine ou le 2-MIB produits par les cyanobactéries) sont détectés par l'humain à des concentrations extrêmement faibles (ng/L), ce qui rend la surveillance et le traitement essentiels. L'**OMS (2022)** souligne qu'une eau doit être sans goût ni odeur détectable à température ambiante, bien que certaines odeurs minérales ou chlorées soient parfois tolérées si elles sont faibles et connues.

4.1.3. Turbidité

La turbidité représente une mesure optique de la diminution de transparence d'un liquide causée par la présence de particules en suspension (argiles, limons, phytoplancton, débris organiques) et de colloïdes (particules de 0,001 à 1 μm comme les matières humiques, oxydes métalliques). Ce phénomène résulte principalement de la diffusion de la lumière par ces particules, obéissant à deux lois physiques distinctes :

Loi de Rayleigh (pour particules $< \lambda/10$) – diffusion prédominante pour les petites particules.

Loi de Mie (pour particules $> \lambda/10$) – applicable aux particules plus grosses.

Les sources de turbidité sont variées et présentent des niveaux caractéristiques différents. L'érosion des sols après des épisodes pluvieux (10-500 NTU après pluie), ruissellement agricole (5-50 NTU), rejets d'eaux usées domestiques (50-300 NTU) et certains rejets industriels riches en matières solides (jusqu'à 1000 NTU) (Derwiche et *al.*, 2010).

4.2. Paramètres physico-chimiques

4.2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH (potentiel hydrogène) est un paramètre fondamental qui mesure l'activité des ions hydrogène (H^+) dans une solution, selon la relation : $pH = -\log [H^+]$, Où $[H^+]$ représente la concentration (ou activité) des ions hydrogène (en mol/L). Ce paramètre influence directement les équilibres physico-chimiques et interagit avec d'autres facteurs essentiels comme la dureté, l'alcalinité et la température.

En milieu naturel, le pH de l'eau présente des variations significatives selon les caractéristiques géologiques des sols traversés. Comme le montre le Tableau, on distingue trois plages de pH caractéristiques avec des impacts spécifiques sur la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques. La plage optimale se situe généralement entre 6,5 et 8,5, mais peut varier de 4 à 10 dans des conditions naturelles extrêmes.

Tableau 3 : Classification des eaux naturelles selon leur pH et impacts associés (OMS, 2017 ; US EPA, 2018)

Plage de pH	Type d'eau	Caractéristiques principales
0-6,5	Eau acide (riches en CO_2 dissous)	Augmentation de la solubilité des métaux lourds (Pb, Cd, Al) et toxicité accrue pour la faune.
6,5-8,5	Eau naturelle (plage optimale)	Conditions optimales pour la vie aquatique (biodiversité préservée, bon équilibre chimique).
8,5-14	Eau alcaline (présence de carbonate/ bicarbonates)	Conversion des ammoniums (NH_4^+) en ammoniac (NH_3) toxique et précipitation des carbonates.

Un pH faible (acide) favorise particulièrement la solubilisation des métaux sous des formes ioniques, souvent plus toxiques pour les écosystèmes aquatiques. A l'inverse, un pH

élevé (basique) augmente les concentrations en ammoniac (NH_3), une substance particulièrement nocive pour les organismes aquatiques, notamment les poissons (**Degremont, 2005**). Cette sensibilité des espèces aquatiques aux variations de pH explique pourquoi ce paramètre est considéré comme crucial dans les études de qualité des eaux et les réglementations environnementales (**OMS, 2017 ; US EPA, 2018**).

4.2.2. Température

La température de l'eau est un paramètre physico-chimique essentiel qui influence directement la solubilité des sels et des gaz ($\downarrow$ 10% pour O_2 par $+1^\circ\text{C}$). Elle joue également dans la cinétique des réactions chimiques et biochimiques : celles-ci voient leur taux augmenter d'un facteur 2 à 3 pour toute élévation de 10°C . Une hausse de la température stimule en outre l'activité métabolique ($+15\%$ d'activité enzymatique par $+1^\circ\text{C}$) des organismes aquatiques. Ce paramètre dépend principalement de la température ambiante, mais peut aussi être perturbé par des rejets d'eaux résiduaires chaudes, notamment d'origine industrielle (**Dali et Bentaleb, 2005**).

4.2.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, propriété directement proportionnelle à sa concentration en ions dissous tels que Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} . Bien que l'eau pure soit naturellement peu conductrice en raison de sa faible teneur ionique, la présence de ces électrolytes accroît significativement sa conductivité. Cette propriété s'exprime généralement en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou milli-siemens par centimètre (mS/cm) (**Rodier, 1996**).

La mesure de la CE requiert une sonde immergée dans le milieu à analyser. Après une légère agitation et un temps de stabilisation d'environ 30 secondes, la lecture peut être effectuée. Il est recommandé de rincer la sonde à l'eau déminéralisée après chaque utilisation pour garantir la fiabilité des mesures ultérieures (**Agrigon, 2000**). La CE constitue un excellent indicateur de la minéralisation globale de l'eau, mais varie sensiblement avec la température (augmentation de 2 à 3 %), la concentration ionique et la nature spécifique des ions présents (**Rodier, 1996**).

4.2.4. Dureté totale (TH)

La dureté totale de l'eau correspond à la concentration en cations divalents, principalement calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). Elle est généralement exprimée en $^\circ\text{F}$ (degré français) ou en mg/L d'équivalent CaCO_3 . On distingue :

- Eaux très douces : $< 7^{\circ}\text{F}$ ($< 70\text{ mg/L}$),
- Eaux douces à moyennement dures : $7 - 20^{\circ}\text{F}$ ($70 - 200\text{ mg/L}$),
- Eaux dures à très dures : $> 20^{\circ}\text{F}$ ($> 200\text{ mg/L}$).

La dureté affecte les propriétés physico-chimiques de l'eau, comme la formation de tartre ou le pouvoir moussant des détergents. Elle influence également le métabolisme des organismes aquatiques, certains étant adaptés à des milieux très calcaires, d'autres préférant les eaux douces (**Degremont, 2005**).

4.2.5. Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates, généralement présents sous forme de sels de calcium ou de magnésium, constituent un paramètre important de la qualité des eaux. À fortes concentrations, ils peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux, particulièrement chez les populations sensibles comme les enfants, et altérer significativement le goût de l'eau. Les normes internationales, notamment celles de l'OMS, établissent un seuil maximal recommandé de 400 mg/L au-delà duquel l'eau est considérée comme impropre à la consommation (**Gasmi et Refice, 2020**). Leur présence dans les eaux naturelles résulte principalement de la dissolution des roches sédimentaires, mais peut également provenir de rejets industriels ou de processus d'oxydation de sulfures (**Appelo et Postma, 2005**). Leur surveillance est donc essentielle pour garantir la qualité sanitaire des ressources en eau (**Hem, 1985**).

4.2.6. Fer (Fe^{2+})

Le fer est un élément abondant dans les eaux souterraines, représentant 4,5 à 5 % de la composition de la croûte terrestre. Sa présence dans les eaux naturelles est principalement due au lessivage des formations géologiques, mais peut également résulter de rejets industriels ou de la corrosion des conduites métalliques. Dans le cadre de la production d'eau potable, la teneur maximale recommandée en fer est fixée à $0,3\text{ mg/L}$, seuil au-delà duquel des problèmes de coloration et de goût peuvent apparaître (**Potelon et Zysman, 1998**). Cette limite permet également de prévenir les dépôts dans les réseaux de distribution et les appareils domestiques.

4.2.7. Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés oxydés de l'azote (degré d'oxydation +V), caractérisés par une solubilité élevée dans l'eau ($> 500\text{ g/L}$ à 20°C). Ils sont largement utilisés dans :

- L'industrie chimique (fabrication d'explosifs).

- L'agriculture comme engrais agricoles (75 % de la production mondiale sert d'engrais),
- L'agroalimentaire (additifs E251-E252) (Savary, 2010).

Dans les eaux non polluées, leur concentration naturelle reste généralement inférieure à 3 mg/L. Cependant, sous l'effet des activités humaines (ruissellement agricole, rejets domestiques et industriels), certaines eaux souterraines dépassent la norme OMS de 50 mg/L (Molénat et al, 2011).

Les nitrates proviennent principalement de :

- La nitrification des matières organiques azotées,
- L'épandage excessif d'engrais,
- Les eaux usées non traitées.

Une fois ingérés, ils peuvent se réduire en nitrites (NO_2^-), composés toxiques responsable : de la méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu), ou la méthémoglobine forme incapable de transporter l'oxygène, d'un risque accru chez les nourrissons (seuil critique : $> 10 \text{ mg/L}$) (Rieu, 1981 ; Baza, 2006 ; OMS, 2022).

4.2.8. Alcalinité

L'alcalinité correspond à la capacité d'une eau à neutraliser les acides grâce à la présence de trois espèces basiques principales dont la prédominance varie en fonction du pH :

Tableau 4 : Espèces chimiques responsables de l'alcalinité selon le pH

Espèce chimique	Formule	Domaine de prédominance (pH)
Hydroxydes	OH^-	$>10,3$
Carbonates	CO_3^{2-}	8,3 - 10,3
Hydrogénocarbonates	HCO_3^-	4,5 - 8,3

Contrairement à l'acidité qui mesure la concentration en ions H^+ , l'alcalinité traduit la capacité de neutralisation de ces ions par les bases faibles présentes dans l'eau. On distingue principalement deux types d'alcalinité :

- Alcalinité totale ($\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$)
- Alcalinité composite ($\text{TA} = [\text{OH}^-] + \frac{1}{2}[\text{CO}_3^{2-}]$).

Bien qu'aucune norme française ou européenne ne fixe de limite réglementaire, l'alcalinité reste un paramètre essentiel car elle influence directement le caractère agressif ou incrustant de l'eau (**Al-Rawajfeh, A et Al-Shamaileh, 2007**).

4.2.9. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures, principalement présents sous forme de sels de sodium (NaCl), potassium (KCl) et calcium (CaCl₂), sont des anions abondants dans les milieux aquatiques. Leur concentration varie considérablement selon les environnements : très élevée dans l'eau de mer (environ 19 g/L), elle est nettement plus faible dans les eaux de pluie (environ 3 mg/L). Ces composés, bien qu'inodores et incolores, confèrent un goût salé perceptible à partir de concentration élevée. Dans les eaux naturelles, leur teneur dépend principalement de la nature géologique des terrains traversés (**Ayad, 2016**). L'étude des chlorures revêt une importance particulière en hydrochimie, notamment pour évaluer les intrusions salines ou les contaminations anthropiques (**Chelli et al., 2013**).

4.2.10. Résidus secs (R.S)

Les résidus secs représentent un paramètre fondamental pour évaluer la minéralisation globale d'une eau. Lors de son parcours à travers les différents terrains géologiques, l'eau se charge progressivement en sels minéraux par dissolution des roches et des sols. La mesure des résidus secs consiste à évaporer un litre d'eau à une température standardisée de 180°C, puis à peser les sels minéraux restants après élimination complète de l'eau. Cette méthode normalisée permet d'obtenir une estimation quantitative de la charge minérale totale dissoute.

Selon la classification établie par **Rodier et al. (1996)**, les eaux peuvent être catégorisées en fonction de leur degré de minéralisation. Les eaux très faiblement minéralisées présentent des résidus secs inférieurs à 50 mg/L et sont typiquement rencontrées dans les zones granitiques ou les eaux de fonte glaciaire. Les eaux faiblement minéralisées, dont les résidus secs se situent entre 50 et 500 mg/L, correspondent généralement aux eaux de source ou aux eaux de surface peu chargées. La catégorie des eaux moyennement minéralisées (500 à 1500 mg/L) regroupe la majorité des eaux souterraines des bassins sédimentaires. Enfin, les eaux fortement minéralisées, avec des résidus secs excédant 1500 mg/L, sont caractéristiques des eaux thermales ou des environnements géologiques particuliers comme les formations évaporitiques. Bien qu'aucune norme stricte ne fixe de limites réglementaires pour les résidus secs, ce paramètre reste un indicateur essentiel pour évaluer le caractère agressif ou incrustant d'une eau, ainsi que son adéquation à différents usages domestiques ou industriels (**Al-Rawajfeh et**

Al-Shamaileh, 2007). La mesure des résidus secs s'intègre ainsi dans une approche globale de caractérisation de la qualité physico-chimique des eaux naturelles.

4.2.11. Total des solides dessous (TDS)

Le total des solides dissous (TDS) représente la concentration totale de toutes les substances organiques et inorganiques dissoutes dans l'eau, généralement exprimée en mg/L ou en ppm (parties par million). Il inclut principalement des ions minéraux (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, bicarbonates) ainsi que des petites molécules organiques (telles que les acides fulviques ou les acides humiques) (**Hem, 1985 ; Sawyer et al., 2003**).

Le TDS est un indicateur clé de la qualité physico-chimique de l'eau : une eau à faible TDS est considérée comme douce ou faiblement minéralisée, tandis qu'un TDS élevé peut indiquer une pollution ou une minéralisation excessive, souvent due à des infiltrations de sels, des apports agricoles (engrais), ou des rejets industriels (**EPA, 2018**).

Le TDS est étroitement lié à la conductivité électrique : plus il y a de substances dissoutes, plus l'eau est conductrice. Cependant, le TDS donne une mesure plus globale de la charge totale en matières dissoutes, tandis que la conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire l'électricité (**Appelo & Postma, 2005**).

Selon les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la limite acceptable de TDS dans l'eau potable est de 1000 mg/L, bien que pour des raisons esthétiques et organoleptiques (goût, odeur), un seuil inférieur à 500 mg/L soit recommandé (**OMS, 2017**).

4.2.12. Salinité (SAL)

La salinité désigne la concentration totale des sels dissous dans l'eau, exprimée en grammes par litre (g/L) ou en parties par mille (‰). Dans les milieux naturels, elle varie largement : inférieure à 0,5 g/L dans les eaux douces, elle dépasse 35 g/L dans les eaux marines. Elle dépend essentiellement de la géologie locale, des apports anthropiques (eaux usées, engrais) et de l'évaporation (**Hem, 1985**).

La salinité influence la conductivité électrique, la flottabilité, ainsi que la répartition des espèces aquatiques : certaines, dites euryhalines, tolèrent de larges variations, tandis que d'autres y sont très sensibles. Une salinité anormalement élevée dans les eaux souterraines peut indiquer une intrusion marine ou une pollution saline (**Appelo & Postma, 2005**).

4.2.13. D'autres paramètres

Il y a aussi d'autres paramètres physico-chimiques essentiels à surveiller pour évaluer la qualité de l'eau, notamment l'oxygène dissous (OD), les nitrites (NO_2^-), l'ammonium (NH_4^+), le sodium, le potassium et le manganèse. L'oxygène dissous représente la concentration d'oxygène gazeux (O_2) en solution dans l'eau, essentiel pour le maintien de la vie aquatique, notamment chez les espèces aérobies comme les poissons, macroinvertébrés et micro-organismes décomposeurs. Sa solubilité est influencée par la température, la pression atmosphérique, la salinité et la photosynthèse (**Rodier, 1996**), et une concentration inférieure à 5 mg/L est considérée critique pour la faune aquatique, tandis que des valeurs < 2 mg/L sont dites hypoxiques (**Wetzel, 2001 ; OMS, 2017**). Une désoxygénation peut être provoquée par une forte charge organique consommée par les bactéries (**Demars et al., 2015**). Les nitrites, produits intermédiaires de la nitrification ou de la dénitrification, sont des indicateurs sensibles de pollution récente et signalent un déséquilibre du cycle de l'azote. Très toxiques pour les organismes aquatiques et l'être humain, ils peuvent provoquer la méthémoglobinémie, notamment chez les nourrissons ; l'OMS fixe leur concentration maximale dans l'eau potable à 0,2 mg/L (**Rodier, 1996 ; Camargo & Alonso, 2006 ; OMS, 2017**). L'ammonium, issu de la dégradation des matières organiques azotées ou des rejets anthropiques, est un marqueur de pollution récente ; il devient plus toxique à pH élevé car il se transforme en ammoniac libre (NH_3), toxique pour les poissons. L'OMS recommande une limite de 0,5 mg/L dans l'eau potable (**Rodier, 1996 ; OMS, 2022**). Le sodium et le potassium sont naturellement présents dans les eaux, avec des concentrations variables selon le contexte géologique. Bien que le sodium soit généralement inoffensif, sa consommation excessive peut poser problème aux personnes hypertendues. Le potassium, présent dans les eaux naturelles à des niveaux de 10 à 15 mg/L, ne représente généralement pas de danger, son seuil de perception gustative étant estimé à 40 mg/L (**Hoffmann et al., 2014**). Le manganèse, élément métallique courant, peut se retrouver sous forme dissoute ou particulaire. Au-delà de 0,02 mg/L, il altère la qualité organoleptique de l'eau et peut causer des taches sur les textiles et les installations domestiques (**Rodier et al., 1996**). La conformité de ces différents paramètres ne signifie pas l'absence totale de polluants, mais indique que leurs concentrations demeurent en dessous des seuils de dangerosité (**Maiga, 2005 ; US EPA, 2023**).

4.3. Paramètres bactériologiques

Les paramètres bactériologiques constituent des indicateurs essentiels pour évaluer la qualité sanitaire des eaux et les risques pour la santé publique. Ces analyses permettent de détecter la présence de micro-organismes pathogènes ou indicateurs de contamination fécale, fournissant ainsi des informations cruciales sur la potabilité de l'eau (Omer, 2020).

4.3.1. Bactéries coliformes totales

Les bactéries coliformes totales, bien que non nécessairement pathogènes, servent d'indicateurs généraux de la qualité microbiologique de l'eau. Présentes dans l'environnement (sol, végétation) et les intestins des animaux, leur détection signale une possible contamination par des agents pathogènes. Les normes actuelles, comme la Directive UE 2020, exigent leur absence dans 100 mL d'eau potable (APHA, 2017).

4.3.2. *Escherichia coli* (*E. coli*)

Escherichia coli (Figure 5), un coliforme fécal spécifique, représente un marqueur plus précis de contamination fécale récente. Sa présence dans l'eau, détectable par des méthodes rapides comme le test Colilert®, indique un risque potentiel de pathogènes entériques. Les coliformes thermotolérants, capables de se développer à 44,5 °C, confirment cette contamination fécale et permettent d'évaluer l'efficacité des traitements de l'eau (Tchobanoglous et al., 2003).



Figure 5 : *E. coli* (Ntumba et McCartney, 2023)

4.3.3. Coliformes fécaux (ou thermotolérants)

Les coliformes fécaux (Figure 6), également appelés coliformes thermotolérants, incluant *Escherichia coli*, sont des bactéries capables de se multiplier à une température de

44,5 °C. Leur présence dans l'eau indique une contamination d'origine fécale, ce qui en fait un indicateur essentiel pour évaluer la qualité microbiologique de l'eau. Ce paramètre est particulièrement important pour contrôler l'efficacité des traitements appliqués aux eaux potables ou aux eaux usées (Nathanson, 2004).



Figure 6 : Coliformes fécaux (Monreseaudeau, 2022)

4.3.4. Entérocoques intestinaux (streptocoques fécaux)

Les entérocoques (**Figure 7**) sont également indicateurs de contamination fécale. Ils survivent plus longtemps que les coliformes dans des environnements hostiles (eau salée, températures extrêmes), ce qui en fait des indicateurs complémentaires précieux, notamment en eau de mer ou dans les sols (Mara, et Horan, 2003 ; Wiesmann, et *al.*, 2007). Leur détection est particulièrement utile pour le contrôle des eaux de baignade, avec un seuil recommandé inférieur à 50 UFC/100 mL par l'EPA (2022).



Figure 7 : Les entérocoques (Zimmermann, 2024)

4.3.5. *Clostridium perfringens*

Clostridium perfringens, par ses spores résistantes aux désinfectants conventionnels, sert d'indicateur de pollution fécale ancienne. Sa recherche est particulièrement pertinente pour les eaux ayant subi un traitement ou un stockage prolongé. Les bactéries hétérotrophes, bien que généralement non pathogènes, renseignent sur la charge organique globale et le potentiel de formation de biofilms dans les réseaux de distribution (Nathanson, 2004).

4.3.6. Bactéries hétérotrophes (BHP)

Les bactéries hétérotrophes sont des micro-organismes non spécifiques qui utilisent la matière organique dissoute comme source de carbone et d'énergie. Bien qu'elles ne soient pas pathogènes, leur dénombrement donne une idée du niveau de contamination organique de l'eau et de la charge microbienne globale. Leur croissance est favorisée par la température, le pH et la présence de nutriments. (Tchobanoglous et al., 2003 ; Nathanson, 2004).

4.3.7. *Salmonelles* et *Shigelles*

Enfin, la recherche spécifique de pathogènes comme *Salmonella* (Figure 8) et *Shigella*, bien que moins systématique, reste cruciale pour prévenir les risques épidémiques. Les méthodes moléculaires modernes (PCR) permettent désormais leur détection avec une sensibilité accrue (1-10 cellules/L), offrant une meilleure protection contre les maladies hydriques (Tchobanoglous et al., 1985).

Cette approche intégrée des paramètres bactériologiques, combinant indicateurs classiques et techniques analytiques avancées, constitue la base des évaluations modernes de la qualité microbiologique des eaux. Les normes actuelles, comme celles de l'OMS (2021), s'appuient sur ces différents marqueurs pour établir des seuils de sécurité adaptés aux divers usages de l'eau.



Figure 8: *Salmonelles* (Do O'Gomes, 2022)

4.4. Cadre réglementaire international et national

La qualité des eaux destinées à la consommation humaine fait l'objet d'une réglementation rigoureuse aux niveaux international et national. Les normes établies par l'OMS (2022) servent de référence mondiale, mais chaque pays les adapte en fonction de ses particularités géologiques, sanitaires et socio-économiques. En Algérie, le cadre réglementaire défini par le Journal Officiel de la République Algérienne (**JORA, 2011**) impose le contrôle de 41 paramètres qualité, couvrant l'ensemble des aspects sanitaires et organoleptiques (**Alouane, 2012 ; OMS, 2022**).

La notion de potabilité implique non pas une absence totale de substances indésirables, mais leur maintien en dessous de seuils garantissant l'innocuité sanitaire à court et long terme. Cette approche repose sur des évaluations toxicologiques rigoureuses et des facteurs de sécurité importants.

Des écarts significatifs existent entre les normes internationales et les réglementations nationales (**Tableau 5**). À titre d'exemple, la réglementation algérienne autorise une teneur en chlorures plus élevée (500 mg/L contre 250 mg/L recommandés par l'OMS), tout en étant plus exigeante concernant la turbidité (<2 NTU contre <2,5 NTU selon l'OMS). Ces différences reflètent une nécessaire adaptation aux contextes locaux, aux spécificités des ressources en eau et aux capacités techniques des systèmes de traitement nationaux.

Tableau 5 : Normes de qualité physico-chimique de l'eau potable selon les normes Algériennes et OMS

Paramètre	Unité	Normes Algérienne	Normes OMS
pH	Unité pH	6,5 - 8,5	9
Température	°C	25	25
Conductivité	µS/cm	2800	2100
Résidu sec	mg/L	2000	1500
Turbidité	NTU	2	2,5
Dureté totale (TH)	mg/L	500	500
Calcium	mg/L	200	270
Magnésium	mg/L	150	50
Sodium	mg/L	200	150
Potassium	mg/L	20	20
Sulfate	mg/L	400	400
Chlorure	mg/L	500	250
Nitrate	mg/L	50	50
Nitrite	mg/L	0,1	0,1
Aluminium	mg/L	0,2	0,2
Phosphate	mg/L	0,5	0,5
Ammonium	mg/L	0,5	0,5
Matières organiques	mg/L	3	-
Métaux lourds	mg/L	0,3	-
Fer	mg/L	0,3	0,3
Manganèse	mg/L	0,5	0,4

La qualité bactériologique de l'eau destinée à la consommation humaine est un critère essentiel pour la santé publique. La présence de micro-organismes pathogènes ou indicateurs d'une contamination fécale peut entraîner de graves risques sanitaires. Ainsi, des normes strictes ont été établies par des organismes internationaux comme l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et reprises par les normes nationales, afin de garantir une eau potable exempte de tout danger microbiologique.

Tableau 6 : Les normes bactériologiques de l'eau selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes algériennes (NA 6368)

Paramètre microbiologique	Unité	Norme OMS / Algérienne
Coliformes totaux	UFC / 100 mL	0 (absence)
<i>Escherichia coli</i> (E. coli)	UFC / 100 mL	0 (absence)
Entérocoques intestinaux	UFC / 100 mL	0 (absence)
<i>Clostridium perfringens</i> (spores)	UFC / 100 mL	0 (absence)
Bactéries aérobies mésophiles à 22°C	UFC / mL	≤ 100
Bactéries aérobies mésophiles à 37°C	UFC / mL	≤ 20
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	UFC / 100 mL	0 (absence)
<i>Legionella</i> spp.	UFC / L	≤ 1000 (pour eaux sanitaires chaudes)
Coliformes fécaux (thermotolérants)	UFC / 100 mL	0 (absence)

5. Principales sources anthropiques de pollution des eaux souterraines

La dégradation de la qualité des eaux souterraines est en grande partie attribuée aux activités humaines. Plusieurs sources anthropiques sont identifiées comme responsables majeures de cette contamination, affectant à la fois la salubrité de l'eau et la santé publique (Howard et al., 2003).

5.1. Assainissement domestique inadéquat

Dans de nombreuses zones rurales ou périurbaines des pays en développement, l'absence ou l'inefficacité des réseaux d'égouts entraîne le recours à des fosses septiques, des latrines rudimentaires ou non étanches. Ces systèmes, souvent mal conçus ou mal entretenus, laissent s'infiltrer dans le sol des eaux usées riches en nitrates, bactéries fécales (*Escherichia coli*, entérocoques) et autres contaminants biologiques. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les zones où la nappe phréatique est peu profonde, facilitant ainsi la contamination directe des aquifères (Ojo et al., 1992 ; Howard et al., 2003).

5.2. Rejets industriels non contrôlés

Les effluents liquides issus des activités industrielles comme les tanneries, les aciéries, les usines chimiques constituent une source majeure de pollution des eaux souterraines,

notamment lorsqu'ils sont déversés sans traitement préalable. Ces rejets contiennent souvent des métaux lourds (Plomb, Cadmium, Chrome), des solvants organiques et des hydrocarbures qui, en raison de leur toxicité et de leur persistance dans l'environnement, menacent durablement la qualité des nappes phréatiques. De tels cas ont été documentés dans la région industrielle de Sétif (Algérie) ou le bassin du Gange en Inde (**Chapman, 1992 ; Lapworth et al., 2012**).

5.3. Agriculture intensive

L'agriculture moderne, orientée vers une productivité élevée, utilise massivement des engrais azotés et des pesticides. Dans des régions telles que le bassin parisien, le Midwest américain ou la plaine de la Mitidja (Algérie), ces intrants agricoles sont facilement lixiviés vers le sous-sol, en particulier en période de pluies abondantes ou sur des sols perméables. Les nappes phréatiques se retrouvent alors contaminées par des nitrates, des phosphates et divers produits phytosanitaires, certains étant suspectés d'être perturbateurs endocriniens ou cancérogènes (**Todd, 1980 ; Shah et al., 2007**).

5.4. Élevage intensif et abattoirs

Les exploitations agricoles intensives, qu'il s'agisse d'élevages avicoles, porcins ou bovins, génèrent d'importants volumes de déjections animales. Celles-ci, souvent épandues sans traitement sur les sols, peuvent ruisseler vers les eaux souterraines, transportant des agents pathogènes fécaux (coliformes, *Salmonella* spp.), de l'ammonium et des charges élevées de matière organique. Ces rejets organiques non maîtrisés favorisent la pollution microbiologique des aquifères, comme observé dans certaines régions d'élevage intensif en Bretagne (France) ou au Brésil (**Sangodoyin, 1993 ; Gerba & Smith, 2005**).

5.5. Réservoirs et infrastructures souterraines défaillantes

Les infrastructures souterraines, telles que les cuves de stockage de carburants ou les réseaux de canalisations vétustes, représentent également une source silencieuse mais significative de pollution. Les fuites provenant de ces installations, souvent dues à la corrosion ou à un mauvais entretien, libèrent dans les sols des hydrocarbures aromatiques (comme le benzène ou le xylène) et des solvants chlorés, très mobiles et toxiques même à faibles concentrations. Ces contaminations sont fréquentes dans les anciennes stations-service, les bases militaires abandonnées ou les zones industrielles mal régulées (**Foster, 2000 ; Rivett et al., 2008**).

6. Impacts de la pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines a de multiples répercussions sur la santé humaine, l'environnement et l'économie :

- **Impacts sanitaires** : La consommation d'eau contaminée par des nitrates (supérieurs à 50 mg/L) est associée au syndrome du bébé bleu (méthémoglobinémie) chez les nourrissons. Les bactéries pathogènes peuvent provoquer des gastro-entérites, voire des épidémies (WHO, 2017).
- **Impacts écologiques** : Les nitrates et phosphates qui rejoignent les nappes peuvent également émerger dans les zones humides et les rivières, favorisant l'eutrophisation et perturbant les écosystèmes aquatiques (European Environment Agency, 2018).
- **Impacts économiques** : La décontamination des nappes est coûteuse, parfois techniquement irréalisable. L'agriculture et les usages domestiques sont affectés, obligeant au recours à des sources d'eau alternatives ou à la mise en place de traitements coûteux (UNESCO, 2022).

7. Traitement de l'eau

Les bioréacteurs sont utilisés depuis plus d'un siècle dans le traitement des eaux usées. Ils peuvent contenir des microorganismes libres (boues activées) ou fixés (biofilms). Toutefois, ces procédés ne permettent pas d'éliminer les sels dissous, ce qui est problématique pour les industries comme le textile (Wang et al., 2018).

7.1. Traitement des gaz dissous

L'aération oxyde les gaz indésirables comme l'hydrogène sulfuré (H_2S), qui est converti en sulfate ou en soufre solide. Le méthane, bien que non toxique, est éliminé par ventilation, car il peut provoquer l'asphyxie ou des explosions (EPA, 2020).

7.2. Filtres au charbon actif

Les filtres à charbon actif sont efficaces pour éliminer de faibles concentrations de H_2S par adsorption. Toutefois, ces filtres doivent être remplacés régulièrement pour maintenir leur efficacité (WHO, 2011).

7.3. Échange d'ions pour les nitrates

La dénitrification par échange d'ions est une méthode efficace pour réduire les nitrates dans les petites installations. Les résines utilisées sont souvent plus sélectives pour les sulfates, et la gestion des saumures rejetées reste un défi écologique (Ghaly et *al.*, 2011).

7.4. Adoucissement et désinfection

L'adoucissement de l'eau consiste à réduire sa dureté (teneur en calcium et magnésium). La désinfection UV permet de détruire les agents microbiens, tout comme le système d'osmose inverse, qui élimine aussi les sels et les contaminants organiques (MWH, 2005).

7.5. Chloration et fluoration

La pré-chloration est utilisée pour oxyder le H_2S , suivi par la chloration finale pour la désinfection. Le chlore transforme les gaz indésirables en particules filtrables. La fluoration, quant à elle, ajuste la teneur en fluor de l'eau potable (CDC, 2020).

Chapitre II :

Description de la zone d'étude

1. Présentation de la wilaya de Mila

La wilaya de Mila est située au nord-est de l'Algérie, à une altitude moyenne de 464 mètres et à environ 70 km de la côte méditerranéenne. Intégrée à la chaîne de l'Atlas tellien, elle s'étend selon un axe ouest-est comme l'ensemble des reliefs du Nord algérien (ANDI, 2013).

Avec une superficie de 3407,60 km², elle représente 0,14 % du territoire national. Créée lors du découpage administratif de 1984, la wilaya compte aujourd'hui 32 communes (DPSB, 2018).

1.1. Délimitation territoriale de la wilaya de Mila

La wilaya de Mila est délimitée par :

- Au Nord : la wilaya de Jijel ;
- Au Nord-Est : la wilaya de Skikda ;
- A l'Est : la wilaya de Constantine ;
- Au Sud-Est : la wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- Au Sud : la wilaya de Batna ;
- A l'Ouest : la wilaya de Sétif.

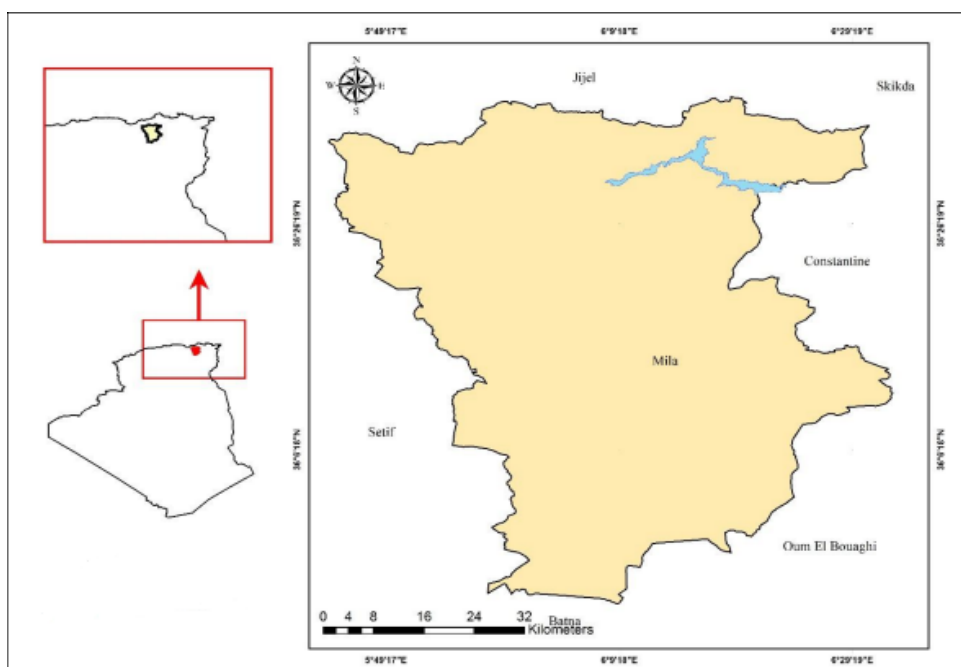


Figure 9 : Carte de situation géographique de la wilaya de Mila
(Valentine Sévigny, 2019)

2. Les caractéristiques géologiques

2.1. Géologie

Le bassin de Mila fait partie du domaine externe de la chaîne alpine du nord-est de l'Algérie, laquelle est rattachée à la branche sud des Maghrébides, s'étendant du détroit de Gibraltar à l'Ouest jusqu'à la Sicile et la Calabre à l'Est (**Atmania, 2010**). La portion nord-orientale de cette branche est généralement subdivisée en deux grands ensembles :

- Un domaine **interne**, comprenant le socle kabyle ainsi que les formations de flysch ;
- Un domaine **externe**, correspondant aux formations telliennes et à celles de l'avant-pays (**Atmania, 2010**).

2.2. Relief

Le relief de la wilaya de Mila est caractérisé par une grande diversité (**CETIC, 2008**). On distingue trois zones principales selon leurs caractéristiques topographiques:

- **Zone nordique** : à dominance montagneuse, elle représente 14 % de la surface agricole utile (SAU) labourée (**DSA de Mila, 2022**). La pluviométrie annuelle y varie entre 600 mm et 1200 mm. Cette zone est reconnue pour sa production arboricole, notamment l'olivier, ainsi que pour la pratique de l'apiculture (**Belahlou, 2016**).
- **Zone médiane** : occupant 68 % de la SAU labourée (**DSA de Mila, 2022**), elle reçoit entre 400 mm et 600 mm de précipitations annuellement. On y pratique essentiellement les grandes cultures et l'élevage (**Belahlou, 2016**).
- **Zone méridionale** : elle couvre 18% de la SAU labourée (**DSA de Mila, 2022**) et correspond aux hauts plateaux. Les précipitations y sont inférieures à 350 mm par an. Cette région se distingue par la culture de céréales fourragères, l'élevage, l'aviculture, ainsi que les cultures maraîchères pratiquées sous irrigation (**Belahlou, 2016**).

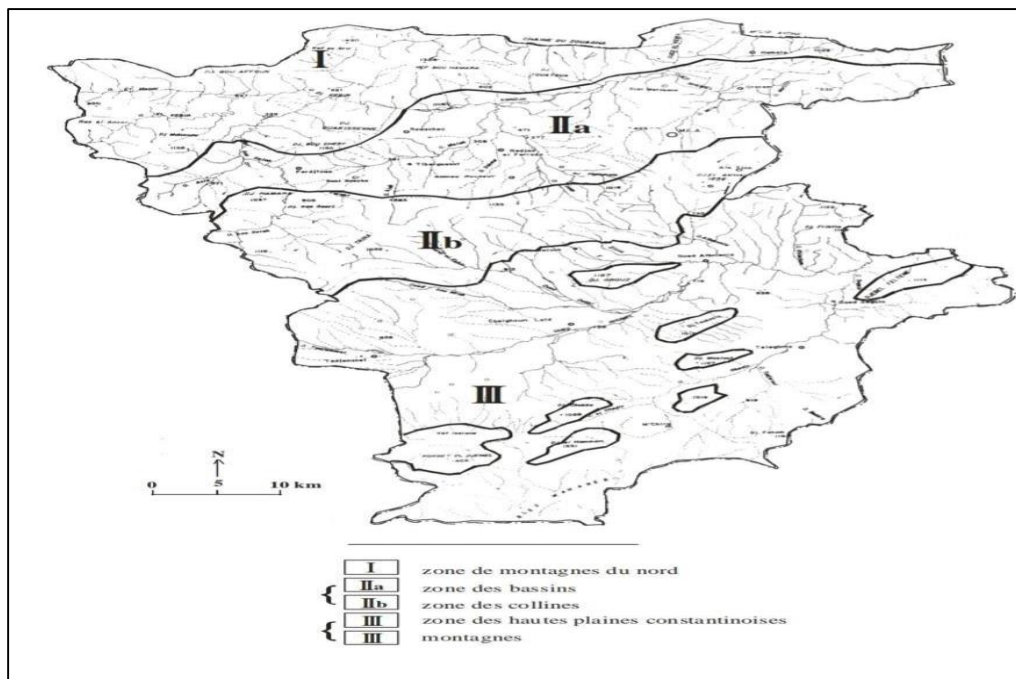


Figure 10 : Carte du relief de la wilaya de Mila (Soukehal, 2011)

2.3. Pédologie

Du point de vue pédologique, les sols de la wilaya de Mila présentent les caractéristiques suivantes :

- La quasi-totalité des sols appartiennent à la catégorie des sols bruns forestiers (ou sols brunifiés) ;
- La majorité de ces sols sont acides ;
- Ils se caractérisent par une forte capacité de rétention en eau ;
- On observe l'apparition de fentes de retrait durant les périodes de sécheresse (Berkal et Elouaere, 2014).

2.4. Climatologie

La région de Mila est située dans une zone à climat méditerranéen, correspondant à l'étage subhumide. Elle se caractérise par un contraste climatique net entre le nord et le sud du territoire :

- Le nord, influencé par le climat méditerranéen, est humide et pluvieux ;
- Le sud, quant à lui, présente les traits d'un climat semi-aride à aride, sous l'influence d'un climat continental.

Cette disparité climatique est essentiellement due à plusieurs facteurs, notamment la double influence climatique (méditerranéenne au nord, continentale au sud) et la configuration du relief montagneux, qui accentue ces contrastes thermiques et pluviométriques.

Le climat constitue ainsi un facteur écologique majeur, influençant directement la répartition et la diversité de la flore et de la faune locales (**Metallaoui et al., 2013**).

L'étude du climat régional repose principalement sur certains paramètres fondamentaux, à savoir :

- La température ;
- Les précipitations ;
- Le régime des vents ;
- Et le taux d'humidité.

Pour la caractérisation climatique de notre zone d'étude, nous nous sommes basés sur les données météorologiques enregistrées à la station d'Aïn-Tin, sur une période de dix années (2015–2020).

2.5. Température

La température est l'un des éléments climatiques les plus déterminants. Elle joue un rôle essentiel dans la répartition de l'eau à travers le processus d'évapotranspiration (**Emsalem, 1986, cité par Aouissi, 2010**). Elle influence fortement les conditions générales de développement et de croissance, notamment chez les végétaux.

Selon les données de la station météorologique d'Ain-Tin (**Tableau 7**), la température moyenne mensuelle la plus faible est observée en janvier, avec 5°C. En revanche, les températures les plus élevées sont enregistrées en Juillet et Août, avec des moyennes respectives de 34,8°C et 34,5°C.

Tableau 7 : Moyenne mensuelle des températures (Station d'Ain-Tin ; 2015-2020)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T	8,9	9,0	11,3	14,5	17,7	23,4	28,6	26,3	22,3	18,7	13,2	9,7

D'après l'histogramme présenté dans la **Figure 11**, la température la plus élevée est observée au mois de juillet, avec 28,6°C, tandis que la plus basse est enregistrée en janvier, atteignant 8,9°C.

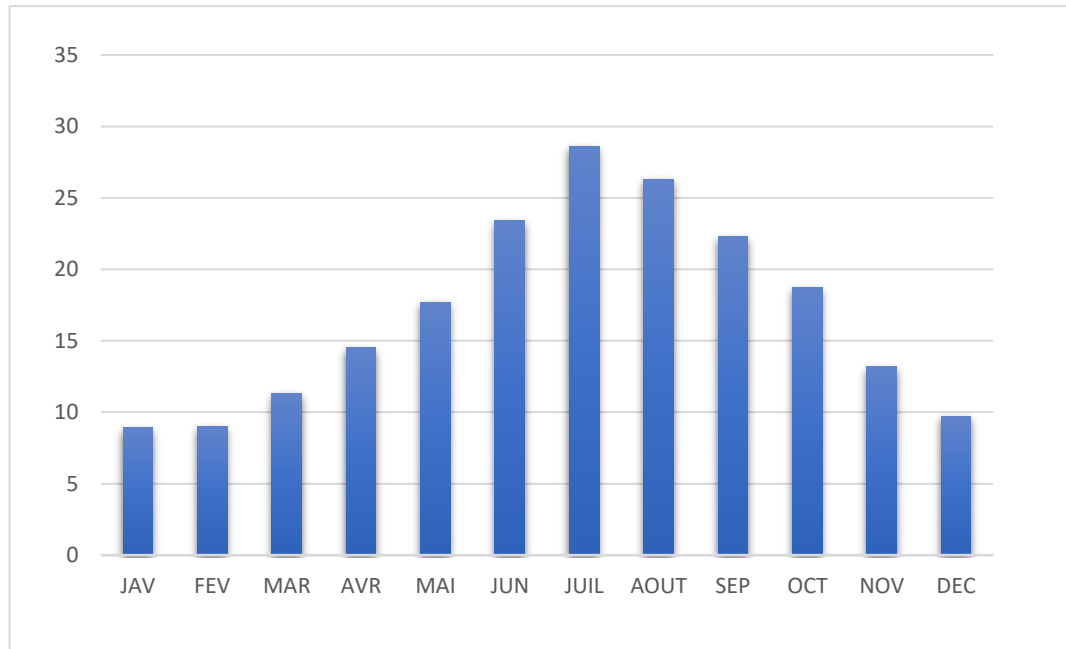


Figure 11 : Variation des températures moyennes mensuelles observées durant la période (2015-2020)

2.6. Précipitation

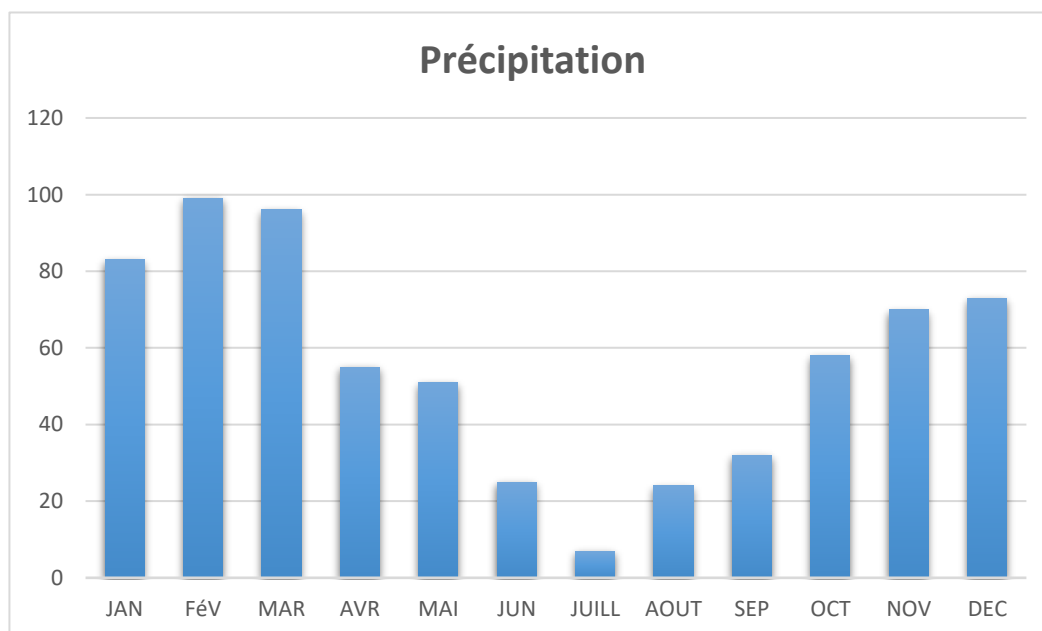
Les précipitations, tout comme la température, comptent parmi les principaux éléments déterminants du climat (**Aouissi, 2010**). Elles désignent toutes les formes d'eau issues de l'atmosphère, qu'elles soient liquides ou solides, telles que la pluie, la neige ou la grêle. Ces précipitations sont généralement mesurées à l'aide d'un pluviomètre, qui indique l'épaisseur de la couche d'eau tombée. Elles représentent un facteur essentiel, car elles reflètent le fonctionnement de la circulation des eaux superficielles et souterraines (**Aouissi, 2010**).

Les données collectées sur la période 2015-2020 (**Tableau 8**) révèlent que l'hiver est la saison la plus pluvieuse, avec une moyenne mensuelle de 83 mm. Cette situation permet une bonne recharge de la nappe phréatique ainsi qu'une dilution des éléments chimiques. En revanche, l'été est marqué par une faible pluviométrie, estimée à seulement 7 mm/mois, ce qui favorise l'évaporation et entraîne une concentration des éléments chimiques.

Tableau 8 : Précipitations moyennes mensuelles (Station d'Ain-Tin ; 2015-2020).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Précipitation	83	99	96	55	51	25	7	24	32	58	70	73

Les histogrammes des précipitations (**Figure 12**) montrent une forte variabilité des pluies au cours de l'année. Les mois les plus pluvieux sont Février (99 mm), Mars (96 mm) et Janvier (83 mm), tandis que les mois les plus secs sont Juillet (7 mm), Août (24 mm) et Juin (25 mm).

**Figure 12** : Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain-Tin (2015-2020)

3. La synthèse climatique

3.1. Diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombro-thermique proposé par **Bagnouls et Gaussen (1957)** constitue un outil graphique de référence pour l'analyse du climat, notamment pour l'identification des périodes sèches et humides au cours de l'année. Sur ce diagramme:

- L'axe des abscisses (x) représente les mois de l'année ;
- L'axe des ordonnées (y) indique à la fois :

- Les précipitations moyennes mensuelles (P), en millimètres ;
- Et les températures moyennes mensuelles (T), en degrés Celsius.

La règle fondamentale repose sur la relation $P = 2T$. Une période est considérée comme sèche lorsque $P < 2T$, c'est-à-dire que le total des précipitations est inférieur au double de la température moyenne. Sur le graphique, cela correspond à la situation où la courbe ombrique (pluviométrique) passe sous la courbe thermique.

Tableau 9 : Données climatiques mensuelles (station de Aïn-Tin, 2015–2020)

Paramètre / Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
T. max (°C)	13,5	13,8	16,2	20,3	24,1	30,7	34,8	34,5	29,3	23,9	17,4	13,6
T. min (°C)	5,0	4,7	6,5	8,8	11,7	16,3	20,6	20,2	15,8	13,6	9,4	5,8
Precipitation	83	99	96	55	51	25	7	24	32	58	70	73

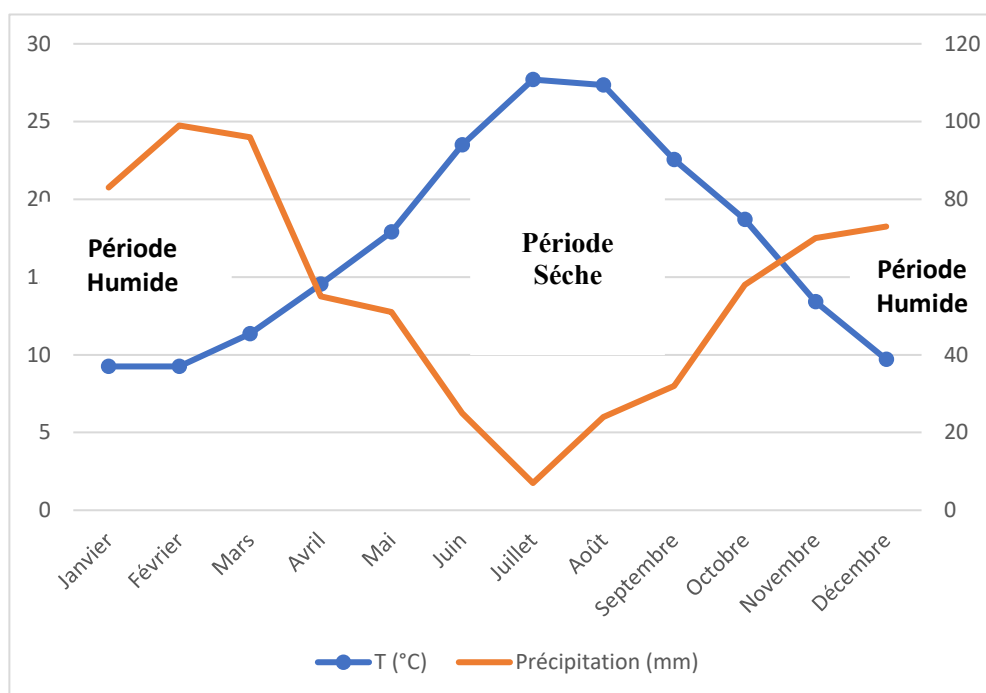


Figure 13: Diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen

3.2. L'indice pluviométrique d'Emberger

L'indice pluviométrique d'Emberger constitue un outil précieux pour la classification des climats méditerranéens en fonction de leur degré d'aridité. Ce modèle

permet de distinguer cinq étages bioclimatiques, allant du plus aride jusqu'au climat de haute montagne (**Emberger, 1955**).

Emberger s'est basé sur deux paramètres climatiques fondamentaux :

- La précipitation annuelle moyenne (P) exprimée en millimètres ;
- Les températures extrêmes (maximale et minimale), exprimées en degrés absolus Kelvin.

La formule utilisée pour le calcul du quotient pluviométrique est la suivante :

$$Q_2 = \frac{100 \times P}{\left(\frac{M+m}{2}\right) \times (M - m)}$$

où:

- Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger ;
- P : précipitations annuelles moyennes (en mm) ;
- M : température moyenne du mois le plus chaud (en °K) ;
- m : température moyenne du mois le plus froid (en °K) (**Ramade, 2003**).

Les températures sont converties en **degrés Kelvin** selon la relation :

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273,2$$

Application aux données de Mila :

- **P = 673 mm**
- **M = 28,6 °C → 301,8 K**
- **m = 8,9 °C → 282,1 K**

$$Q_2 = \frac{100 \times 673}{\left(\frac{301,8+282,1}{2}\right) \times (301,8 - 282,1)} = \frac{67300}{(291,95) \times 19,7} \approx 117,01$$

Le quotient pluviométrique d'Emberger obtenu pour Mila est de 117,01, ce qui permet de situer cette région dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver chaud selon la classification.

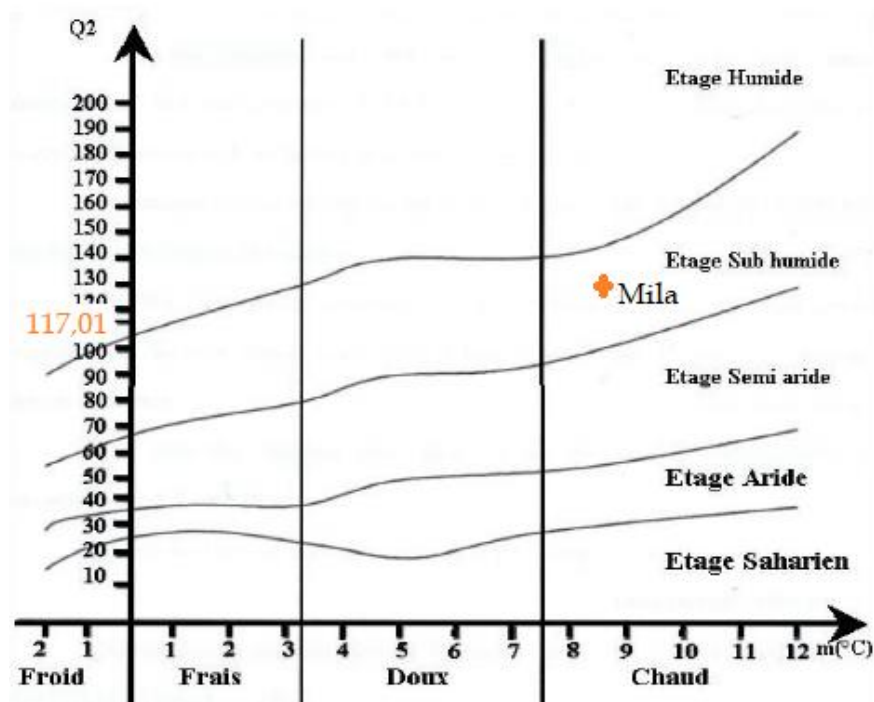


Figure 14 : Situation de la région de Mila dans le climagramme d'Emberger

PARTIE PRATIQUE

Chapitre III :

Matériel et méthodes

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la potabilité de l'eau provenant de trois sources naturelles situées dans la wilaya de Mila. Cette évaluation vise à identifier d'éventuels risques sanitaires liés à la consommation de cette eau et à proposer, en conséquence, des mécanismes de surveillance et de gestion permettant d'assurer la qualité de l'eau à long terme.

1. Lieu de stage

Notre stage de Master a été réalisé au niveau de laboratoire d'analyses physico-chimiques et bactériologiques géré par l'unité de l'algérienne des eaux (ADE) de la wilaya de Mila durant une période de 3 mois (Mars 2025 - Mai 2025). Ce laboratoire de contrôle et de suivi de qualité de l'eau a commencé ces activités en mars 2003, il est situé à la commune de Mila, dispose des travailleurs chargés de l'autocontrôle des eaux par l'analyse physico-chimique et bactériologique des eaux destinée à la consommation humaine.

2. Nature et période de prélèvement

Trois échantillons d'eau ont été prélevés à partir de trois sources différentes situées dans la wilaya de Mila, à des dates distinctes entre Septembre 2024 et Mai 2025. Les prélèvements ont été effectués à des fins d'analyses physico-chimiques et bactériologiques.

Tableau 10 : Nature et période de prélèvement

Échantillon	Lieu de prélèvement	Date de prélèvement	Type d'analyses effectuées
Source 1	El Maarat- Terrai Bainen	Septembre 2024	Analyses physico-chimiques et bactériologiques
		Mai 2025	
Source 2	Sidi Abdelmalek – Hamala	Septembre 2024	Analyses physico-chimiques et bactériologiques
		Mars 2025	
Source 3	Ayoun Soltane – Oued el nedja	Juillet 2024	Analyses physico-chimiques et bactériologiques
		Février 2025	

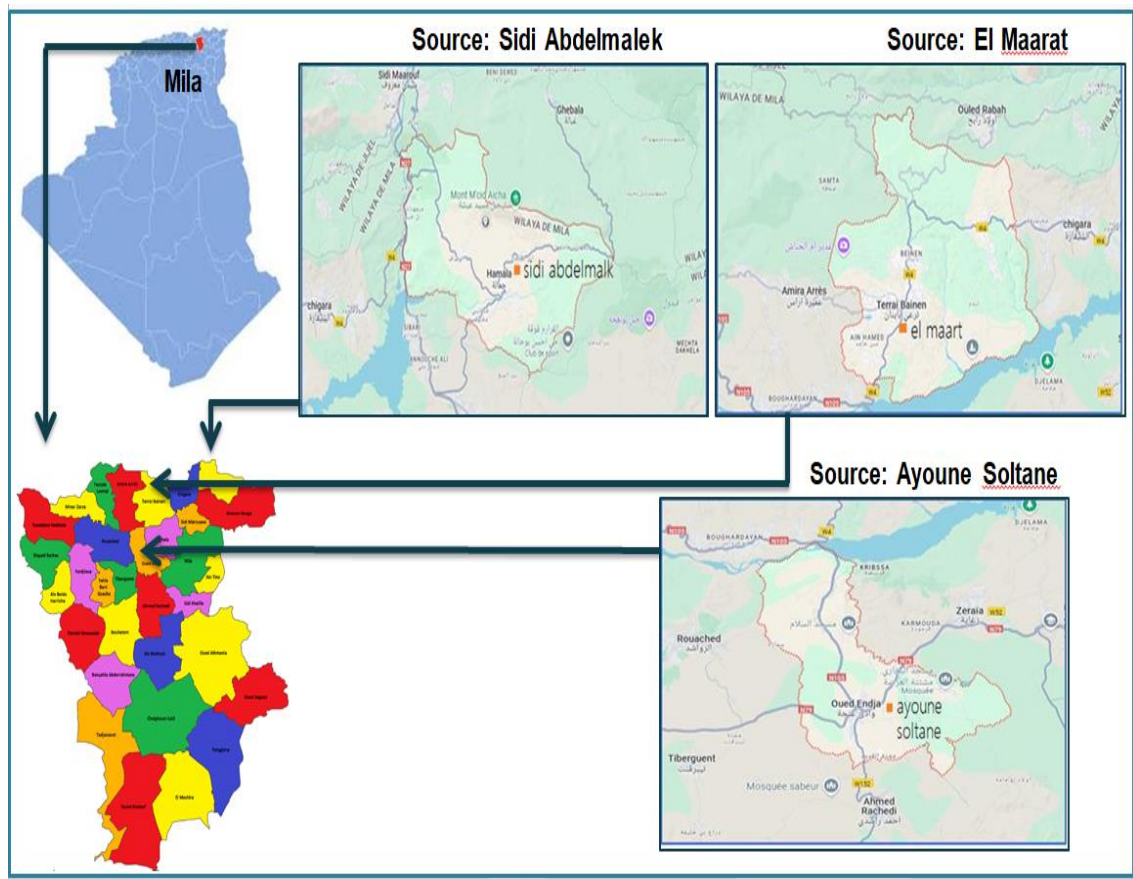


Figure 15 : Les régions d'étude Hamala, Terrai bainen, Oued Endja
(Google earth, 2025)

3. Prélèvement de l'eau à analyser

Les principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau :

- Identité des préleveurs ;
- Date et heure de prélèvement ;
- Point de prélèvement d'eau ;
- Origine de l'eau : eau de source de la wilaya de Mila (**Source El Maarat, Source Sidi Abdelmalek, Source Ayoune Soltane**) (Rodier, 2009).

4. Echantillonnage

Pour les analyses physico-chimiques, les échantillons d'eau doivent être collectés dans des bouteilles en plastique propres, préalablement rincées à plusieurs reprises avec l'eau à analyser, puis hermétiquement fermées jusqu'à leur analyse au laboratoire de l'ADE de Mila.

Pour les analyses bactériologiques, les échantillons sont prélevés à l'aide de flacons en verre Pyrex stériles, d'une capacité de 250 ml, munis de bouchons à vis métallique, afin de faciliter le prélèvement et d'éviter toute forme de contamination. (Derwich et *al.*, 2008 ; Merzoug, 2009).

5. Transport des échantillons

Les échantillons triés sont soigneusement placés dans une glacière à 4 °C puis transportés au laboratoire. Si le transfert doit excéder une 1 h, il convient d'utiliser une boîte isotherme munie d'un élément réfrigérant dont la température doit être comprise entre 4 et 6 °C.

L'analyse bactériologique doit débuter dans un délai maximum de 8 h après le prélèvement. En aucun cas l'analyse ne doit être effectuée lorsque le délai dépasse 24 h (Rodier et *al.*, 1996).

6. Les analyses physico-chimiques

Les paramètres à analyser sont choisis en fonction de l'objectif recherché, en plus de la possibilité de réaliser cette analyse.

Les paramètres de la qualité des eaux analysés sont résumés dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 : Les paramètres de la qualité des eaux

Paramètre	Symbole	Unité	Méthode d'analyse
Potentiel hydrogène	pH	/	Potentiométrie
Conductivité électrique	C.E	μS/cm	Conductimétrie
Salinité	SAL	%	Conductimétrie
Total des solides dissous	TDS	mg/L	Conductimétrie
Dureté totale	TH	°F	Méthode volumétrique à l'EDTA
Turbidité	—	NTU	Turbidimétrie
Résidu sec	R. S	mg/L	Méthode volumétrique
Alcalinité totale	T.A, T.A.C	°F	Méthode volumétrique
Calcium	Ca ²⁺	mg/L	Méthode volumétrique à l'EDTA
Magnésium	Mg ²⁺	mg/L	Méthode volumétrique à l'EDTA
Chlorures	Cl ⁻	mg/L	Méthode volumétrique

Sulfates	SO_4^{2-}	mg/L	Méthode néphélométrique au chlorure de baryum
Nitrates	NO_3^-	mg/L	Méthode colorimétrique au salicylate de sodium
Nitrites	NO_2^-	mg/L	Méthode colorimétrique
Phosphates	PO_4^{3-}	mg/L	Méthode colorimétrique à l'acide ascorbique
Fer	Fe^{2+}	mg/L	Méthode colorimétrique à la phénantroline
Matière organique	MO (en O_2)	mg/L	Méthode d'oxydation à chaud (reflétant la DCO)

6.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel d'hydrogène (pH) reflète la concentration en ions hydrogène (H^+) dans une solution aqueuse. Il traduit l'équilibre acido-basique sur une échelle logarithmique allant de 0 à 14, la valeur neutre étant fixée à 7. Ce paramètre est fondamental dans de nombreux processus physico-chimiques et peut varier selon plusieurs facteurs, notamment l'origine géochimique de l'eau.

La mesure du pH, ainsi que celle de la température, est réalisée à l'aide d'un pH-mètre comprenant un boîtier électronique et une sonde munie de deux électrodes. L'échantillon d'eau est versé dans un bécher propre, puis les électrodes sont immergées dans le liquide ; la lecture s'effectue directement sur l'appareil. Avant chaque mesure, les électrodes ainsi que le bécher sont rincées à l'eau distillée et séchées à l'aide d'un papier absorbant. Les résultats sont exprimés en unités de pH.



Figure 16 : La mesure du pH

6.2. Température

La température est mesurée par le biais d'une sonde de température connectée au pH-mètre, suivant le même protocole que pour la détermination du pH.

6.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est mesurée directement à l'aide d'un conductimètre. Cette mesure s'effectue sur un volume d'eau suffisant pour permettre l'immersion complète de l'électrode de conductivité. L'appareil est calibré à une température de référence de 25 °C. Une fois la sonde stabilisée dans le bécher contenant l'échantillon, la valeur est lue directement et exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).



Figure 17 : La mesure de conductivité

6.4. Dureté totale (TH)

La dureté totale est déterminée par titrage complexométrique des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), en utilisant une solution disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) à pH 10. Le noir ériochrome T sert d'indicateur coloré : en présence d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , une coloration rouge-violet est observée. À l'équivalence, la couleur vire au bleu, témoignant de la complexation complète des ions métalliques.

Matériel et réactifs nécessaires:

- Burette (25 ou 50 mL).
- Erlenmeyer (250 mL).
- Pipette (50 ou 100 mL).
- Agitateur magnétique (facultatif).
- Solution EDTA 0,01 mol/L (standardisée).
- Tampon pH 10 ($\text{NH}_4\text{Cl}/\text{NH}_4\text{OH}$).

- Noir ériochrome T (NET) (indicateur solide ou en solution).
- Eau distillée ou déminéralisée.

Protocole expérimental :**1. Préparation de l'échantillon :**

- Prélever 100 mL d'eau à analyser dans un erlenmeyer.
- Ajouter 1 à 2 mL de tampon pH 10 pour maintenir un pH optimal pour la réaction.
- Ajouter une pointe de spatule de noir ériochrome T (ou quelques gouttes si en solution).
- La solution prend une couleur rouge-violet en présence de Ca^{2+} et Mg^{2+} .

2. Titrage à l'EDTA :

- Remplir la burette avec la solution EDTA 0,01 mol/L.
- Titrer lentement l'échantillon sous agitation jusqu'à changement de couleur (rouge-violet → bleu).
- Noter le volume V (mL) d'EDTA consommé.

3. Calcul de la dureté totale :

La dureté totale est exprimée en degré français (°F) ou en mg/L de CaCO_3 :

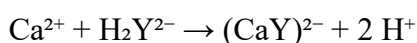
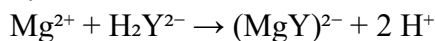
$$\text{Dureté totale (}^\circ\text{F)} = \frac{V \times C_{\text{EDTA}} \times 1000}{\text{Volume échantillon (mL)}} \times 100$$

V = Volume d'EDTA utilisé (mL)

C_{EDTA} = Concentration de l'EDTA (mol/L)

Facteur 100 : conversion en °F (1 °F = 10 mg/L CaCO_3)

Réactions chimiques impliquées :

Complexation du calcium :**Complexation du magnésium :****Changement de couleur de l'indicateur :**

- **Avant équivalence** : Complexe rouge-violet ($\text{NET} + \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$).
- **Après équivalence** : EDTA libère l'indicateur → couleur bleue.

6.5. Sulfates (SO_4^{2-})

Les ions sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum en milieu acide (chlorhydrique). La turbidité de la suspension formée est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 420 nm, fournissant une estimation quantitative (**Rodier et al., 2009**).

Matériel et réactifs nécessaires :

- Spectrophotomètre (visible à 420 nm).
- Cuvettes (en verre ou quartz, chemin optique 1 cm).
- Pipettes graduées (1, 5, 10 mL).
- Bêchers (50-100 mL).
- Agitateur magnétique.
- Solution standard de sulfate (K_2SO_4 , 100 mg/L SO_4^{2-}).
- Chlorure de baryum (BaCl_2 , 10% m/v).
- Acide chlorhydrique (HCl 1 mol/L).
- Solution tampon de conditionnement (NaCl 25% + HCl 0,1 mol/L).
- Eau désionisée (exempte de sulfates).

Protocole détaillé :

1. Préparation de la gamme d'étalonnage.

2. Mode opératoire :

- Conditionnement des échantillons :
- Prélever 50 mL d'échantillon filtré (filtre 0,45 μm).
- Ajouter 1 mL de HCl 1 mol/L ($\text{pH} \approx 2,5-3$).
- Ajouter 5 mL de solution tampon de conditionnement.

Précipitation :

- Sous agitation constante, ajouter 0,5 mL de BaCl_2 10%.
- Homogénéiser immédiatement pendant 30 sec.
- Laisser reposer 5 min $\pm$ 30 sec.

Mesure spectrophotométrique :

- Régler le spectrophotomètre à 420 nm.
- Faire le blanc avec l'échantillon non traité au BaCl_2 .
- Mesurer l'absorbance après 5 min exactement.

3. Expression des résultats :

- Construction de la courbe d'étalonnage ($A = f(C)$).

- Calcul par régression linéaire.

6.6. Fer (Fe^{2+})

Le fer est oxydé puis réduit en milieu acide avant d'être dosé par spectrophotométrie. La formation d'un complexe coloré rouge-orangé entre les ions ferreux et la 1,10-phénanthroline est mesurée à une longueur d'onde de 510 nm.

Matériel et Réactifs :

- Spectrophotomètre UV-Visible (longueur d'onde : 510 nm).
- Cuvettes en verre ou quartz (1 cm de chemin optique).
- Pipettes graduées (1, 5, 10 mL).
- Bêchers et fioles jaugées (50, 100 mL).
- Agitateur magnétique.
- Bain-marie (si nécessaire pour accélérer la réaction).
- Solution standard de fer (Fe^{2+}) (100 mg/L, préparée à partir de sulfate ferreux ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)).
- Solution de 1,10-phénanthroline (0,1 % dans l'eau).
- Solution d'hydroxylamine ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 10 %) (pour réduire Fe^{3+} en Fe^{2+}).
- Tampon acétate ($\text{pH} \approx 4,5$) (mélange acide acétique / acétate de sodium).
- Acide chlorhydrique (HCl 0,5 mol/L) (pour acidifier l'échantillon).
- Eau désionisée (exempte de fer).

Protocole Expérimental :

1. Préparation de la gamme d'étalonnage.

2. Traitement de l'échantillon :

Réduction du fer ferrique (Fe^{3+}) en ferreux (Fe^{2+}) :

- Prélever 50 mL d'échantillon filtré (filtre 0,45 μm).
- Ajouter 1 mL de HCl 0,5 mol/L (pour acidifier).
- Ajouter 1 mL de solution d'hydroxylamine 10 %.
- Agiter et laisser reposer 5 min (pour réduire tout Fe^{3+} en Fe^{2+}).

Formation du complexe coloré :

- Ajouter 2 mL de tampon acétate ($\text{pH} \approx 4,5$).
- Ajouter 2 mL de solution de 1,10-phénanthroline 0,1 %.
- Agiter et laisser reposer 10-15 min pour un développement complet de la couleur.

3. Mesure Spectrophotométrique :

- Régler le spectrophotomètre à 510 nm.
- Faire le blanc avec de l'eau désionisée traitée de la même manière.
- Mesurer l'absorbance de chaque étalon et de l'échantillon.

4. Calcul de la Concentration en Fer :

- Tracer la courbe d'étalonnage (absorbance en fonction de la concentration).
- Calcul par régression linéaire.

6.7. Matière organique (M.O)

L'évaluation de la matière organique se fait par oxydation en milieu acide à l'aide du permanganate de potassium. La quantité d'oxygène consommée lors de la réduction du permanganate est proportionnelle à la charge organique de l'échantillon.

Matériel et Réactifs :

- Ballon à reflux (250 mL) avec réfrigérant.
- Pipettes graduées (5, 10, 25 mL).
- Burette (25 ou 50 mL).
- Plaque chauffante (ou bain-marie à 100°C).
- Pipette automatique (pour H₂SO₄ concentré).
- Solution de KMnO₄ 0,01 mol/L (standardisée).
- Solution d'oxalate de sodium (Na₂C₂O₄) 0,01 mol/L.
- Acide sulfurique concentré (H₂SO₄, 98 %).
- Eau distillée.

Protocole Détaillé :

1. Préparation de l'échantillon :

- Filtrer l'échantillon (filtre 0,45 µm) pour éliminer les MES.
- Diluer si nécessaire (si COD > 50 mg O₂/L).

2. Oxydation à chaud :

- Introduire 50 mL d'échantillon dans le ballon à reflux.
- Ajouter 5 mL de H₂SO₄ concentré (milieu fortement acide).
- Ajouter 10 mL de KMnO₄ 0,01 mol/L (en excès connu).
- Porter à ébullition douce (100°C) pendant 30 min sous reflux.

3. Titration de l'excès de KMnO₄ :

- Refroidir le mélange.
- Ajouter 10 mL de Na₂C₂O₄ 0,01 mol/L (en excès).

- Titrer l'excès d'oxalate par du KMnO_4 0,01 mol/L jusqu'à virage rose persistant.
- Noter le volume V (mL) de KMnO_4 utilisé.

4. Contrôle à blanc :

Répéter l'opération avec 50 mL d'eau distillée à la place de l'échantillon.

Calculs :

$$\text{COD} \left(\text{mg O}_2/\text{L} \right) = \frac{(V_{\text{blanc}} - V_{\text{échantillon}}) \times C_{\text{KMnO}_4} \times 8 \times 1000}{V_{\text{échantillon}}}$$

V = Volume de KMnO_4 consommé (mL).

C = Concentration de KMnO_4 (mol/L).

8 = Masse molaire équivalente de l'oxygène (g/mol).

6.8. Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates réagissent avec le salicylate de sodium pour former un complexe jaune (paranitrosalicylate), mesuré par spectrophotométrie à 415 nm (**Rodier et al., 2009**).

Matériel et Réactifs :

- Spectrophotomètre UV-Visible (longueur d'onde : 415 nm).
- Cuvettes en verre ou quartz (1 cm de chemin optique).
- Pipettes graduées (1, 5, 10 mL).
- Bêchers et fioles jaugées (50, 100 mL).
- Bain-marie (ou bloc chauffant à 100°C).
- Agitateur magnétique.
- Solution standard de nitrate (NO_3^-) (100 mg/L, préparée à partir de KNO_3).
- Solution de salicylate de sodium (5 % dans l'eau).
- Acide sulfurique concentré (H_2SO_4 , 98 %).
- Solution alcaline (NaOH 2 mol/L).
- Catalyseur (acide salicylique ou sulfate d'hydrazine).
- Eau désionisée exempte de nitrates.

Protocole Expérimental :

1. Préparation de la gamme d'étalonnage.

2. Traitement de l'échantillon.

Préparation :

- Prélever 25 mL d'échantillon filtré (filtre 0,45 μm).
- Ajouter 1 mL de solution de salicylate de sodium (5 %).
- Ajouter 2 mL de H_2SO_4 concentré (pour acidifier).

Réaction de coloration :

- Chauffer à 100°C pendant 20 min (formation du complexe jaune).
- Refroidir à température ambiante.
- Ajouter 5 mL de NaOH 2 mol/L pour alcaliniser (pH $\sim$ 12).

Développement de la couleur :

- Laisser reposer 10 min pour stabilisation de la couleur.

3. Mesure Spectrophotométrique :

- Régler le spectrophotomètre à 415 nm.
- Faire le blanc avec de l'eau désionisée traitée de la même manière.
- Mesurer l'absorbance de chaque étalon et de l'échantillon.

4. Calcul de la Concentration en Nitrates :

- Tracer la courbe d'étalonnage (absorbance en fonction de la concentration).
- Calcul par régression linéaire.

6.9. Alcalinité

L'alcalinité d'un échantillon est définie par sa capacité à neutraliser un acide fort. Elle est déterminée par titrage à l'aide d'un acide minéral dilué, en présence de deux indicateurs colorés : la phénolphthaléine (T.A) pour un pH de 8,3 et le méthylorange (T.A.C) pour un pH de 4,3. Cette méthode permet d'évaluer la concentration des bases faibles présentes dans l'eau.

Matériel et Réactifs :

- Burette (25 ou 50 mL).
- Erlenmeyer (250 mL).
- Pipette (50 ou 100 mL).
- Agitateur magnétique.

- pH-mètre (optionnel pour validation).
- Solution d'acide chlorhydrique (HCl 0.02 N) standardisée.
- Phénolphthaléine (1 % dans l'éthanol) → Rose à pH > 8.3.
- Méthylorange (0.1 % dans l'eau) → Orange à pH < 4.3.
- Eau distillée .

Protocole Détaillé :

1. Titre Alcalimétrique (T.A) - pH 8.3 :

- Prélever 100 mL d'échantillon dans un erlenmeyer.
- Ajouter 2-3 gouttes de phénolphthaléine (solution rose si alcalinité présente).
- Titrer avec HCl 0.02 N jusqu'à décoloration (virage rose → incolore).
- Noter le volume V_1 (mL) d'acide consommé.

2. Titre Alcalimétrique Complet (T.A.C) - pH 4.3 :

- Dans le même erlenmeyer, ajouter 2-3 gouttes de méthylorange.
- Continuer le titrage avec HCl jusqu'à virage jaune → orange.
- Noter le volume total V_2 (mL) d'acide utilisé (incluant V_1).

3. Calcul des Alcalinités:

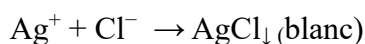
Paramètre	Formule	Interprétation
T. A	$T.A = \frac{V_1 \times N \times 50000}{Volume\ échantillon\ (mL)} \left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \right)$	Détecte $OH^- + \frac{1}{2} CO_3^{2-}$
T.A.C	$T.A.C = \frac{V_2 \times N \times 50000}{Volume\ échantillon\ (mL)} \left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \right)$	Détecte $HCO_3^- + \frac{1}{2} CO_3^{2-}$

6.10. Chlorures (Cl⁻)

Le dosage des chlorures est réalisé en milieu neutre à l'aide d'une solution titrée de nitrate d'argent, en présence de chromate de potassium comme indicateur. La formation d'un précipité rouge brique de chromate d'argent marque la fin du titrage.

Réactions :

Précipitation des chlorures (blanc) :



Fin du titrage (apparition d'un précipité rouge brique) :



Le point d'équivalence est marqué par la formation du chromate d'argent, plus soluble que AgCl, qui apparaît seulement quand tous les Cl⁻ ont été précipités.

Matériel et Réactifs :

- Solution titrante : AgNO_3 (0,01 mol/L à 0,1 mol/L, standardisée si besoin).
- Indicateur : Solution de K_2CrO_4 à 5% ($\approx 0,25$ mol/L).
- Échantillon : Eau ou solution contenant Cl^- .
- Matériel : Burette, erlenmeyer, pipette, agitateur.

Protocole Expérimental :**1. Préparation de l'échantillon :**

- Prélever un volume précis ($V_e = 50$ ou 100 mL) d'échantillon.
- Ajuster le pH entre 7 et 9 (si nécessaire avec du NaHCO_3 pour neutraliser les acides ou HNO_3 dilué pour les bases).
- Ajouter 1 mL de K_2CrO_4 (la solution devient jaune due à CrO_4^{2-}).

2. Titrage par AgNO_3 :

Rincer et remplir la burette avec AgNO_3 .

- Titrer lentement sous agitation:
- Début : Formation de AgCl (blanc, peu visible).
- Equivalence : Apparition d'un précipité rouge brique persistant (Ag_2CrO_4).

3. Calcul de la concentration en Cl^- :

- Noter le volume d' AgNO_3 versé (V).

Concentration des chlorures :

$$C_{\text{Cl}^-} = \frac{C_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3}}{V_{\text{échantillon}}} \left(\text{en } \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)$$

Conversion en mg/L :

$$\text{Cl}^- \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = C_{\text{Cl}^-} \times 35,45 \times 1000$$

6.11. Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+})

Ces cations sont titrés par complexométrie avec une solution d'EDTA, à pH contrôlé, en présence d'un indicateur coloré. L'EDTA forme des complexes stables avec les ions, provoquant un changement de teinte de l'indicateur, qui passe du rouge au violet puis au bleu à l'équivalence.

Matériel et Réactifs :

Solution titrante : EDTA (0,01 mol/L ou autre concentration standardisée).

Tampon pH 10 : Solution $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ (ou tampon ammoniacal).

Indicateur : Noir Ériochrome T (NET) en poudre ou en solution.

Échantillon : Eau ou solution contenant Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Matériel : Burette, erlenmeyer, pipette, agitateur magnétique (si disponible).

Protocole Expérimental :

1. Préparation de l'échantillon :

- Prélever un volume précis ($V_e = 50$ ou 100 mL) de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 2 mL de tampon pH 10 pour maintenir le pH optimal.
- Ajouter une pointe de spatule de NET (la solution doit devenir rouge/violette en présence de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$).

2. Titrage par l'EDTA :

- Rincer et remplir la burette avec la solution d'EDTA.
- Titrer lentement sous agitation jusqu'à changement de couleur :

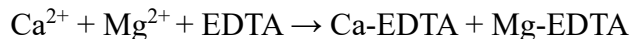
Début : Rouge/violet (complexe Ca/Mg-Indicateur).

Équivalence : Transition nette vers le bleu (indicateur libre).

3. Calcul des concentrations :

Noter le volume d'EDTA versé à l'équivalence (V).

La réaction globale est :



Concentration totale en $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (en mg/L ou mmol/L) :

$$C_{\text{Ca+Mg}} = \frac{C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}}{V_{\text{échantillon}}}$$

6.12. Résidu sec (R.S)

Le résidu sec est obtenu par évaporation complète de l'eau à 105°C , suivie de la pesée des matières résiduelles solides, dissoutes ou en suspension. Cette méthode permet d'évaluer la charge globale en substances solides, offrant un indicateur de la qualité de l'eau.

Matériel et Équipement:

- Capsule de porcelaine ou plat en silice (préalablement calcinée et tarée).
- Étuve réglée à $105 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Balance analytique (précision $\pm 0,1$ mg).
- Bain-marie ou évaporateur rotatif (pour éviter les projections).
- Dessiccateur (avec gel de silice ou CaCl_2 anhydre).
- Pipette ou éprouvette graduée.

Protocole Expérimental :

1. Préparation de la capsule :

- Nettoyer et calciner la capsule à 550°C pendant 1 h (pour éliminer les résidus organiques).
- La refroidir dans un dessiccateur et la peser (m_1 , masse tare).

2. Évaporation de l'échantillon :

- Homogénéiser l'échantillon (agiter vigoureusement si présence de MES).
- Pipeter un volume précis ($V = 50$ à 100 mL, selon la charge en solides) dans la capsule.
- Évaporer à sec:

Sur bain-marie (pour éviter l'ébullition violente).

Puis sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 h.

3. Pesée du résidu sec :

- Retirer la capsule de l'étuve, la refroidir dans le dessiccateur.
- Peser (m_2 , masse capsule + RS).
- Calculer le RS :

$$RS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \times 10^6}{V_{\text{échantillon}} (mL)}$$

6.13. Solides dissous totaux (TDS) et salinité (SAL)

La concentration en solides dissous totaux (TDS) est déterminée à l'aide d'un conductimètre de type Hach (voir Figure 19). Le TDS représente l'ensemble des substances dissoutes dans l'eau, incluant les sels, les minéraux et certains métaux, et s'exprime en mg/L. La salinité est quant à elle définie comme la concentration en sels dissous, et peut être estimée à partir des TDS (Aminot et Chaussepied, 1983).

Matériel et Équipement :

- Conductimètre.
- Cellule de conductivité (avec constante de cellule adaptée).
- Solution étalon de KCl (pour l'étalonnage).
- Thermomètre (si le conductimètre ne compense pas automatiquement la température).
- Bêchers propres (rincés à l'eau déionisée).

Protocole Expérimental :

1. Étalonnage du Conductimètre :

- Rincer la cellule avec de l'eau déionisée.
- Plonger la cellule dans une solution étalon de KCl.
- Ajuster la lecture du conductimètre à la valeur attendue (vérifier la température si nécessaire).

2. Mesure de la Conductivité :

- Rincer la cellule avec l'échantillon à analyser.
- Immerger la cellule dans l'échantillon, agiter légèrement pour homogénéiser.
- Noter la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et la température (si compensation manuelle).

3. Conversion Conductivité $\rightarrow$ TDS :

Appliquer le facteur de conversion (généralement entre 0,55 et 0,75, dépendant de la composition ionique) :

$$TDS \left(\frac{mg}{L} \right) = \text{Conductivité} \left(\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right) \times \text{Facteur de conversion}$$

Si le conductimètre intègre un mode TDS, il effectue automatiquement la conversion.

4. Calcul de la Salinité :

$$SAL \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{TDS \left(\frac{mg}{L} \right)}{1000}$$

7. Analyses bactériologiques

La microflore présente dans l'eau peut être d'origine naturelle (aquatique ou tellurique), ou résulter d'une contamination anthropique ou animale, notamment par voie fécale (**Rodier et al., 2009**).

Les analyses bactériologiques nécessitent des conditions strictement stériles de prélèvement et de transport (**Leyral et al., 2002**), pour éviter toute contamination secondaire. L'objectif principal de ces analyses est la détection et le dénombrement de micro-organismes indicateurs de contamination, notamment les coliformes totaux et fécaux (en particulier *Escherichia coli*), ainsi que les streptocoques fécaux (**Rodier et al., 2009 ; Ouahchia et al., 2015**).

7.1. La méthode de filtration sur membrane

Matériel requis :

- Filtres membranaires stériles (0,45 µm de porosité, 47 mm de diamètre).
- Support de filtration stérile (autoclavé à 121°C pendant 15 min).
- Pompe à vide (pression $\leq$ 500 mm Hg).
- Milieux de culture spécifiques :
 - m-Endo LES pour coliformes totaux.
 - m-FC pour coliformes fécaux.
 - Slanetz-Bartley pour entérocoques.

Procédure opératoire :

1. Préparation pré-analytique

- Allumer la hotte à flux laminaire 30 min avant manipulation.
- Désinfecter la paillasse avec de l'éthanol à 70%.
- Porter des gants stériles et un masque.

2. Montage du système

- Assembler l'entonnoir de filtration sur le flacon collecteur.
- Placer la membrane stérile (face brillante vers le haut) à l'aide de pincettes stériles.

3. Filtration

- Homogénéiser doucement l'échantillon.
- Filtrer 100 mL d'eau (ou volume adapté à la charge microbienne attendue).
- Rincer avec 20-30 mL d'eau peptonée stérile.

4. Mise en culture

- Transférer délicatement la membrane sur le milieu de culture approprié.
- Éliminer les bulles d'air par pression douce avec une spatule stérile.

5. Incubation

- m-Endo : $35 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ pendant 24 ± 2 h.
- m-FC : $44.5 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 ± 2 h.
- Slanetz-Bartley : $36 \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 44 ± 4 h.

6. Lecture des résultats

- Compter les colonies caractéristiques :
 - Coliformes totaux : colonies rouge métallique sur m-Endo.
 - *E. coli* : colonies bleues sur m-FC.
 - Entérocoques : colonies rouge-brun sur Slanetz-Bartley.
- Exprimer les résultats en UFC/100 mL avec correction du volume filtré.

Contrôles qualité :

- Témoin négatif : filtration d'eau stérile.
- Témoin positif : souche de référence (ex. *E. coli* ATCC 25922).
- Blanc de manipulation : membrane non inoculée.

Avantages de la méthode :

- Sensibilité élevée (détection jusqu'à 1 UFC/100 mL).
- Spécificité grâce aux milieux sélectifs.
- Possibilité d'archivage des membranes pour analyses complémentaires.

Limites :

- Ne détecte que les bactéries cultivables.
- Interférences possibles avec des particules en suspension.
- Nécessite un laboratoire équipé (Rodier, 2009 ; norme ISO 9308-1:2014).

Cette méthode standardisée reste la technique de référence pour le contrôle sanitaire des eaux, offrant un excellent compromis entre spécificité, sensibilité et reproductibilité (Ouahchia et al., 2015).

Chapitre IV :

Résultats et discussion

1. Les résultats des analyses physicochimiques

Le tableau ci-après présente les résultats des paramètres physico-chimiques analysés à partir de trois sources d'eau localisées dans la région de Mila. Les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire de l'ADE de Mila. L'interprétation des résultats s'est basée sur les normes de potabilité en vigueur en Algérie ainsi que sur les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Tableau 12 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau provenant des trois sources

Paramètre	Unité	S. El Maarat		S. Sidi Abdelmelak		S. Ayoune Soltane	
		2024	2025	2024	2025	2024	2025
pH	—	7,08	7,16	7,05	7,12	7,70	7,06
Conductivité électrique	µS/cm	88,7	116,8	768	739	1340	1207
Nitrates (NO₃⁻)	mg/L	3,45	1,71	0,282	0,142	70,21	45,65
Sulfates (SO₄²⁻)	mg/L	57,01	17,01	101	53,13	95,39	128
Fer (Fe²⁺)	mg/L	0,07	0,098	0,034	0,033	0,09	0,02
Phosphates (PO₄³⁻)	mg/L	0,01	0	0	0	0	0
Chlorures (Cl⁻)	mg/L	23,4	21,27	19,14	21,27	132,59	95,01
Alcalinité totale (TA)	°F	0	0	0	0	0	0
Alcalinité complète (TAC)	°F	8,45	29,28	326,96	319,4	384,3	341,6
Dureté totale (TH)	°F	40	36,2	482	392	442	590
Calcium (Ca²⁺)	mg/L	12,82	9,61	128,25	36,87	91,38	168,33
Magnésium (Mg²⁺)	mg/L	1,94	33,53	39,36	72,9	52	41,31
Matière organique (MO)	mg O ₂ /L	1,51	0,27	0,14	0,26	1,13	0,56
Résidu sec (RS)	mg/L	64	150	711	1411	1064	534

1.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH influence la plupart des processus chimiques et biologiques des écosystèmes aquatiques. C'est un facteur limitant. Pour un pH inférieur à 4,5 ou supérieur à 10, une toxicité

pour les organismes vivants est à noter.

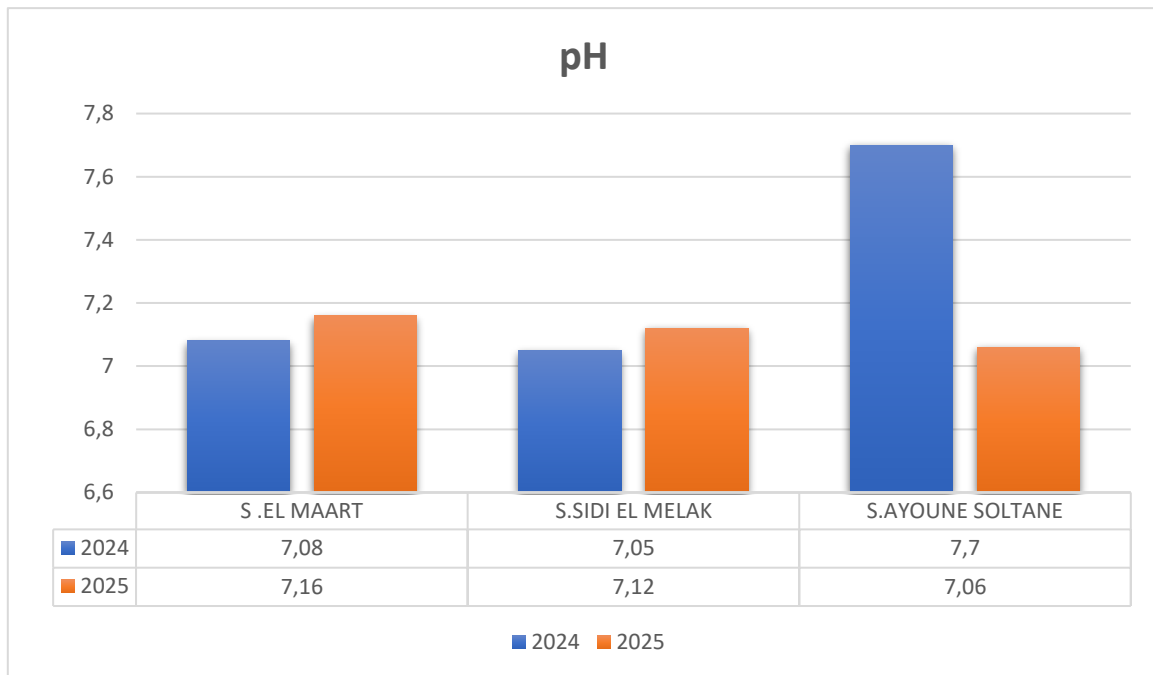


Figure 18 : Teneur du pH de l'eau des 03 sources étudiées

Les mesures du pH de l'eau pour les trois sources étudiées (**Figure 18**), effectuées au laboratoire de l'ADE au cours de l'année 2024, montrent une variation des valeurs de pH entre 7,05, 7,08 et 7,70, indiquant que ces eaux présentent un pH légèrement alcalin. Selon le **Tableau 5**, la qualité de l'eau tend vers la neutralité dans l'ensemble des stations.

En 2025, les valeurs de pH relevées varient entre 7,06, 7,12 et 7,16, confirmant également une eau proche de la neutralité dans les trois stations, comme l'indique le **Tableau 5**.

1.2. La conductivité électrique

La conductivité électrique nous renseigne avec une bonne approximation sur la charge minérale des eaux ainsi que sur leur salinité. Elle est proportionnelle au degré de minéralisation (teneur globale en éléments minéraux généralement ionisés) et varié en fonction de la température. Cependant, il est impératif de signaler que l'accroissement de la conductivité est aussi relatif aux quantités de rejet de sels suite aux activités agricoles (**Bensaci, 2007 ; Amira, 2008**). La mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer rapidement la minéralisation globale (**Sayad, 2008**).

Tableau 13 : Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (Izebatene et *al.*, 2019)

Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Qualification de l'eau
$\text{CE} < 400$	Excellente
$400 < \text{CE} < 750$	Bonne
$750 < \text{CE} < 1500$	Passable
$1500 < \text{CE} < 3000$	Médiocre

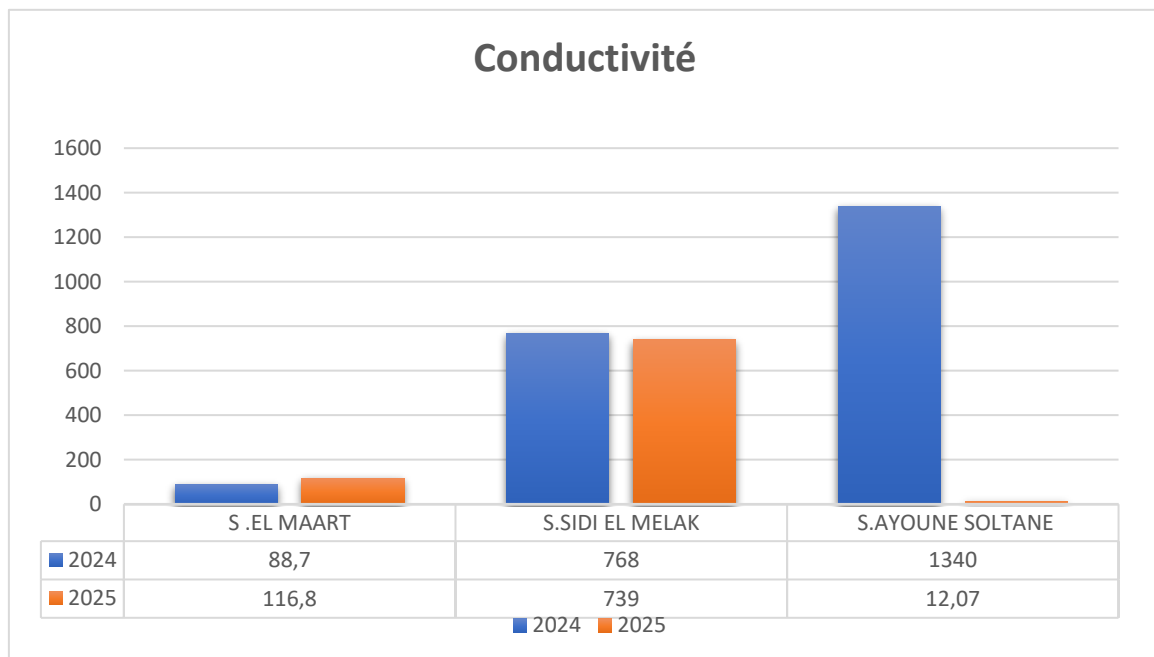


Figure 19 : Teneur de la conductivité de l'eau des 03 sources étudiées

Les mesures de la conductivité électrique de l'eau issues des trois sources étudiées, effectuées en 2024 et 2025, mettent en évidence des variations notables selon les sites. Pour la source de El Maarat, les valeurs enregistrées sont de 88,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2024 et 116,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2025, ce qui classe cette eau parmi les excellentes pour les deux années, selon les critères de Izebatene et al. (2019). À Sidi Abdelmelak, une légère amélioration de la qualité a été observée : la conductivité a diminué de 768 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2024 à 739 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2025, faisant passer la qualification de l'eau de passable à bonne. Concernant la source d'Ayoune Soltane, la conductivité était relativement élevée en 2024 avec une valeur de 1340 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduisant une eau de qualité passable. En revanche, en 2025, une baisse très marquée de la conductivité a été enregistrée avec une valeur de 12,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquant une amélioration significative vers une

eau de qualité excellente. Toutefois, cette dernière valeur nécessite d’être vérifiée en raison de l’écart important par rapport à l’année précédente.

1.3. Dureté totale (TH)

La dureté de l’eau consiste en la mesure des teneurs en calcaire et magnésium. Les teneurs dépendent de la nature des couches géologiques avec lesquelles l’eau s’est trouvée en contact durant son acheminement dans le sol. En général, l’eau qui présente une concentration de carbonate de calcium inférieure à 75 mg/L est considérée comme de l’eau douce ; entre 75 et 150 mg/L, on parle d’eau à dureté moyenne ; entre 150 et 300 mg/L, d’eau dure ; et à plus de 300 mg/L, d’eau à dureté élevée (CFPTEP, 2015).

Tableau 14 : Qualité de l’eau en fonction de la dureté totale (Izebatene et al., 2019)

Dureté totale (°F)	Qualification de l’eau
0 à 7	Très douce
7 à 15	Douce
15 à 30	Moyennement dure
30 à 40	Dure
> 40	Très dure

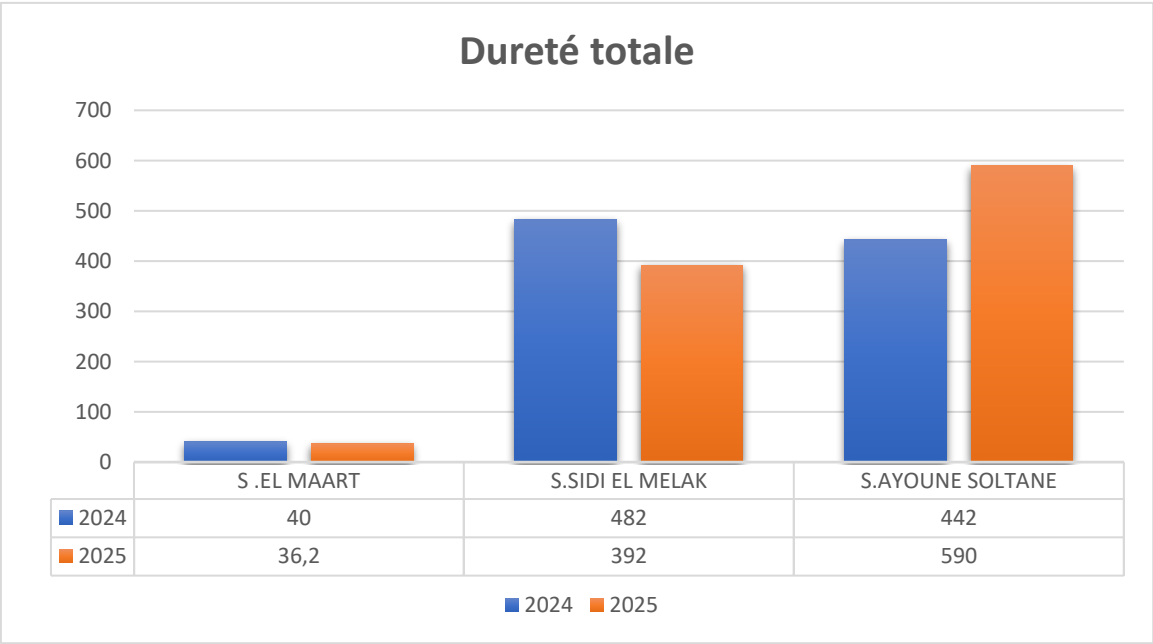


Figure 20: Teneur de la dureté totale de l’eau des 03 sources étudiées

Les analyses de la dureté totale (TH) de l'eau provenant des trois sources étudiées (**Figure 20**), réalisées au laboratoire de l'ADE, montrent des variations notables entre les années 2024 et 2025.

À la source de El Maarat, les valeurs de la dureté totale ont été estimées à 40 °F en 2024 et à 36,2 °F en 2025. Ces résultats indiquent que l'eau de cette source est douce.

En revanche, dans les sources de Sidi Abdelmalek et d'Ayoune Soltane, des niveaux de dureté plus élevés ont été enregistrés. À Sidi Abdelmalek, la dureté totale variait entre 392 et 482 mg/L entre 2024 et 2025, tandis qu'à Ayoune Soltane, elle oscillait entre 442 et 590 mg/L sur la même période. Ces valeurs traduisent une eau à dureté élevée dans ces deux sources.

1.4. Sulfates (SO_4^{2-})

Les concentrations en sulfates dans l'eau présentent une variabilité importante, principalement en raison des interactions entre l'eau et les substances présentes dans les aquifères souterrains. Ces niveaux peuvent largement dépasser les 100 mg/L, notamment en raison de la solubilité du gypse. Par ailleurs, le sulfate peut également résulter des processus d'oxydation microbienne, notamment en tant que produit final de la dénitrification des nitrates dans les aquifères (**Barry, 1988**).

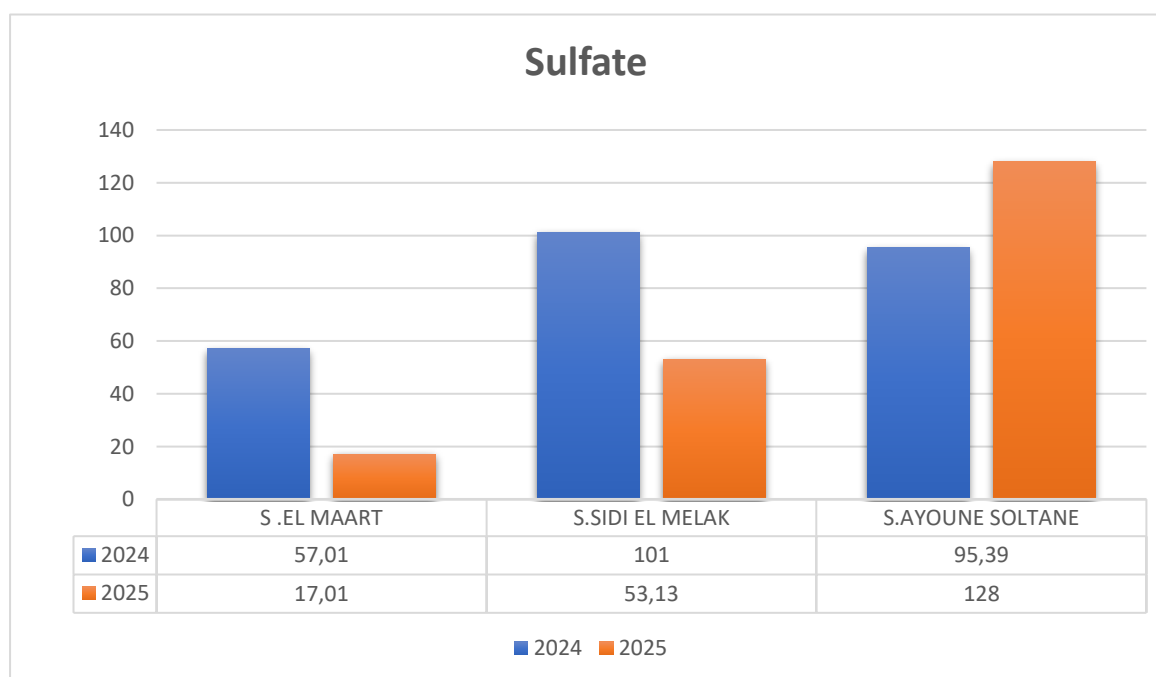


Figure 21 : Teneur du sulfate de l'eau des 03 sources étudiées

Les résultats obtenus pour les concentrations en sulfates (**Figure 21**) indiquent que toutes les valeurs mesurées restent conformes aux normes algériennes, fixées à un maximum de 400 mg/L. Les teneurs varient entre une valeur minimale de 17,01 mg/L et une valeur maximale de 128 mg/L. Ces résultats suggèrent que l'eau analysée présente une bonne qualité vis-à-vis de la teneur en sulfates.

1.5. Fer (Fe^{2+})

Le fer est un élément essentiel pour le bon fonctionnement de l'organisme, notamment pour la synthèse de l'hémoglobine dans le sang. Les besoins en fer varient quotidiennement en fonction de l'âge et du sexe (**Ben chehba, 2017**).

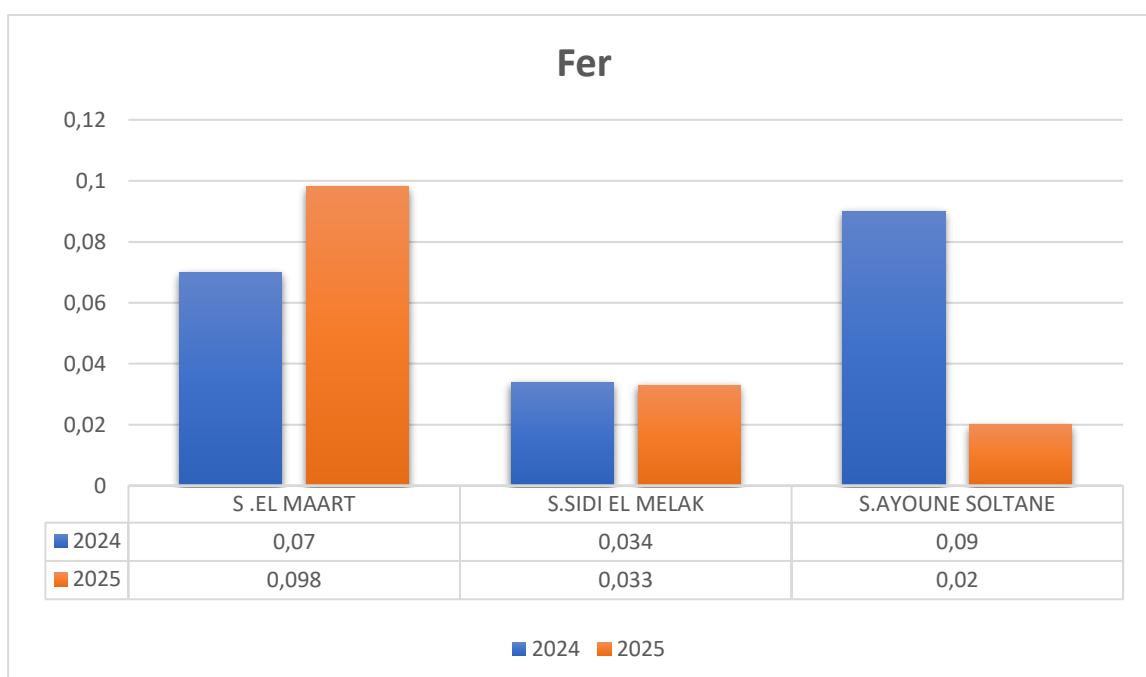


Figure 22 : Teneur du fer de l'eau des 03 sources étudiées

Les résultats de l'analyse du fer révèlent que les trois sources étudiées respectent les normes algériennes ainsi que celles de l'OMS en matière de potabilité de l'eau. Les concentrations mesurées varient entre une valeur minimale de 0,02 mg/L à la source d'Ayoune Soltane et une valeur maximale de 0,098 mg/L à la source d'El Maarat.

1.6. Matière organique (M.O)

La détermination de la matière organique peut se faire à l'aide de différentes méthodes analytiques, telles que l'oxydabilité au permanganate ou la mesure du carbone organique total (**Codex et Coin, 1981**). Lors de sa décomposition, la matière organique libère des éléments

essentiels comme le carbone, l'azote et le phosphore, constituant ainsi une source d'énergie. Elle joue également un rôle important comme support à la synthèse biologique et représente une source de métabolites (Feuillade, 2004).

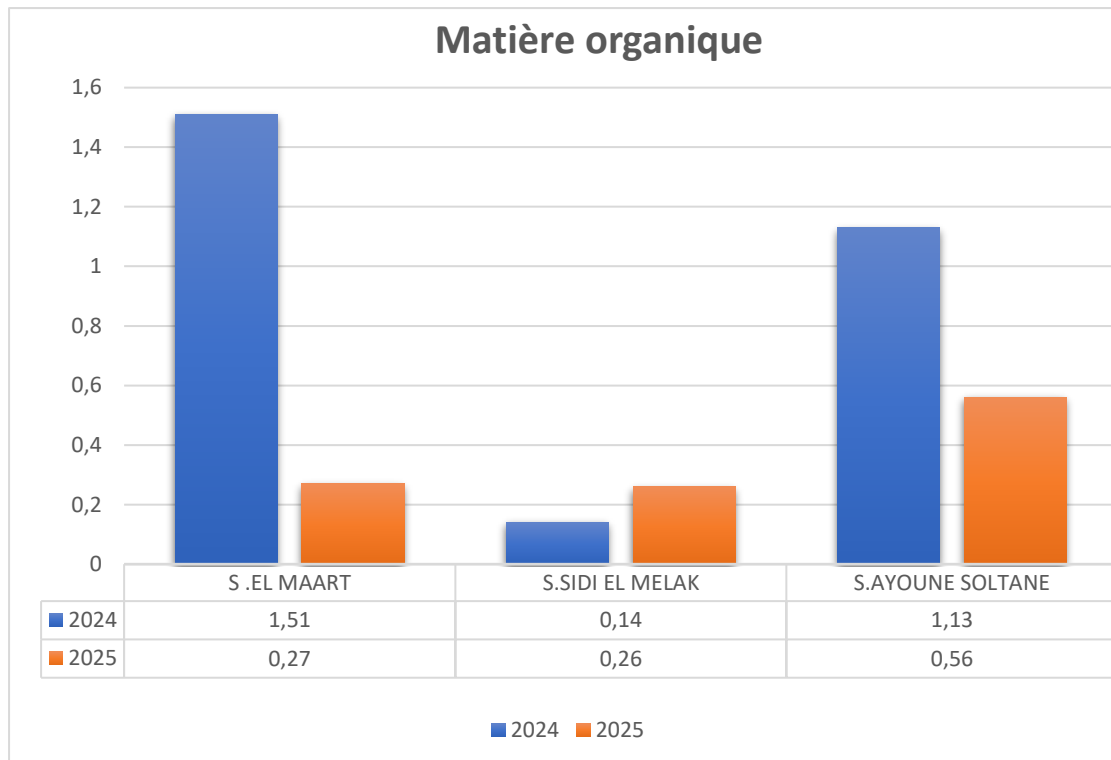


Figure 23 : Teneur de la matière organique de l'eau des 03 sources étudiées

Les résultats de l'analyse de la matière organique (**Figure 23**) montrent que les valeurs obtenues pour les trois sources étudiées, restent toutes inférieures aux limites fixées par les normes algériennes et celles de l'OMS en matière de potabilité de l'eau. Ces résultats confirment que l'eau des sources analysées est conforme aux exigences de qualité concernant la teneur en matière organique.

1.7. Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates sont des composés d'azote et d'oxygène et sont indispensables aux développements des végétaux mais peuvent être toxiques pour l'homme. La plupart des eaux naturelles contiennent normalement des nitrates à des doses faibles de quelque mg/L. Cependant des nombreuses eaux souterraines et des surfaces ont une concentration élevée en nitrate du fait de l'enrichissement des sols par les engrais ou par les rejets des eaux usées domestiques ou industrielles (Rousseau et al., 2004).

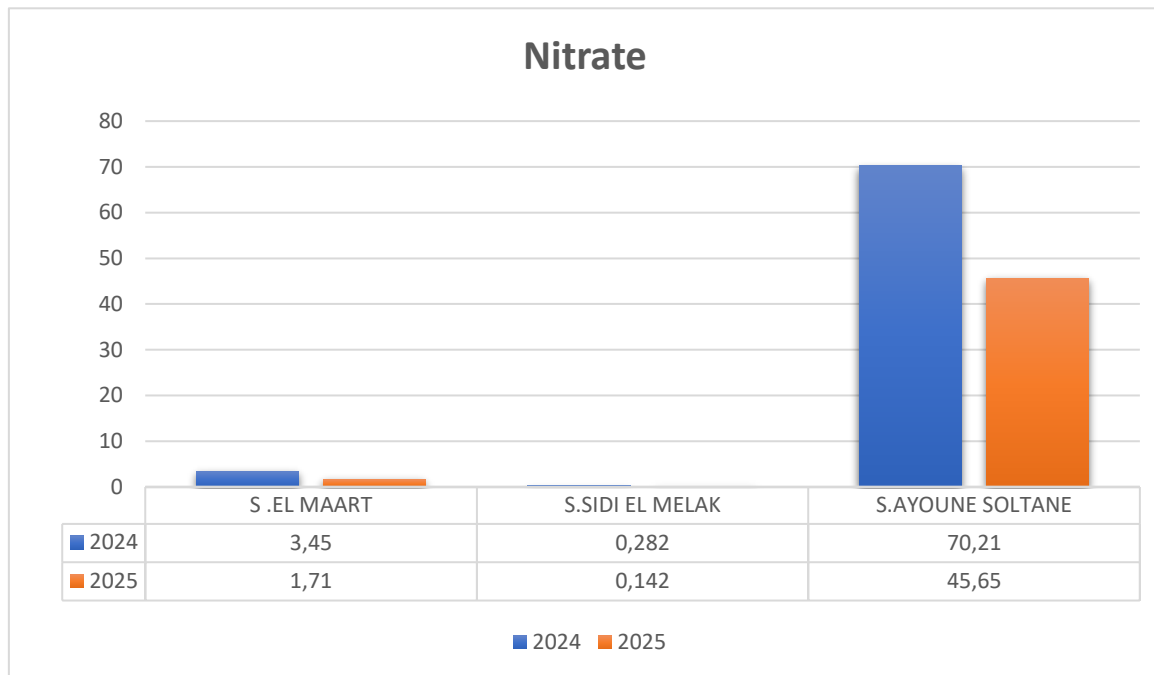


Figure 24 : Teneur du nitrate de l'eau des 03 sources étudiées

Les analyses des nitrates dans l'eau provenant des trois sources étudiées (**Figure 24**), r  alis  es au laboratoire de l'ADE, indiquent que les concentrations mesur  es à la source d'El Maarat et à celle de Sidi Abdelmalek en 2024 et 2025 sont rest  es conformes aux normes en vigueur.

En revanche, la source d'Ayoune Soltane a présenté en 2024 une concentration plus   lev  e, atteignant 70,21 mg/L. Toutefois, une diminution notable a été observ  e en 2025, avec une concentration ramen  e à 45,65 mg/L, ce qui la situe également dans les limites fix  es par les normes de potabilité.

1.8. Alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes. Le titre alcalimétrique (TA) mesure la teneur de l'eau en hydroxydes libres et en carbonates. Le titre alcalimétrique complet ou TAC correspond à la teneur en hydroxydes libres carbonates et hydrogénocarbonates. Ces déterminations sont bas  es sur la neutralisation d'un volume d'eau par un acide minéral dilué (**Menad et Metadjer, 2012**).

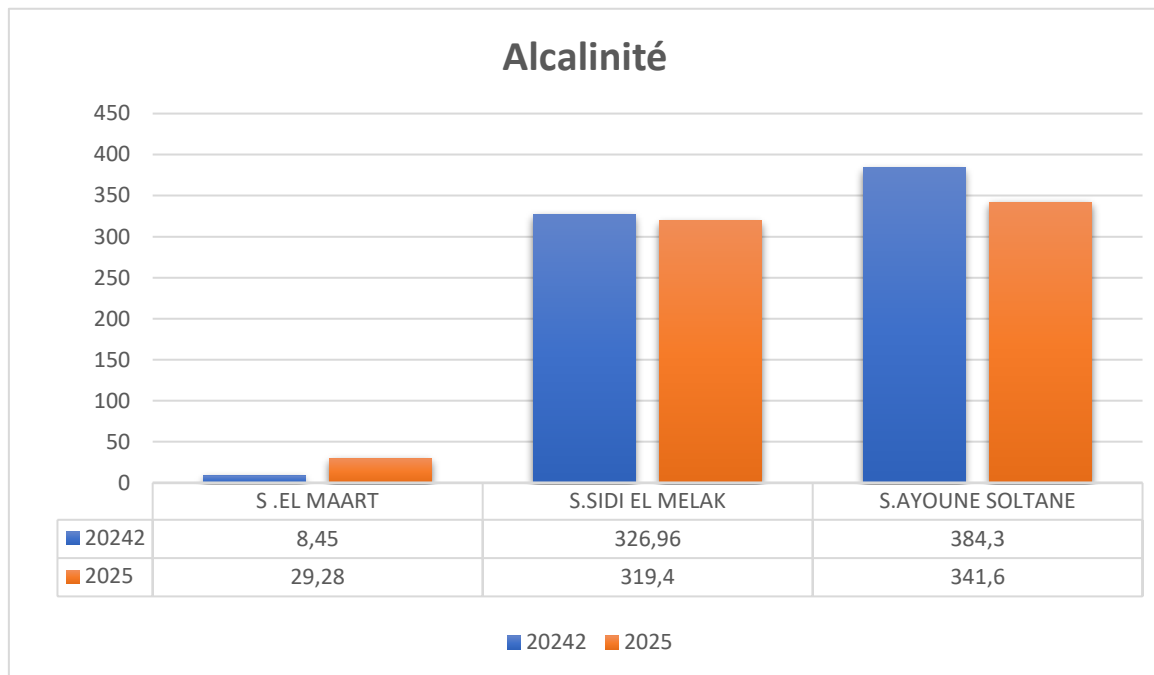


Figure 25 : Teneur du Alcalinité de l'eau des 03 sources étudiées

D'après les résultats obtenus (**Figure 25**), il ressort que le titre alcalimétrique (TA) est nul dans l'eau lors des deux campagnes de prélèvements effectuées sur les quatre sites étudiés. Cela indique une absence ou une présence négligeable d'alcalins libres et de carbonates dans ces eaux.

En ce qui concerne le titre alcalimétrique complet (TAC), les résultats varient légèrement d'une source à une autre. Cette mesure reflète principalement la teneur en bicarbonates, qui sont les principaux contributeurs à l'alcalinité de l'eau dans le cas où les carbonates et hydroxydes sont absents. Les valeurs enregistrées montrent que l'eau contient une faible concentration en bicarbonates, traduisant une alcalinité modérée à faible, sans pour autant compromettre la qualité de l'eau.

1.9. Chlorures (Cl⁻)

Le chlorure est largement distribué dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) ou de potassium (KCl), l'eau de mer contient la plus grande quantité de chlorure dans l'environnement (**Conseil National de la Recherche de Canada, 1977**). Les effets nocifs des chlorures sur la santé peuvent provoquer une hypertension artérielle ou une sensibilité au sodium (Na) (**Ministère de la santé, Canada, 1983**).

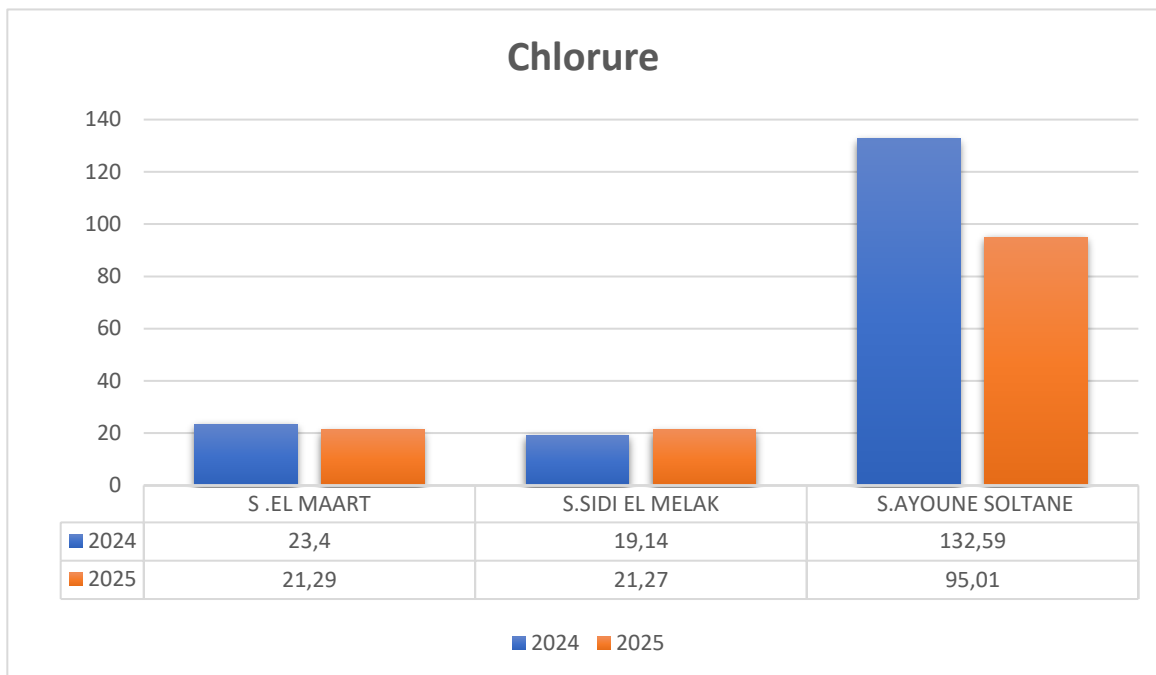


Figure 26 : Teneur du chlorure de l’eau des 03 sources étudiées

Selon les normes de potabilité de l’eau en Algérie ainsi que celles de l’OMS (**Tableau 5**), la concentration maximale admissible en chlorures est fix e à 500 mg/L. Les résultats obtenus (**Figure 26**) montrent que les concentrations en chlorures mesur es dans les trois sources étudiées restent largement en dessous de ce seuil. Ces résultats indiquent donc que la qualité de l’eau, en ce qui concerne les chlorures, est consid r e comme acceptable.

1.10. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium présent dans l’eau potable peut avoir des effets bénéfiques sur la santé. Il contribue notamment à bloquer l’absorption des métaux lourds, à renforcer la masse osseuse et à prévenir certains types de cancer, comme le cancer du côlon. Certaines études suggèrent même qu’il pourrait atténuer les premiers signes du cancer colorectal (**Garland et al., 1985**).

Des recherches indiquent également que l’incidence du cancer colorectal est plus  lev e chez les personnes consommant une eau douce pauvre en calcium (**Silberner, 1985**).

Cependant, à des concentrations très  lev es, le calcium peut devenir nocif. Un excès peut notamment entraver l’absorption d’autres minéraux essentiels, tels que le fer (**Monser et al., 1976**).

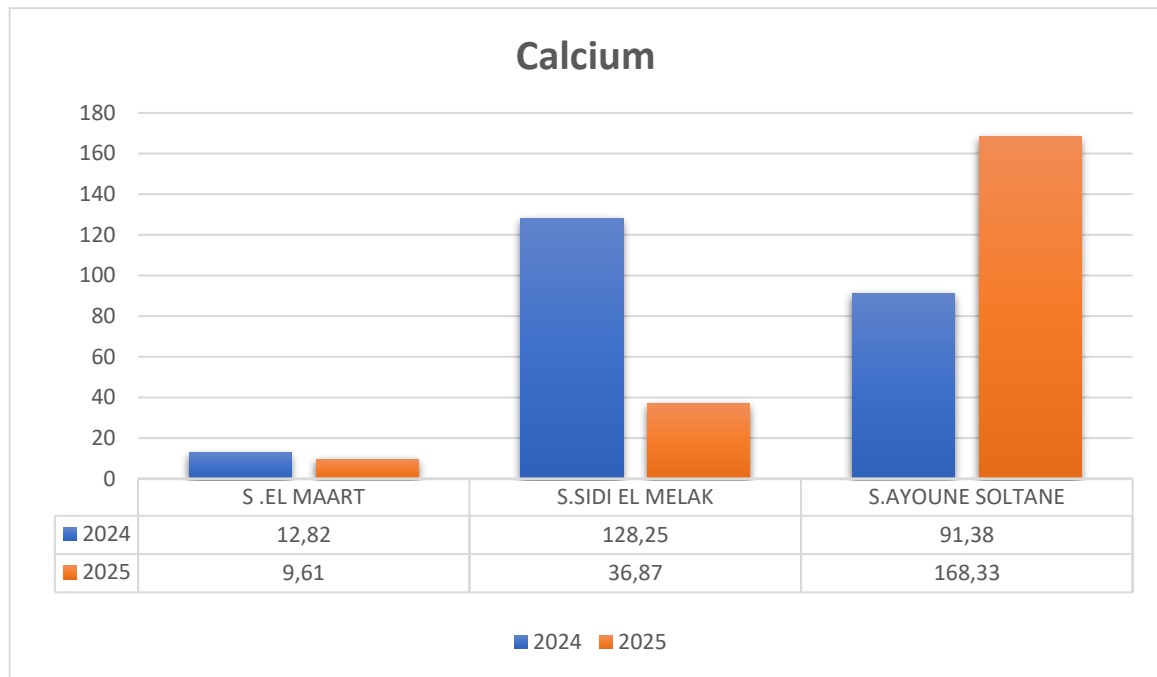


Figure 27 : Teneur du calcium de l’eau des 03 sources étudiées

D’après les résultats obtenus (**Figure 27**), la concentration en calcium dans l’eau des trois sources étudiées en 2024 et 2025 varie entre 9,61 mg/L et 168,33 mg/L. Ces valeurs restent conformes aux normes de potabilité de l’eau établies par les autorités algériennes ainsi que par l’Organisation mondiale de la santé (OMS).

1.11. Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium est un élément indispensable au métabolisme humain. Il joue un rôle clé dans la régulation de la perméabilité cellulaire et participe au bon fonctionnement des systèmes cardiovasculaire, neuromusculaire et rénal. Toutefois, des concentrations excessives de magnésium peuvent altérer gravement ces fonctions. L’effet indésirable le plus courant lié à la présence de magnésium dans l’eau potable est son action laxative.

Le corps humain nécessite environ 25 grammes de magnésium. L’apport journalier en magnésium par l’eau de boisson varie en fonction de la durt  de celle-ci. Par exemple, chez des individus consommant 1,5 litre d’eau par jour, l’apport en magnésium peut atteindre environ 2,5 mg/jour dans le cas d’une eau douce contenant 1 mg/L de Mg²⁺ (**Bokovay, 1986**).

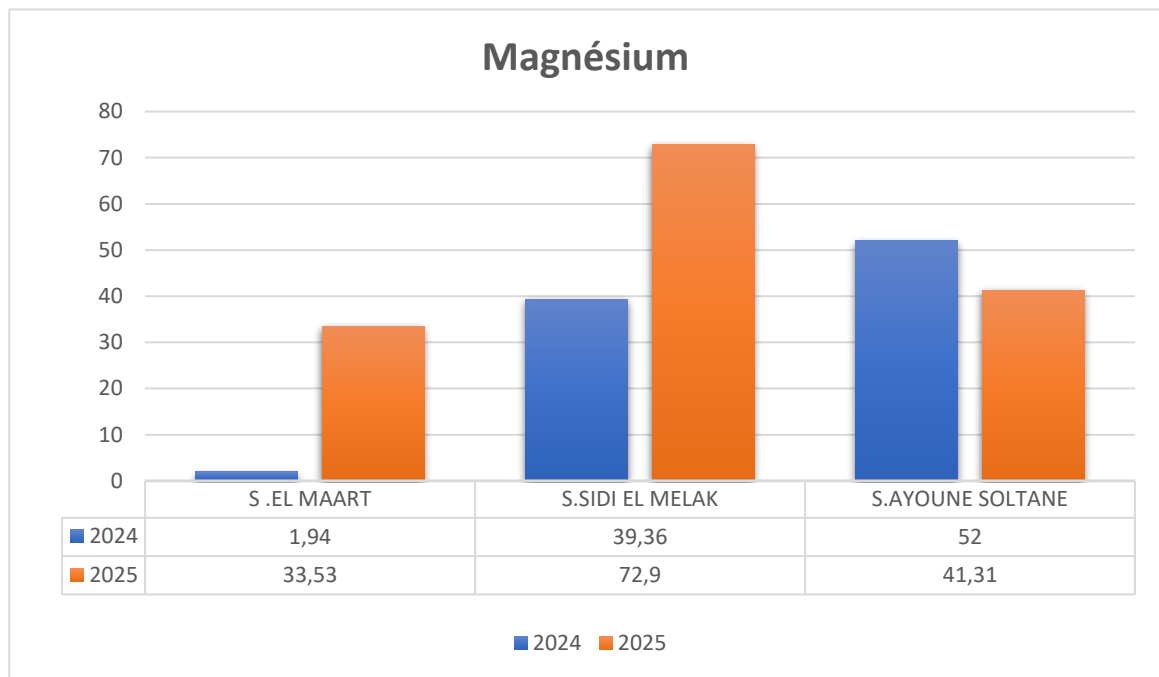


Figure 28 : Teneur du magnésium de l’eau des 03 sources  tudi e

Les résultats de l’analyse du magnésium (**Figure 28**) montrent que les concentrations mesur es dans les trois sources restent conformes aux normes algériennes de potabilité de l’eau (**Tableau 5**). La valeur minimale a été enregistr e en 2024 à la source d’El Maarat, avec une concentration de 1,91 mg/L. En revanche, la concentration maximale, atteignant 72,9 mg/L, a été observ e à la source de Sidi Abdelmalek. Ces valeurs demeurent dans les limites acceptables, indiquant une qualité d’eau satisfaisante sur le plan du magnésium.

1.12. Résidu sec (R.S)

La détermination du résidu sec dans l’eau non filtr e permet d’évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension non volatiles, obtenues après évaporation de l’eau. Ces substances contribuent notamment à la formation du tartre dans les installations hydrauliques (**Rodier, 2009 ; Khelili & Lazali, 2015**).

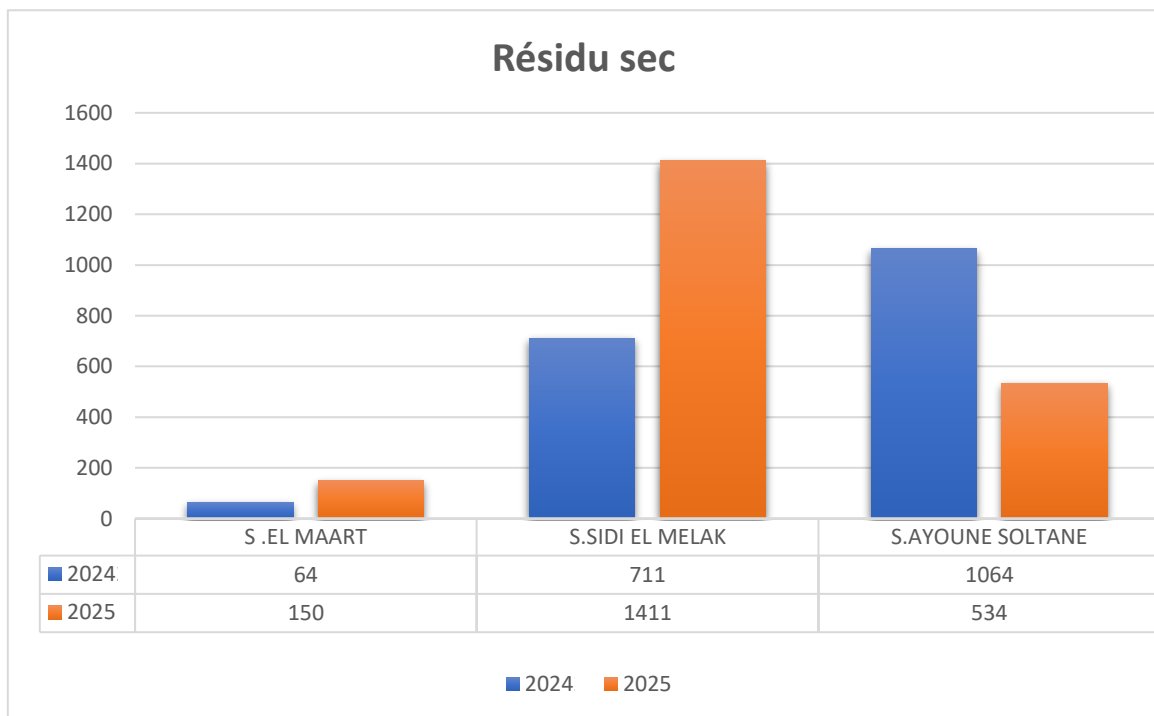


Figure 29 : Teneur du résidu sec de l'eau des 03 sources étudiées

D'après les résultats obtenus (**Figure 29**), les valeurs des résidus secs mesurées dans les trois sources étudiées indiquent que l'eau analysée présente une qualité jugée acceptable, conformément aux normes de potabilité en vigueur en Algérie et aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

1.13. Phosphate (PO_4^{3-})

Ce nutriment, bien qu'essentiel au développement des organismes vivants, peut devenir un polluant lorsqu'il est présent en concentrations élevées dans l'environnement, contribuant notamment à des phénomènes tels que l'eutrophisation (**Rodier et al., 2009**).

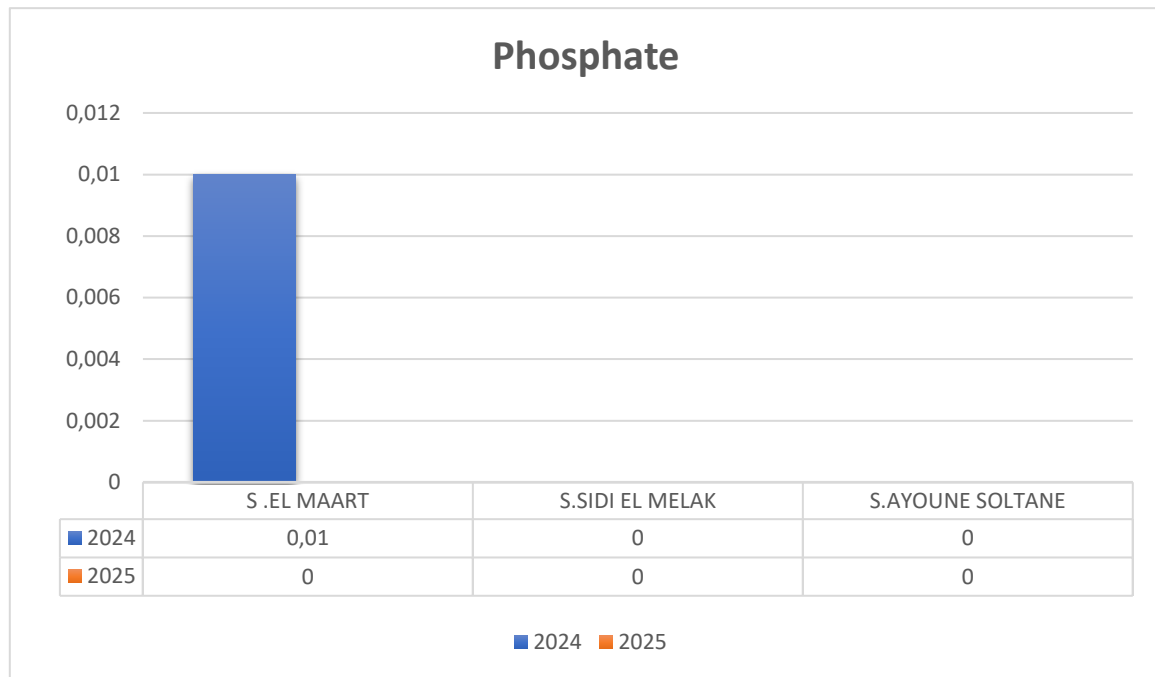


Figure 30 : Teneur du phosphate de l'eau des 03 sources étudiées

Les résultats de l'analyse des phosphates (**Figure 30**) montrent que toutes les valeurs obtenues sont conformes aux normes de potabilité de l'eau établies par l'Algérie et l'OMS (**Tableau 5**). La concentration minimale, égale à 0 mg/L, a été enregistrée à la source d'El Maarat en 2025, ainsi qu'aux sources d'Ayoune Soltane et de Sidi Abdelmalek en 2024 et 2025. La concentration maximale observée, qui reste très faible, est de 0,01 mg/L et a été mesurée à la source d'El Maarat en 2025. Ces résultats indiquent une absence quasi totale de pollution phosphatée dans les eaux analysées.

2. Comparaison des analyses physico-chimiques

Cette partie porte sur l'analyse comparative de 14 paramètres physico-chimiques mesurés dans six sources d'eau, dont trois font l'objet de la présente étude (S. El Maarat, S. Sidi Abdelmelak et S. Ayoune Soltane) et trois autres sources de référence (S. Tamda, S. El Wessaf et S. Houima). Le choix de ces derniers s'est appuyé sur la disponibilité des données analytiques couvrant la même période (2024-2025), garantissant ainsi une comparabilité optimale des résultats, notamment pour les paramètres critiques comme les nitrates et la dureté.

Le **Tableau 15** présente les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau des trois sources de références au cours des années 2024 et 2025 à des fins d'une analyse comparative.

Tableau 15 : Les résultats des analyses physicochimiques obtenus des trois sources de références au cours des années 2024 et 2025

	Tamda		El Wessaf		Houima	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025
pH	7,79	7,51	7,13	7,03	6,80	7,37
Conductivité	482	499	305	334	1609	1529
NO₃⁻	36,61	33,57	8,55	2,42	0,673	2,06
SO₄²⁻	20,7	34,28	300,14	00	244,77	173,10
Fe	0,017	0,003	0,054	0,06	0,011	0,03
PO₄³⁻	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04
Cl⁻	22,68	30,48	22,68	22,68	159,53	129,75
TA	00	00	00	00	00	00
TAC	400,16	245,22	150,06	180,56	445,3	361,25
TH	320	260	158	170	774	616
Ca²⁺	90,58	90,58	32,86	32,06	250,90	173,94
Mg²⁺	22,84	8,26	18,46	21,87	21,87	44,22
MO	0,14	1,08	0,28	0,06	2,44	0,26
RS	237	373	291	808	1027	1344

Les résultats montrent que la majorité des paramètres respectent les normes établies par l'OMS et la réglementation algérienne. Plus précisément :

Le pH de toutes les sources se maintient dans l'intervalle normal (6,80-7,79).

La conductivité électrique, bien que variable (88,7-1609 µS/cm), reste dans les limites acceptables, avec cependant des valeurs significativement plus élevées pour les sources de Houima et Ayoune Soltane, révélant une minéralisation plus prononcée.

Parmi les éléments préoccupants, on note particulièrement :

Une concentration en nitrates dépassant la norme de 50 mg/L à la Source d'Ayoune Soltane (70,21 mg/L en 2024). La source de Tamda affiche une concentration proche du seuil limite (36,61 mg/L).

Une dureté particulièrement élevée (TH > 300 °F) est observée aux sources de Houima, Sidi Abdelmelak et Ayoune Soltane.

Les analyses révèlent également :

- Des concentrations en sulfates importantes aux sources d'Houima et El Wessaf (atteignant 300 mg/L).
- Une alcalinité marquée ($\text{TAC} > 300 \text{ °F}$) dans quatre sources (Sidi Abdelmalek, Ayoune Soltane, Tamda et Houima).
- Des concentrations en calcium élevée à la source Ayoune Soltane (168,33 mg/L en 2025).
- Une légère augmentation de matière organique à la source Houima (2,44 mg/L en 2024).

Parmi l'ensemble des sources évaluées, la source d'El Maarat présente le profil le plus favorable avec :

- Une conductivité particulièrement faible (88,7-116,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Une dureté modérée (40 °F).
- Des concentrations en nitrates particulièrement basses (1,71-3,45 mg/L).

Cette analyse met en évidence la nécessité d'une surveillance particulière des paramètres critiques (Nitrates et dureté) dans certaines sources.

3. Les paramètres bactériologiques

L'évaluation de la potabilité de l'eau nécessite une attention particulière à sa qualité microbiologique. Dans cette optique, nous avons entrepris des investigations afin d'identifier les différentes espèces bactériennes susceptibles de contaminer les eaux de source.

3.1. Résultats des analyses des coliformes totaux, *E. coli* et des streptocoques fécaux

Les résultats des analyses bactériologiques de l'eau prélevée en 2024 et 2025 à partir des trois sources — El Maarat, Sidi Abdelmalek et Ayoune Soltane — ont été synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 16 : Résultats des analyses bactériologiques des eaux étudiées

Point d'eau	Date	Coliformes totaux	<i>E. coli</i>	Entérocoques
S. el Maarat	Septembre 2024	0	0	0
	Mai 2025	0	0	1
S. sidi Abdelmalek	Septembre 2024	0	0	0
	Mars 2025	0	0	0
S. Ayoune Soltane	Juillet 2024	0	0	0
	Février 2025	30	24	4

Conformément aux normes de qualité microbiologique de l'eau destinée à la consommation humaine, aucune présence de coliformes totaux, de coliformes fécaux (*E. coli*) ou d'entérocoques ne doit être détectée dans un échantillon de 100 mL d'eau (**normes OMS, 2017 ; Directive 98/83/CE du Conseil de l'Union européenne ; JORA, 2011**).

S. El Maarat : Les résultats du Septembre 2024 et du Mai 2025 montrent une eau globalement conforme. La présence d'un (1) UFC/100 ml d'entérocoques dans l'échantillon de Mai 2025 peut indiquer une contamination fécale très légère ou ponctuelle, nécessitant un suivi (**Edberg et al., 2000**).

S. Sidi Abdelmalek : Tous les échantillons analysés présentent une absence totale de contamination bactériologique, ce qui indique une qualité bactériologique satisfaisante selon les normes internationales (**Rodier et al., 2009 ; OMS, 2017**).

S. Ayoune Soltane : L'échantillon du Février 2025 révèle des niveaux très élevés de coliformes totaux (30 UFC/100 mL), de coliformes fécaux (24 UFC/100 mL) et de 4 UFC/100 mL d'entérocoques, ce qui est clairement non conforme et indique une pollution fécale récente et potentiellement persistante (**Leclerc et al., 2001 ; Leyral & Morel, 2002**). Ce point d'eau nécessite des mesures correctives urgentes et une surveillance accrue, car la consommation de cette eau peut présenter des risques sanitaires (**OMS, 2017**).

3.2. Comparaison des analyses bactériologiques

Le **Tableau 17** présente une synthèse des résultats des analyses bactériologiques effectuées sur l'eau des trois sources au cours des années 2024 et 2025.

Tableau 17 : Les résultats de l'analyse bactériologique des trois sources de références au cours des années 2024 et 2025

Point d'eau	Date	Coliformes totaux	<i>E. coli</i>	Entérocoques
Tamda	Septembre 2024	0	0	0
	Mai 2025	39	39	0
El wessaf	Septembre 2024	0	0	0
	Mars 2025	0	0	0
Houima	Juillet 2024	0	0	1
	Février 2025	0	0	0

L'analyse microbiologique des six sources d'eau étudiées (S. Tamda, S. El Wessaf, S. Houima, S. El Maarrat, S. Sidi Abdelmalek et S. Ayoune Soltane), basée sur les indicateurs de contamination fécale (coliformes totaux, *Escherichia coli* et entérocoques intestinaux), révèle des situations contrastées selon les normes OMS et algériennes. Ces dernières imposent une absence totale (0 UFC/100 mL) d'*E. coli* et d'entérocoques, et un seuil maximal de 10 UFC/100 mL pour les coliformes totaux.

Les résultats mettent en évidence deux cas particulièrement préoccupants. La source de Tamda présente en Mai 2025 une contamination alarmante avec 39 UFC/100 mL de coliformes totaux et d'*E.coli*, tandis que la source d'Ayoune Soltane enregistre en Février 2025 des niveaux critiques (30 UFC de coliformes, 24 UFC d'*E. coli* et 4 UFC d'entérocoques). Ces valeurs, bien au-delà des seuils admissibles, indiquent une pollution fécale récente et un risque sanitaire élevé, probablement dus à des infiltrations d'eaux usées ou à une protection insuffisante des points de captage (Cabral, 2010 ; WHO, 2017). À un moindre degré, les sources de Houima et El Maarat montrent des contaminations ponctuelles d'entérocoques (1 UFC), pouvant s'expliquer par des facteurs environnementaux temporaires comme des ruissellements pluviaux (Edberg et al., 2000).

En contraste positif, les sources d'El Wessaf et Sidi Abdelmalek maintiennent une conformité parfaite durant toute la période d'étude, sans aucune contamination détectée. Parmi l'ensemble des sources évaluées, la source de Sidi Abdelmalek se distingue comme la référence en matière de qualité bactériologique, suivie de près par El Wessaf. Ces performances constantes soulignent l'efficacité de leurs systèmes de protection et la stabilité de leur environnement.

Ces résultats mettent en lumière la nécessité : (1) d'un suivi régulier renforcé, particulièrement pour les sources à risque comme Tamda et Ayoun Soltane ; (2) d'investigations complémentaires pour identifier les causes précises des contaminations (facteurs saisonniers, pressions anthropiques ou défaillances techniques) ; et (3) de mesures correctives immédiates pour les sources non conformes. La vulnérabilité de certaines sources aux contaminations microbiologiques appelle à une révision des dispositifs de protection et à une gestion plus rigoureuse des bassins d'alimentation.

Conclusion

Conclusion

L'eau, ressource vitale et élément clé du développement durable, fait l'objet de cette étude portant sur trois sources principales de la région de Mila : El Maarat, Sidi Abdelmalek et Ayoun Soltane. Notre évaluation, basée sur les normes algériennes et les recommandations de l'OMS pour l'eau potable, combine des analyses physico-chimiques et bactériologiques pour dresser un portrait complet de la qualité de ces ressources hydriques.

Les analyses révèlent une eau présentant un pH neutre à légèrement alcalin (6,80-7,79), témoignant d'un bon équilibre chimique propice à la consommation humaine. La conductivité électrique, indicateur de minéralisation, montre des variations significatives entre les sources, avec une amélioration notable observée à Ayoun Soltane. La dureté totale, bien qu'élevée à Sidi Abdelmalek et Ayoun Soltane ($TH > 300$ °F), reste dans les limites autorisées, reflétant probablement la nature géologique des aquifères. Les concentrations en sulfates et en fer se maintiennent systématiquement en dessous des seuils réglementaires, tandis que les teneurs en matière organique et en nitrates demeurent généralement acceptables. Une exception notable apparaît à Ayoun Soltane, où le taux de nitrates atteint 70,21 mg/L, suggérant une possible influence des activités agricoles environnantes.

Le profil bactériologique présente des disparités marquées entre les sources. Sidi Abdelmalek se distingue par une excellente qualité microbiologique, totalement exempte de germes pathogènes. À l'inverse, Ayoun Soltane montre des signes alarmants de contamination fécale, avec présence d'*Escherichia coli* (24 UFC/100 mL) et d'entérocoques intestinaux (4 UFC/100 mL), indiquant un risque sanitaire important nécessitant des mesures urgentes.

L'extension de l'étude à trois sources supplémentaires (Tamdá, El Wessaf et Houima) confirme cette dichotomie qualitative. El Wessaf rejoint Sidi Abdelmalek dans le groupe des sources de qualité irréprochable, tandis que Tamdá présente des contaminations bactériennes similaires à Ayoun Soltane. Houima occupe une position intermédiaire, nécessitant une surveillance accrue malgré des paramètres globalement acceptables.

Ces résultats soulignent la nécessité :

1. D'un programme de surveillance renforcé des sources contaminées.
2. De mesures de protection accrues des zones de captage.

3. De campagnes de sensibilisation des usagers.
4. De traitements correctifs immédiats (chloration) pour les sources problématiques.

La préservation durable de ces ressources hydriques exige une approche intégrée combinant :

- Un suivi scientifique rigoureux.
- Une gestion environnementale proactive.
- Une implication active des communautés locales.
- Des aménagements de protection adaptés.

Cette étude met en lumière l'impérieuse nécessité d'une gestion différenciée des ressources en eau, adaptée aux spécificités de chaque source, pour garantir à long terme l'accès à une eau de qualité pour l'ensemble des usagers de la région de Mila.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Agence Nationale de Développement de l'Investissement. (2013). *ANDI*.
2. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2017). Étude hydrogéologique de la région de Mila. Rapport interne, Direction des ressources en eau, Wilaya de Mila.
3. AGRIGON.A, (2000) : Annuaire de la qualité des eaux et des sédiments. DUNOD.206p.
4. Akın, M., & Akın, G. (2007). Suyun önemi, Türkiye'de su potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 47(2), 105–118.
5. Al-Rawajfeh, A., & Al-Shamaileh, E. M. (2007). Water chemistry and quality parameters. Desalination, 206(1-3), 119-127.
6. American Public Health Association (APHA). (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.). American Public Health Association.
7. Amira W. (2008). Degré de contamination de l'eau de la mare Redjla (Taher) par les nitrates : Détermination de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau. Mémoire de magister. Université de Jijel. 103 p.
8. ANRH (2021). Agence Nationale des Ressources Hydrauliques - Rapport annuel sur la gestion des ressources en eau en Algérie. Alger : ANRH.
9. Aouissi, A. (2010). *Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-est de l'Algérie)* [Mémoire de Magister en Hydro-écologie, Université de Guelma].
10. Atmania, D. (2010). *Minéralogie des argiles et phénomène de retrait-gonflement dans le bassin de Mila (Nord constantinois)* [Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine].
11. Ayad, W. (2016). Étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines. Journal Algérien des Sciences, 12(3), 24-29.
12. Ayad, W. (2017). Impacts sanitaires des nitrates dans les eaux. Revue Santé & Environnement, 5(1), 45-52.
13. Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leurs classifications. *Annales de Géographie*, 355, 193–220.
14. Bary., (1988), l'intension marine et son impact sur l'écosystème.
15. Baza, Y. (2006). Effets des nitrates sur la santé humaine. Santé Publique, 18(2), 78-83.
16. Ben chehba H., Ben Hennour N., (2017). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de sources dans les localisés de Miliana (Ain Defla) et Ain.
17. Bensaci T. (2007). Détermination de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface : cas du barrage Timgad (W. de Batna) et la retenue collinaire d'Ourkis (W.

- d'Oum El Bouaghi). Mémoire de Magister, Centre universitaire Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi. 81 p.
18. Bensaoula, F., Bouguerra, M. L., & Djebbar, T. (2007). Les eaux souterraines en Algérie : enjeux et perspectives. *Revue des Sciences de l'Eau*, 20(2), 181-190.
 19. Berkali, K., & Elouaere, F. (2014). *Inventaire et écologie des oiseaux d'eau au niveau du barrage de Beni Haroun (Wilaya de Mila) : saison d'hivernage 2013/2014* [Mémoire de Master, Centre Universitaire de Mila].
 20. Bessaoud, O. (2013). L'agriculture irriguée et la gestion de l'eau en Algérie. *Options Méditerranéennes. Série B : Études et Recherches*, (71), 145–164.
 21. Boeglin J.C. (2006). Propriétés Des Eaux Naturelles. Dans : *Techniques De L'ingénieur, W1 : Technologie Des Eaux. Techniques De L'ingénieur. Chap.G1 110*, Pp: 1-8.
 22. Boeglin, N. (2006). Origine et qualité des eaux souterraines en Afrique de l'Ouest. IRD.
 23. Bokovoy., (1986), recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada.
 24. Bony, S. (2015). L'eau atmosphérique. In A. Euzen, C. Jeandel & R. Mosseri (Dir.), *L'eau à découvert* (pp. 76–77). CNRS Éditions.
 25. Cabral, J. P. S. (2010). Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(10), 3657–3703. <https://doi.org/10.3390/ijerph7103657>
 26. Cardot C. (1999). *Les Traitements Des Eaux (Procédés Physicochimiques ; Cours Et Problèmes Résolus)*, Ellipses. 247P.
 27. Castany, G. (1998). *Les problèmes d'alimentation en eau potable*. Paris: Dunod.
 28. CDC. (2020). *Water Fluoridation Basics*. Centers for Disease Control and Prevention.
 29. Çepel, N., & Ergün, C. (2003). The importance of water and its ecological problems.
 30. CETIC. (2008). *Monographie touristique de la wilaya de Mila*.
 31. CFPTEP. (2015). Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable. Le chrome dans l'eau potable. Document de consultation publique. Canada. Pp 02-03.
 32. Chaplin, M. (2001). Water: its importance to life. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 29(2), 54–59.
 33. Chapman, D. (1992). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. WHO/UNEP.
 34. Chelli, M., Djouhri, A., et al. (2013). Étude des chlorures dans les eaux du littoral. *Hydrologie Algérienne*, 8(4), 33-39.

35. Codex Stan et Coin, (1981). La pratique de l'eau : usages domestiques. Collectif et industriel. Édition : Moniteur. Paris
36. Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hydrogeology of Spain. Balkema.
37. Dali, Z. et Bentaleb, F. (2005): Impact humaine sur l'environnement « cas de l'ensablement de la région de Boussaâda ». Mémoire d'ingéniorat, Université de M'sila, M'sila, 71 p.
38. Degremont G., (2005). Mémento technique de l'eau, Tome 1, 10^{ème} édition, Edit.Tec et doc, PP : 3- 38.
39. Deheb (Tiaret). Mémoire de master. Université Abdelhamid ben Badis-Mostaganem.
40. Derwich, E., Beziane, Z., Benaabidate, L., & Belghyti, D. (2008). Évaluation de la qualité des eaux de surface des oueds Fès et Sebou utilisées en agriculture maraîchère au Maroc. Larhyss Journal, (7), 59–77.
41. Derwiche, A., et al. (2010). Turbidité et pollution des eaux de surface. Revue des Sciences de l'Eau, 23(1), 15-23.
42. Diallo A-D. (2015) : Détermination de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux de puits de la commune urbaine de Mamou. Mémoire de master. Institut supérieur de Technologie de Mamou, Guinée, 83 p.
43. Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires (DPSB). (2018). *Rapport d'activités*.
44. Drissi S. (2008). Qualité Ds Eaux De Quelques Sources Dans La Région De Souk-Ahras. Mémoire De Magister. Centre Universitaire De Souk Ahras. 69 P.
45. Duvignaud, P. (1980). La Synthèse Ecologique, 2^{ème} édition, Doin Editeurs, Paris. 380 P.
46. Edberg, S. C., Rice, E. W., Karlin, R. J., & Allen, M. J. (2000). Escherichia coli: the best biological drinking water indicator for public health protection. Symposium Series (Society for Applied Microbiology), (29), 106S–116S.
47. Edberg, S. C., Rice, E. W., Karlin, R. J., & Allen, M. J. (2000). Escherichia coli: The best biological drinking water indicator for public health protection. Symposium Series (Society for Applied Microbiology), 29, 106S–116S
48. Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Revue des Travaux de Botanique et de Géologie Zoologique*, Montpellier, France.
49. Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). Balancing Water for Humans and Nature. Earthscan.
50. FAO. (2020). The State of Food and Agriculture – Water and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

51. Faurie, C., Médori, P., & Ferrar, C. (2003). *Écologie : Approche scientifique et pratique* (5e éd.). Lavoisier.
52. Foster, S. S. D. (2000). Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies. World Bank.
53. Garland., (1985). Prévion de la toxicité aigüe des eaux des rivières.
54. Gasmi, W., & Refice, M. (2020). Problématique des sulfates dans les eaux potables. *Revue de l'Eau*, 31(2), 113-118.
55. Géný, P., Waechter, P., & Yatchinovsky, A. (1992). Environnement et développement rural : Guide de la gestion des ressources naturelles. Éditions Frison-Roche (Ministère de la Coopération et du Développement, Agence de Coopération Culturelle et Technique).
56. Gleick, P. H. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press.
57. Habila S. (2008). Etude De L'impact Du Barrage Beni Haroun Sur L'environnement : Effets Eco- Toxicologique. Mémoire De Magister. Université De Jijel., 176 P.
58. Hoffmann, F., et al. (2014). Sodium et potassium dans l'eau potable : aspects physiologiques. *European Journal of Water Research*, 10(1), 92-98.
59. IPCC. (2022). Sixth Assessment Report – Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change.
60. JORA (Journal Officiel de la République Algérienne), n°43, 2011. Normes algériennes de potabilité de l'eau.
61. Khelili R., Lazali D., (2015). Etude des propriétés physico-chimiques et bactériologiques de l'eau du barrage Harraza (Wilaya de Ain Defla).
62. Leclerc, H., Mossel, D. A. A., Edberg, S. C., & Struijk, C. B. (2001). Advances in the bacteriology of the coliform group: Their suitability as markers of microbial water safety. *Review of Microbiology*, 55(3), 201-209.
63. Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Principles of Biochemistry* (7th ed.). W. H. Freeman.
64. Leyral, G., & Morel, G. (2002). *Microbiologie pour les sciences et les techniques*. Éditions Dunod.
65. Leyral, G., Ronnefoy, C., & Guillet, F. (2002). *Microbiologie et qualité des industries agroalimentaires*. Paris.
66. Mara, D., & Horan, N. J. (2003). *Handbook of water and wastewater microbiology*. Elsevier.

67. Margat, J., & Van der Gun, J. (2013). Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. CRC Press.
68. Meddi, M., & Hubert, P. (2003). Impact des changements climatiques sur les ressources en eau du Nord de l'Algérie. *Sécheresse*, 14(3), 161–169.
69. Menad K., Metadger., (2012). Traitement des eaux saumatre par l'osmose inverce cas de l'eau de Khemis Miliana. Université Miliana.
70. Merzoug, S. (2009). Étude de la qualité microbiologique et physicochimique de l'eau de l'écosystème lacustre Garaet Hadj-Taher (Benazzouz, Wilaya Skikda) [Mémoire de Magistère, Université 08 Mai 1945 de Guelma].
71. Metallaoui, S., Maazi, M. C., Saheb, M., Houhamdi, M., & Barbraud, C. (2013). *A comparative study of the diurnal behaviour of the Northern Shoveller (Anas clypeata) during the wintering season at Garaet Hadj-Tahar (North-East Algeria) and Garaet Timerganine (Algerian highlands)*.
72. Ministère de la Santé Nationale et du Bien-être social, Canada, 1983.
73. Molénat, J., et al. (2011). Les nitrates dans les eaux souterraines. *Agronomie Environnement*, 31(3), 210-218.
74. Monod J. (1989). Mémento Technique De L'eau. 9ème Edition. T1. Dégrémont. France. 591Pages.
75. Monster AC., Boersma G., (1976). Pharmacokinetics of trichloroethylene in volunteers, influence of workload and exposure concentration. *Int Arch Occup Environ Health* environmental health. 10.1007/BF00378619.
76. MWH. (2005). Water Treatment: Principles and Design (2nd ed.).
77. NA 6368-2016. Norme algérienne : Qualité de l'eau - Spécifications microbiologiques de l'eau destinée à la consommation humaine, IANOR, Algérie.
78. Nathanson, J. A. (2004). Basic environmental technology: Water supply. Prentice-Hall of India.
79. Ngô C. Et Regent A. (2004). Déchets Et Pollution, Impact Sur L'environnement Et La Santé. Dunod, Paris. 134p.
80. Ogedengbe, K. (1980). Groundwater Pollution and Irrigation Return Flow. *Journal of Environmental Management*.
81. Ojo, O., et al. (1992). Septic Tanks and Groundwater Pollution. *Nigerian Journal of Science*.

82. Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068–1072.
83. OMS (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson – 4e édition incorporant le 1er addendum. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.
84. OMS (Organisation Mondiale de la Santé). (2000). Directives de qualité pour l'eau de boisson (2e éd.). Genève: OMS.
85. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4e édition, Genève.
86. Panin, G. N. (1987). Evaporation and heat exchange of the Caspian Sea (89 p.). Nauka. (In Russian).
87. Pimentel, D., Berger, B., Filibert, D., et al. (2004). Water resources, agriculture, and the environment (Environmental Biology Report). New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University.
88. Potelon, J. L., & Zysman, K. (1998). Le fer dans l'eau potable. *Revue Française de l'Eau*, 5, 54-60.
89. Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie : entre rareté et gaspillage. *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(3), 237–251. <https://doi.org/10.7202/044698ar>
90. Rieu, M. (1981). Effets des nitrates sur la santé. *Revue Médicale de France*, 6(2), 67-70.
91. Rodier J, Legube B, Merlet N., (2009). L'analyse de l'eau, Ed. Dunod, 78-1368.
92. Rodier J., Bazin C., Broutin J. P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L., (2005). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. 8ème édition. Dunod, Paris, 1383-1384.
93. Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chambon, P., Champsaur, H., & Rodi, L. (1996). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer (8e éd.). Dunod.
94. Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chambon, P., Champsaur, H., & Rodi, L. (2009). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9e éd. Dunod.
95. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Coll. (1996). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (8e éd.). Paris : Dunod.
96. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & coll. (2009). L'analyse de l'eau (9e éd.). Dunod.
97. Rodier. J., (2005). L'analyse de l'eau ; Eaux Naturelles, Eaux Résiduelles, Eaux De Mer. 8ème édition. Dunod. 1383 p.
98. Rousseau N., Roy N., Cantin P., Cardinal P., (2004). Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé.

99. Roux, J. C. (1995). Les eaux souterraines et leur rôle dans le cycle de l'eau. Éditions du BRGM.
100. Sangodoyin, A. Y. (1987). Considerations for Groundwater Protection in Nigeria. Environmental Health Perspectives.
101. Sangodoyin, A. Y. (1993). Waste Disposal and Groundwater Pollution in Nigerian Urban Areas. Water Resources Journal.
102. Sangodoyin, A. Y., & Agbawhe, O. M. (1991). Environmental Study on Surface and Groundwater Pollutants. Environmental Management and Health.
103. Savary, P. (2010). Les nitrates dans l'environnement et la santé. Revue Environnement et Pollution, 18(2), 91-96.
104. Shiklomanov, I. 1993. "World Freshwater Resources." In Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources, edited by Peter H. Gleick. New York: Oxford University Press.
105. Silberner, (1985). Traitement électrolytique localisé des produits de corrosions.
106. Soukehal, B., & Cherrad, S. (2011). *Étude d'aménagement territorial et architectural*. Département d'Architecture, Université de Jijel / Département d'Aménagement du territoire, Université de Constantine.
107. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). Wastewater engineering: Treatment and reuse (4th ed.). Tata McGraw-Hill.
108. Tchobanoglous, G., Peavy, H. S., & Rowe, D. R. (1985). Environmental engineering. McGraw-Hill Interamericana.
109. Todd, D. K. (1980). Groundwater Hydrology. Wiley & Sons.
110. Touchart L. (2003). Hydrologie : Mers, Fleuves Et Lacs. Armand Colin. Vuef. 190 P.
111. Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2011). Earth's global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311–323.
112. UNESCO. (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
113. WHO (World Health Organization). (2011). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.).
114. WHO (World Health Organization). (2017). Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum.
115. Wiesmann, U., Choi, I. S., & Dombrowski, E.-M. (2007). Fundamentals of biological wastewater treatment. John Wiley & Sons.

116. Wiley.Ghaly, A. E., et al. (2011). Treatment of Water Contaminated with Nitrates Using Ion Exchange Technology. Journal of Environmental Science.
117. World Health Organization.EPA. (2020). Methane Emissions. U.S. Environmental Protection Agency.
118. Ziana et célia (2019-2020) : Analyse de quelques paramètres physico-chimiques d'une source d'eau au niveau de la commune de Mizrana (Tizi-Ouzou).

Site web:

ANBT (2020). Agence Nationale des Barrages et Transferts - Situation des barrages en Algérie. Consulté sur : <http://www.anbt.dz>

Balasubramanian, A. (2015, August). The world's water (Technical Report, p. 4). Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/315123891>.

Daubrée, A. (2023, 17 janvier). Enjeu complexe, la gestion de l'eau devient cruciale. Gazette Normandie. <https://www.gazettenormandie.fr/article/enjeu-complexe-la-gestion-de-l-eau-devient-cruciale>.

De Monreseaudeau.fr, L. (2022, 30 novembre). Tout savoir sur les coliformes dans les réseaux d'eau. Monreseaudeau.fr. <https://www.monreseaudeau.fr/actualites/tout-savoir-coliformes-reseaux-eau/>.

Decrouy, A. (2022, 10 juin). Eaux de surface : Définition et exemples. ProjetEcolo. <https://www.projetecolo.com/eaux-de-surface-definition-et-exemples-733.html>.

Do O'Gomes, I. (2022, 14 avril). Salmonelles : quelles sont les caractéristiques de ces bactéries ? Sciences et Avenir. https://www.sciencesetavenir.fr/sante/que-sont-les-salmonelles_162869

Fuhrmann, T. (2020). L'eau atmosphérique, nouvelle frontière du droit international. Avenir Commun Durable, Collège de France. <https://www.college-de-france.fr/fr/actualites/eau-atmospherique-nouvelle-frontiere-du-droit-international>.

Ntumba, R., & McCartney, A. (2023, June 20). Understanding E. coli's evolution could lead to treatments for serious infections. Imperial College London. <https://www.imperial.ac.uk/news/245517/understanding-colis-evolution-could-lead-treatments/>

Omer, N. H. (2020). Water quality parameters. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/71383>.

Panin, G. N. (1986). Atmospheric water. In G. N. Panin, Types and Properties of Water – Vol. I. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO. Retrieved from <https://www.eolss.net>.

Roussel, F. (2020, 2 octobre). Eaux souterraines : pour une approche globale et décloisonnée. Actu-Environnement. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/eaux-souterraines-approche-globale-decloisonnee-36221.php>.

U.S. Geological Survey. (2019, October 25). The distribution of water on, in, and above the Earth. Water Science School. Retrieved from <https://www.usgs.gov/index.php/media/images/distribution-water-and-above-earth>.

UNESCO. (2022). Groundwater: Making the invisible visible. The United Nations World Water Development Report 2022. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/>.

