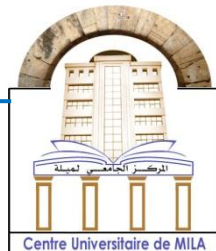


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N°Ref :.....

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et de l'Environnement

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : écologie et environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème :

**Evaluation de la qualité des eaux souterraines de la
plaine de Chelghoum Laid (Wilaya de Mila)**

Présenté par :

➤ NAMOUNE Boutheina

Devant le jury :

- | | |
|----------------|-----------|
| – KOUADRA .R | Promoteur |
| – BOUCHAREB .N | Président |
| – BOUAROUDJ .S | Examineur |

Année Universitaire : 2024/2025



REMERCIEMENT

Nous remercions tout d'abord Dieu pour la volonté, le courage et la patience dont il nous a dotés pour la rédaction de ce mémoire de fin d'études.

Nous remercions nos chers parents de nous avoir permis d'atteindre ce stade de nos études.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à notre encadrant "Dr Kouadra Riad", pour ses conseils avisés et sa rigueur scientifique tout au long de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des membres du Laboratoire des Sciences Naturelles et des Matériaux (LSNM) du Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf Mila pour leur soutien technique et scientifique. Nos remerciements s'adressent plus particulièrement à la Doctorante Kouicem Khadidja et au Dr Lalaoui Meriem pour leur assistance experte lors des analyses en laboratoire, ainsi que pour leurs précieux conseils méthodologiques qui ont grandement contribué à la qualité des résultats obtenus.

Nous adressons également nos sincères remerciements au Directeur de l'Algérienne des eaux (ADE) de la wilaya de Mila, ainsi qu'à Mr. Nabil Boukahoul, Directeur du Laboratoire de l'ADE de Mila, pour leur précieuse collaboration. Leur soutien technique nous a permis d'accéder aux données et analyses afin de compléter ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, à mener à bien ce travail.





DÉDICACE

"À mes parents, sans qui rien n'aurait été possible."

"À ma famille, pour leur soutien indéfectible."

« À mes frères, pour leur soutien constant et leur soutien constant. »

"À tous ceux qui ont cru en moi... et à ceux qui ont douté : merci pour la motivation !"

"À mon directeur de recherche Kouadra Riad, pour ses précieux conseils et sa patience."

"À mes collègues de promo, pour l'entraide et les fous rires qui ont rendu ce parcours moins solitaire."

"À ceux qui doutent encore : ce mémoire est la preuve qu'avec de la persévérance, même l'impossible devient réalité."

"À la connaissance, cette lumière qui ne cesse de grandir quand on la partage."



Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines dans la plaine de Chelghoum El Aid, en évaluant spécifiquement sa potabilité et son adéquation pour l'irrigation. Les résultats révèlent une prédominance des faciès chimiques du chlorure et sulfate calcique et magnésium, indiquant que l'eau souterraine peut être affectée par la dissolution des roches évaporitiques et/ou la pollution due aux activités humaines. La plupart des paramètres testés répondent aux normes de potabilité fixées par l'OMS, ce qui suggère que l'eau est sûre pour la consommation. Dans l'ensemble, ces eaux présentent un risque modéré de salinisation et un faible risque d'alcalinisation des sols. Ils peuvent être utilisés pour irriguer les cultures tolérantes au sel, à condition qu'un drainage adéquat soit en place.

Mots-clés : Eaux souterraines, Chelghoum El Aid, irrigation, pollution, salinisation.

Abstract:

The primary objective of this study is to analyze the physical and chemical parameters of groundwater in the Chelghoum El Aid plain, specifically assessing its potability and suitability for irrigation. The findings reveal a predominance of calcium and magnesium sulfate and chloride chemical facies, indicating that the groundwater may be affected by the dissolution of evaporitic rocks and/or pollution from human activities. Most of the tested parameters meet the potability standards set by the WHO, suggesting that the water is safe for drinking. Overall, these waters present a moderate risk of salinization and a low risk of soil alkalization. They can be utilized for irrigating salt-tolerant crops, if adequate drainage is in place.

Keywords : Groundwater, Chelghoum El Aid, irrigation, pollution, salinisation.

المخلص:

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تحليل المعلومات الفيزيائية والكيميائية في سهل شلغوم العيد ولاية ميله وتحديدًا تقييم صلاحيتها للشرب وملاءمتها للري. وتكشف النتائج عن هيمنة السمات الكيميائية من نوع كلوريد وكبريتات الكالسيوم والمغنيزيوم، مما يشير إلى أن المياه الجوفية قد تأثرت بتحلل الصخور المتبخرة و/أو التلوث الناجم عن الأنشطة البشرية. وتتوافق معظم المعايير التي تم اختبارها مع معايير صلاحية الشرب التي وضعتها منظمة الصحة العالمية، مما يشير إلى أن المياه آمنة للشرب. بشكل عام تمثل هذه المياه خطراً معتدلاً للتملح وخطراً منخفضاً لقلوية الماء. ويمكن استخدامها للري المحاصيل التي تتحمل الملوحة بشرط توفر الصرف المناسب.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، شلغوم العيد، الري، التلوث، الملوحة.

Sommaire



Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I .L'eau, ressource naturelle	2
I.1.Définition de l'eau	2
I.2.Composition de la molécule d'eau	2
I.3.Le cycle de l'eau	3
I.4.Différents états de l'eau	4
I.4.1.États de l'eau	4
I.4.2.L'eau sous forme solide	4
I.4.3.L'eau sous forme liquide	5
I.4.4.L'eau sous forme de gaz	5
I.5.Propriétés de l'eau	5
I.5.1.Propriétés chimiques de l'eau.....	5
I.5.2.Propriétés physiques	6
I.5.3.Propriétés électriques	6
I.5.4.Propriétés optiques	7
I.6.Les sources des eaux	7
I.6.1.Eaux de pluie	7
I.6.2.Les eaux souterraines	7
I.6.3.Nappes libres	7
I.6.4.Nappes phréatiques	7
I.6.5.Les nappes alluvionnaires	8
I.6.6.Les nappes captives	8
I.6.7.Les nappes profondes	8
I.6.8.Les eaux superficielles	8
I.7.Importance de l'eau	8
I.8.L'eau et la santé	
9 I.9.Qualité des eaux	9
I.9.1.Définition	9
I.9.2.Qualité de l'eau d'alimentation	9
I.9.3.Qualité des eaux souterraines	9
I.9.4.Les paramètres de qualité des eaux	10
I.9.5.Pollution de l'eau	13
I.9.6.Définition	14
I.9.7.Pollution des eaux de surface	14
I.9.8.Les principales origines sources des pollutions	17
I.9.9.Les types de pollution	18
I.9.10.Traitement des eaux	21
I.9.11.Normes de la qualité de l'eau	21

Chapitre II : Contexte de l'étude

II.1 Situation géographique de la zone d'étude	22
II.2.Orographie	22
II.3.Climat	23
II.4.Végétation et la culture	24
II.5.Réseau hydrographique	25

Sommaire

II.6.Habitat	26
II.7.Économie	27
II.8.Contexte géologique et hydrogéologique	27
II.9.Contexte climatologique	32
II.9.1.Aperçu sur le climat de l'Algérie	32
II.9.2.Cadre de l'étude	32
II.9.3.La pluviométrie	33
II.9.4.Les températures	33
II.9.5.Les courants de vent prédominants	33
II.9.6.Hydrographie	33
II.9.7.Humidité.....	33
II.10 Conclusion	34

Chapitre III : Matériels et méthodes

III. Introduction	35
III.1.Prélèvements et méthodes analytiques	35
III.2.Analyse des paramètres physico-chimiques.	36
III.2.1.Les paramètres physiques	36
III.2.2.Les paramètres chimiques	37
III.2.3.Détermination de Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	38
III.2.4.Carbonate (CO_3^-) et Bicarbonate (HCO_3^-)	39
III.2.5.Dosage de phosphore	39
III.2.6.Sulfate (SO_4^{2-})	40
III.2.7.Nitrite (NO_2^-)	42
III.2.8.Nitrate (NO_3^-)	43
III.2.9.Chlorure (Cl^-)	44
III.2.10.Dosage de calcium (Ca^{2+}) par la méthode titrimétrique à l'EDTA	45
III.2.11.Détermination de la dureté ou titre hydrotimétrique par titrimétrie à l'EDTA	46

Chapitre IV: Résultats et Discussions

IV. Introduction	47
IV.1.Fiabilité de donnée chimique	47
IV.2.Etude de paramètres physico chimiques	48
IV.2.1.Température	48
IV.2.2.Le potentiel hydrogène (pH)	49
IV.2.3.Conductivité électrique	50
IV.2.4.Total des solides dissous (TDS)	51
IV.2.5.Dureté	52
IV.3.Les cations	53
IV.3.1.Le calcium (Ca^{2+})	53
IV.3.2.Le Magnésium (Mg^{2+})	54
IV.3.3.Le Sodium (Na^+)	55
IV.3.4.Le Potassium (K^+)	56
IV.4.Les anions	57

Sommaire

IV.4.1.Les chlorures (Cl^-)	57
IV.4.2.Les sulfates (SO_4^{2-})	58
IV.4.3.Les bicarbonates (HCO_3^-)	59
IV.5.Les éléments chimiques indicateurs de la pollution	60
IV.5.1.Nitrates (NO_3^-)	60
IV.5.2.Nitrites (NO_2^-)	60
IV.5.3.Phosphates (PO_4^{3-})	61
IV.6.Classification des eaux	62
IV.6.1.Classification de Piper	62
IV.6.2.Classification de Stabler	63
IV.7.Potabilité des eaux	65
IV.8.L'aptitude des eaux à l'irrigation.....	66
IV.9.Classification des eaux en fonction du SAR	67
IV.10.Conclusion	68
Conclusions et recommandations	70
Références Bibliographiques	

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

Tableau 1 :Température d'ébullition de quelques composés	6
Tableau 2 : masse volumique de l'eau à la température	6
Tableau 3 : Classification des eaux selon la conductivité électrique.	11
Tableau 4 : Instruments utilisés pour l'analyse des paramètres physiques.	36
Tableau 5: Détermination de Carbonate et Bicarbonate.....	39
Tableau 6: Synthèse statistique des paramètres hydrochimiques des eaux analysées.....	48
Tableau7 : Classification des eaux en fonction de la conductivité selon les normes algériennes.	50
Tableau8: Classification des eaux en fonction de la dureté selon les normes algériennes	52
Tableau9: Classification de STABLER.....	64
Tableau 10:Normes OMS (2022) et valeurs maximales des paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau analysés.	66
Tableau11: Classification des eaux d'irrigation selon la méthode de Richards.....	67

Liste Des Figures

Figure01 : Structure chimique de la molécule d'eau.....	3
Figure 02: Schéma général du cycle de l'eau..	4
Figure03: La répartition de l'eau sur terre.....	5
Figure04 : cycle du phosphore dans le sol et l'eau.	14
Figure05:Situation géographique de la plaine de Chelghoum Laid	22
Figure06:Cadre géographique de la région d'étude d'après un modèle numérique du terrain.	23
Figure 07: Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien.....	24
Figure 08: Occupation du sol du sous-bassin versant Rhumel-amont.....	25
Figure 09: Réseau hydrographique de sous-bassin versant Oued Rhumel-amont	26
Figure 10 : Sous-bassin versant du Rhumel Amont et sa situation dans le Bsssin versant kebir Rhumel.	27
Figure 11: Carte géologique de la région d'étude, d'après J.M.VILLA(1980) Extrait de la carte de Sétif 1\ 200000.	29
Figure 12 : coupe géologique (NW/SE) à travers la plaine d'étude.....	30
Figure 13 : Colonne litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine de Chelghoum laid	31
Figure 14 :Réseau hydrographique de sous bassin versant Oued Rhumel.	32
Figure 15:Localisation des points de prélèvements.....	35
Figure 16 : filtration de l'eau à partir du papier filtre.....	37
Figure 17: Dosage de TA et TAC.....	38
Figure 18 : Solutions et produits utilisés pour le dosage de phosphore.	40
Figure 19: Tween 20%.	41
Figure 20: Dosage de sulfate.	41
Figure 21: Réactifs du nitrite et nitrate.	42
Figure 22: Dosage de nitrite	43
Figure 23: dosage de nitrate.	44
Figure 24: Dosage des chlorures avant et après l'étalonnage de nitrate d'argent.....	45
Figure 25: Dosage de calciumavant et après l'étalonnage d'ETDA.....	46
Figure 26: Titrage de la duretéavant et après l'étalonnage d'ETDA.	47
Figure 27: Température des eaux souterraines de la plaine Chelghoum El Aid.	49
Figure28:les valeurs de potentiel d'hydrogène des eaux souterraines étudiées.	50
Figure 29: La Conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine Chelghoum El Aid.....	51
Figure30: LeTotal des solides dissous (TDS) des eaux souterraines de la plaine.....	52

Liste Des Figures

Figure31:Dureté des eaux souterraines étudiées.....	53
Figure32: Calcium des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.	54
Figure33: Concentrations de magnésium des eaux souterraines de Chelghoum El Aid.	55
Figure34: Concentrations de sodium des eaux souterraines de Chelghoum El Aid.....	56
Figure35: Teneurs en potassium des eaux souterraines étudiées	57
Figure36: Teneurs en chlorures dans les eaux souterraines étudiées	58
Figure 37: Teneurs en sulfates dans les eaux souterraines étudiées.....	59
Figure38: Teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines étudiées.	59
Figure39: Teneurs en nitrates dans les eaux souterraines étudiées.	60
Figure40: Teneurs en nitrites dans les eaux souterraines étudiées.	61
Figure41: Teneurs en phosphates des eaux souterraines étudiées.	62
Figure 42: Classification des eaux étudiées selon le diagramme de Piper.....	63
Figure 43: Classification des eaux étudiées selon la méthode de Stabler.....	65
Figure44: Classification des eaux d'irrigation d'après WILCOX.	68

Liste des abréviations

°C : Degré Celsius

μS/cm : Micro siemens par Centimètre.

CE : Conductivité Electrique.

DRE : Direction des Ressources en Eaux.

MES : Matières en suspension.

NH₄⁺ : Ammonium.

NO₂⁻ : Nitrites.

NO₃⁻ : Nitrates.

OD : Oxygène dissous.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

PH : Potentiel Hydrogène.

T : Température.

TDS: Total Dissolved Solids

SO₄²⁻ : Sulfates

Cl⁻ : Chlorure

Mn²⁺ : manganèse

Si(OH)₄⁻ : Silicium

PO₄⁻ : Phosphate

Introduction générale

Introduction générale

L'eau présente, à l'échelle de la planète, un élément vital pour tous les êtres vivants, c'est aussi un facteur important pour toutes activités socio-économiques. L'approvisionnement en eau douce devient de plus en plus difficile à cause de la surpopulation, ce qui a mené à la recherche des eaux souterraines.

À l'échelle mondiale, la sollicitation des ressources en eau, notamment les eaux souterraines, augmente, surtout à cause de la montée de la demande et de la détérioration de la qualité de l'eau (**UNESCO ; 2022**). Cette situation est attribuable à l'urbanisation croissante, à l'essor de l'industrie et à l'emploi massif des engrais chimiques dans le secteur agricole, ce qui entraîne une pollution d'origine humaine (**Gleeson et Al ; 2020**).

En Algérie, l'augmentation de la population ces dernières années a engendré un progrès dans divers secteurs, dont l'industrie et l'agriculture (**ONS ; 2022**). Ce progrès a cependant provoqué une contamination des ressources en eau. Par ailleurs, les effets des changements climatiques tels que l'irrégularité des précipitations, la hausse des températures et une évapotranspiration accrue affectent ces réserves en eaux souterraines (**Meddi et al ; 2020**).

La région de Chalghoum El Aid, située dans le Nord-Est algérien, constitue l'une des principales zones agricoles de la wilaya de Mila. Ces dernières années, l'accroissement démographique y a été marqué, engendrant une hausse des besoins en eau, tant pour les usages domestiques que pour l'irrigation agricole.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid (Ouest de Mila), afin de caractériser leur potabilité, leur aptitude à l'irrigation et leur vulnérabilité à la pollution. Cette analyse permettra également d'identifier les éventuelles sources de contamination et de proposer des mesures de protection pour une gestion durable de la ressource hydrique.

Pour atteindre cet objectif, cette étude est structurée en quatre principaux chapitres :

- **Le premier chapitre** constitue une synthèse bibliographique systématique portant sur les fondamentaux hydrologiques (cycle naturel de l'eau, états physiques) ; les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques de la molécule H_2O ; la typologie des ressources hydriques (origine, distribution) et les principaux contaminants aquatiques (nature, sources et comportement environnemental).
- **Le deuxième chapitre** présente une analyse descriptive du secteur étudié, incluant son contexte géographique et climatique, ainsi qu'une caractérisation des formations géologiques composant le système aquifère.
- **Le troisième chapitre** représente la partie pratique et expérimentale de l'étude à travers : l'échantillonnage des eaux souterraines (stratégie d'échantillonnage, conservation), les mesures et analyses réalisées en laboratoire.
- **Le quatrième chapitre** concerne une étude hydrochimique portant sur l'interprétation des analyses physico-chimiques des eaux souterraines afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à la consommation humaine et à l'irrigation. Enfin, notre travail se termine par des conclusions avec quelques recommandations.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I. L'eau, ressource naturelle

La notion de « **ressources en eau** » désigne les eaux liquides impliquées dans le cycle hydrologique et accessibles aux usages humains (**Margat et Andréassian ; 2021**). On distingue principalement quatre sources d'eau brute : les eaux de pluie, les eaux de mer, les eaux de surface et les eaux souterraines. Chacune de ces sources possède des caractéristiques propres, reflétant son interaction avec l'environnement (**Ayed ; 2016**).

Dans les pays bordant la mer Méditerranée, les ressources en eau sont limitées et réparties de manière inégale dans le temps et l'espace. Les États du sud de la région ne reçoivent que 10 % des précipitations annuelles moyennes (**Blinda et Thivet ; 2009**).

La compréhension des conditions climatiques est essentielle dans les études de planification économique, car elle permet une meilleure gestion des apports hydriques non contrôlés (**Conway et Schipper ; 2011**). Une telle maîtrise favorise ainsi l'efficacité des systèmes de prévision et de gestion des ressources en eau à court, moyen et long terme (**Kettab et al ; 2008**).

Parmi toutes les ressources naturelles, l'eau est devenue la plus précieuse. La question de l'eau représente aujourd'hui l'un des enjeux majeurs à l'échelle mondiale. Les ressources en eau douce proviennent principalement des eaux de surface (rivières, lacs, etc.), des eaux de source et des eaux souterraines (**Baurant ; 1971**).

Les réserves naturelles d'eau se composent des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface, qu'elles soient retenues ou en écoulement (barrages, lacs, rivières), ainsi que des eaux marines (**Degremont ; 2005**).

I.1.Définition de l'eau

L'eau liquide (H_2O) est généralement perçue comme une substance banale en raison de sa transparence, de son absence d'odeur et de goût, ainsi que de sa présence abondante sur Terre (**Graini ; 2011**).

Cependant, elle constitue un élément naturel essentiel, indispensable à toute forme de vie. Ressource vitale pour les activités humaines, l'eau joue un rôle clé dans le développement durable en tant que facteur de production incontournable (**Gleick ; 1993**). De ce fait, elle occupe une place croissante au cœur des enjeux stratégiques mondiaux (**Baziz ; 2008**).

I.2.Composition de la molécule d'eau

L'eau ne se limite pas à un simple assemblage de molécules de H_2O . Elle possède d'excellentes propriétés de solvant, lui permettant de dissoudre une grande variété de substances ioniques, comme les sels qui se décomposent en ions, ainsi que certaines molécules polaires, qu'elles soient toxiques ou non (**Metahri ; 2012**).

Au cours de son cycle naturel, l'eau se charge en composés solides ou gazeux en fonction des milieux qu'elle traverse, qu'il s'agisse de rivières, de roches ou de l'atmosphère (**Saidi ; 2014**).

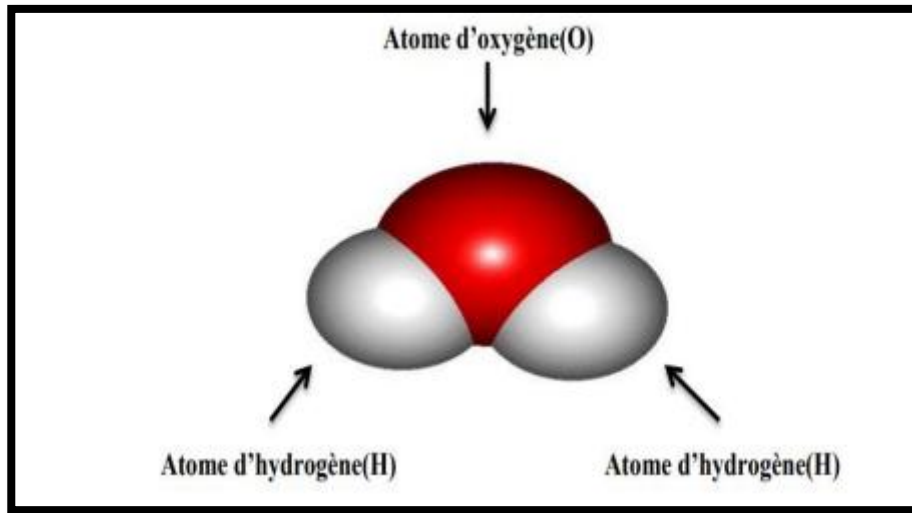


Figure01 : Structure chimique de la molécule d'eau (Khoubach et Laouar ; 2006).

I.3. Le cycle de l'eau

L'eau sur Terre est estimée à environ 1 350 millions de km³, dont plus de 97 % sont stockés dans les océans. L'ensemble de l'eau provient des océans et y retourne inévitablement, suivant un cycle hydrologique continu (Duvignaud ; 1980).

Le cycle de l'eau correspond à l'enchaînement des processus qui permettent son changement d'état et son déplacement à travers les différents milieux naturels (Touchart ; 2003). Ce phénomène perpétuel met en interaction les grandes composantes du système climatique global, notamment l'atmosphère, les océans, les terres émergées et la biosphère continentale (Drissi ; 2008).

Sous ses trois états physiques – gazeux, liquide et solide – l'eau circule en permanence à travers ce vaste cycle naturel (Figure 2).

- **Evapotranspiration**

L'évapotranspiration désigne l'ensemble des pertes d'eau sous forme de vapeur (Boeglin ; 2006). Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau des océans, des lacs et des rivières s'évapore. Par ailleurs, les végétaux transpirent et libèrent également de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Drissi ; 2008).

- **Précipitations**

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère se condense pour former des nuages, qui donnent naissance aux précipitations sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Ces précipitations, source principale des réserves en eau douce, varient en fonction du climat et du relief, qui influencent leur répartition géographique (Boeglin ; 2006).

- **Ruissellement**

Lorsqu'elles atteignent le sol, une partie des précipitations s'écoule en surface vers les cours d'eau, les lacs et les océans. Ce phénomène, appelé ruissellement de surface, joue un rôle essentiel dans l'alimentation des réseaux hydrographiques (**Boeglin ; 2006**).

- **Infiltration**

Une autre partie des précipitations pénètre dans le sol et le sous-sol, un processus connu sous le nom d'infiltration (**Boeglin ; 2006**). Ce phénomène est crucial pour les écosystèmes terrestres, car il contribue à la réhydratation des sols et à l'alimentation des nappes phréatiques ainsi que des rivières souterraines (**Geny et al ; 1992**).

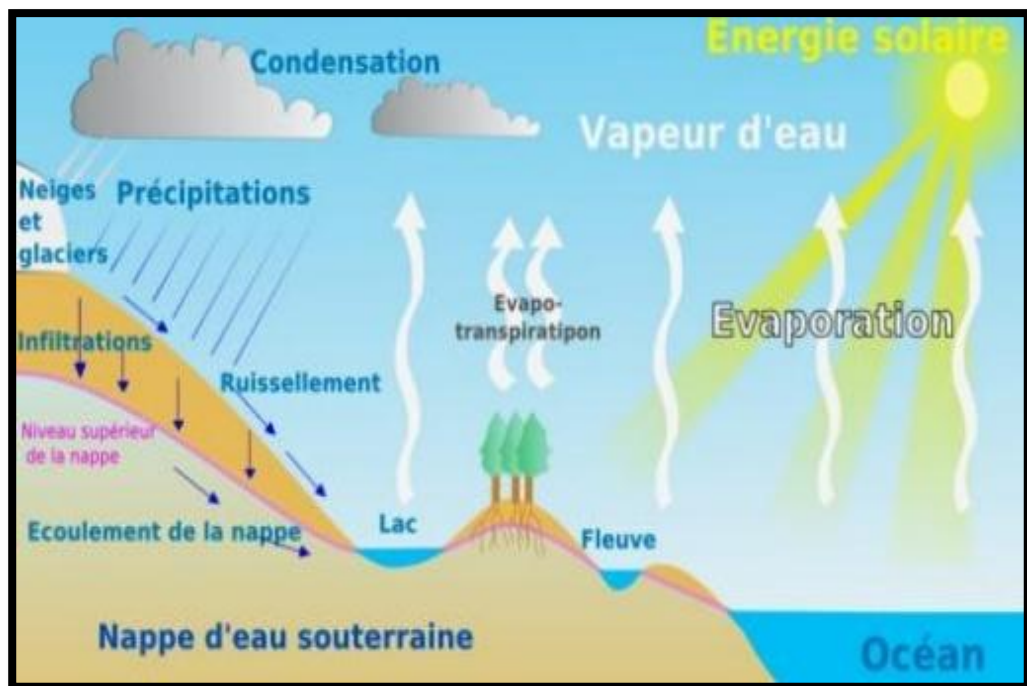


Figure 02 : Schéma général du cycle de l'eau. (**Gény et al ; 1992**).

I.4. Différents états de l'eau

I.4.1. États de l'eau

L'eau est un élément essentiel de notre environnement et se manifeste sous trois états : solide, liquide et gazeux (**Musy et Higy ; 2004**).

I.4.2. L'eau sous forme solide

Lorsque la température descend en dessous de 0 °C, l'eau passe à l'état solide. On la retrouve sous forme de glace dans les calottes polaires, les glaciers alpins, la neige des montagnes ou encore le givre qui se dépose sur les arbres en hiver par temps froid.

I.4.3. L'eau sous forme liquide

L'eau liquide est principalement stockée dans les océans et les mers, qui contiennent de l'eau salée et représentent 97,2 % des réserves hydriques de la planète. Les autres réservoirs d'eau liquide comprennent les lacs, les rivières et les eaux souterraines, constitués d'eau douce. Ces derniers ne représentent qu'une infime fraction du volume total d'eau terrestre, avec respectivement 0,01 % pour les lacs et rivières, et 0,06 % pour les eaux souterraines (**Lazhar ; 2011**).

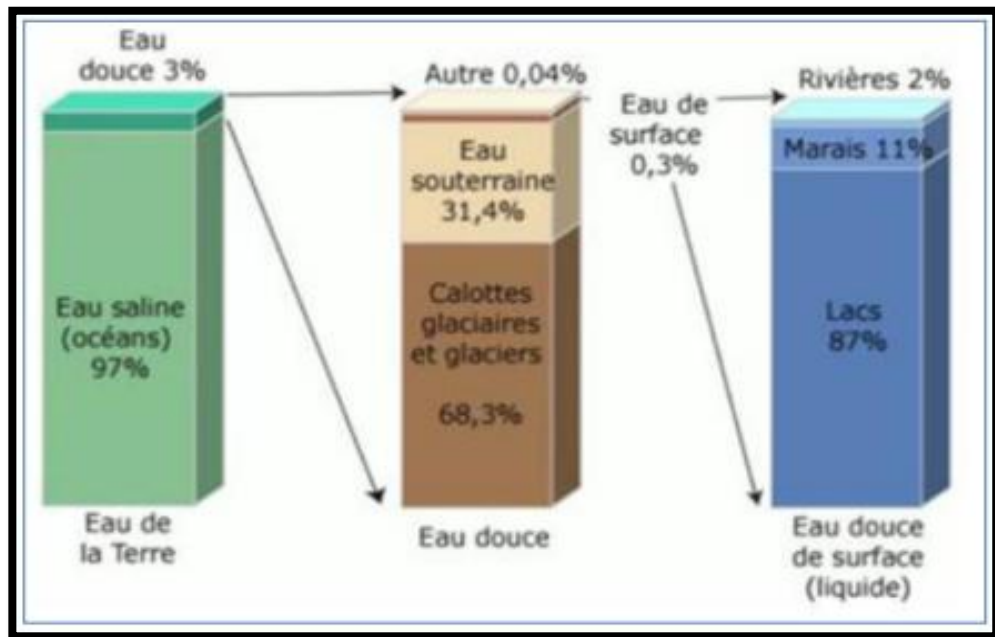


Figure03 : La répartition de l'eau sur terre (**Vasco ; 2017**).

I.4.4. L'eau sous forme de gaz

Dans l'atmosphère, l'eau se présente sous forme de vapeur, constituant l'humidité de l'air. Bien qu'essentielle au cycle de l'eau, elle ne représente qu'environ 0,001 % du volume total d'eau sur Terre (**Merouani et Bouguedah ; 2013**).

I.5. Propriétés de l'eau

I.5.1. Propriétés chimiques de l'eau

L'eau est un solvant universel capable de dissoudre la plupart des substances minérales, ainsi qu'un grand nombre de gaz et de composés organiques. Le phénomène de solvation, ou hydratation, repose sur la rupture partielle ou totale des liaisons électrostatiques entre les molécules dissoutes, qui sont ensuite remplacées par de nouvelles interactions avec les molécules d'eau, formant ainsi de nouvelles structures (**Boglin ; 2001**).

Les molécules d'eau interagissent entre elles grâce aux liaisons hydrogène. L'atome d'oxygène porte une charge partiellement négative, tandis que les atomes d'hydrogène développent une charge partiellement positive, favorisant ainsi l'établissement de ces liaisons (**Bliefert et al ; 2008, Marsily ; 1995**).

I.5.2. Propriétés physiques

- **Température d'ébullition**

L'eau possède une température d'ébullition anormalement élevée par rapport à d'autres composés hydrogénés de masse moléculaire similaire. Cette particularité s'explique par la présence de liaisons hydrogène intermoléculaires qui stabilisent la phase liquide (Rodier ; 1984).

Tableau 1 : Température d'ébullition de quelques composés (Rodier ; 1984).

Corps	Masse Moléculaire	Température d'ébullition (°C)
CH ₄	16	-161
NH ₃	17	-33
H ₂ O	18	+100
H ₂ S	34	62
HCl	35	85

- **Masse volumique**

La masse volumique de l'eau varie en fonction de la température, de la pression et de la concentration en sels dissous. À une température de référence de 4 °C et sous pression atmosphérique normale, elle est d'environ 1 g/cm³ (Boglin ; 2001).

Tableau 2 : masse volumique de l'eau à la température (Rodier ; 1984).

T °C	4 °C	15 °C	20 °C
Masse volumique (g/cm ³)	1,000000	0,999 160	0,998 259
Volume massique (cm ³ /g)	1,000 000	1,000 841	1,001 744

- **Tensions superficielles**

La tension superficielle correspond à une force de traction agissant à la surface d'un liquide, cherchant à minimiser son étendue. Dans le cas de l'eau, cette force est particulièrement élevée, atteignant 73 erg/cm à une température de 18 °C. (Bliefert et al ; 2008).

I.5.3. Propriétés électriques

- **Constante diélectrique** : 80 farads par mètre.
- **Fort pouvoir ionisant**, facilitant la dissociation des molécules en ions.
- **Conductivité électrique** : $4,2 \times 10^{-6}$ µS/m à 20 °C, une propriété exploitée pour le contrôle de la qualité de l'eau (Rodier et al ; 2009).

I.5.4. Propriétés optiques

La transparence de l'eau dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse. Ces propriétés optiques sont largement utilisées pour évaluer l'efficacité des traitements d'épuration et détecter certaines formes de pollution (**Rodier et al ; 2009**).

I.6. Les sources des eaux

L'eau est présente sous diverses formes dans la nature, mais sa répartition sur Terre est inégale, influencée par le climat et la structure géologique du sol (**Vilaginès ; 2000**).

I.6.1. Eaux de pluie

Les eaux de pluie sont parmi les plus pures pour la consommation humaine, car elles sont naturellement saturées en oxygène et en azote, et ne contiennent pas de sels dissous, notamment ceux de magnésium et de calcium, ce qui les rend très douces. Toutefois, dans les régions industrialisées, elles peuvent entrer en contact avec des poussières atmosphériques et se contaminer (**Raymond ; 1997**).

I.6.2. Les eaux souterraines

Une partie des précipitations s'infiltré dans le sol et le sous-sol, formant les eaux souterraines, qui ne retournent ni à l'atmosphère par évaporation ni aux océans par ruissellement (**Boeglin ; 2006**). Ces eaux représentent environ 60 % des réserves d'eau continentales, avec un écoulement estimé à 12 000 milliards de m³ par an, soit 30 % du débit des fleuves. Leur renouvellement varie selon leur profondeur : environ 300 ans pour les nappes superficielles et jusqu'à 5 000 ans pour les nappes profondes (**Roux ; 1990**). Les eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau et dans le maintien des équilibres écologiques. Elles constituent également une ressource précieuse pour l'approvisionnement en eau potable, ainsi que pour les besoins industriels et agricoles (**Bensaoula et al ; 2007**).

I.6.3. Nappes libres

Contrairement à ce que son nom pourrait suggérer, une nappe libre n'est pas exposée à l'air libre, mais se trouve dans un sol contenant de l'air, souvent appelé "sol non saturé". Elle se caractérise par un niveau piézométrique qui dépend uniquement de la perméabilité du sol permettant l'infiltration de l'eau (**Vilaginès ; 2003**). Selon **Barbier (2011)**, ces nappes sont particulièrement vulnérables aux pollutions.

I.6.4. Nappes phréatiques

Les nappes phréatiques se forment lorsque le sol imperméable sous-jacent est relativement horizontal et peu profond. Ce type de nappe permet l'exploitation de l'eau par des puits. Son niveau piézométrique évolue en fonction des précipitations : il baisse en période de sécheresse, ce qui peut entraîner l'assèchement des puits (**Boeglin ; 2001**). Les nappes phréatiques constituent une ressource essentielle en eau potable ainsi qu'en eau d'irrigation (**Milgrom et al ; 2003**).

I.6.5. Les nappes alluvionnaires

Les nappes alluvionnaires sont des formations aquifères situées dans les alluvions des grands cours d'eau (**Hiscock et Bense ; 2014**). Elles jouent un rôle essentiel dans l'alimentation des nappes phréatiques situées sur les berges. Cependant, elles restent vulnérables aux contaminations provenant des infiltrations en surface (**Rodier ; 1996**).

I.6.6. Les nappes captives

Les nappes captives sont recouvertes par une couche imperméable ou peu perméable, empêchant leur interaction directe avec la surface (**Freeze et Cherry ; 1979**). Leur surface piézométrique est généralement située au-dessus du toit de la nappe. Lorsqu'une nappe captive exerce une pression suffisante pour que l'eau jaillisse spontanément lors d'un forage, elle est qualifiée de nappe artésienne (**Vilaginès ; 2003**).

I.6.7. Les nappes profondes

Les nappes profondes contiennent des eaux qui peuvent être directement exploitables par des sources naturelles, des forages ou des puits (**Hiscock et Bense ; 2014**). Toutefois, pour préserver leur qualité, elles doivent être protégées contre les infiltrations de surface susceptibles d'introduire des contaminants (**Rodier ; 1997**).

I.6.8. Les eaux superficielles

Les eaux superficielles englobent l'ensemble des masses d'eau présentes en surface, notamment les ruisseaux, rivières, fleuves, lacs, mers, barrages-réservoirs et glaciers. Ces eaux sont en interaction constante avec le sol et l'atmosphère, ce qui les rend particulièrement sensibles aux influences environnementales (**Vilaginès ; 2000**).

I.7. Importance de l'eau

L'eau est une ressource indispensable à la vie, essentielle non seulement pour l'humanité mais aussi pour l'ensemble des écosystèmes. Les différentes réserves d'eau : rivières, lacs, mers et eaux souterraines doivent être préservées pour garantir leur disponibilité et leur qualité (**Ciffq ; 2011**).

La pollution et la raréfaction de l'eau ont un impact direct sur la santé humaine et la biodiversité. En effet, un écoulement d'eau préservé de toute contamination est primordial pour assurer l'équilibre des écosystèmes aquatiques et terrestres (**Brasilia ; 2013**). Une pénurie d'eau de qualité affecte les environnements naturels, déjà fragilisés par l'urbanisation et le changement climatique (**CE ; 2011**).

I.8.L'eau et la santé

Eau est l'un des éléments les plus fondamentaux de l'alimentation humaine. Pour être considérée comme potable, une eau doit répondre à des normes de qualité strictes afin d'éviter tout risque sanitaire. Le code de la santé publique encadre le contrôle de la qualité de l'eau potable, garantissant ainsi la protection des populations contre les risques de contamination.

Une eau visuellement claire et limpide peut néanmoins contenir des substances nocives ou des agents pathogènes pouvant causer des maladies. Comme l'a souligné Louis Pasteur : « Nous buvons 90 % de nos maladies. »(WHO ; 2022). L'eau peut être un vecteur de nombreuses maladies d'origine bactérienne, virale ou parasitaire, rendant son traitement et sa surveillance essentiels pour la santé publique (El-yamani ; 2006).

I.9. Qualité des eaux

I.9.1. Définition

La qualité de l'eau repose sur un ensemble de critères physico-chimiques permettant d'évaluer son niveau de pureté et son adéquation aux différents usages, qu'ils soient domestiques, agricoles, industriels ou alimentaires (Ramade ; 2002).

À mesure que le niveau de pollution augmente, divers usages de l'eau sont compromis. En premier lieu, la potabilité devient une préoccupation majeure. Ensuite, l'eau des rivières peut perdre sa capacité à soutenir la faune aquatique. Une pollution plus avancée peut également rendre l'eau impropre à la baignade, entraînant des pertes économiques, notamment dans le secteur touristique. Enfin, une contamination excessive impacte l'utilisation agricole, notamment pour l'abreuvement du bétail et l'irrigation des cultures (Ramade ; 2002).

I.9.2. Qualité de l'eau d'alimentation

La question de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine suscite de plus en plus d'inquiétudes ces dernières années (Cruyver ; 1993). Autrefois perçue comme un symbole de pureté, l'eau est aujourd'hui l'un des produits alimentaires les plus contrôlés et soumis à des normes sanitaires strictes (Defranceschi ; 1996).

L'eau est essentielle à la vie, à la santé et à l'hygiène. Cependant, elle peut également être un vecteur de maladies hydriques, telles que la brucellose, la tuberculose, la fièvre typhoïde, le choléra et diverses infections diarrhéiques. Ces maladies, qui causent chaque année des milliers de décès dans le monde, illustrent l'importance d'un suivi rigoureux de la qualité de l'eau potable (Ouahdi ; 1995).

I.9.3. Qualité des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont généralement considérées comme pures d'un point de vue bactériologique, ce qui en fait une source privilégiée pour l'approvisionnement en eau potable (Unicef ; 1999). Elles constituent souvent une alternative plus sûre aux eaux de surface en matière de santé publique (Fiambsch ; 1998). Cependant, leur qualité peut varier selon les saisons et les précipitations. Lors de fortes pluies, elles peuvent devenir troubles ou être contaminées par des infiltrations provenant de nappes phréatiques voisines. Par ailleurs, les eaux souterraines peuvent être polluées par des substances issues du sol, notamment des pesticides ou des rejets d'eaux usées d'origine humaine ou animale. Bien que la pollution y soit généralement plus limitée que dans les eaux de surface, elle peut avoir des effets durables en raison des faibles vitesses de percolation et du temps nécessaire pour restaurer l'équilibre écologique des nappes phréatiques (Gaujous ; 1995).

I.9.4. Les paramètres de qualité des eaux

A-les paramètres organoleptiques

- **Couleur**

La teinte de l'eau résulte de la présence de matières organiques naturelles telles que les tanins et les substances humiques, ainsi que de certains métaux comme le fer et le manganèse (WHO ; 2006). Les rejets industriels fortement colorés peuvent également altérer sa transparence. Une coloration anormale dans les réseaux d'approvisionnement public est souvent perçue négativement par les consommateurs, les incitant à rechercher d'autres sources, parfois moins sécurisées sur le plan sanitaire (Brasilia ; 2013).

- **Odeur**

L'odeur de l'eau peut indiquer une contamination ou la présence de matières organiques en décomposition (WHO ; 2011). Ce paramètre joue un rôle essentiel dans l'évaluation rapide de la qualité de l'eau et son acceptabilité par le public (Rodier et al ; 2009).

- **Goût et saveur**

Le goût de l'eau est le résultat d'une combinaison de sensations gustatives, olfactives et chimiques perçues lors de son ingestion. La saveur, quant à elle, est liée à la stimulation des papilles gustatives par certaines substances dissoutes (Rodier et al ; 2005). De nombreuses substances minérales, même à très faible concentration, peuvent altérer le goût de l'eau bien avant d'atteindre des seuils toxiques (Graindorge ; 2015).

- **Turbidité**

La turbidité désigne la diminution de la clarté de l'eau due à la présence de particules en suspension (Lanteigne ; 2003). Il s'agit du premier critère visuel influençant l'acceptabilité de l'eau par les consommateurs (Andriamiradis ; 2005).

Une turbidité élevée peut résulter de la précipitation d'éléments tels que le fer, l'aluminium ou le manganèse en raison d'une oxydation dans le réseau de distribution (Jeanluc ; 2002).

Son suivi est crucial pour garantir l'efficacité des traitements d'épuration (Rodier ; 2005). La turbidité est généralement exprimée en unités néphélométries de turbidité (NTU) (Lanteigne ; 2003).

B-Les paramètres physico-chimiques

- **Température (°C)**

La température constitue un paramètre écologique fondamental pour les environnements aquatiques. Elle est influencée à la fois par les variations climatiques naturelles (saisons, alternance jour/nuit) et par des facteurs anthropiques, tels que le rejet d'eaux de refroidissement issues des activités industrielles. Une modification importante de la

température peut affecter la biodiversité aquatique en provoquant une pollution thermique. De plus, elle joue un rôle déterminant dans les processus biologiques et chimiques, notamment la nitrification et la dénitrification, qui sont essentiels au cycle de l'azote (**Leynaud G ; 1968**).

- **Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution, définie par l'équation $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, où $[\text{H}^+]$ représente l'activité des ions hydrogène (**Ramade ; 1998**).

Ce paramètre régule de nombreux équilibres physico-chimiques et interagit avec d'autres facteurs tels que la dureté, l'alcalinité et la température. En général, le pH de l'eau potable varie entre 7,2 et 7,6 (**Bremond et Vuichard ; 1973**).

Toutefois, il peut osciller entre 4 et 10 selon la composition géologique du sol traversé. Un pH faible peut accentuer la toxicité de certains métaux en les maintenant sous forme ionique, tandis qu'un pH élevé favorise l'accumulation d'ammoniac, une substance nuisible pour les organismes aquatiques (**Rodier ; 2009**).

- **Conductivité électrique (C.E)**

La conductivité électrique représente la capacité d'une eau à conduire le courant électrique. Elle correspond à la conductance d'une colonne d'eau placée entre deux électrodes distantes de 1 cm, chacune ayant une surface de 1 cm² (**Rodier ; 2005**).

Ce paramètre est directement influencé par la température et reflète la concentration en sels dissous dans l'eau (**Mens et Derouane ; 2000**).

En effet, la conductivité permet d'estimer la charge totale en électrolytes d'une eau naturelle et d'en évaluer la minéralisation. Dans les eaux de surface, la conductivité est généralement inférieure à 1500 µS/cm, avec une minéralisation dominée par les bicarbonates et le calcium (**Gaujous ; 1995**).

Tableau 3 : Classification des eaux selon la conductivité électrique (Rodier ; 2005).

Type d'eau	Conductivité électrique (µS/cm)	Résistivité
Eau pure	<23	>30000
Eau douce peu minéralisée	100à200	5000à10000
Eau de minéralisation Moyenne	250à500	2000à40000
Eau très minéralisée	1000à20000	400à1000

- **Matières en suspension (MES)**

Les matières en suspension désignent l'ensemble des particules solides présentes dans l'eau, d'origine minérale (érosion des sols, sédiments) ou organique (débris végétaux, plancton). Dans les milieux aquatiques non pollués, elles proviennent principalement du

bassin versant sous l'effet de l'érosion naturelle et des apports biologiques. Leur concentration varie en fonction des conditions hydrologiques, augmentant significativement lors des crues. Les eaux naturelles contiennent toujours une certaine quantité de MES, mais une teneur inférieure à **30 mg/L** est généralement considérée comme acceptable (**Afri Mehannaoui ; 1998**).

- **Total des solides dissous (TDS)**

Le total des solides dissous (TDS) représente l'ensemble des substances minérales et organiques dissoutes dans l'eau. Bien que l'OMS n'ait pas établi de seuil spécifique pour la santé, une concentration élevée en TDS peut accélérer la corrosion des canalisations et conférer à l'eau un goût désagréable. Une eau est généralement jugée de bonne qualité lorsque sa teneur en TDS est inférieure à **600 mg/L (WHO ; 2011)**.

- **Chlorures (Cl⁻)**

Les chlorures sont des anions inorganiques largement présents dans les eaux naturelles et les effluents domestiques et industriels. Leur concentration peut augmenter en raison de la dissolution des sels minéraux, de l'infiltration d'eau de mer ou de l'utilisation de sels de voirie en hiver (**Rodier J ; 2016**).

Les chlorures influencent plusieurs paramètres de qualité de l'eau :

- ✓ **Salinité et Conductivité** : Une concentration élevée accroît la conductivité électrique.
- ✓ **Corrosion** : Des teneurs excessives accélèrent la dégradation des infrastructures métalliques.
- ✓ **Goût de l'eau** : À forte concentration, ils confèrent une saveur salée à l'eau potable (**OMS ; 2017**).

- **Sulfates (SO₄²⁻)**

Les sulfates sont des ions naturellement présents dans les eaux, associés aux principaux cations comme le calcium, le sodium et le potassium. Ils proviennent de l'altération des minéraux sulfurés (ex : Gypse) ou de rejets industriels. Leur concentration varie généralement entre **5 et 200 mg/L** dans les eaux naturelles (**Rodier ; 1984**).

- **Les nutriments**

Les éléments nutritifs tels que les ortho phosphates (PO₄³⁻), les nitrites (NO₂⁻), les nitrates (NO₃⁻) et l'ammonium (NH₄⁺) jouent un rôle clé dans les écosystèmes aquatiques. Leur présence excessive, souvent due aux fertilisants agricoles et aux rejets urbains, entraîne un phénomène d'eutrophisation, perturbant l'équilibre écologique (**Idrissi ; 2006**).

- **Nitrate (NO₃)**

Ce sont les formes d'azote les plus solubles dans l'eau, et leur concentration varie selon les saisons et les événements hydrologiques (**Bchitou ; 2001**).

Ils proviennent des engrais agricoles, des rejets industriels et des processus naturels du sol. Les normes internationales fixent une valeur maximale admissible de **40 mg/L** pour l'eau potable (OMS ; 2008).

- **Nitrites (NO_2)**

Intermédiaires du cycle de l'azote, ils résultent de l'oxydation de l'ammonium ou de la réduction des nitrates. Des concentrations élevées témoignent souvent d'une pollution par des matières organiques en décomposition (De Villers et al ; 2005).

- **Ammonium (NH_4^+)**

Ce composé est fréquemment présent dans les eaux superficielles, issu de la décomposition des matières organiques végétales et animales. En milieu basique ($\text{pH} > 9,2$), il se transforme en ammoniac gazeux (Ramade ; 2000).

L'azote ammoniacal est fréquent dans les eaux superficielles. Il a pour origine la matière organique végétale et animale des cours d'eau. La nitrification des ions ammonium se fait en milieu aérobie faible. En général, l'ammonium se transforme assez rapidement en nitrites et nitrates par oxydation bactérienne (Brmenond et Vuichard ; 1973).

- **Phosphore (PO_4^{3-})**

Le phosphore est un élément naturellement présent en faibles concentrations dans les eaux de surface. Il joue un rôle fondamental dans la dynamique des écosystèmes aquatiques, en influençant directement la productivité biologique (Rousseau et al ; 2004). En particulier, il constitue un nutriment essentiel au développement des algues, dont une concentration excessive peut provoquer leur prolifération et entraîner des phénomènes d'eutrophisation dans les plans d'eau stagnants, tels que les lacs et les étangs.

Les phosphates, principales formes du phosphore dans l'eau, sont des anions aisément absorbés par les sols. Leur concentration dépend des caractéristiques géologiques des terrains traversés ainsi que de la dégradation des matières organiques. Une teneur en phosphates supérieure à **0,5 mg/L** est généralement considérée comme un indicateur de pollution et peut avoir des répercussions négatives sur la qualité de l'eau et la biodiversité aquatique. (Sarkar et al ; 2007).

I.9.5. Pollution de l'eau

La pollution des eaux souterraines représente une menace constante pour la disponibilité de cette ressource vitale dans un avenir proche (Castany ; 1982). Bien que discrète, elle est particulièrement persistante et ses effets doivent être envisagés à très long terme (Gaujous ; 1985).

Ce n'est qu'avec l'essor de la civilisation industrielle, à partir du milieu du XVIII^e siècle, que la pollution de l'eau a pris une ampleur significative, un phénomène qui perdure jusqu'à aujourd'hui (Ramade ; 2002).

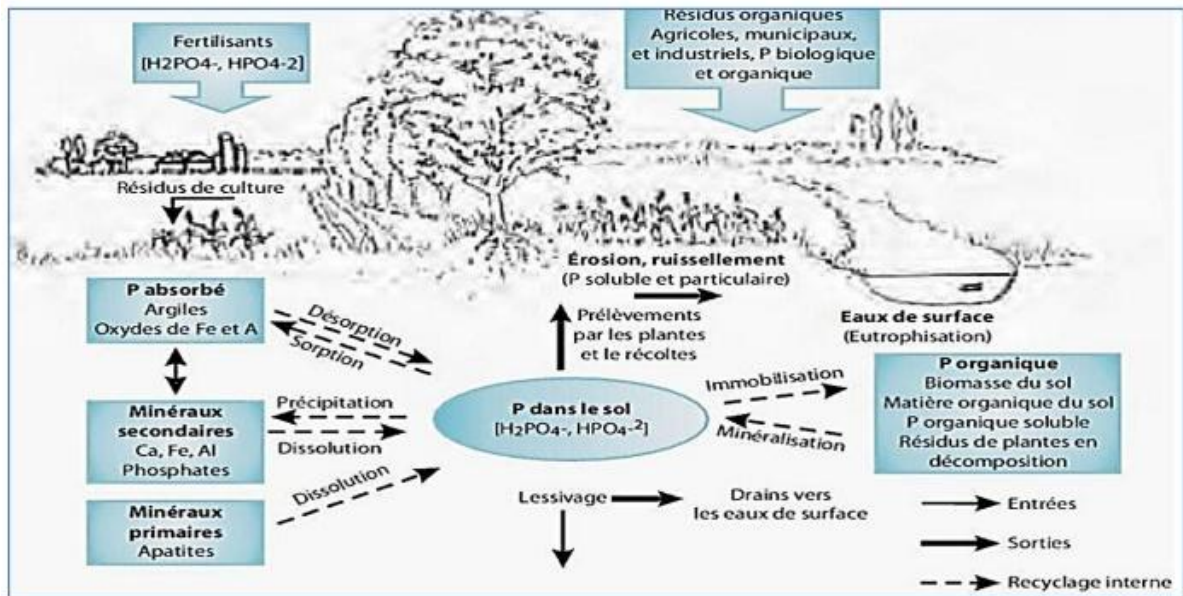


Figure04 : cycle du phosphore dans le sol et l'eau (Ghanimi ; 2014).

L'une des principales causes de cette pollution est l'accumulation de matières organiques fermentescibles (MOF), dont la dégradation consomme une grande quantité d'oxygène dissous, entraînant rapidement une anoxie des milieux aquatiques affectés (Ramade ; 2002). Les zones humides d'eau douce jouent un rôle essentiel dans l'épuration de l'eau, mais leur capacité d'absorption reste limitée. Elles ne peuvent traiter qu'un certain volume d'eaux issues du ruissellement agricole ainsi que des rejets domestiques et industriels. Alors que la population et la pollution continuent d'augmenter sans relâche, la capacité auto-épuratrice des écosystèmes naturels diminue progressivement, atteignant parfois un seuil critique où elle devient inefficace, voire totalement neutralisée.

I.9.6. Définition

La pollution de l'eau se caractérise par toute modification de ses propriétés physiques, chimiques ou biologiques, compromettant son utilisation pour la consommation humaine, la préservation des écosystèmes aquatiques ou d'autres usages (Chapman ; 1996). Elle est principalement causée par l'introduction de substances polluantes dans les milieux aquatiques, qu'elles proviennent de sources naturelles ou des activités humaines.

I.9.7. Pollution des eaux de surface

A-Différents types d'eau pour la consommation humaine

- Les eaux naturelles

Les eaux destinées à la consommation humaine comprennent l'eau du réseau de distribution publique (eau du robinet), les eaux conditionnées (eaux de source, eaux minérales naturelles et eaux rendues potables après traitement) ainsi que les eaux de puits privés utilisées pour la boisson. L'eau prélevée directement dans les milieux naturels n'est

généralement pas consommable en l'état. Elle doit subir des traitements spécifiques afin de respecter les normes de qualité établies, garantissant ainsi une consommation sans risque pour la population. La composition chimique des eaux de consommation varie en fonction des substances minérales qu'elles contiennent, ces dernières étant influencées par des paramètres spatio-temporels. Avec la croissance démographique et le développement économique mondial, la demande en eau a presque doublé au cours des cinquante dernières années **(Rabiet ; 2006)**.

- **Les eaux souterraines**

Les eaux souterraines désignent les réserves d'eau situées dans le sous-sol, constituant une ressource précieuse pour l'approvisionnement en eau potable. Elles interagissent avec d'autres masses d'eau, notamment les eaux douces continentales (rivières, zones humides, lacs) ainsi que les eaux marines en zone littorale. Le sens de ces échanges varie selon les conditions hydrologiques annuelles. Jouant un rôle essentiel dans l'alimentation des cours d'eau de surface, elles influencent directement leur qualité. Ainsi, les activités humaines peuvent impacter la qualité et le débit des nappes souterraines, mettant en péril la stabilité des écosystèmes aquatiques et terrestres qui en dépendent. **(Kaid Rassou ; 2009)**.

En raison de leur protection naturelle contre les pollutions, les eaux souterraines constituent historiquement la principale ressource en eau potable **(Guergazi et al ; 2005)**. Dès les années 1970, leur préservation est devenue un enjeu majeur afin de garantir leur disponibilité et leur qualité à long terme **(Bohy ; 2003)**.

- **Les eaux de surface**

Les eaux de surface regroupent les masses d'eau qui circulent ou stagnent à la surface du sol, telles que les rivières, les lacs, les étangs et les barrages. Elles proviennent soit de l'émergence des nappes souterraines sous forme de sources, soit du ruissellement des eaux de pluie. Leur composition chimique est influencée par la nature des sols qu'elles traversent **(Bohy ; 2003)**. En raison de leur exposition directe à l'environnement, ces eaux favorisent souvent le développement de micro-organismes, notamment à cause des déchets qui y sont rejetés. Les ressources en eau douce sont vitales pour l'homme, qui en dépend fortement, en particulier pour l'agriculture **(Thiollet ; 2004)**.

De nos jours, la contamination affecte non seulement les eaux de surface, mais aussi les eaux souterraines, qui subissent l'infiltration des polluants issus des décharges, des résidus miniers et des sites industriels **(Daniel et al ; 1998)**.

- **Eau de mer**

Les mers, qui couvrent environ deux tiers de la surface terrestre, constituent d'immenses réservoirs d'eau salée représentant près de 97,4 % du volume total des eaux terrestres **(Dinnat ; 2003)**.

B-Principaux éléments présents dans l'eau en liaison avec l'action anthropique

- **Sodium (Na^+)**

Le sodium est un élément largement présent dans les minéraux composant les roches volcaniques, notamment dans les feldspaths sodiques $\text{Na}[\text{Si}_3\text{AlO}_8]$, qui figurent parmi les plus abondants. Dans les eaux souterraines, il se trouve sous forme ionique (Na^+) et subit des processus d'adsorption et de désorption similaires à ceux du calcium et du magnésium, rendant sa dissolution tout aussi complexe. En l'absence d'affleurements de roches évaporitiques, les concentrations naturelles de sodium observées dans les environnements volcaniques et les socles cristallins varient généralement de quelques milligrammes par litre à quelques dizaines de milligrammes par litre (**BRGM ; 2007**).

- **Potassium (K^+)**

Le potassium est un élément largement présent dans les roches ignées, notamment dans les roches volcaniques et les formations argileuses. Dans les roches silicatées, il se retrouve principalement sous forme d'orthose $[\text{KAlSi}_3\text{O}_8]$, de micas et de feldspathoïdes, comme la leucite $[\text{KAlSi}_2\text{O}_6]$. De manière générale, les concentrations en potassium dans les eaux souterraines restent faibles et dépassent rarement 10 mg/L. (**BRGM ; 2007**).

- **Chlorures (Cl^-)**

Les chlorures présents dans les eaux souterraines peuvent provenir de plusieurs sources :

- ✓ **Origine atmosphérique** : Ils sont transportés sous forme d'aérosols dans l'eau de pluie. Une corrélation a été établie entre la concentration en chlorures dans les précipitations et la distance par rapport à la mer.
- ✓ **Interactions eau/roches** : Certains minéraux contenus dans les roches ignées et volcaniques, comme la sodalite $[\text{Na}_8(\text{Cl}_2(\text{AlSiO}_4)_6)]$, sont riches en chlorures. De plus, des inclusions fluides dans certains minéraux volcaniques peuvent contribuer à l'apport de chlorures.
- ✓ **Origine marine** : L'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers, appelée biseau salé, constitue une source importante de chlorures.
- ✓ **Origine anthropique** : L'utilisation d'engrais dans l'agriculture entraîne une contamination des eaux souterraines par les chlorures. (**BRGM ; 2007**).

- **Sulfate (SO_4^{2-})**

L'ion sulfate (SO_4^{2-}) est la principale forme des sulfates dans les eaux souterraines. Sa présence peut être attribuée à plusieurs processus :

- ✓ **Oxydation des minéraux sulfurés** : L'oxydation de minéraux riches en soufre, comme la pyrite (FeS_2), libère des sulfates dans l'eau, avec des concentrations variant de quelques milligrammes par litre à plusieurs dizaines de mg/L.
- ✓ **Lessivage des formations évaporitiques** : L'altération de roches telles que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) peut provoquer une forte augmentation des concentrations en sulfates, atteignant parfois plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de mg/L.

- ✓ **Oxydation des sulfures atmosphériques** : Les précipitations acides résultant de la pollution atmosphérique contribuent également à la présence de sulfates dans les eaux souterraines. **(BRGM ; 2007).**

C-Eléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM) regroupent les métaux et métalloïdes présents dans l'environnement en très faibles quantités, généralement inférieures à 1 mg/L dans l'eau. Cependant, leur accumulation excessive, notamment en raison des activités humaines, peut engendrer une pollution de l'eau et représenter un danger pour les écosystèmes et la santé humaine **(Kabata et Pendias ; 2001)**. Certains ETM sont essentiels au bon fonctionnement des organismes à faibles concentrations, comme le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le fer (Fe) et le manganèse (Mn), tandis que d'autres sont toxiques même à faible dose, tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et l'arsenic (As).

I.9.8. Les principales origines sources des pollutions

A-Source de pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont majoritairement contaminées par les activités humaines. Cette pollution peut être directe, à travers l'évacuation des eaux usées domestiques, l'élimination des déchets solides, le rejet d'effluents industriels, la propagation d'hydrocarbures dans les sols ou encore la gestion inappropriée des déchets radioactifs. Elle peut également être indirecte, résultant d'accidents, de l'utilisation de sels de déneigement, des pluies acides, du mauvais entretien des puits ou encore des pratiques agricoles intensives **(Degrémont ; 1991)**.

B-Sources naturelles

Certaines substances naturellement présentes dans l'environnement peuvent contaminer l'eau potable. Des éléments inorganiques tels que le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent provenir des formations géologiques environnantes et altérer la qualité des eaux souterraines, les rendant potentiellement dangereuses pour la consommation humaine **(Djabri ; 1996)**.

C-Sources agricoles

Les activités agricoles, incluant l'élevage et l'aviculture, sont responsables de rejets significatifs de polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. L'agriculture est la principale cause de pollution diffuse des ressources en eau, en raison de l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires. Les nitrates et nitrites, issus des fertilisants azotés et phosphorés, s'infiltrant dans les nappes phréatiques et ruissellent vers les cours d'eau, particulièrement lors des périodes de pluie. L'accumulation de ces substances peut affecter la qualité de l'eau et avoir des conséquences néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine **(Gauthier ; 1982)**.

D-Sources industrielles

Les activités industrielles génèrent une grande quantité de rejets susceptibles de polluer les rivières et les nappes phréatiques, parfois à un niveau si important que leurs effets à long terme restent mal connus (**Boeglin ; 1998**). Ces rejets peuvent contenir des substances variées, sous forme soluble ou insoluble, d'origine minérale ou organique. Certains de ces contaminants sont biodégradables, tandis que d'autres sont persistants et toxiques, même à très faibles concentrations. Selon le secteur industriel, les polluants rejetés peuvent inclure :

- **Matières organiques et graisses** : issues des abattoirs et des industries agroalimentaires.
- **Hydrocarbures** : provenant des industries pétrolières et des transports.
- **Métaux lourds** : libérés par les procédés de traitement de surface et la métallurgie.
- **Produits chimiques divers (acides, bases, solvants, colorants, etc.)** : Générés par les industries chimiques et les tanneries.
- **Eaux chaudes** : provenant des circuits de refroidissement des centrales thermiques.
- **Substances radioactives** : issues des centrales nucléaires et des installations de traitement des déchets radioactifs.

E-Sources résidentielles

Les installations résidentielles d'évacuation des eaux usées peuvent être une source importante de contamination des eaux souterraines. Ces systèmes, tels que les fosses septiques, les puisards, ou encore les puits de drainage pour les eaux pluviales, peuvent introduire dans l'environnement divers polluants, notamment des bactéries, des virus, des nitrates et des composés organiques (**Mcgraw-Hill ; 1999**).

L'entreposage inapproprié ou l'élimination incorrecte de produits ménagers chimiques (peintures, solvants, détergents synthétiques, huiles, médicaments, désinfectants, produits chimiques pour piscines, pesticides, batteries, carburants, etc.) Constitue une autre menace pour la qualité des eaux souterraines. En l'absence de dispositifs de gestion adaptés, ces substances peuvent s'infiltrer dans le sol et atteindre les nappes phréatiques. (**Mcgraw-Hill ; 1999**).

Lorsque ces déchets sont jetés dans les ordures ménagères, ils risquent de contaminer les eaux souterraines si les centres de traitement des déchets ne disposent pas d'équipements adéquats pour neutraliser ces produits dangereux. De même, les substances chimiques abandonnées ou enterrées directement dans le sol peuvent se dissoudre progressivement et polluer les ressources en eau souterraines (**Mcgraw-Hill ; 1999**).

I.9.9. Les types de pollution

a-Pollution naturelle

La pollution naturelle correspond à toute altération de l'environnement résultant de processus naturels sans intervention humaine. Elle peut toucher l'air, l'eau, les sols et les

écosystèmes, avec parfois des conséquences aussi significatives que celles des pollutions d'origine anthropique (**Botkin et Keller ; 2011**).

b-Pollution physique :

La pollution physique se manifeste par la présence excessive de substances solides, liquides ou énergétiques qui perturbent l'équilibre des écosystèmes et représentent un danger pour la santé humaine. Contrairement aux pollutions chimiques et biologiques, elle est causée par des facteurs physiques tels que les particules en suspension, la pollution sonore, lumineuse ou encore thermique (**Hill ; 2010**).

c-Pollution mécanique

La pollution mécanique est une forme spécifique de pollution physique caractérisée par l'accumulation de déchets solides ou d'éléments perturbateurs dans l'environnement. Elle peut causer des dégâts aux écosystèmes et aux infrastructures et inclut :

- Les débris plastiques et autres déchets volumineux ;
 - Les particules en suspension dans l'air et l'eau ;
 - Les dommages causés aux espèces animales et végétales par des éléments mécaniques (**Hill ; 2010**).
- **Pollution thermique :** Ce type de pollution est lié à l'introduction de chaleur excessive dans l'environnement, affectant particulièrement les milieux aquatiques et l'atmosphère :
- **Rejets industriels et nucléaires :** L'eau chaude rejetée par les centrales électriques et certaines industries réduit la teneur en oxygène des cours d'eau, perturbant ainsi les écosystèmes aquatiques (**Kaushal ; 2010**).
- **Effet d'îlot de chaleur urbain :** L'accumulation de chaleur dans les zones urbaines, due aux matériaux artificiels et à la densité des constructions, entraîne une augmentation locale des températures et modifie les conditions climatiques régionales (**Oke ;1982**).
- **Pollution radioactive :** La pollution radioactive résulte de la dispersion de substances radioactives dans l'environnement. Ses principales sources incluent :
- ✓ Les accidents nucléaires (ex.) : Tchernobyl, Fukushima) ;
 - ✓ Les déchets radioactifs issus des centrales nucléaires et des hôpitaux ;
 - ✓ Les essais nucléaires militaires. (**UNSCEAR ; 2000**).
- **Matières en suspension (MES)**

Les matières en suspension (MES) désignent les particules solides présentes dans l'eau, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique. Elles peuvent être de nature minérale (sables, argiles, limons) ou organique (débris végétaux, micro-organismes). La concentration en MES est un indicateur clé de la qualité de l'eau, influençant la clarté, la sédimentation et l'équilibre des écosystèmes aquatiques. (**APHA ; 2017**).

d-Pollution chimique

La pollution chimique se caractérise par l'introduction dans l'environnement de substances potentiellement toxiques, qu'elles soient d'origine naturelle ou synthétique. Ces contaminants peuvent altérer la santé humaine ainsi que les écosystèmes. Parmi les principaux polluants chimiques, on retrouve les métaux lourds, les pesticides, les hydrocarbures, les plastiques, les composés organiques volatils (COV) et certains produits pharmaceutiques (Alloway et Ayres ; 1997).

e-Pollution biologique

La pollution biologique est provoquée par la présence ou la prolifération excessive d'organismes vivants pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, champignons) ou d'espèces invasives qui perturbent l'équilibre des écosystèmes. Elle peut affecter la santé humaine, la faune, la flore, ainsi que les milieux aquatiques et terrestres (Geldreich ; 1996).

f-Pollution agricole

La pollution agricole englobe l'ensemble des contaminations du sol, de l'eau et de l'air résultant des pratiques agricoles intensives. Elle est principalement due à l'utilisation excessive d'engrais chimiques, de pesticides, aux rejets de déjections animales et à l'érosion des sols (Tilman et al ; 2001).

Les principaux agents polluants agricoles sont :

- **Fertilisants** : Selon la FAO, il s'agit de « toute substance contenant un ou plusieurs éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes » (FAO ; 2000).
- **Engrais azotés** : Ce sont des fertilisants contenant de l'azote sous une forme assimilable par les plantes, selon la FAO (FAO ; 2000).
- **Phosphates** : Ils regroupent les composés contenant du phosphore, un élément crucial pour la croissance végétale et le métabolisme cellulaire (FAO ; 2004).
- **Pesticides** : L'OMS définit un pesticide comme « toute substance ou mélange de substances utilisé pour prévenir, détruire ou contrôler un organisme nuisible, y compris les vecteurs de maladies humaines ou animales » (OMS ; 2009).

i-Pollution industrielle

La pollution industrielle résulte des rejets de substances nocives liés aux activités industrielles. Ces contaminants affectent l'air, l'eau et les sols, entraînant des répercussions négatives sur la biodiversité et la santé humaine. (Baud J ; 2006).

g-Les polluants bactériologiques

Les polluants bactériologiques désignent les micro-organismes pathogènes présents dans l'environnement, en particulier dans l'eau, l'air et le sol, qui peuvent être responsables de maladies chez l'homme et les animaux. Leur présence est généralement liée aux rejets domestiques, agricoles et industriels. (Leclerc et al ; 2002).

I.9.10. Traitement des eaux

Le traitement de l'eau vise principalement à éliminer les micro-organismes pathogènes et les impuretés susceptibles d'être nuisibles à la santé humaine. Qu'il s'agisse d'eaux souterraines ou de surface, ces ressources ne sont généralement pas directement potables et nécessitent un traitement adapté. **(Valentin ; 2000).**

Lorsqu'il est impossible de garantir une protection continue de la source jusqu'au consommateur, une désinfection devient indispensable. Il est alors crucial de maintenir une concentration adéquate de chlore résiduel pour assurer une qualité sanitaire de l'eau **(OMS ; 1994).**

1.9.11. Normes de la qualité de l'eau

L'eau destinée à la consommation humaine doit respecter des normes strictes fixées par la réglementation nationale afin de limiter la présence de substances potentiellement nocives. Ces normes peuvent varier d'un pays ou d'une région à l'autre en fonction des réglementations locales et des standards internationaux **(OMS ; 1994).**

En Algérie, les critères de potabilité de l'eau sont établis par l'arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00), qui définit les spécifications des eaux de boisson préemballées et leurs modalités de mise sur le marché **(Bouziati ; 2000)**. Ces normes, adoptées par les directions de l'hydraulique des wilayas du Nord, couvrent 41 paramètres de qualité répartis en quatre catégories :

- Paramètres organiques
- Paramètres physico-chimiques
- Substances indésirables
- Substances toxiques

Chapitre II

Contexte de l'étude

II. Situation géographique de la zone d'étude

La plaine de Chelghoum Laid se trouve dans le Nord-Est de l'Algérie. Il est inclus dans la section supérieure du Kébir Rhumel. Cette plaine se trouve à environ 60 km au Sud-Ouest de la capitale de la wilaya de Mila. Au nord, elle est délimitée par la municipalité d'Ain Mellouk, au sud par la municipalité d'El-Mechira, à l'est par Oued Segun et à l'ouest par Tadjenanet. Elle est encadrée par des élévations successivement illustrées par Dj Djahalia au Nord-ouest, Dj Ed Dahari au Nord, DjGrouz à l'Est, le versant nord du Dj Toukouia au Sud-est, Djebel Chebka et les massifs d'Ouled Abd au Sud (**Figure 05 ; Hamoud ; 2018**).

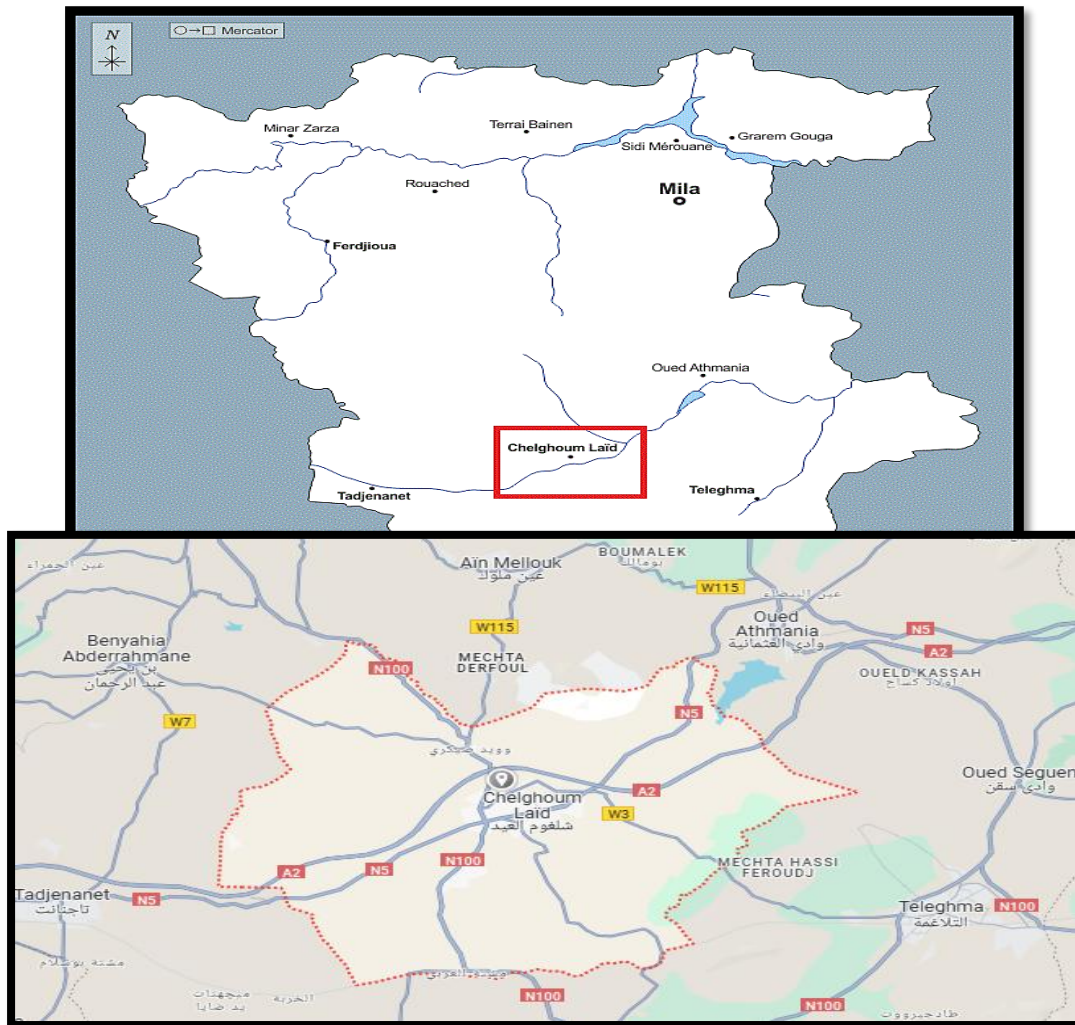


Figure05 : Situation géographique de la plaine de Chelghoum Laid (HAMOUD ; 2018).

II.1.Orographie

La municipalité est parcourue par l'Oued Rhumel et son affluent Oued Dekri. Elle se distingue par des pentes douces ne dépassant pas 12,5%, des altitudes moyennes oscillant entre 800 et 900 m et des ensembles isolés.

- Djebel Dess : culminant à 1120 mètres, se trouve au sud-ouest.
- Djebel Grouz : avec une hauteur de 1167 mètres, est localisé à l'est extrême.

- Djebel Toukouia : qui atteint une hauteur de 1250m : il est positionné au sud-est de la plaine.

Certaines collines ayant une altitude moyenne de 1164m ont été illustrées.

Le secteur se caractérise par des reliefs escarpés et isolés, avec notamment à l'est le djebel Grouz qui atteint 1187 m, au sud-est Dj Toukouia (1192m), au sud-ouest Dj Thoutit (1092m) et au nord-ouest Dj Ed Dess (1212m). En ce qui concerne les plaines de Tadjenanet et Chelghoum Laid, leur altitude moyenne se situe généralement entre 850 et 900 mètres. Elles sont fréquemment marécageuses au cœur des dépressions, ce qui confirme la présence d'eau souterraine épidermique. **(Figure 6).**

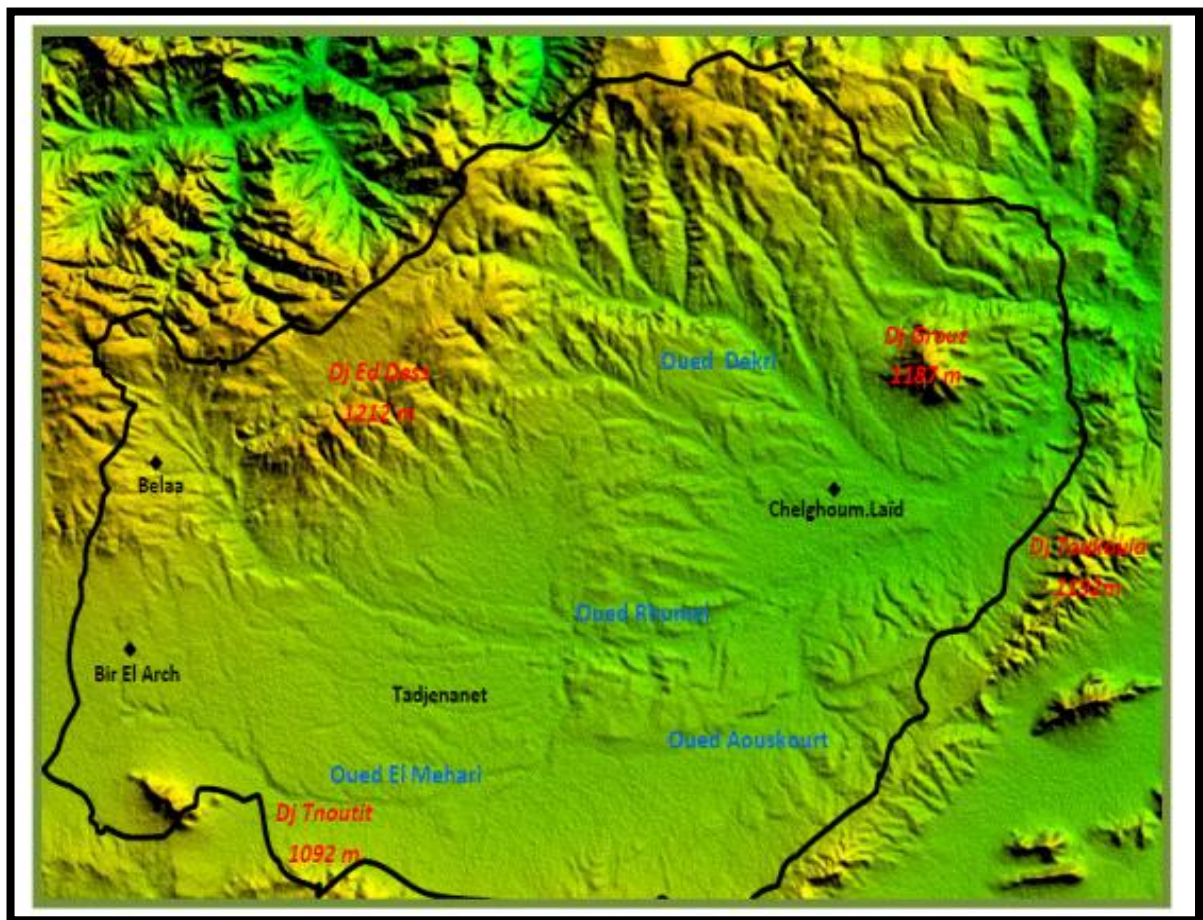


Figure06 : Cadre géographique de la région d'étude d'après un modèle numérique du terrain (MIHOUBI ; 2009).

II.2.Climat

La région de Chelghoum Laid connaît un climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par des hivers frais et humides, des étés à la chaleur sèche, et un écart de températures notable entre les différentes saisons. L'importance des altitudes dans la distribution des précipitations est notable, avec les plaines situées entre 850 et 900 mètres et les montagnes atteignant jusqu'à 1200 mètres. Selon la perspective bioclimatique, la figure 3 illustre la présence de

deux zones climatiques, le subhumide et le semi-aride, cette dernière étant la plus prédominante.

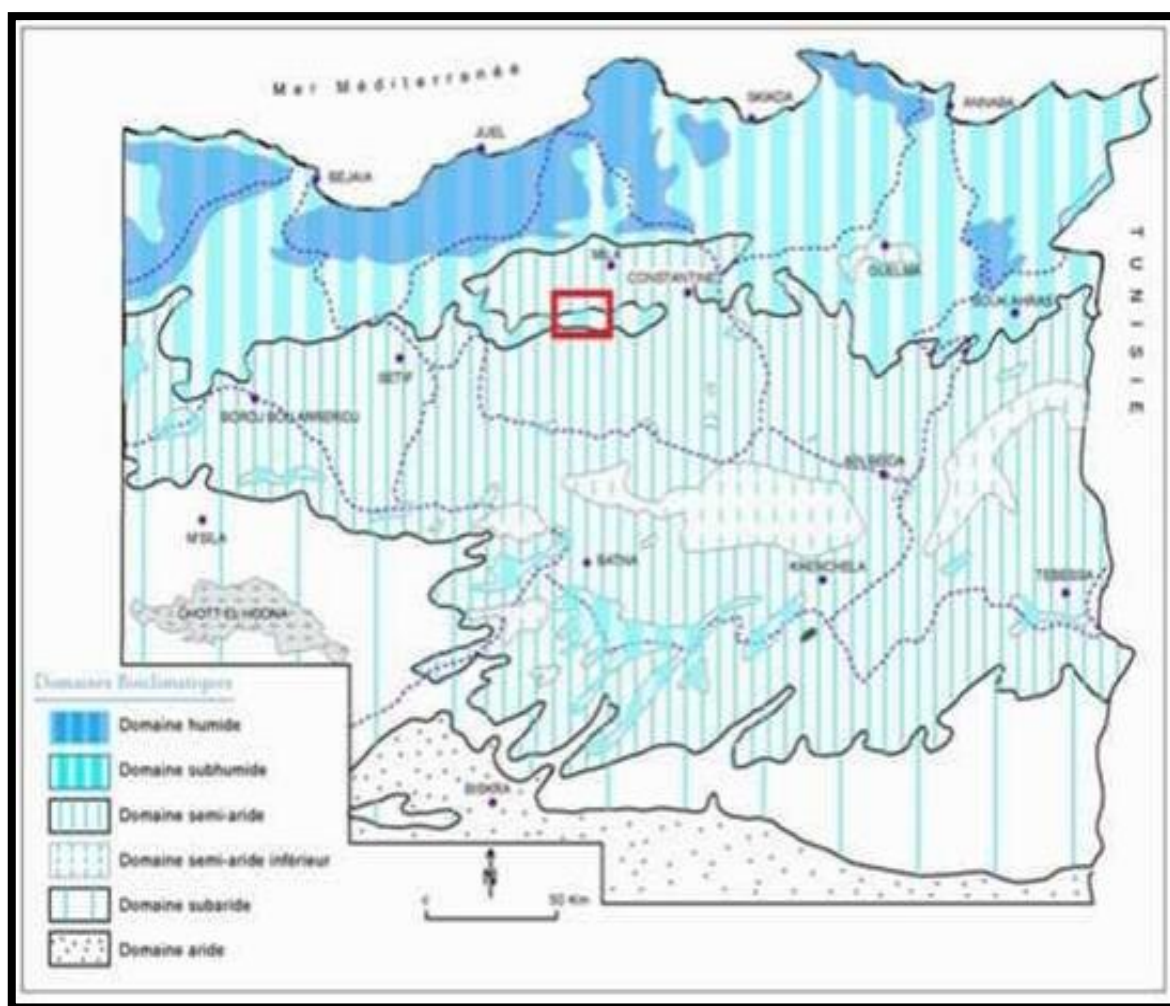


Figure 07 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien. (Mebarki A ; 2005).

II.3.Végétation et la culture

L'aspect global de la région est caractéristique du plateau constantinois : un paysage légèrement ondulé, de vastes terrains vallonnés généralement teintés de rouge, avec peu ou pas de végétation. Au printemps, la région se transforme en une vaste étendue de verdure, modelant des ondulations dans le relief. Après le labour à l'automne, une seule teinte persiste : le brun rougeâtre des marnes du Néogène, entrecoupé de taches plus claires ou grises provenant de la croûte calcaire actuelle ou marno-calcaire de l'Éocène. Conditions climatiques semi-arides caractérisées par la végétation : zones consacrées à la culture des céréales (comme l'orge et le blé) et à l'horticulture commerciale ; espace restreint de prairies naturelles concentré dans la vallée du Rhumel (**Figure 8**).

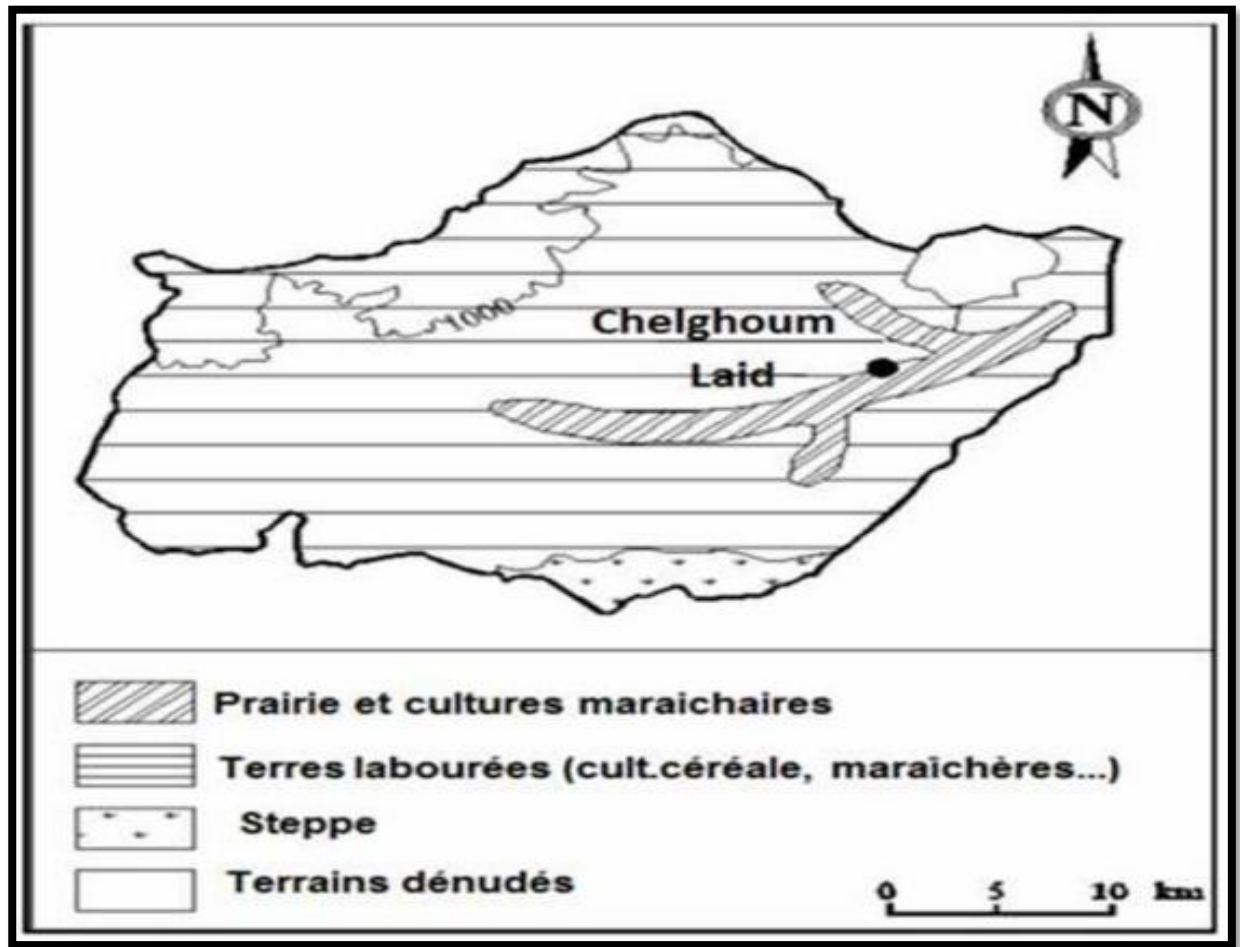


Figure 08 : Occupation du sol du sous-bassin versant Rhumel-amont (Mebarki A ; 1982).

II.4.Réseau hydrographique

Avant d'arriver à l'extrémité du Hammam Groz, l'Oued Rhumel reçoit plusieurs tributaires tels que : Oued Dekri, Oued Aouskourt et Oued El Mahari (**Figure.9**). On observe que toutes ces vallées possèdent des décharges permanentes et disposent de ressources indispensables, sans négliger les interactions avec les eaux souterraines.

Le bassin versant «10-03»est habituellement subdivisé en quatre sous-bassins :

- Zone hydrologique assez peu active, située au sud de Tajnanet.
- La partie supérieure du Rhumel (de Belaa à Chelghoum Laïd) et son affluent Oued El Mehari.
- Oued Dekri, qui est le plus important des affluents.
- Le sous-bassin créé par les affluents provenant de la ligne Dj Chebka-Toukouia

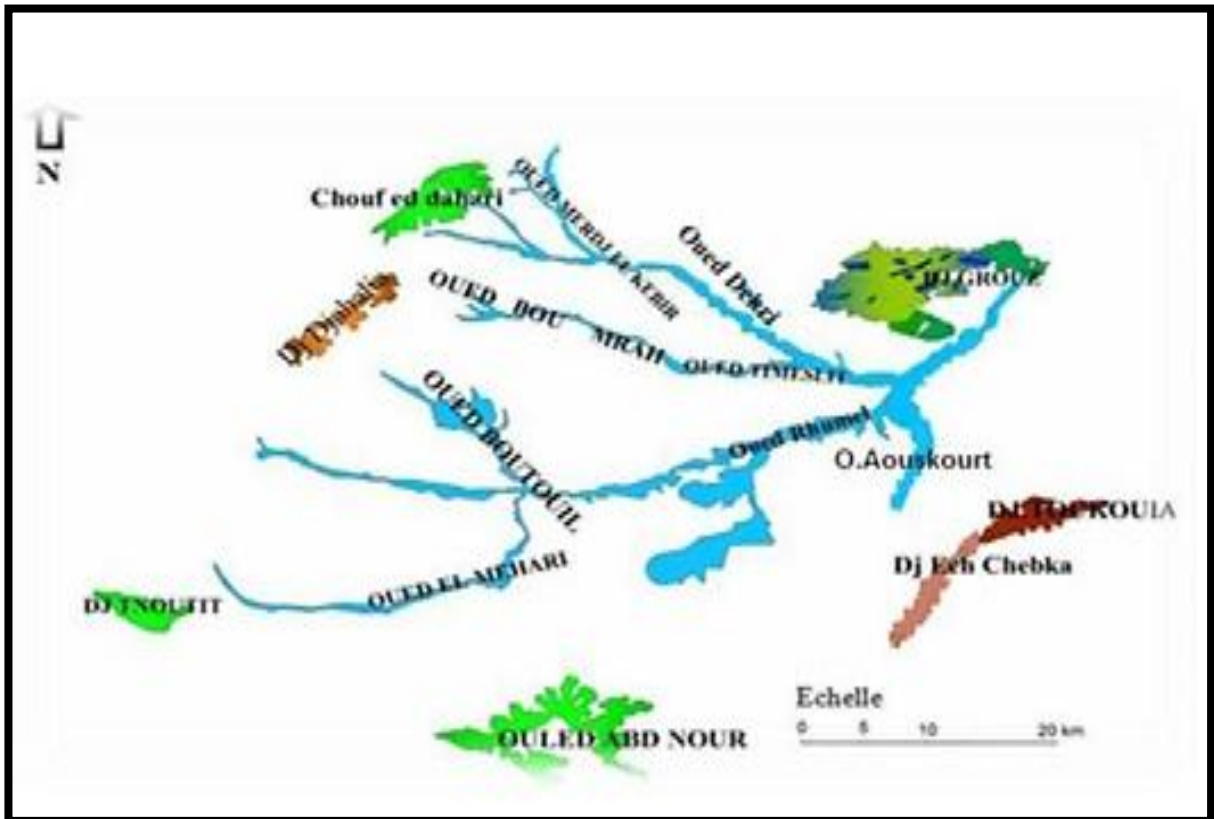


Figure 09: Réseau hydrographique de sous-bassin versant Oued Rhumel-amont (Mihoubi N ; 2009).

II.5.Habitat

Selon le dernier recensement, Chelghoum Laid couvre une superficie de 258,2 km² et abrite une population de 82 560 individus. La ville compte une densité de 319,8 résidents par km². La distribution des habitations dans la région est inégale, c'est pourquoi nous identifions trois types d'habitats :

- ✓ Un habitat concentré dans les villes et les villages : la cité de ChelghoumLaid ainsi que le hameau d'Aziz Ben Tellis (également connu sous le nom de Benyahya Abderrahmène). Un habitat semi-installé au sein de la plaine, sous forme de mechtas et douars tels que : Mechta Tahmâcht et Douar Ouled Zarga.
- ✓ Un habitat éparpillé constitué de fermes ou de maisons individuelles.

La zone présente une distribution inégale des résidences, qui est corrélée aux conditions de vie, notamment en ce qui concerne l'eau. Pour ce faire, nous disposons de différentes sortes d'habitats :

- ✓ Un habitat densifié dans les villes et les villages.
- ✓ Nous formons des Mechtas et des douars en occupant un habitat semi-disposé au sein des plaines.
- ✓ Un habitat éparpillé constitué de fermes ou de maisons individuelles.

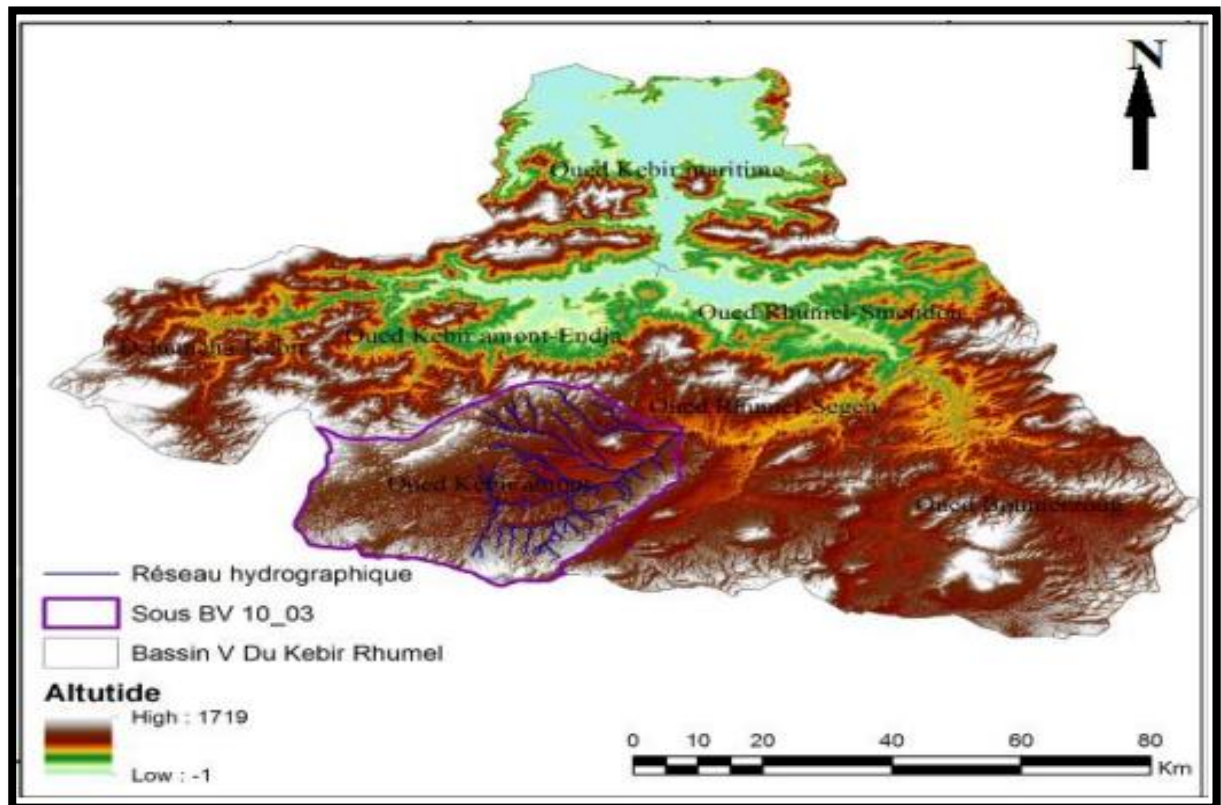


Figure 10 : Sous-bassin versant du Rhumel Amont et sa situation dans le Bsssin versant kebir Rhumel.

II.6.Économie

La région a une économie principalement basée sur les céréales : le blé (principalement dur) et l'orge, l'arboriculture et l'élevage de moutons, de chèvres et de bovins grâce à la mise en place d'élevages industriels de volailles. Les zones industrielles ont aussi une grande importance pour l'économie de la région et leurs émissions peuvent constituer une menace de pollution pour les eaux superficielles et souterraines.

II.7.Contexte géologique et hydrogéologique

Le bassin versant d'Oued Rhumel est le résultat du fond d'un ancien bac mio-pliocène, recouvert par un colmatage quaternaire en surface. Les Oueds Rhumel et Dekri le drainent, bien qu'ils aient très peu incisé ce dernier étant donné qu'ils sont entravés en aval par la rive calcaire de Hammam Oued Athmania, gorgeusement découpée par le Rhumel(barrage).

D'un point de vue géologique, le sous-bassin supérieur de l'Oued Rhumel est associé aux Monts de Constantine, bien qu'il soit déjà intégré au plateau occidental de Sétif. Le secteur d'étude présente une géologie variable. Comprendre cette géologie est crucial pour déterminer les différentes formations perméables et semi-perméables, ainsi que pour identifier les aquifères exploitables de manière bénéfique. La recherche qui suit porte sur les divers types de formations géologiques présentes dans notre région, elle a été conduite sur la base de la carte géologique de Kebir Rhumel et de la carte géologique de Sétif (1/200 000). Notre plaine est divisée en trois sections majeures :

a) Les formations quaternaires qui sont :

- **Alluvions récentes et anciennes** : Notamment les limons gris et les graviers qui sont souvent submergés aux niveaux de l'oued Dekri et de l'oued Timeslit.
- **Villafranchien** : Une couverture de limon mêlée à des morceaux de calcaire, résultant de la décalcification du substrat pliocène due au ruissellement des eaux superficielles, est indissociable du pliocène.

b) Formations tertiaires : Les formations tertiaires sont de faible épaisseur (20 à 40m).

- **Moi-pliocène continentale** : Les caractéristiques de ces terrains sont les sables, les limons teintés de rouge, les cailloux et les conglomérats.
- **Éocène inférieur et moyen** : Il s'agit de calcaires marneux contenant des lits de silex et de calcaires cristallins qui peuvent atteindre jusqu'à 280 mètres.
- **Éocène supérieur et moyen** : Il est constitué de marnes jaunes à strates calcaires marneuses d'une épaisseur approximative de 300m.
- **Paléocène** : Présente des marnes de couleur noire ou jaune, entrecoupées de marnes grises et de marno-calcaires en petits bancs.

c) Les formations secondaires :

- **Crétacé** : La série du Crétacé est très épaisse, environ de 2000m.
- **Sénonien** : est composé de marnes noires, de marnes calcaires et de lentilles calcaires.
- **Cénomaniens et Turoniens** : Au Dj Grouz, on trouve des calcaires massifs qui peuvent atteindre une épaisseur de 300 mètres.
- **Albiens et Vraconiens** : On ne les trouve qu'à Dj Grouz, sous la couche carbonatée du Cénozoïque, où on commence par des marnes qui se mêlent de marno-calcaires, tandis que l'apex est constitué de dolomies à macrocristaux.
- **Aptien** : Il n'est pas apparent sur le site d'étude, il se compose de calcaires avec des intercalations de marne en petites couches.
- **Barrémien** : Il est composé d'une suite de calcaire, de dolomie et de grès, avec de légères couches d'argile ou de marne.
- **Jurassique** : Elle n'est présente nulle part dans la région d'étude, mais cela ne permet pas de présumer son existence.
- **Trias** : Le Trias, qui est le plus ancien des terrains, affleure à la surface au niveau de Dj DESS et Dj Toukouia. Principalement composé d'argiles rouges et de gypse, agrémenté de quelques cristaux de quartz.

Selon les différentes études géologiques, hydrogéologiques et géophysiques (Durozoy ; 1960) ; trois zones aquifères ont été identifiées.

- ❖ **Aquifère Mio-Plio-Quaternaire** : C'est un aquifère libre d'environ 300 m d'épaisseur(Réf). L'aquifère de surface est composé de graviers et de limons du Quaternaire, de fragments de calcaire, marnes et conglomérats du Néogène continental, et enfin couches calcaires et de marnes à socle argileux.
- ❖ **Aquifère de l'Eocène** : C'est un aquifère captif d'une épaisseur de 60 à 150 mètres, avec une couche sous-jacente de marne d'époque Dano Montien. L'aquifère est constitué d'un groupe de marnes avec des couches de phosphate.

- ❖ **Aquifère multicouche du Crétacé supérieur** : Souvent caractérisé par des formations marneuses recouvertes de couches calcaires Calcaire et Dolomite. L'aquifère a jusqu'à 630 m d'épaisseur (dassamior ; 2022).

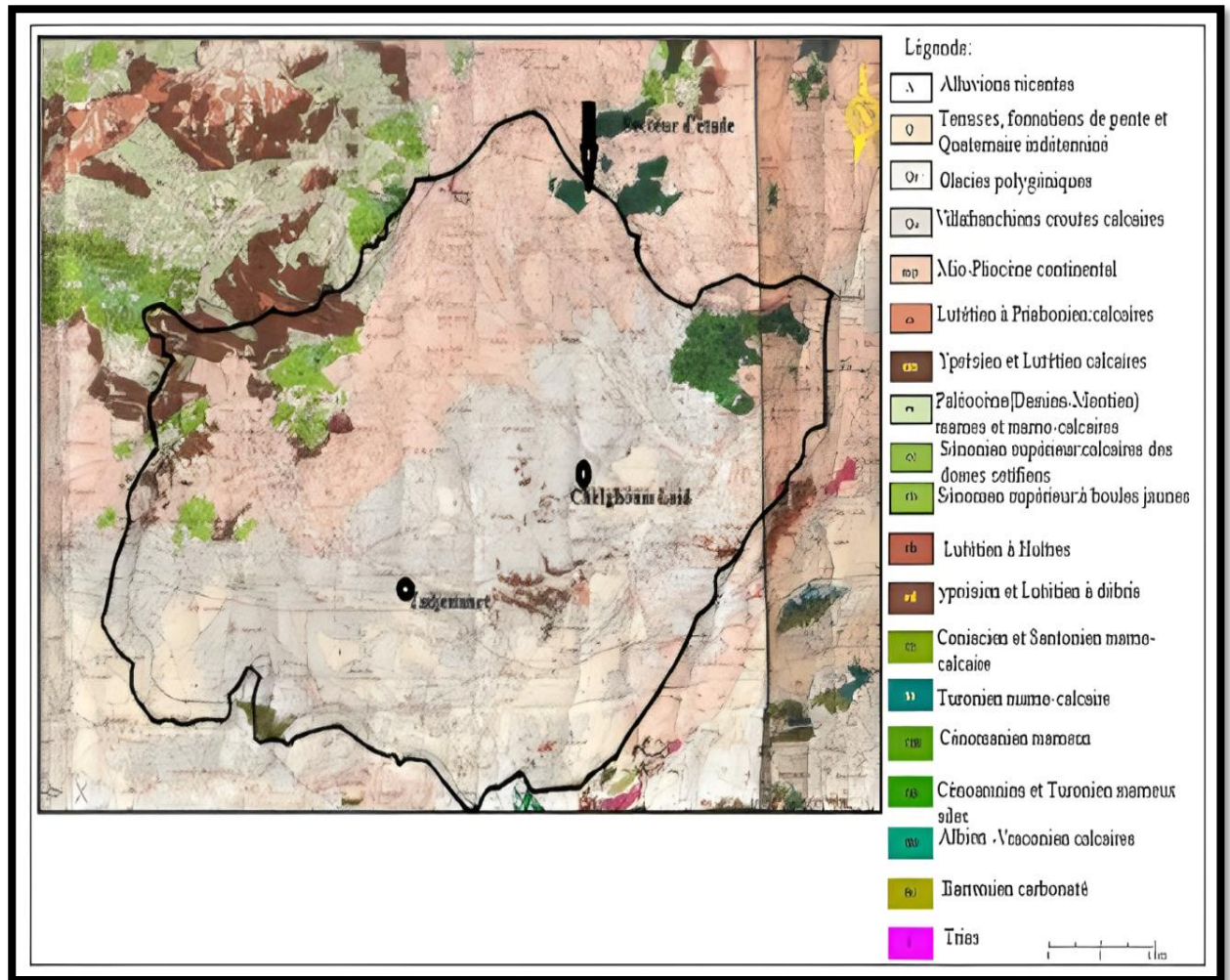


Figure 11 : Carte géologique de la région d'étude, d'après J.M.VILLA(1980)

Extrait de la carte de Sétif 1\ 200000.

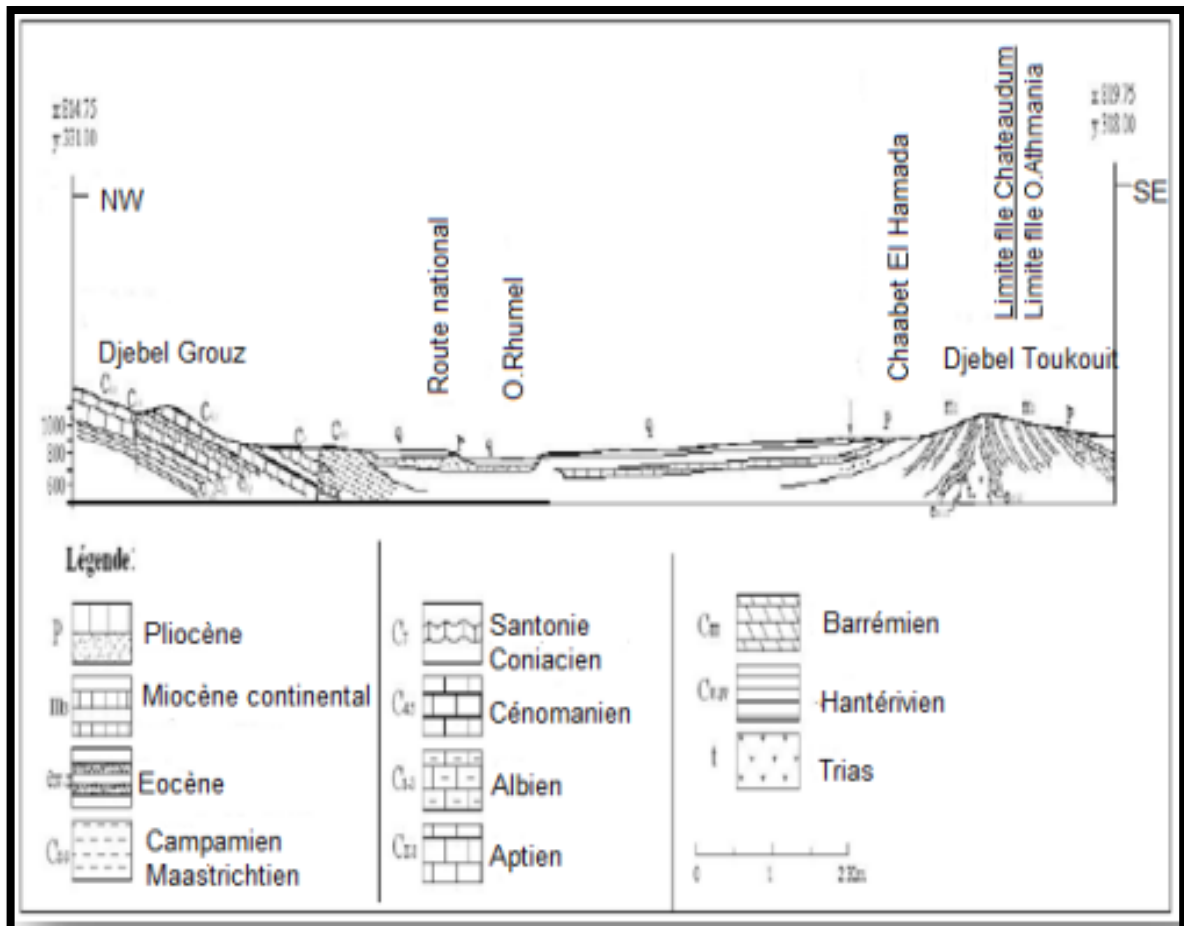


Figure 12 : coupe géologique (NW/SE) à travers la plaine d'étude (G. DUROZOY ; 1960).

Log	Age		Lithologie	Epaisseur (m)	Affleurement	Perméabilité relative	Aquifère
	QUATERNAIRE		Cailloutis, graviers, limons		Au niveau de la plaine	Perméable	Aquifère superficiel libre
	TERTIAIRE	Néogène continental	Marnes avec des niveaux calcaires, conglomérats et marnes.	100 à 150 100 à 180			
		Miocène	Marnes et banc de grès, calcaire et marne	50 à 150			
			Argile				
		Lutétien sup priabonien	Marne à banc de calcaires	300	SE, NW du S.BV	Imperméable	
	Eocène inf et moyen	Calcaire marneux à lit de silex et phosphates	60 à 150	SE, NW Au W du s.BV	Perméable	Aquifère peu profond captif	
		Danien Montien	Marnes et lits de calcaire grossier	70	Au Dj Dess et au Sud de BV		Imperméable
	SECONDAIRE	Maestrichtien	Marnes à banc de calcaires lunachelliques	150 à 180	Dj Dess et au SW de S.BV	Semi Perméable	Aquifère multi couche profond
		Campanien	Marne et calcaire massif	100			
		Sénonien inf	Marnes à bancs de calcaire	50	Dj Grouz	Semi perméable	
		Cénomanién Turonien	Calcaire, dolomie Marno-calcaire et marnes	300			
		Albien Vraconien	Calcaire avec intercalation marneuse, calcaire massif à dolomies microcristallines	180	Dj Grouz		
		Aptien inf et moyen	Calcaire avec intercalation marneuse, calcaire bien lité, calcaire marneux	145	/		
		Barémien sup	calcaire	40 à 60	Dj Tnoutit Et Dj Grouz		
		Barémien inf	Calcaire en petit banc, marne et marno calcaire Dolomies avec intercalation rare de calcaire dolomitique	80 50 250			
		Néocomien	Complexe dolomitique	150	/		
		Jurassique supérieur	Dolomie et calcaire dolomitique	150	/		
Trias	Argile, gypse à cristaux de quartz		Dj Dess Toukoui a	Imperméable			

Figure 13 : Colonne litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine de Chelghoum laid (Mihoubi N ; 2007).

II.8.Contexte climatologique

II.8.1.Aperçu sur le climat de l'Algérie

En raison de son ampleur géographique, l'Algérie est en contact avec plusieurs régions climatiques. Au nord, il s'étend jusqu'à la bordure méridionale de la zone tempérée où le climat est de nature méditerranéenne.

Vers l'intérieur, le climat méditerranéen se dégrade rapidement et la tendance à l'aridité s'intensifie. Les précipitations durant la saison froide deviennent insuffisantes, donnant lieu à l'apparition de climats semi-arides et arides. Au-delà des chaînes atlastiques, le désert s'implante de manière définitive, spécifiquement au sud de la ligne isohyète de 100 mm.

Pour ce qui est de la zone d'étude incluse dans les hautes plaines, elle bénéficie d'un climat méditerranéen et semi-aride. Il se distingue par une saison froide assez tempérée pendant laquelle des perturbations cycloniques, provenant de la Méditerranée en hiver et de l'océan en automne et printemps, se produisent

Entraînent généralement des pluies conséquentes, surtout sur les zones montagneuses, suivies d'une phase de chaleur.

II.8.2.Cadre de l'étude

La zone d'étude fait, est incluse dans le sous-bassin du Kébir Rhumel (N° 10 d'après la codification de l'A.N.R.H) a une superficie de 8811 km², et il est subdivisé en sept sous-bassins : Bassin de l'oued Kébir Amon-Enja au Nord et le sous-bassin de l'oued Rhumel Sègues à l'Est, le bassin versant Soummam (15) à l'Ouest et le bassin versant des hauts plateaux constantinois (07) au Sud (**benlabed ; 2018**).

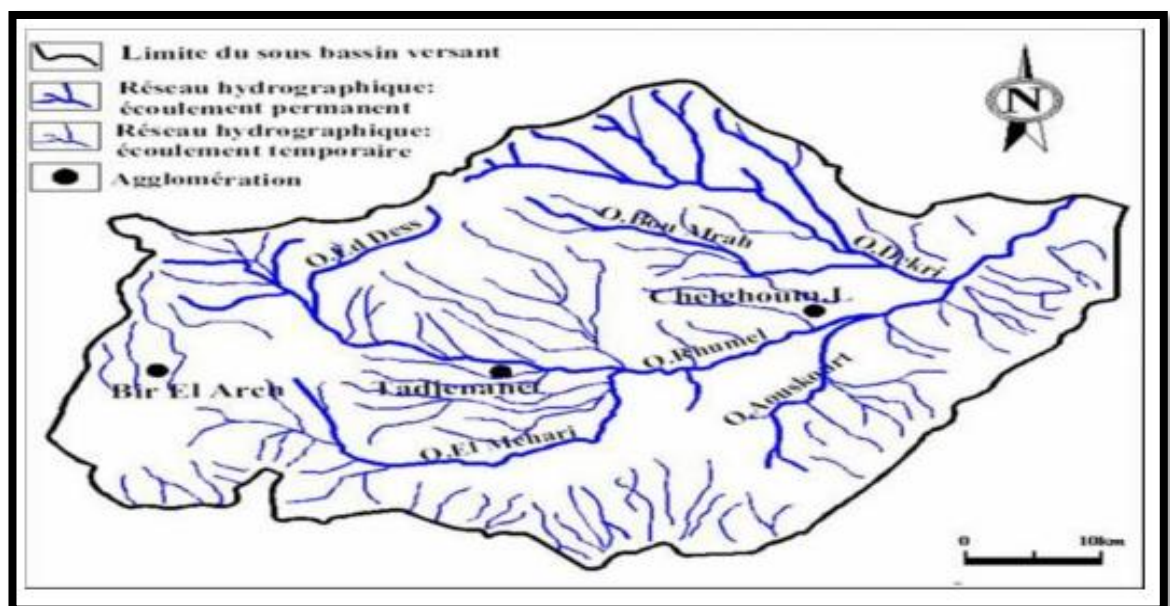


Figure 14 : Réseau hydrographique de sous bassin versant Oued Rhumel (Mihoubi N ;2009).

L'analyse climatique nous offre la possibilité de déterminer les volumes de précipitations sur la zone, l'orientation des vents prédominants à travers les saisons et les températures tout au long de l'année. Ceci nous permettra d'identifier les attributs climatiques de la zone et leurs influences sur les aspects urbanistiques et humains. Le climat est de nature méditerranéenne, avec une tendance vers le subhumide (semi-aride), caractérisé par une saison sèche et chaude suivie d'une saison humide et froide avec des transitions brèves (HERAOU A ; 2011).

II.8.3.La pluviométrie

Chelghoum El Aid reçoit en moyenne environ 400mm de pluie par an. Les collines d'oued Athmania, situées au nord et au nord-est de la commune, bénéficient d'une pluviométrie annuelle de 400 à 600 mm, ce qui équivaut à 70% de la superficie communale. Par ailleurs, environ 30% de la superficie située dans la zone sud-est reçoit quant à elle entre 300 et 400 mm de précipitations par an (HERAOU A ; 2011).

II.8.4.Les températures

La température moyenne annuelle s'établit à environ 16,73°, avec un sommet atteint en juillet et août à 34,10° et un creux mensuel de 3,68° en janvier. Ce contraste est assez marqué et définit une région où l'été est marqué par des températures élevées et où l'hiver peut voir les températures chuter très bas (HERAOU A ; 2011).

II.8.5.Les courants de vent prédominants

La zone de Chelghoum El Aid est soumise aux vents prédominants frais et pluvieux provenant du nord-ouest et, dans une moindre mesure, du nord-est, ainsi qu'aux vents estivaux chauds provenant du sud-est. Lorsque les constructions, notamment celles destinées à l'habitation, sont mal orientées, l'influence de ces vents dominants sur ces dernières est assez gênante (HERAOU A ; 2011).

II.8.6.Hydrographie

Dans la municipalité de Chelghoum El Aid, deux cours d'eau représentent le réseau hydrographique. Quant à l'Oued Dekri, il est situé au nord et prend naissance dans les communes de Benyahia et Bouhatem. L'Oued Rhumel, qui prend sa source dans la commune de Tadjenanet, se situe au sud-ouest du chef-lieu. Un confluent est créé à l'est de la ville de Chelghoum-laid lorsque ces deux rivières se rejoignent.

Ils représentent les principaux oueds qui approvisionnent le barrage Hammam Grouz. Donc, d'un point de vue hydrographique, la région de Chelghoum Laid se trouve dans le sous-bassin versant numéro 3 du vaste bassin versant de l'Oued Rhumel (HERAOU A ; 2011).

II.8.7.Humidité :

L'aridité de l'atmosphère est une caractéristique du climat des hautes plaines. Ces valeurs correspondent à l'humidité relative mesurée à 13h. C'est cette valeur qui correspond à la perception de l'humidité ou de la sécheresse de l'air.

II.8.8.Conclusion :

Le secteur d'étude appartient en grande partie au bassin du Kébir Rhumel avec :

- Une topographie assez plane dans le sous-bassin Rhumel amont et des reliefs plus ou moins élevés représentés par les djebels : Ed Dess, Grouz...
- Un climat semi-aride marqué par deux climats bien distingués.
- Un réseau hydrographique dense de type exoréique drainé principalement par Oued Rhumel et ses affluents (Oued Dekri, Oued Kareb...) pouvant alimenter la nappe d'eau en période de crue.

À travers les études géologiques et hydrogéologiques, nous définissons les horizons aquifères suivants :

- **Les formations du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire :** Cailloutis, fragments de calcaire, alluvions des plateaux, alluvions anciennes des vallées et les alluvions actuelles, c'est l'aquifère superficiel (objet de notre étude) en communication avec les eaux superficielles (oueds-chaabat...) avec aquifères sous-jacents.
- **Les formations de l'Éocène :** Ensemble calcaire marneux à lits de silex et phosphates plus ou moins fissurés.
- **Formations de Crétacé supérieur :** Constitué essentiellement de marnes et de carbonates fissurés et qui est potentiellement aquifère ; avec l'aquifère de l'Éocène (souvent en relation) constituent l'aquifère intermédiaire.

Chapitre III

Matériels et Méthodes



III. Introduction

L'échantillonnage et l'analyse des eaux souterraines sont des étapes essentielles pour évaluer leur qualité et détecter d'éventuelles contaminations. Ce chapitre décrit les techniques utilisées pour le prélèvement, la localisation des points d'échantillonnage et l'analyse des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

III.1. Prélèvements et méthodes analytiques

Dans le cadre de cette étude, environ de 15 échantillons des eaux souterraines ont été prélevés en Février 2025 dans plusieurs points localisés dans la nappe alluviale.

Au cours de nos travaux sur terrain, nous avons procédé à des mesures directes sur les eaux ainsi qu'à des prélèvements en vue d'analyse au laboratoire.

L'ensemble de 15 échantillons des eaux souterraines ont été collectés au cours du mois de Février 2025. Après filtration, tous les échantillons ont été stockés dans des bouteilles dans une glacière à température constante ($<4^{\circ}\text{C}$) et conservés au réfrigérateur ($<4^{\circ}\text{C}$).

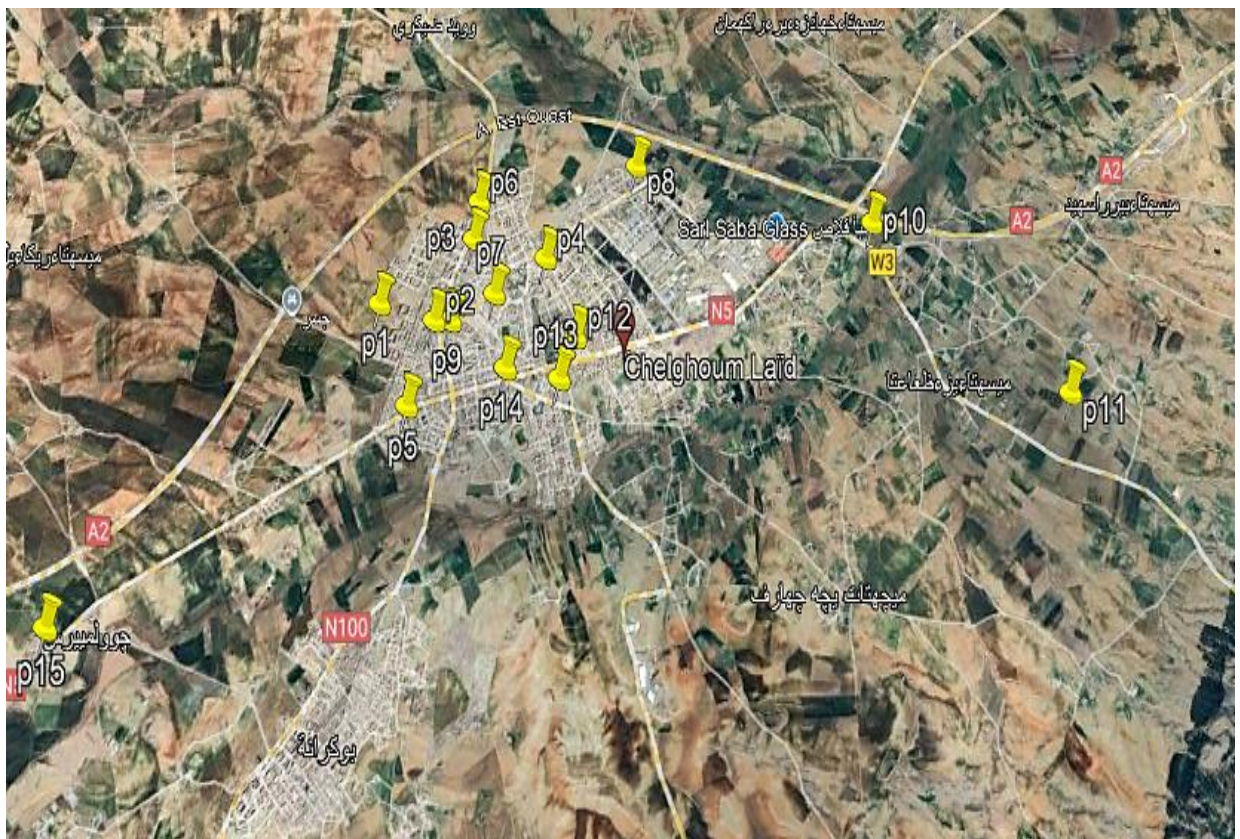


Figure 15 : Localisation des points de prélèvements (Google Earth, 2025).

III.2. Analyse des paramètres physico-chimiques

III.2.1. Les paramètres physiques

Les paramètres physiques tels que le pH, la température (T), la conductivité électrique (EC), la salinité et total des solides dissouts (TDS) ont été déterminés à l'aide d'un Thermomètre et pH-mètre. Le tableau ci-dessous présent les différents appareillment utilisés pour mesurer les paramètres physiques :

Tableau 4 : Instruments utilisés pour l'analyse des paramètres physiques.

Paramètre	Nom de l'appareille	Appareille
PH	PH mètre	
Température (°C)	Thermomètre	

• TDS • Conductivité électrique (CE)	Consort analyseur portatif 6010Multi-paramètre	
---	--	--

III.2.2. Les paramètres chimiques

Les analyses des différents éléments ont été effectuées au Laboratoire de Recherche en Sciences Naturelles et Matériaux (LSNM) du Centre Universitaire Mila au cours du mois de mars 2025. Les éléments :

- Calcium (Ca), magnésium (Mg), bicarbonates (HCO_3) et chlorures (Cl) ont été analysés par titrage volumétrique (**Rodier ; 2009**).
- Phosphate, Sulfate, Nitrite, Nitrate par Spectrophotométrie.
- Sodium (Na) et potassium (K) par spectrophotomètre de flamme (Jenway PFP7 flame photometer) au niveau du Laboratoire de l'Algérienne des eaux de Mila.

✓ Filtration d'eaux

Le papier filtre est utilisé pour séparer les particules solides insolubles des liquides tels que l'eau. Cette technique repose sur la taille des pores du papier filtre, qui piège les grosses particules et laisse passer le liquide pur (**Catherine N et al ; 2009**). L'eau (contenant des solides non dissous) est versée dans un entonnoir filtrant muni d'un papier filtre. Les particules solides sont piégées dans le papier, tandis que le liquide pur passe dans le ballon inférieur. Le papier contenant les sédiments est jeté et l'eau filtrée est collectée.



Figure 16 : filtration de l'eau à partir du papier filtre.

III.2.3. Détermination de Titre Alcalimétrique Complet (TAC)

✓ **Principe**

Cette évaluation repose sur la neutralisation d'une quantité d'eau par une solution d'acide chlorhydrique (HCl), diluée en présence de phénophtaléine. L'objectif est de mesurer la concentration en hydroxyde libre et en carbonate.

✓ **Solution utilisée**

- *Solution de phénophtaléine* : 100 ml d'éthanol avec 0,5 g de phénophtaléine.
- *Solution de rouge de méthyle* : chauffer 25 ml de l'eau distillée puis ajouter 5 mg de rouge de méthyle.
- *Solution d'orange de méthyle* : chauffer 25 ml de l'eau distillée puis ajouter 5 mg d'orange de méthyle.



Figure 17 : Dosage de TA et TAC.

✓ **Mode opératoire :**➤ **Prélèvement de l'échantillon :**

Prélever 10 mL d'eau à analyser à l'aide d'une éprouvette graduée, puis les verser dans un flacon en verre propre.

➤ **Premier titrage (Titre Alcalimétrique - TA)**

Ajouter 1 mL de solution de phénophtaléine à l'échantillon. Titrer avec une solution d'acide chlorhydrique (HCl 0,02 N) jusqu'à observer un virage de couleur, marqué par le passage du rose à l'incolore. Noter le volume de HCl utilisé : ce volume correspond au **Titre Alcalimétrique (TA)**.

➤ **Deuxième titrage (Titre Alcalimétrique Complet - TAC)**

Ajouter ensuite 2 gouttes de solution de rouge de méthyle et 2 gouttes de solution d'orange de méthyle. Poursuivre le titrage avec la solution de HCl (0,02 N) jusqu'à un

nouveau virage de couleur, cette fois du jaune au rouge orangé. Noter le volume total de HCl consommé : ce volume correspond au **Titre Alcalimétrique Complet (TAC)**.

✓ **Expression des résultats**

➤ **TA :**

- $V/5$ exprime le titre alcalimétrique (TA) en milliéquivalents par litre.
- V exprime le volume de titre alcalimétrique.

➤ **TAC :**

- $V/5$ exprime le titre alcalimétrique complet (TAC) en milli équivalents par litre.
- V exprime le volume de titre alcalimétrique complet.

III.2.4. Carbonate (CO_3^{2-}) et Bicarbonate (HCO_3^-)

Les carbonates sont présents uniquement à un pH supérieur à 8,3, tandis que les bicarbonates le sont lorsque le pH se situe entre 4,4 et 8,3. Lors d'un dosage asymétrique combiné à une mesure de pH, à quel moment ces ions sont présents ou ne sont plus présents dans l'échantillon.

Tableau 5: Détermination de Carbonate et Bicarbonate.

Espèces carbonatées	Valeurs respectives des titres TA et TAC		
	Si TA = 0	Si TA < TAC/2	Si TA = TAC/2
CO_3^{2-}	0	2 TA	TAC
	TAC	TAC - 2TA	0
HCO_3^-	TAC	TAC - 2TA	0

III.2.5. Dosage de phosphore

✓ **Principe**

Le dosage du phosphore repose sur la formation d'un complexe phosphomolybdique en présence de molybdate d'ammonium dans un milieu acide. Ce complexe est ensuite réduit par l'acide ascorbique, produisant une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en phosphore. La mesure de l'absorbance se fait par spectrophotométrie

✓ **Solutions et produits utilisés**

- Solution de molybdate d'ammonium
- Solution d'acide ascorbique
- Solution d'oxytartrate de potassium et d'antimoine
- Solution d'acide sulfurique

✓ **Mode opératoire**

- Préparer le mélange des réactifs : mettre 25ml de solution de molybdate d'ammonium, ajouter 50ml d'acide sulfurique, 20 ml d'acide ascorbique et 10ml d'oxytartrate de potassium et D'antimoine.
- Dans des béchers, mettre 25 ml d'eau Dans chaque échantillon et ajouter 2.5ml de mélange de réactifs, Attendre 5 min.
- Effectuer les lectures au spectromètre à 885nm.

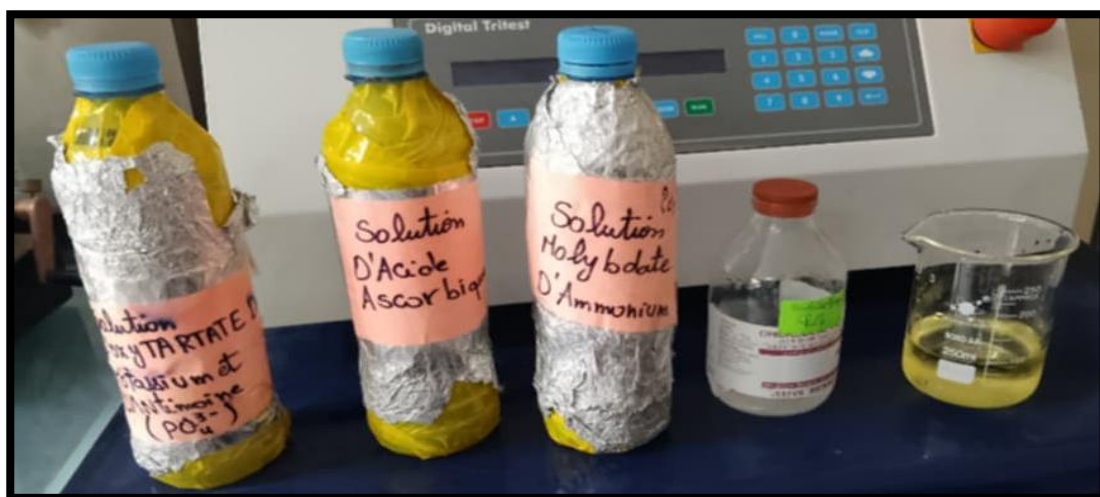


Figure 18 : Solutions et produits utilisés pour le dosage de phosphore.

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

Les ions **sulfates** sont précipités en milieu **chlorhydrique** sous forme de **sulfate de baryum (BaSO_4)**. Pour assurer la stabilité du précipité, une solution de **Tween 20** est ajoutée comme agent stabilisant. L'absorbance des suspensions homogènes ainsi obtenues est ensuite mesurée à l'aide d'un **spectromètre**, permettant de quantifier la concentration en sulfates dans l'échantillon analysé.

✓ **Réactifs et solutions utilisées**

- Solution d'acide chlorhydrique au 1/10.
- Solution de Tween 20 à 25 %.
- Solution de chlorure de baryum.



Figure 19 : Tween 20%.

✓ **Mode opératoire :**

- Dissoudre **10 g de chlorure de baryum** dans **20 ml de Tween 20%**, Compléter le volume à **100 ml** avec de l'eau distillée et homogénéiser la solution avant utilisation.
- Prendre **25 ml d'eau à analyser** dans un récipient propre.
- Ajouter **0,5 ml d'acide chlorhydrique (1/10)**.
- Ajouter ensuite **2,5 ml de la solution de chlorure de baryum + Tween 20**.
- Préparer un témoin en remplaçant l'échantillon d'eau par **25 ml d'eau distillée**, en suivant le même protocole.
- Agiter la solution et laisser reposer **15 minutes**.
- Agiter de nouveau avant de procéder à la lecture
- Effectuer la lecture au **spectrophotomètre** à une **longueur d'onde de 650 nm**.



Figure 20: Dosage de sulfate

III.2.7. Nitrite (NO_2^-)

✓ Principe

Les ions nitrites réagissent en milieu acide ($\text{pH} = 1,9$) avec le sulfamide pour former un sel de diazonium dans une réaction appelée diazotation (**Shinn ; 1941**). Ce sel de diazonium réagit ensuite avec le N-(1-naphtyle)-éthylène diamine dichlorohydraté, conduisant à la formation d'un colorant azoïque rouge.

✓ Réactifs et solutions utilisées

➤ Réactif 1 : solution de sulfanilamide

- *Dilution de l'acide chlorhydrique* : Ajouter 50 ml d'acide chlorhydrique concentré ($d = 1,18$) dans environ 300 ml d'eau distillée, en agitant doucement.

- *Dissolution de la sulfanilamide* : Dissoudre 5 g de sulfanilamide dans la solution obtenue.

- *Ajustement du volume final* : Compléter le volume total à 500 ml avec de l'eau distillée, en homogénéisant bien la solution.

➤ Réactif 2 : solution de N-naphtyl-éthylendiamine.

- Dissoudre 0,5 g de dichlorhydrate de N-(1-naphtyl)-éthylènediamine (NED) dans 500 ml d'eau distillée, en agitant jusqu'à dissolution complète.



Figure 21 : Réactifs du nitrite et nitrate.

✓ Mode opératoire :

- Introduire 25 ml de chaque échantillon dans des flacons en verre.

- Ajouter 0,5 ml de réactif 1, mélanger soigneusement, puis laisser reposer pendant un maximum de 8 minutes.

- Ajouter ensuite 0,5 ml de réactif 2, mélanger de nouveau et attendre 10 minutes.

- Procéder aux lectures au spectromètre à une longueur d'onde de 543 nm.



Figure 22 : Dosage de nitrite.

III.2.8. Nitrate (NO_3^-)

✓ Principe

Les nitrates réagissent avec le salicylate de sodium pour former du paranitrosoulate de sodium, un composé jaune pouvant être quantifié par dosage colorimétrique (**Strickland et parsons ; 1972**).

✓ Réactifs et solutions utilisées

➤ Réactif 1 : solution de sulfanilamide

- Diluer 50 ml d'acide chlorhydrique concentré ($d = 1,18$) dans environ 300 ml d'eau distillée.
- Dissoudre 5 g de sulfanilamide dans cette solution.
- Dissoudre 5 g de sulfanilamide dans cette solution.

➤ Réactif 2 : solution de N-naphtyl-éthylendiamine

- Dissoudre 0,5 g de dichlorhydrate de N-(1-naphtyl)-éthylènediamine (NED) dans 500 ml d'eau distillée.

✓ Mode opératoire

- Faire passer successivement 50 ml de chaque échantillon d'eau à analyser à travers une colonne contenant du cadmium.
- Ajouter 0.5ml de réactif 1, mélangé soigneusement, puis laisser reposer pendant un maximum de 8 minutes.
- Ajouter 0.5ml de réactif 2, mélanger de nouveau et attendre entre 10 minutes.
- Effectuer les lectures au spectromètre à une longueur d'onde de 543 nm.

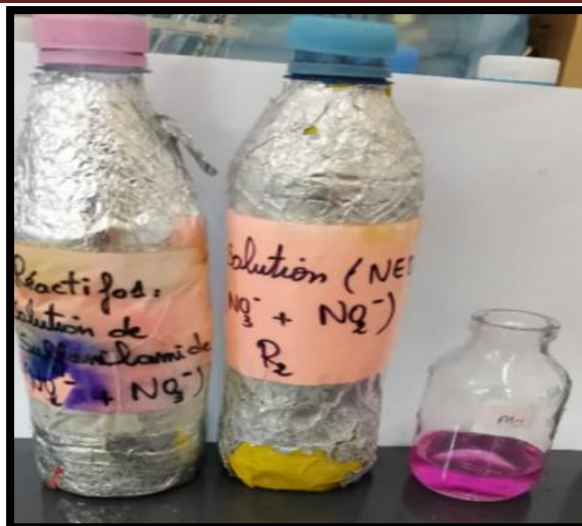


Figure 23 : dosage de nitrate.

III.2.9. Chlorure (Cl^-)

✓ Principe

En milieu neutre, les chlorures sont dosés par titrage avec une solution de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium comme indicateur (ISO 1989). La fin de la réaction est signalée par l'apparition d'une coloration rouge caractéristique du chromate d'argent.

✓ Réactifs et solutions utilisées

- Solution de chromate de potassium 10%
- Solution de nitrate d'argent 0,1 N.
- Acide nitrique
- Carbonate de calcium (poudre)

✓ Mode opératoire

- Introduire 50 ml de l'échantillon dans un flacon en verre.
- Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique, puis ajouter l'indicateur de carbonate de calcium et 2 gouttes de potassium.
- Titrer ensuite la solution goutte à goutte avec une solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une couleur rouge. Noter les volumes utilisés pour le titrage.



Figure 24: Dosage des chlorures avant et après l'étalonnage de nitrate d'argent.

III.2.10. Dosage de calcium (Ca^{2+}) par la méthode titrimétrique à l'EDTA

✓ Principe

Le dosage du **calcium (Ca^{2+})** par **titrage complexe métrique à l'EDTA (acide éthylène diamine tétra-acétique)**, L'EDTA est un agent complexant qui forme un complexe stable avec le calcium (Ca^{2+}) en solution basique. Le titrage est suivi par un indicateur coloré, généralement l'indicateur de murexide, qui change de couleur à la fin de la réaction (**ISO, 1984**).

✓ Réactifs et solutions utilisées

- Solution d'EDTA à 0.05 mol/l.
- Solution NaOH 2 N.
- Indicateur : Murexide.

✓ Mode opératoire

- Introduire 50 ml de l'échantillon dans un flacon en verre.
- Ajouter 3ml de solution NaOH Pour des échantillons et ajouter indicateur de Murexide. On met EDTA la concentration 0.05 mol/l dans la burette, puis on commence à titrer goutte à goutte jusqu'à ce que la couleur change **au rose-violet**, et on écrit la valeur manquant dans la burette.



Figure 25: Dosage de calcium avant et après l'étalonnage d'EDTA.

III.2.11. Détermination de la dureté ou titre hydrotimétrique par titrimétrie à l'EDTA

✓ Principe

La dureté de l'eau est une mesure de la concentration des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) présents dans l'eau. Elle est déterminée par titrage complexométrique à l'EDTA, L'EDTA se lie aux ions (Ca^{2+}) et (Mg^{2+}) en formant des complexes stables solubles. Le titrage est suivi à l'aide d'un indicateur coloré, qui change de couleur lorsqu'il n'y a plus d'ions libres en solution.

✓ Réactifs et solutions utilisées

- Solution tampon
- Indicateur : Noir Erichrome
- Solution d'EDTA 0.01M.

✓ Mode opératoire

- Introduire 50 ml d'eau filtrée à l'aide d'une éprouvette graduée, on ajoute 5 ml de solution tampon à chacun des échantillons.

- Ajoutée l'indicateur Noir Erichrome, puis on remue les échantillons et on ajoute la solution 0,01M EDTA dans la burette, puis goutte à goutte on commence le titrage jusqu'à ce que la solution vire au bleu et on prend la valeur manquante de la burette.



Figure 26 : Titrage de la dureté avant et après l'étalonnage d'ETDA.

CHAPITRE IV

Résultat et Discussion



IV. Introduction

La composition chimique de l'eau influence considérablement sa qualité, ainsi que sa capacité à être utilisée pour la consommation potable ou d'autres usages tels que l'irrigation ou les produits industriels. Cette étude a été réalisée dans le but d'une part d'évaluer la qualité chimique des eaux souterraines et d'autre part d'apprécier l'influence des actions humaines (les divers rejets industriels, agricoles et domestiques) sur ces ressources hydriques dans la plaine de Chelghoum El Aid. Pour cela, nous allons procéder à une analyse hydrochimique qui examinera les résultats des analyses physico-chimiques effectuées en mars 2025 sur quinze (15) échantillons d'eau souterraine, répartis de manière appropriée à travers la plaine pour assurer une représentativité spatiale des points d'eau prélevés. Ces analyses intègrent des paramètres physico-chimiques tels que : le potentiel hydrogène (**pH**), la conductivité électrique (**CE**) et la température(**T**), TDS. Tandis que les différents paramètres chimiques ont été analysés dans divers laboratoires, à l'aide de techniques et d'équipements spécifiques pour analyser les différents paramètres chimiques comme le : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{2-} .

IV.1. Caractérisation hydro chimique des eaux

IV.1.1. Fiabilité de donnée chimique

Avant d'utiliser et d'interpréter correctement les résultats, il est crucial de vérifier les données hydrochimiques. Le calcul d'erreur sur la balance ionique est une technique très utile et populaire permet de vérifier l'exactitude des mesures et d'identifier d'éventuels problèmes lors des analyses (si la somme des cations est équivalente à celle des anions pour les ions majeurs « Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , en milliequivalent par litre »). L'erreur (en %) ne doit pas dépasser 5% selon l'équation suivante (**Appelo et Postma ; 1996**) :

$$(\text{BI}) \% = 100 \times (\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions})$$

L'évaluation des balances ioniques pour l'ensemble des échantillons donne des résultats très satisfaisants (< 5 % ; Tableau 9). Ce qui confirme la fiabilité des données et la nécessité de s'y fier pour atteindre les objectifs de cette étude.

Tableau 6 : Synthèse statistique des paramètres hydrochimiques des eaux analysées.

	Min	Moy	Max
PH	7,42	7,56	8,21
T°C	17	17,5	17,7
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2	2,7	1933
TDS (mg/l)	642	1100	1320
Dureté (méq/l)	6,8	7,7	9
Ca ²⁺ (mg/L)	60	96	132
Mg ²⁺ (mg/L)	6	48	67
Na ²⁺ (mg/L)	27,6	66,7	94,3
K ⁺ (mg/L)	4,5	7	53
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	86	176	292
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	110,35	258,5	337,25
Cl ⁻ (mg/L)	42,6	102,95	145,55
PO ₄ ⁻ (mg/L)	0,002	0,01	0,03
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,001	0,02	0,02
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,028	0,46	1,26
BI (%)	0,34	2,30	2,91

IV.2. Etude de paramètre physico chimique

IV.2.1. Température

L'identification de la température de l'eau est importante pour certaines raisons. Elle joue un rôle important dans (Chapman D ; 1996 ; Morin et al ; 1983) :

- La solubilité des sels et des gaz.
- La dissociation des sels dissouts dans l'eau, donc la conductivité
- La détermination du PH.
- La connaissance de l'origine de l'eau.

D'après l'histogramme des températures (Figure.27), les températures enregistrées sont comprises entre 17°C (P3, p12) et 17,7°C (P8). Ces valeurs sont inférieures à la limite de 25°C fixée par les normes de potabilité des eaux (JORA 2014 ; l'OMS 2006). Cette variation de température est probablement due au changement de profondeur de l'eau dans les puits ainsi qu'au temps de prélèvement des échantillons.

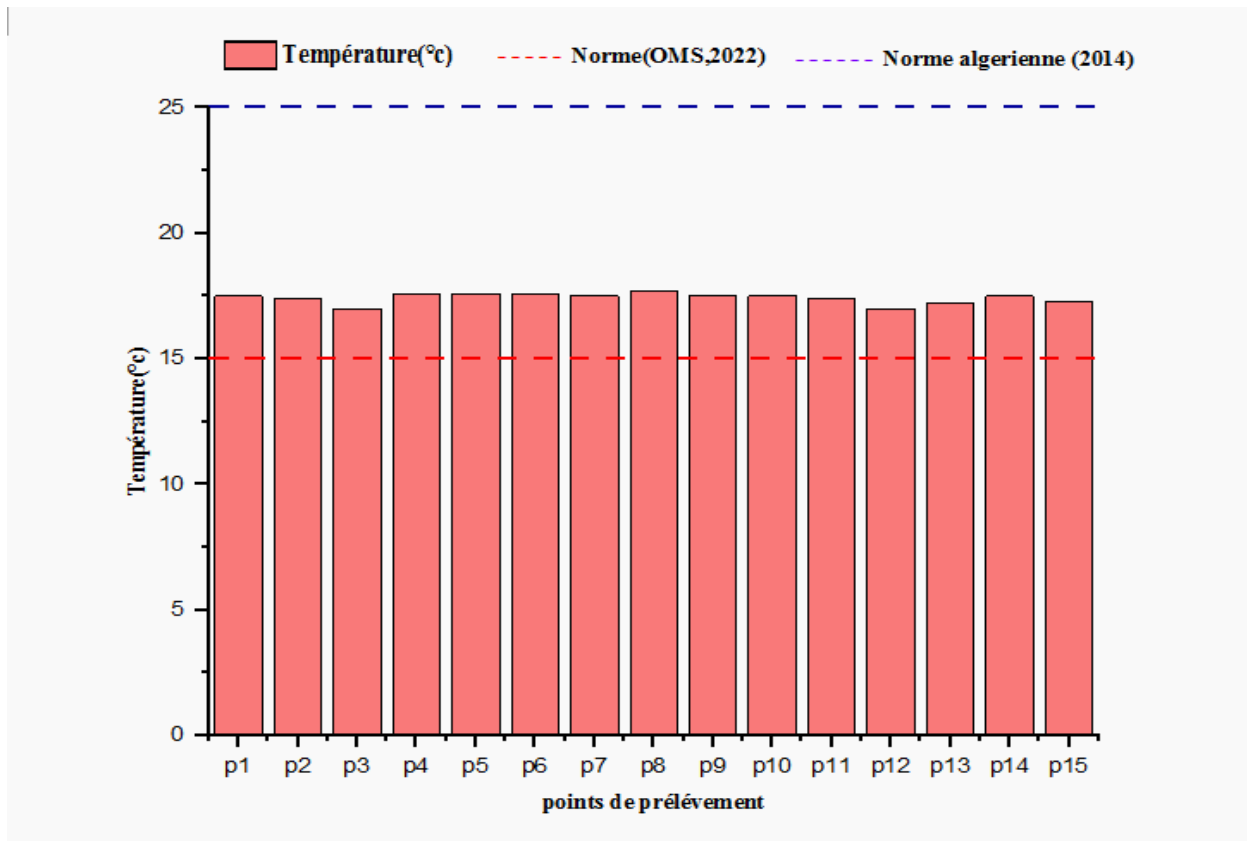


Figure 27 : Température des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

IV.2.2. Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est influencé par son origine, la composition géologique du sol ainsi que le bassin versant qu'elle traverse (**Dussart ; 1966**). Ce paramètre joue un rôle essentiel dans la régulation de nombreux équilibres physico-chimiques, notamment entre l'eau, le dioxyde de carbone dissous, les carbonates et les bicarbonates (**Bermond et Vuichard ; 1973**). Ces derniers forment des systèmes tampons qui favorisent le développement de la vie aquatique. Le pH correspond à une mesure de l'acidité de l'eau, c'est-à-dire de la concentration en ions hydrogène. Dans les milieux naturels, il varie généralement entre 6 et 8,5 (**HCEFLCD ; 2007**).

Les valeurs enregistrées varient de 7,42 à 8,21 (Fig.28), Où la majorité des valeurs se trouve dans l'intervalle permissible de différentes normes de potabilité des eaux (**JORA, 2014 , OMS ;2006**).

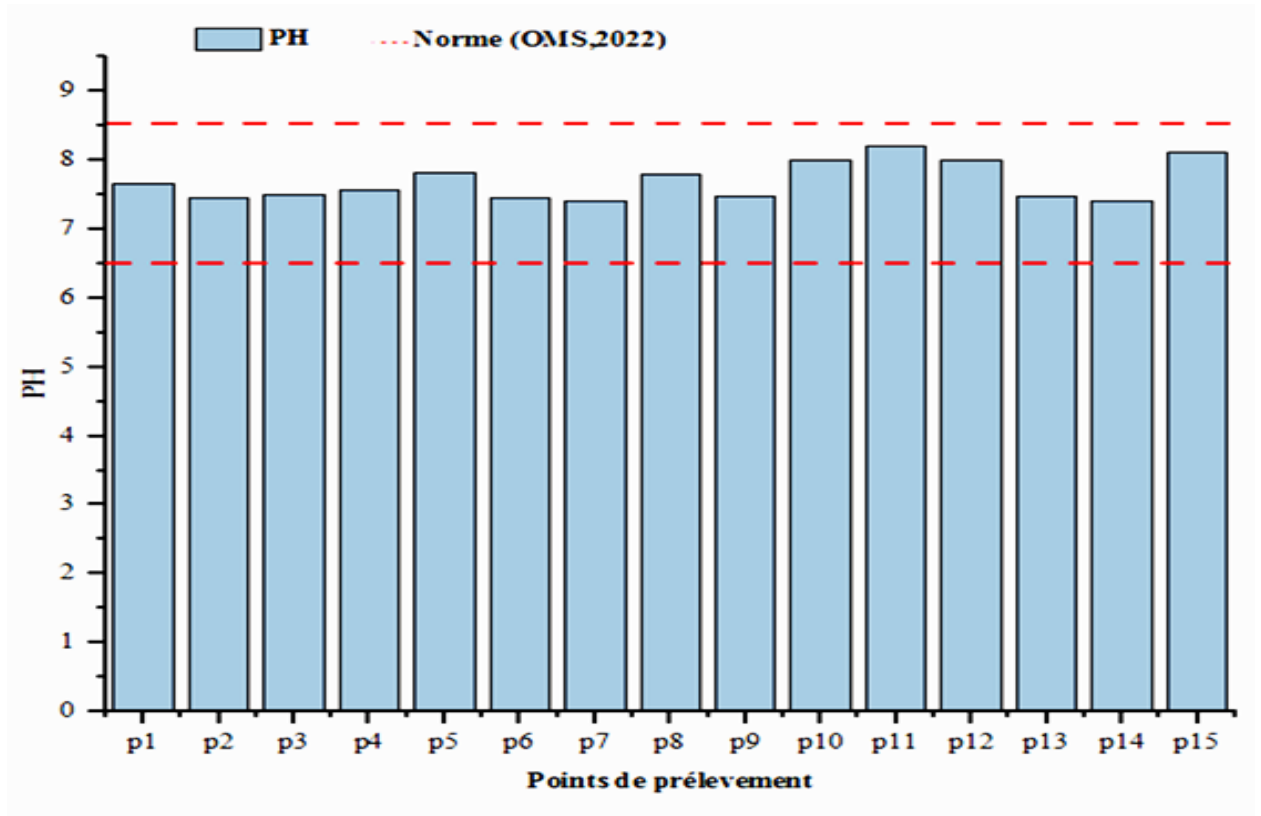


Figure28 : les valeurs de potentiel d'hydrogène des eaux souterraines étudiées.

IV.2.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique correspond à l'aptitude de l'eau à conduire un courant électrique. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment de la concentration en substances dissoutes, de la charge ionique, de la capacité d'ionisation, de la mobilité des ions et de la température de l'eau (WHO ; 2022). Ainsi, la conductivité permet d'estimer le niveau de minéralisation d'une eau (Nouayti et al ; 2015). La conductivité électrique augmente à mesure que la concentration en sels dissous dans l'eau s'élève. Conformément aux normes algériennes, les eaux naturelles peuvent être classées en fonction de leurs valeurs de conductivité électrique (Tableau N°7).

Tableau7 : Classification des eaux en fonction de la conductivité selon les normes algériennes (in Hammadi, Harendi ; 2015).

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Classe
CE < 450	Minéralisation très faible
450 < CE < 750	Minéralisation faible
750 < CE < 1500	Minéralisation moyenne
1500 < CE < 2300	Minéralisation moyennement élevée
2300 < CE < 3000	Minéralisation élevée
CE > 3000	Minéralisation très élevée

Le diagramme (Fig.29) révèle que l'ensemble des valeurs de conductivité électrique, comprises entre 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (points P3, P9) et 1933 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (point P4), respectent la norme algérienne de potabilité ($<2700 \mu\text{S}/\text{cm}$). On observe deux tendances distinctes :

- Les faibles conductivités ($<500 \mu\text{S}/\text{cm}$) concernent les points P1, P2, P3, P5, P7, P8, P9, P13 et P14. Ces valeurs s'expliquent par le lessivage des formations carbonatées (calcaires, marnes et conglomérats du Néogène continental ; **(Zineb A et al ; 2024)**)
- Les conductivités élevées ($>500 \mu\text{S}/\text{cm}$) résultent de la dissolution des formations évaporitiques (gypse, halite) **(Khedidja ; 2016)** ; L'influence des rejets anthropiques (eaux usées urbaines) et Les activités industrielles environnantes.

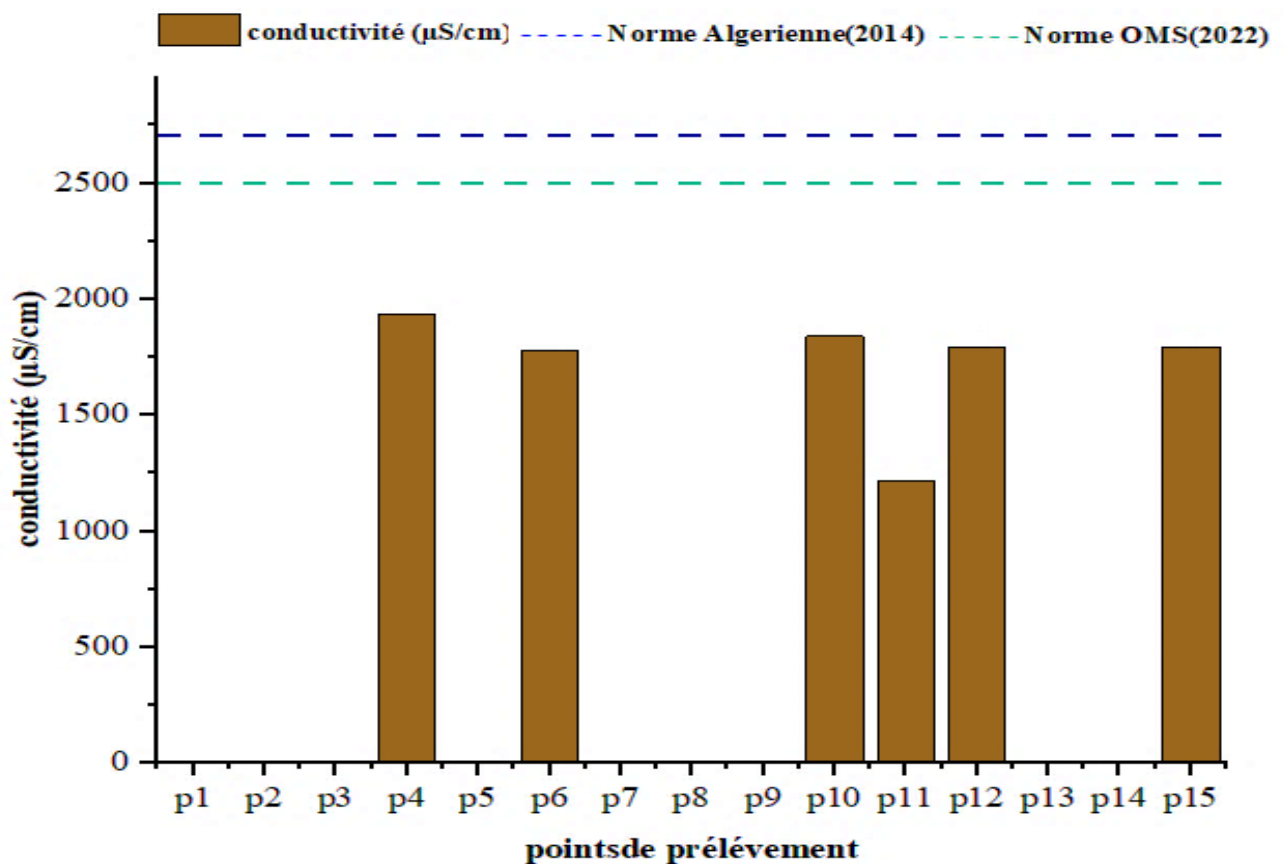


Figure 29 : La Conductivité électrique des eaux souterraines étudiées.

IV.2.4. Total des solides dissous (TDS)

La conductivité de l'eau dépend de la concentration de sels minéraux dissous. Le Total des Solides Dissous (TDS) est une mesure qui reflète la teneur totale en sels minéraux. En règle générale, une eau dont la minéralisation est inférieure à 600 mg/l est considérée comme de bonne qualité **(OMS ;2022)**. Dans notre cas (fig.30), les valeurs de TDS varient entre 649mg/l (p6) et 1320mg/l (p2). De manière générale, la moyenne des valeurs de la Total des solides dissous (TDS) est inférieure à la norme algérienne de potabilité ($<1500 \text{ mg/l}$). Cela indique que la qualité de l'eau est globalement acceptable selon ces référentiels.

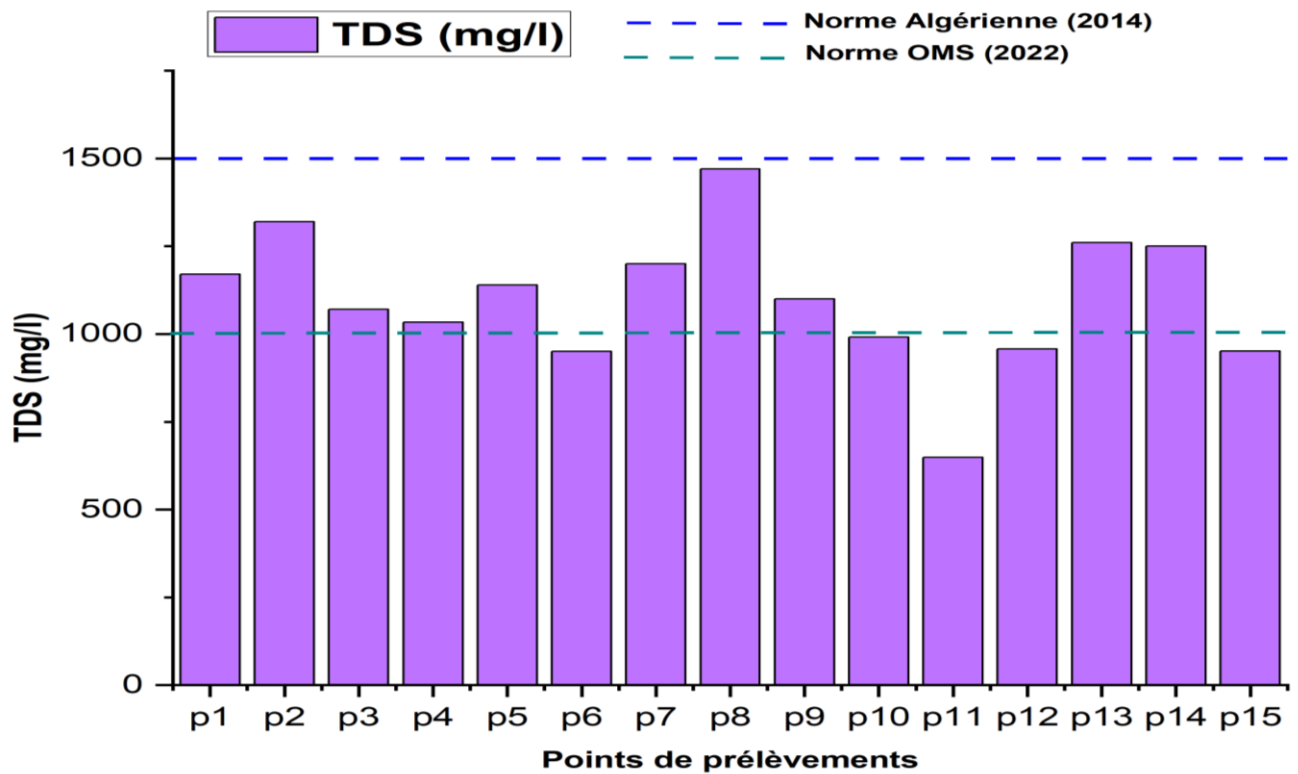


Figure30 : Le Total des solides dissous (TDS) des eaux souterraines étudiées.

IV.2.5. Dureté

La dureté de l'eau est un paramètre physique qui correspond à la teneur totale en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) dissous dans l'eau, généralement exprimée en milligrammes par litre (mg/l) de carbonate de calcium (CaCO_3) ou en degrés français ($^{\circ}\text{FH}$, où $1^{\circ}\text{FH} = 10 \text{ mg/l CaCO}_3$) (OMS ; 2017). Ces ions proviennent principalement de la dissolution des roches calcaires et magnésiennes (ex : gypse, dolomie) (Rodier et al ; 2009).

L'histogramme suivant (Fig.31) présente les variations de la dureté de l'eau, avec des valeurs comprises entre 7,1 mg/L (point P2) et 8,4 mg/L (point P14). Ces résultats indiquent une faible minéralisation en calcium et magnésium, puisque toutes les valeurs sont nettement inférieures à la norme algérienne de potabilité fixée à 200 mg/L (JORA, 2014 ; OMS, 2022).

Cette faible minéralisation en ions calcium et magnésium soit parfaitement adaptée à la consommation humaine.

Tableau8 : Classification des eaux en fonction de la dureté selon les normes algériennes (Rodier et al. 2009).

Dureté ($^{\circ}\text{F}$)	Dureté (mg/L CaCO_3)	Classe
0 à 7 $^{\circ}\text{F}$	< 70 mg/L	eau très douce
7 à 15 $^{\circ}\text{F}$	70 – 150 mg/L	eau douce
15 à 25 $^{\circ}\text{F}$	150 – 250 mg/L	eau moyennement dure
25 à 35 $^{\circ}\text{F}$	250 – 350 mg/L	eau dure
> 35 $^{\circ}\text{F}$	> 350 mg/L	eau très dure

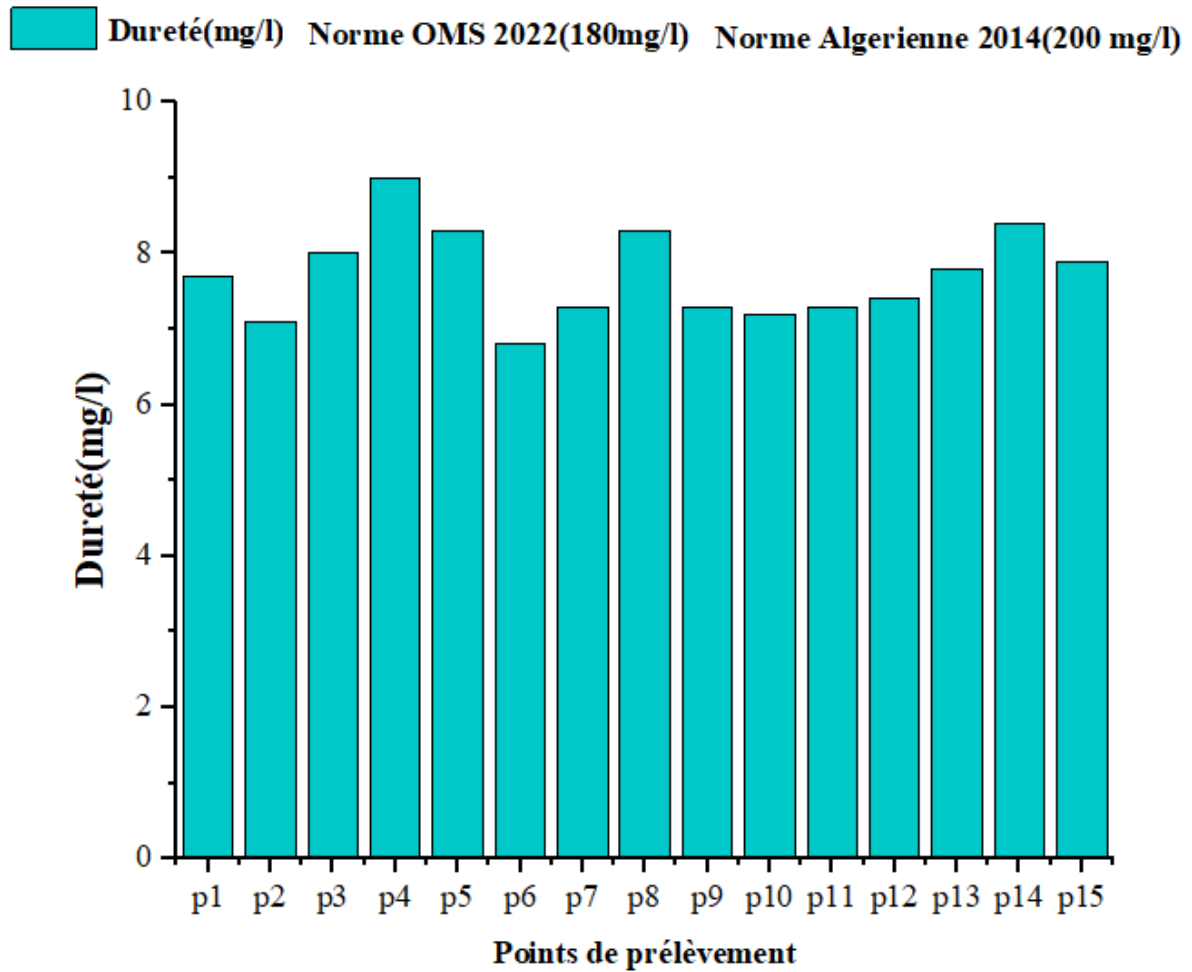


Figure31 : Dureté des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

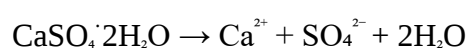
IV.3. Les cations

IV.3.1. Le calcium (Ca^{2+})

Dans les eaux naturelles, le calcium est souvent l'élément principal qui contribue à la dureté de l'eau. Sa présence est principalement due à l'altération des roches carbonatées, comme le calcaire, par le dioxyde de carbone dissous dans l'eau. Ce gaz provient de l'atmosphère ainsi que des couches superficielles du sol, où sa concentration peut être significativement plus élevée en raison de la respiration des racines et de la décomposition de la matière organique. Au contact des roches carbonatées, l'eau chargée en dioxyde de carbone déclenche une réaction chimique qui dissout le carbonate de calcium et libère des ions calcium dans la solution aqueuse (**Mekaoui et Bennour ; 2016, Later et Terki ; 1998**).



Le calcium peut provenir aussi des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) selon la réaction :



Dans notre secteur d'étude, les concentrations en calcium (Fig.32) varient de 60 mg/l (point P11) à 132 mg/l (point P7). La majorité des points d'eau présentent des teneurs inférieures à la norme algérienne de potabilité, fixée à 200 mg/l. Ces variations pourraient être expliquées par des différences dans la composition lithologique des aquifères, le temps de contact entre l'eau et la roche, ou l'influence des rejets humains. Bien que toutes les valeurs restent en dessous de la norme réglementaire, les points présentant les concentrations les plus élevées pourraient résulter d'une dissolution plus marquée des formations carbonatées et des formations évaporitiques en particulier les formations gypseuses. Ces résultats confirment globalement une bonne qualité des eaux vis-à-vis du paramètre calcium.

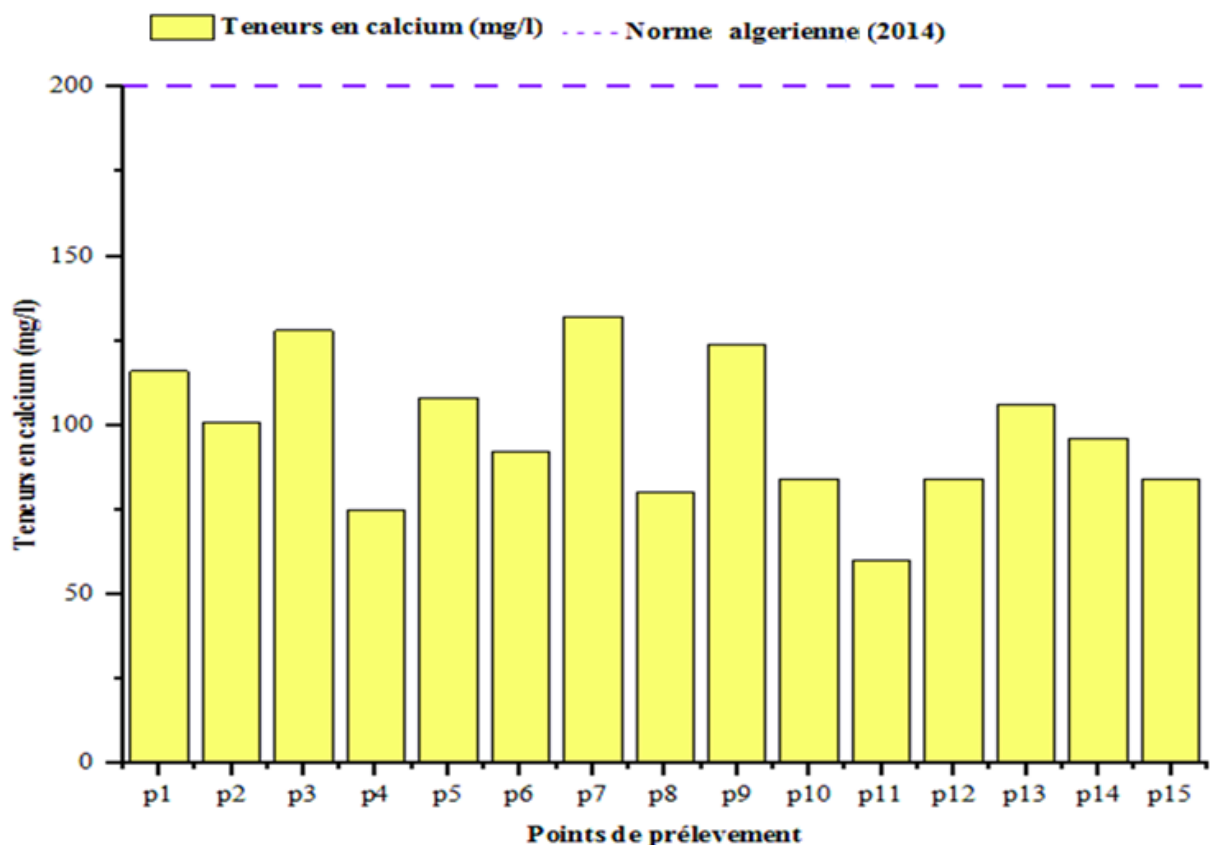


Figure32 : Concentrations de calcium des eaux souterraines étudiées.

IV.3.2. Le Magnésium (Mg^{2+})

Dans les eaux naturelles, le magnésium (Mg^{2+}) est majoritairement issu de l'altération des roches dolomitiques, notamment par dissolution de la dolomie ($CaMg(CO_3)_2$), des calcaires dolomitiques et des marnes riches en magnésium (Appelo et Postma ;2005). La dissolution de ces minéraux magnésiens est accélérée par la présence de CO_3 dissous dans l'eau, qui réagit avec les carbonates pour libérer des ions Mg^{2+} . Ce processus d'altération chimique suit notamment la réaction :



Par ailleurs, le magnésium peut également être libéré lors de la dissolution de sels de magnésium, comme le sulfate de magnésium (MgSO_4), présents dans les terrains gypseux et pyriteux (Langmuir ; 1997). La concentration en magnésium dans l'eau est donc étroitement liée à la nature géologique des formations traversées. Il est important de noter que la mise en solution du magnésium dans l'eau nécessite un temps de séjour significatif, permettant aux réactions chimiques de se produire et aux minéraux de se dissoudre progressivement (Bouafia ; 2015).

Les concentrations en magnésium dans la zone d'étude varient de 6 mg/L (point P6) à 65 mg/L (point P5) (Fig.33). L'ensemble des concentrations mesurées présente des valeurs significativement inférieures au seuil de potabilité établi par la réglementation algérienne (150 mg/L), confirmant ainsi une parfaite conformité des eaux étudiées vis-à-vis du paramètre magnésium.

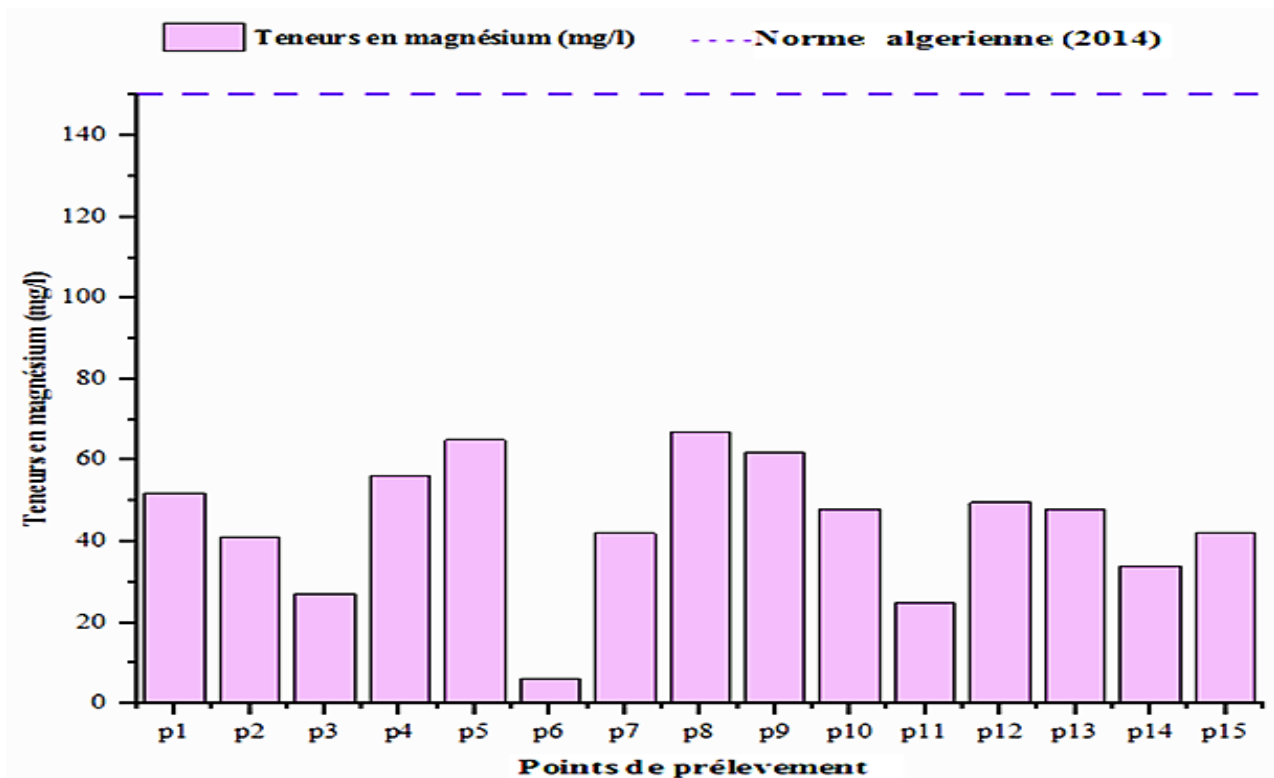


Figure33 : Concentrations de magnésium des eaux souterraines de Chelghoum El Aid.

IV.3.3. Le Sodium (Na^+)

Le sodium provient du lessivage des roches salines, les eaux usées industrielles et domestiques, ainsi que les intrusions d'eau de mer (Hounslow 1995).

D'après l'histogramme des concentrations en sodium (Fig.34), les valeurs mesurées varient entre 27,6 mg/L (point P11) et 94,3 mg/L (point P13), avec une moyenne de [67 mg/L]. Ces concentrations restent inférieures à la norme algérienne et de l'OMS de potabilité fixée à 200 mg/L, ce qui indique une absence de risque sanitaire lié au sodium dans les eaux analysées. Cependant, on observe des variations spatiales, en particulier une concentration plus élevée en P13 (94 mg/L), potentiellement causée par la proximité d'une source saline ou les rejets industriels, etc. Ces résultats confirment que la qualité des eaux respecte les

standards nationaux, bien que des suivis réguliers soient recommandés pour anticiper d'éventuelles contaminations futures.

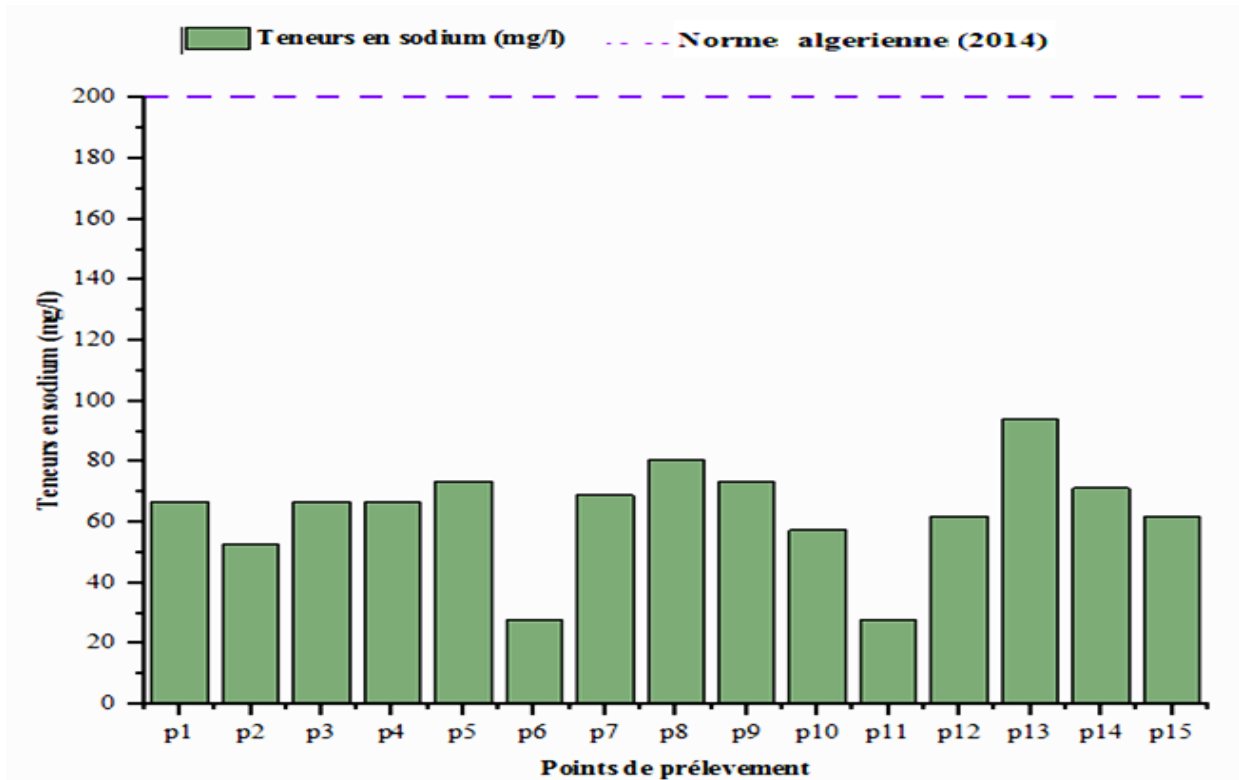


Figure34: Concentrations de sodium des eaux souterraines de Chelghoum El Aid.

IV.3.4. Le Potassium (K^+)

Dans les eaux naturelles, le potassium (K^+) est généralement beaucoup moins abondant que le sodium (Na^+), en raison de sa forte rétention dans les sols et les minéraux argileux (**Karaouet et Bourafa 2016**). Sa présence dans l'eau est principalement liée à :

- L'altération des formations silicatées (gneiss, schistes, feldspaths potassiques),
- La désagrégation des argiles riches en potassium (illite, smectite),
- Les apports anthropiques limités (engrais, eaux usées).

On peut constater sur l'histogramme du potassium (Fig.35) des concentrations allant de 4,5 mg/l (P3) à 11,3 mg/l (P12). La plupart des valeurs restent inférieures à la norme algérienne de potabilité (20 mg/l), à l'exception du puits P7, qui présente une concentration élevée de 53 mg/l. Cette anomalie pourrait s'expliquer par la composition géologique naturelle de la zone ou une contamination anthropique (déchets ou eaux usées).

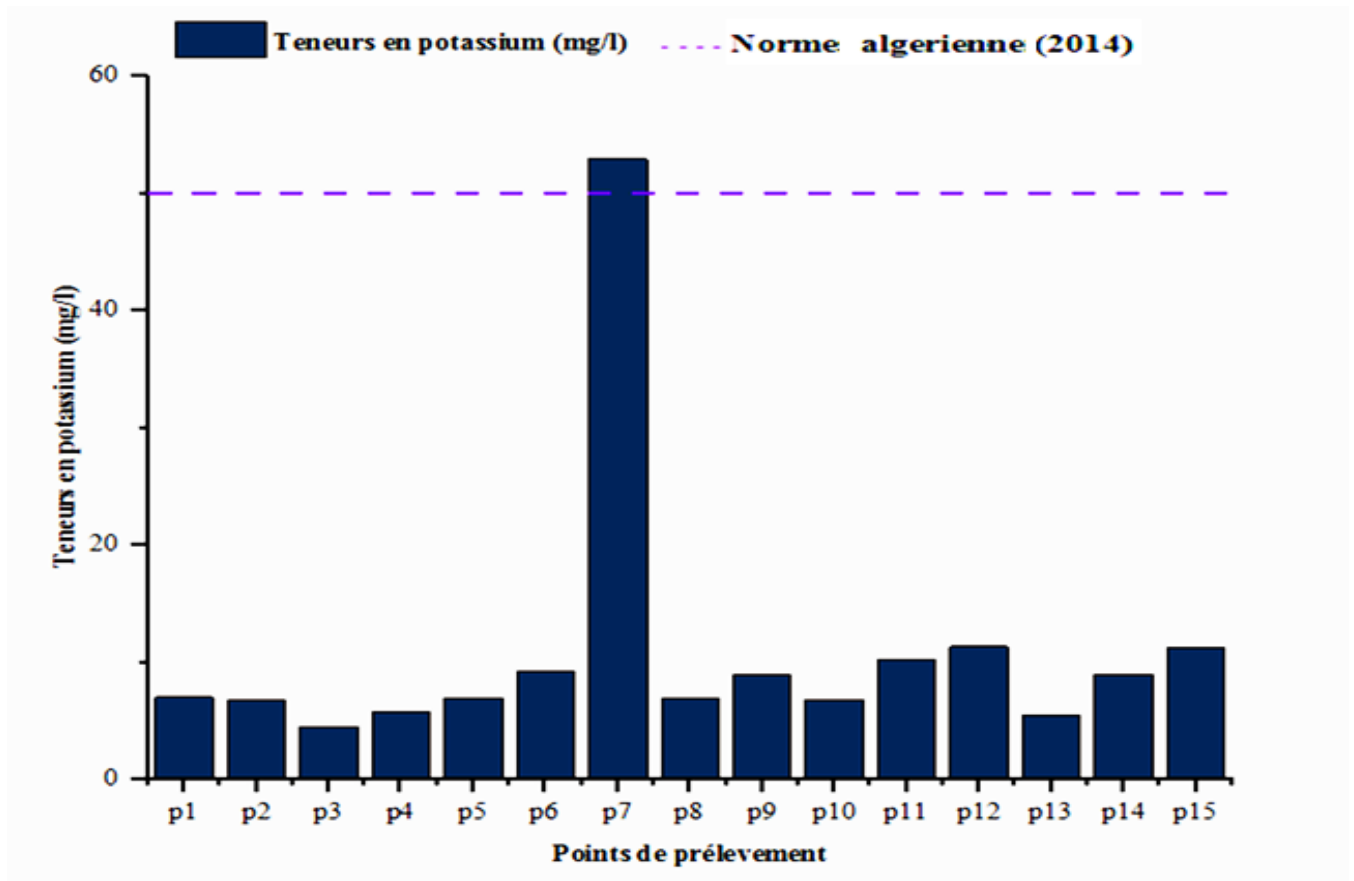


Figure35 : Teneurs en potassium des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

IV.4. Les anions

IV.4.1. Les chlorures (Cl^-)

Cet ion est fréquemment présent dans les eaux naturelles, mais sa concentration peut varier considérablement. Son origine est principalement liée à deux processus naturels : la dissolution de sels minéraux par lessivage des sols salins, ou leur concentration sous l'effet d'une évaporation intense, notamment dans les régions où la nappe phréatique affleure près de la surface (**Appelo et Postma; 2005**). Par ailleurs, des sources anthropiques contribuent également à sa présence, telle que les rejets d'eaux usées domestiques et industrielle, ainsi que l'utilisation massive d'engrais chimiques et de pesticides en agriculture (**Dbieche T ;2002**).

Les concentrations en chlorures dans notre étude (fig.36). Varient de 42,6 mg/L (point P6) à 145,55 mg/L (point P13), comme le montre la figure. Les valeurs mesurées restent en dessous de la norme algérienne de potabilité fixée à 250 mg/L, ce qui signifie qu'il n'y a pas de risque immédiat pour la consommation humaine. Cependant, la variation spatiale observée pourrait être expliquée par des facteurs comme la proximité de sources de contamination humaine (rejets industriels, infiltration d'eaux usées).

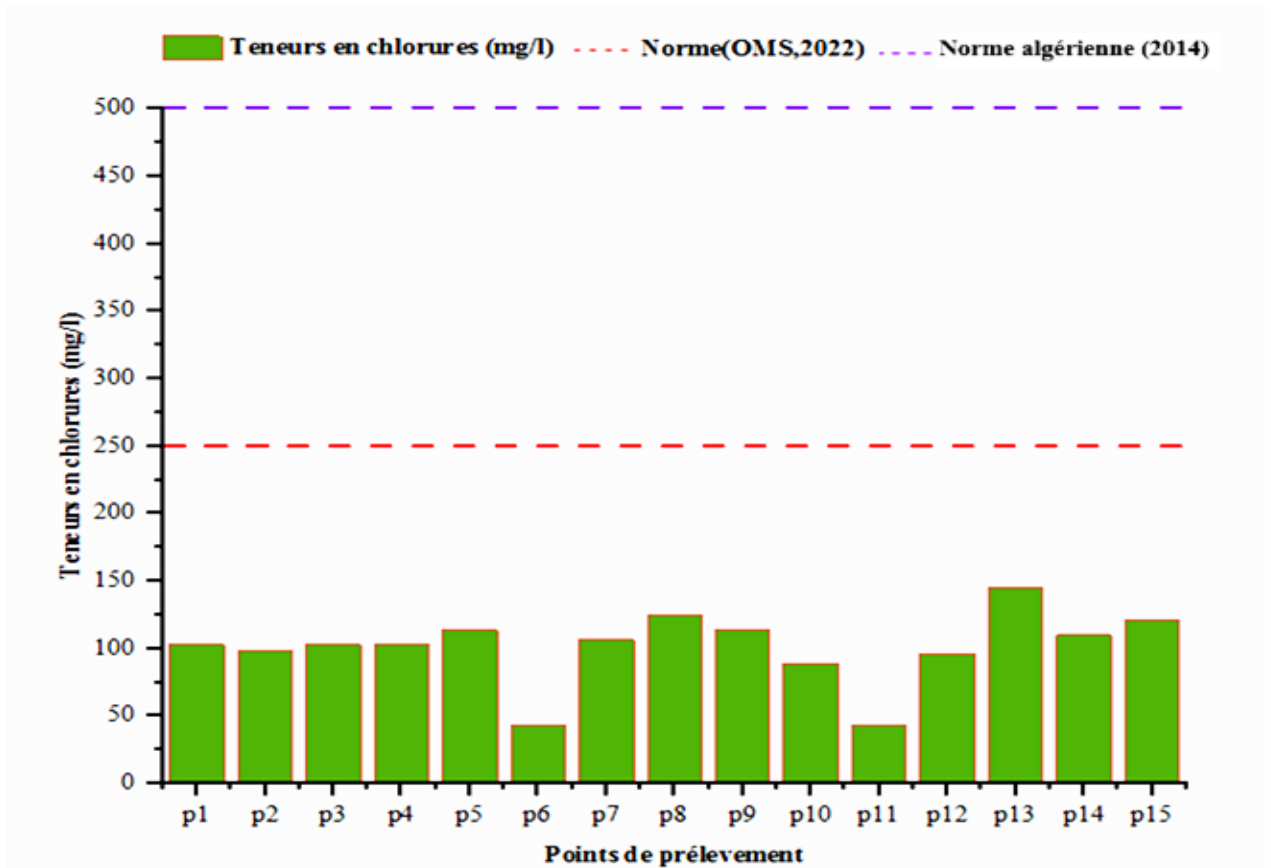


Figure36 : Teneurs en chlorures dans les eaux souterraines étudiées.

IV.4.2. Les sulfates (SO_4^{2-})

Les concentrations de sulfate dans les eaux souterraines varient considérablement, principalement en raison de deux processus géochimiques majeurs : (1) la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), minéral largement répandu dans les formations sédimentaires, libère des ions sulfate dans les aquifères (**Langmuir 1997**) ;(2) l'oxydation des sulfures minéraux lors des épisodes pluvieux contribue également à l'enrichissement en sulfates (**Clark, 2015**).

D'après l'histogramme des sulfates (Fig.37), la majorité des échantillons respectent la norme algérienne de potabilité qui est de 400 mg/L. On peut observer une variabilité spatiale significative avec des concentrations mesurées variant de 110,35 mg/L au point P6 à 337,25 mg/L au point P1. Les concentrations les plus élevées pourraient indiquer une influence anthropique locale (rejets industriels ou agricoles) ou une dissolution accrue des formations gypseuses dans la région (**Khedidja 2016**).

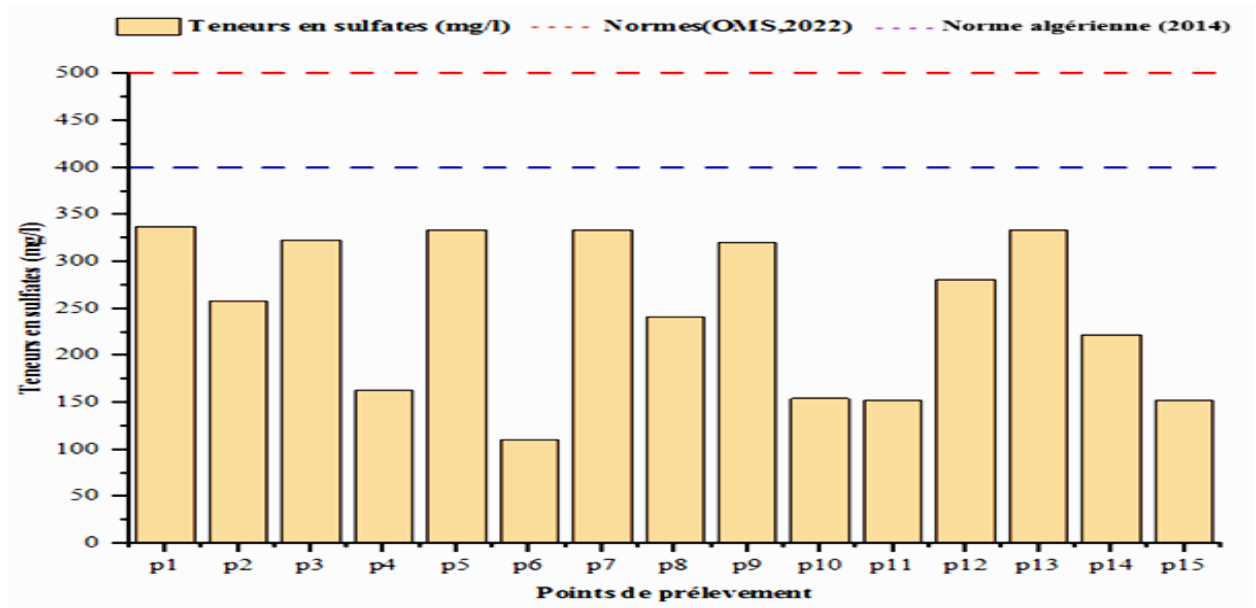


Figure 37 : Teneurs en sulfates dans les eaux souterraines étudiées.

IV.4.3. Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les ions bicarbonates (HCO_3^-) dans les eaux souterraines proviennent principalement de l'altération des roches carbonatées (calcaires) sous l'action des eaux météoriques chargées en dioxyde de carbone (CO_2) (Bouafia 2015 ; Appelo et Postma 2005).

Ce processus géochimique, connu sous le nom de dissolution carbonatée, suit la réaction suivante :



Les résultats (Fig.38) démontrent que la totalité des concentrations en bicarbonates (HCO_3^-) respecte la norme algérienne de potabilité (500 mg/L). Les valeurs mesurées sont comprises entre 86 mg/L au point P3 et 292 mg/L au point P9 (voir Figure 38). Cette variabilité spatiale pourrait s'expliquer par des différences lithologiques locales telles que l'épaisseur et la variation des formations carbonatées.

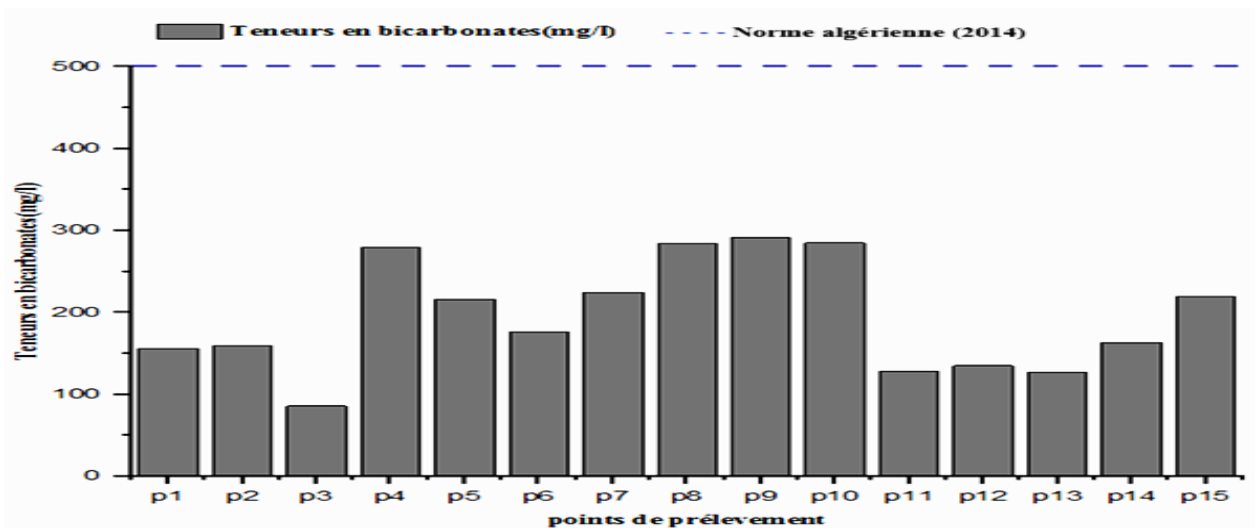


Figure38 : Teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines étudiées.

IV.5. Les éléments chimiques indicateurs de la pollution

IV.5.1. Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates (NO_3^-) sont la dernière étape de l'oxydation de l'azote organique dans les écosystèmes aquatiques. Leur présence dans les eaux souterraines montre un processus avancé d'autoépuration, avec une minéralisation complète de l'azote organique (**Galloway et al 2004**). Cependant, ce cycle naturel est fortement perturbé par les activités humaines en raison de (**Wakida et Lerner 2005**): (1) Utilisation intensive d'engrais azotés en agriculture ; (2) Rejets provenant des déchets industriels, en particulier les industries chimiques et minières ; (3) Infiltration des eaux usées domestiques (**Bremond et Vuichard, 1973**).

La figure ci-dessous (fig.39) montre les niveaux de nitrates mesurés à divers endroits de l'échantillonnage. Les concentrations varient entre 0,028 mg/L (point P9) et 1,26 mg/L (point P14), soit des valeurs largement inférieures à la norme algérienne de potabilité de l'eau, qui est fixée à 50 mg/L. Ces résultats indiquent donc une absence de contamination significative par les nitrates dans les eaux analysées, conformément aux normes réglementaires (**JORA 2014 et OMS 2022**).

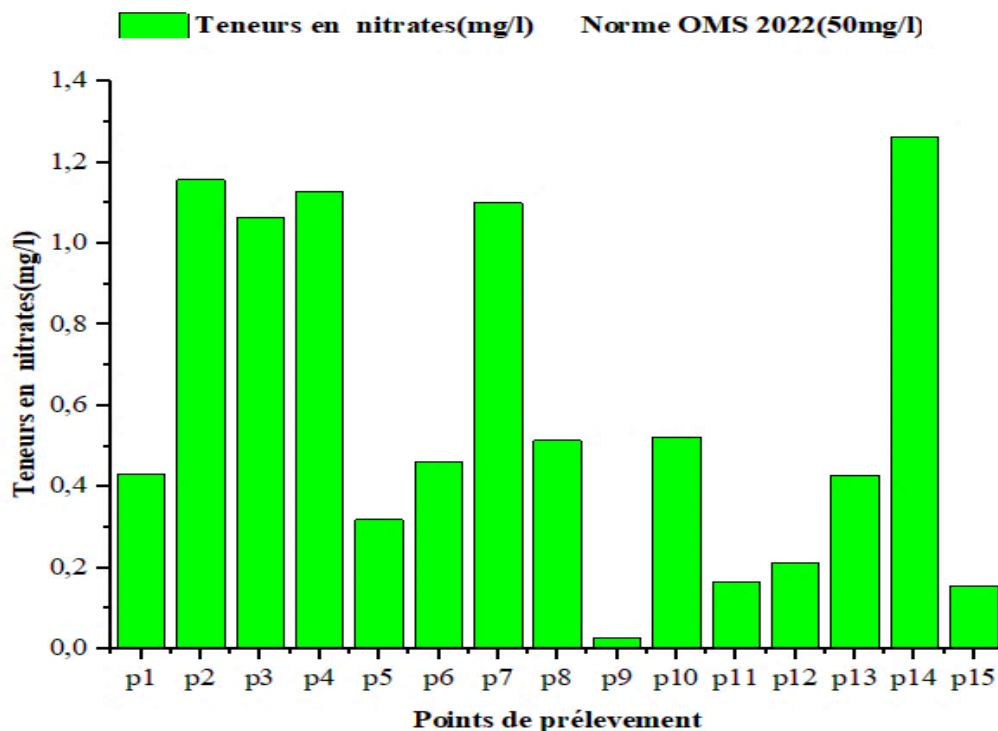


Figure39 : Teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

IV.5.2. Nitrites (NO_2^-)

Il est courant de trouver des nitrites dans l'eau, en particulier à des concentrations faibles. Leur origine est principalement liée à deux processus : une oxydation incomplète de l'ammoniac (NH_3) en nitrates (NO_3^-) ou une réduction des nitrates (NO_3^-) en nitrites (NO_2^-) sous l'action de bactéries dénitrifiantes en conditions anaérobies (**Bremond et Vuichard ; 1973**). Ces composés, bien que naturellement présents, peuvent également provenir de sources

anthropiques, telles que les rejets agricoles ou industriels, et leur présence excessive peut poser des risques pour la santé et l'environnement.

Dans la plaine de Chelghoum El Aid, les teneurs en nitrites ne dépassent pas 0,003 mg/l (Fig.40). Toutes les valeurs mesurées sont bien inférieures à la norme algérienne de potabilité, qui fixe le seuil maximal à 0,2 mg/l. (p3, p9, p10, p11, p12, p13, p14, p15) sont de valeur (0mg/l). Ces résultats indiquent une absence de contamination notable par les nitrites dans les eaux analysées.

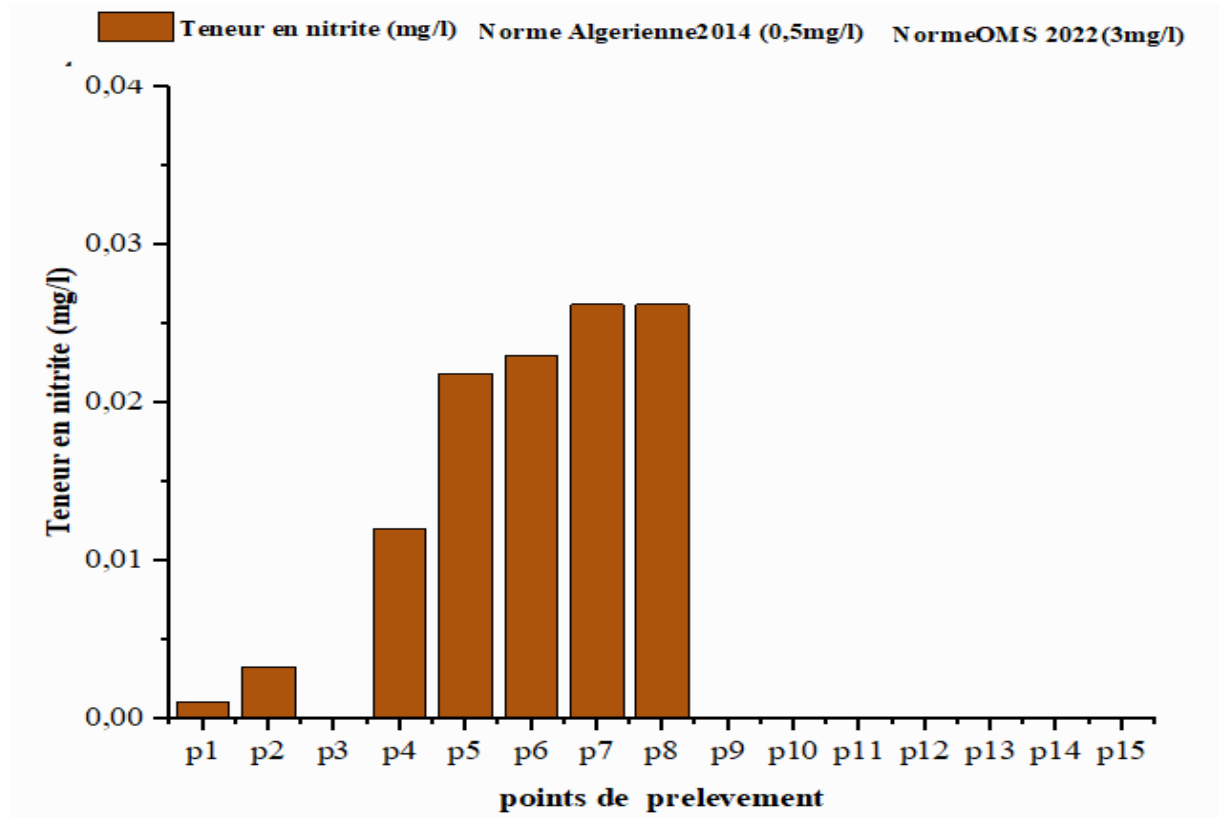


Figure40 : Teneurs en nitrites dans les eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

IV.5.3. Phosphates (PO_4^-)

Deux facteurs déterminent principalement la concentration de phosphates dans les eaux naturelles : La composition chimique des sols traversés et la dégradation de la matière organique. Cependant, des sources anthropiques telles que les rejets industriels, les eaux usées domestiques et le lessivage des engrais phosphatés issus de l'agriculture intensive contribuent significativement à l'augmentation de ces concentrations, pouvant conduire à une contamination des eaux souterraines (**Potelon et Zysman ; 1998**). Ce phénomène affecte les eaux de surface, menace tant la qualité des ressources hydriques que les écosystèmes aquatiques.

Dans les eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid, les teneurs en phosphates sont généralement très faibles, ne dépassant pas 0,005 mg/l (fig.41). Ces concentrations restent bien en dessous de la norme algérienne de potabilité, fixée à 5 mg/l, indiquant une absence de pollution majeure par les phosphates dans la zone d'étude. Ces faibles niveaux peuvent s'expliquer par la faible utilisation d'engrais phosphatés dans la

région, l'absence de rejets industriels significatifs ou une forte rétention des phosphates par les sols.

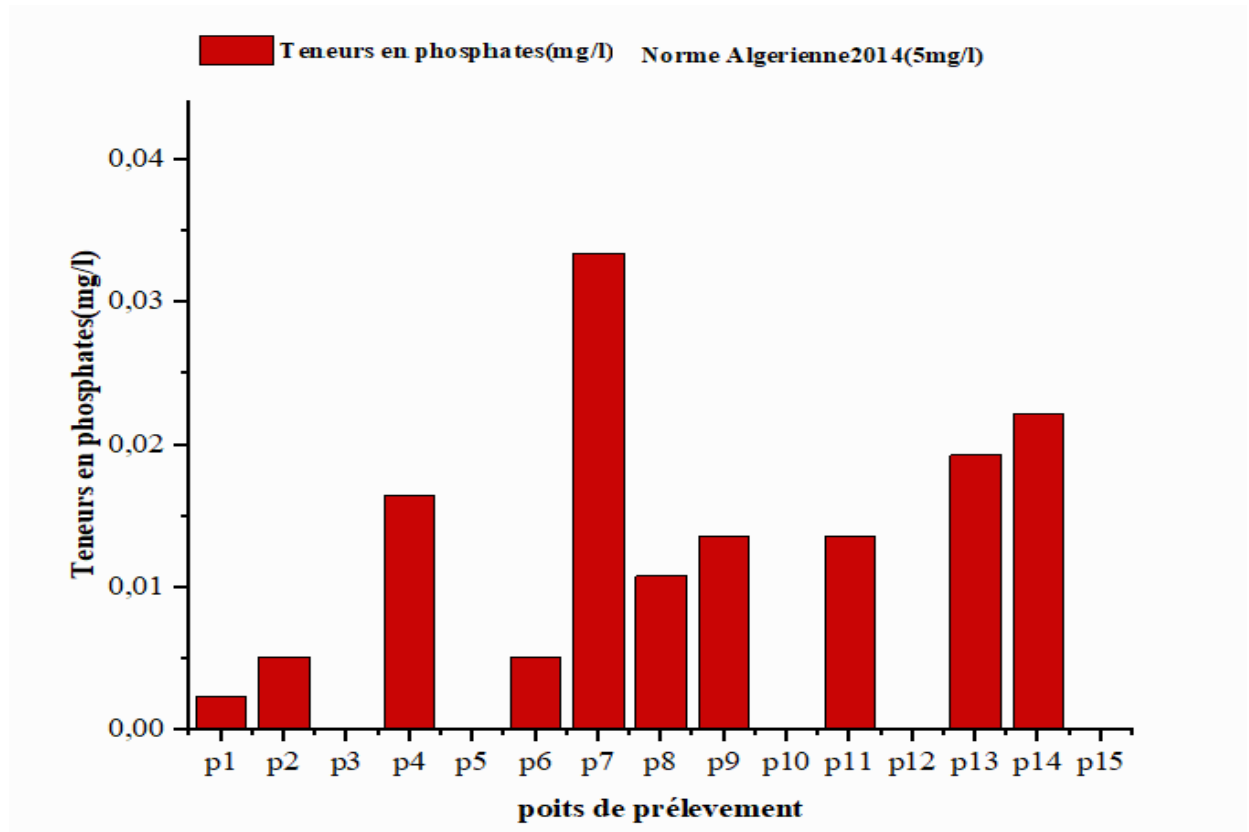


Figure41 : Teneurs en phosphates des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid.

IV.6. Classification des eaux

Les eaux naturelles peuvent être classées selon différentes caractéristiques physico-chimiques. Parmi les classifications les plus utilisées, on retrouve :

IV.6.1. Classification de Piper

Développée par R. N. Piper en 1944, cette méthode est couramment employée en hydrologie, hydrogéologie et géochimie pour caractériser et classer les faciès chimiques des eaux. Elle repose sur l'analyse des concentrations en cations et anions majeurs présents dans l'eau. Le diagramme de Piper, une représentation triangulaire, permet de catégoriser les eaux selon leurs propriétés chimiques dominantes, comme les eaux bicarbonatées, sulfatées ou chlorurées. Ce modèle facilite ainsi l'étude des processus géochimiques affectant la composition des eaux et aide à évaluer leur qualité ainsi que leur potabilité.

La projection des échantillons d'eau sur le diagramme de Piper révèle un faciès chimique principalement chloruré, sulfaté calcique et magnésien. Cette prédominance suggère une influence marquée par des processus géochimiques tels que la dissolution de minéraux évaporitiques (halite, gypse) ou des échanges ioniques avec les formations géologiques de la région. Par ailleurs, la présence simultanée de chlorures et de sulfates pourrait indiquer une contamination anthropique ou une interaction prolongée avec des aquifères profonds.

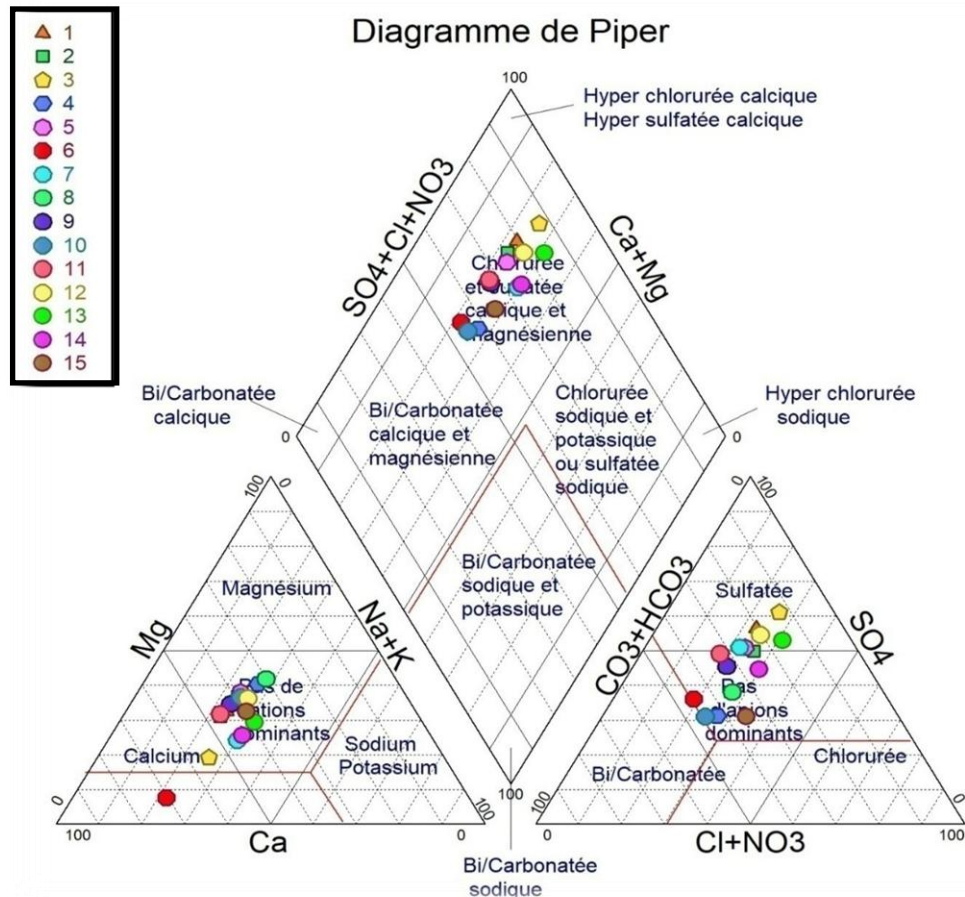


Figure 42 : Classification des eaux étudiées selon le diagramme de Piper.

IV.6.2. Classification de Stabler

Cette méthode est couramment employée pour classer les eaux naturelles en comparant leurs analyses chimiques ou en convertissant les concentrations pondérales des éléments (en mg/L ou ppm) en milliéquivalents par litre (méq/L) (Freeze & Cherry 1979 ; Hem 1985). Ces valeurs sont ensuite exprimées en pourcentages (%) par rapport à la somme des milliéquivalents (méq) totaux des anions et des cations. Cette classification permet de caractériser les eaux en fonction de leur composition ionique dominante, ce qui est utile en hydrochimie et en qualité des eaux (Belkhiri et al. 2010 ; Kumar et al. 2021). Selon Stabler, les eaux peuvent être regroupées en trois types principaux :

- Eaux bicarbonatées (dominance de HCO_3^-)
- Eaux sulfatées (dominance de SO_4^{2-})
- Eaux chlorurées (dominance de Cl^-)

L'application de la méthode de Stabler à la classification des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid révèle une diversité de faciès hydrochimiques (Figure 43 ; Tableau 9), caractérisés par la dominance relative des anions et des cations. Les principaux types identifiés sont :

- **Faciès bicarbonaté** : $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% (\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^{++} \text{K}^+)$: Ce faciès indique une influence des processus d'altération des roches carbonatées.
- **Faciès sulfaté** : $r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^- > r\% (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ $r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^{++} \text{K}^+) > r\% \text{Ca}^{++}$: Ce type suggère une dissolution des minéraux sulfatés (gypse, anhydrite) ou une contamination d'origine anthropique.
- **Faciès chloruré** : $r\% (\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ $r\% (\text{Na}^{++} \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++} > r\% \text{Ca}^{++}$: Ce faciès peut résulter d'intrusions salines ou d'apports anthropiques (eaux usées, engrais).

Tableau9 : Classification des eaux étudiées selon la méthode de Stabler.

E01	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique et magnésienne
E02	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique et magnésienne
E03	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	Sulfaté calcique
E04	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- = r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Bicarbonaté magnésienne
E05	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique et magnésienne
E06	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique
E07	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique
E08	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- = r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté magnésienne
E09	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique
E10	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Bicarbonaté calcique et magnésienne
E11	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique
E12	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique et magnésienne
E13	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique
E14	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Sulfaté calcique
E15	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- = r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{2+}$	Bicarbonaté calcique

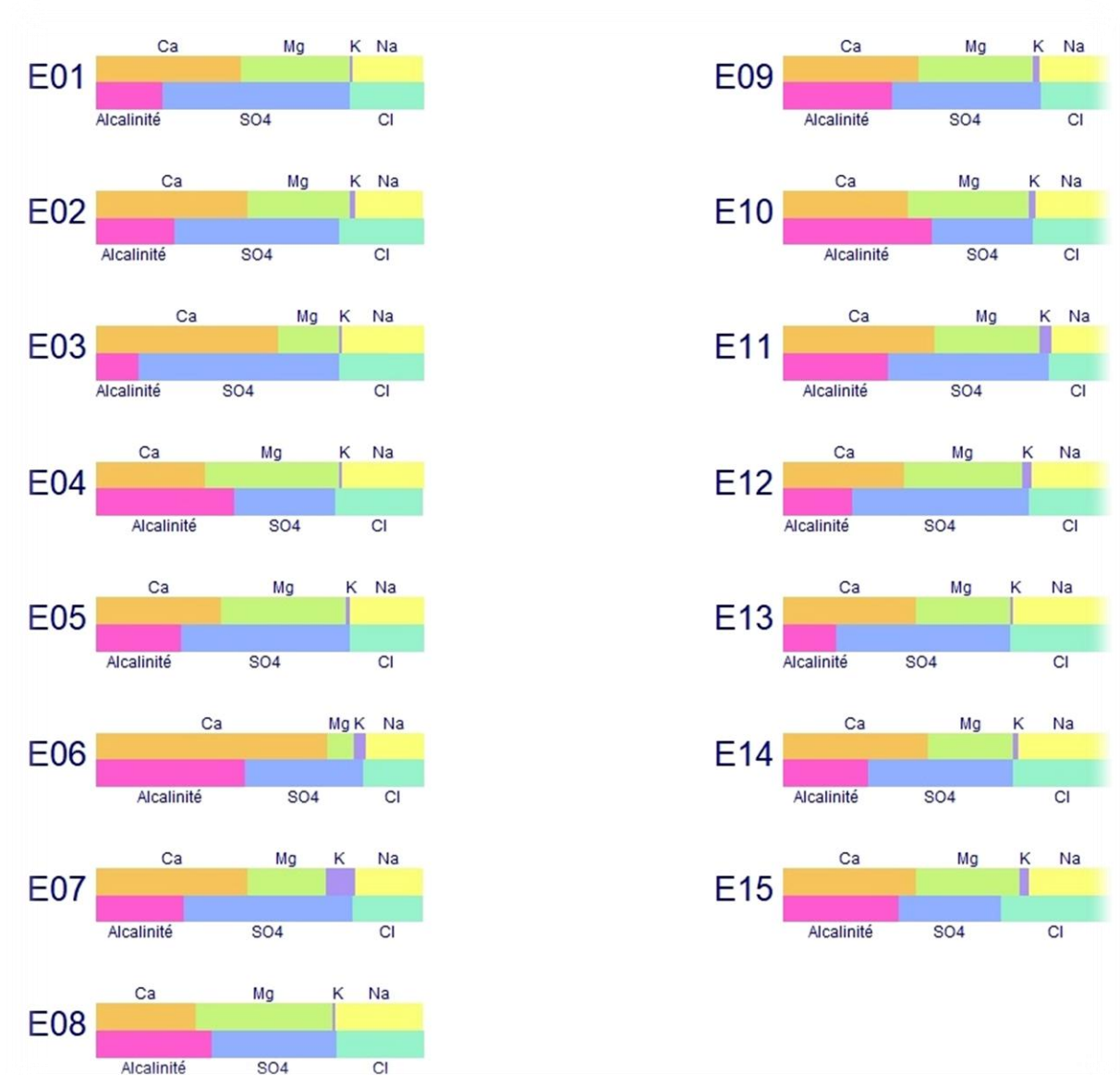


Figure 43 : Classification des eaux étudiées selon la méthode de Stabler.

IV.7. Potabilité des eaux

L'eau pure, à son état naturel, est fréquemment insipide et neutre. Cependant, en traversant différents milieux, elle se charge en éléments minéraux essentiels à notre organisme, mais aussi en sels dissous qui déterminent sa qualité et sa potabilité (**Hem ; 1985 , Appelo et Postma ;2005**). Parfois, elle peut également absorber des substances indésirables, voire toxiques, selon son environnement géologique (**Drever ; 1997**).

Au cours de son parcours à travers les sols et les roches, l'eau subit d'importantes modifications (**Smedley et Kinniburgh ; 2002**), qui ont un impact sur :

- Sa composition chimique, comprend des concentrations des minéraux, des métaux et des composés organiques ;
- Ses propriétés physiques telles que sa couleur et sa turbidité ;
- Ses caractéristiques organoleptiques (goût, odeur).

En 2006, l'OMS a mis en place des normes strictes pour limiter les concentrations maximales admissibles de divers éléments chimiques dans l'eau potable afin de garantir une eau sûre et saine (**WHO 2022 ; Tableau N°10**). Ces références visent à protéger la santé publique tout en tenant compte des variations géologiques naturelles.

Tableau 10 : Normes OMS (2022) et valeurs maximales des paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau analysés.

Substances	Unité	Normes OMS (2022)	Valeurs maximales (paramètres analysés)
pH	-	6,5 – 8,5	7.42-8.21
Conductivité (CE)	µs/cm	< 2500	1933
Température (T)	°C	≤ 15°C (idéal)	17.7
TDS	Mg/L	< 1000	1034
Calcium (Ca ²⁺)	Mg/L	< 200	132
Magnésium (Mg ²⁺)	Mg/L	< 150	67
Sodium (Na ⁺)	Mg/L	< 200	94.3
Potassium (K ⁺)	Mg/L	< 50	53
Chlorures (Cl ⁻)	Mg/L	< 250	145.55
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	Mg/L	< 500	337.25
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	Mg/L	< 500	292
Nitrates (NO ₃ ⁻)	Mg/L	< 50	1.26
Nitrites (NO ₂ ⁻)	Mg/L	< 3	0.02
Phosphates (PO ₄ ³⁻)	Mg/L	< 5	0.03
Dureté	Mg/L	> 180	9

La comparaison des résultats des analyses chimiques des eaux de la plaine avec les normes de l'OMS (2022) (Tableau N°) révèle que toutes les valeurs des paramètres physicochimiques mesurés respectent les limites recommandées. Ce qui confirme que les eaux souterraines analysées sont propres à la consommation et répondent aux critères de potabilité établis par l'Organisation Mondiale de la Santé.

IV.8. L'aptitude des eaux à l'irrigation

La préservation de la qualité du sol et de l'eau est essentielle pour une agriculture durable. Certaines méthodes d'agriculture présentent un danger pour l'environnement, dont les répercussions pourraient toucher tant les zones urbaines que rurales. Pour répondre aux exigences de différentes cultures, l'agriculture a besoin d'une grande quantité d'eau. L'eau utilisée pour l'irrigation doit avoir des propriétés physico-chimiques que les plantes peuvent supporter.

La salinité est l'élément le plus crucial parmi les critères physico-chimiques de l'eau destinée à l'irrigation. Pour évaluer la valeur agricole d'une solution, **Wilcox (1948)** a établi le premier diagramme définissant des classes basées sur la minéralisation totale et le taux de sodium absorbé par l'eau. Par la suite, en 1954, le laboratoire de salinité du département

américain de l'agriculture a proposé un second diagramme (**Richards 1954**), également basé sur la minéralisation totale et le sodium absorbé par le sol (**SAR**).

IV.9. Classification des eaux en fonction du SAR

Lorsqu'un sol contient du sodium (Na) absorbé au-delà de 15 à 25 %, il montre des caractéristiques physiques nuisibles aux plantations en raison de son gonflement et sa non-imperméabilité par défloculation. Le SAR est défini comme une mesure du pouvoir d'échange des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , et Na^{+} dans les argiles et les colloïdes. La formule suivante (**US Salinity Laboratory Staff, 1954**) la donne :

$$\text{S.A.R} = \text{Na}^{+} / \sqrt{((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2)}$$

Les concentrations sont exprimées en (meq/l), Richards a suggéré cinq catégories (05) qui sont illustrées dans le tableau ci-dessous (Tab.11) (**Richards 1954**) :

D'après le graphe de Wilcox (SAR-Conductivité), les eaux de secteur d'étude sont réparties sur la classe **C3S1**. Les eaux de C3S1 sont caractérisées par une forte salinité (conductivité électrique élevée) et une faible alcalinité. Ces eaux présentent un risque moyen de salinisation des sols et un faible risque d'alcalinisation lors de l'irrigation. Elles sont généralement adaptées à l'irrigation de cultures qui tolèrent le sel, à condition que les sols soient bien drainés.

Tableau11 : Classification des eaux d'irrigation selon la méthode de Richards.

Qualités	Degrés	Classes	L'état d'utilisation
Excellente	1 ^{ème}	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
Bonne	2 ^{ème}	<u>C2S1</u> C1S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
Admissible	3 ^{ème}	<u>C3S1</u> C2S3 C3S2	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
Médiocre	4 ^{ème}	C4S1 C4S2 <u>C3S3</u>	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérant aux sels sur sol et bien drainés.
Mauvaise	5 ^{ème}	C3S4 C4S3 <u>C4S4</u>	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

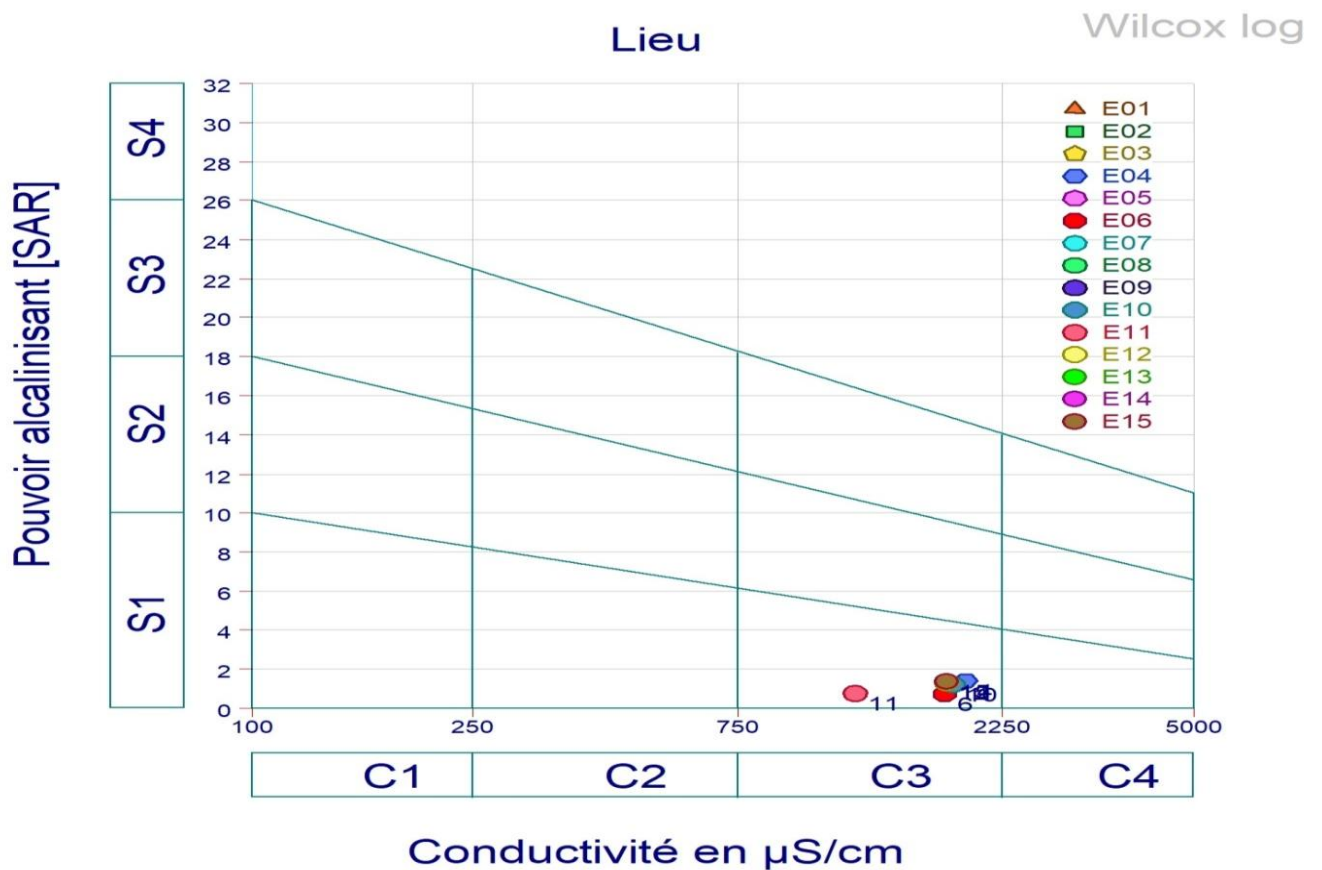


Figure44 : Classification des eaux d'irrigation d'après WILCOX.

IV.10. Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région permis de déduire les résultats suivants :

- Les eaux des puits se caractérisent par une minéralisation moyenne.
- L'analyse des divers éléments chimiques des eaux révèle que la composition chimique des eaux de la région est liée à la nature lithologique du système aquifère, c'est-à-dire à l'effet de la géologie.
- D'après la classification PIPER, les eaux sont caractérisées par un faciès chloruré, sulfaté calcique et magnésien. Cette prédominance suggère que la minéralisation des eaux est contrôlée par des processus géochimiques tels que la dissolution des formations évaporitiques (halite, gypse) et/ou d'apports anthropiques (eaux usées, engrais).
- La comparaison des analyses chimiques des eaux de la plaine avec les normes OMS (2022) montre que tous les paramètres physico-chimiques mesurés respectent les seuils

recommandés. Les résultats confirment que les eaux souterraines respectent les normes de potabilité de l'OMS et sont appropriées pour la consommation humaine.

- Le graphe SAR-conductivité indique que les eaux étudiées appartiennent à la classe C3S1, caractérisée par une forte salinité et faible alcalinité. Généralement, Ces eaux présentent un risque modéré de salinisation et un faible risque d'alcalinisation des sols. Elles peuvent être utilisées pour l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sous réserve d'un drainage adéquat.

Conclusions et Recommandations

Conclusions et recommandations :

La disponibilité de l'eau est essentielle pour assurer la survie véritable et durable ainsi que le progrès social et économique de toute nation, en particulier dans les pays en développement. Les eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable et sont moins sensibles à la contamination que les eaux de surface.

D'après l'analyse géologique, les formations géologiques de la plaine de Chelghoum Laid sont susceptibles de contenir des aquifères, c'est-à-dire des couches de roche perméable capable de stocker et de transmettre de l'eau souterraine. Les formations du recouvrement d'âge Mio-Plio-Quaternaire, comprenant des calcaires, des sables, des grès, des graviers, des conglomérats et des alluvions, peuvent constituer des aquifères importants en raison de leur perméabilité. Ces différentes formations géologiques de la plaine peuvent donc jouer un rôle important dans le stockage et la circulation de l'eau souterraine, et sont donc d'un intérêt géologique et hydrologique significatif.

L'analyse des paramètres climatiques révèle que la région étudiée présente un climat semi-aride, caractérisé par une température moyenne annuelle de 16°C et des précipitations moyennes annuelles de 530mm. Ce type de climat engendre des enjeux spécifiques pour la gestion des ressources en eau. En effet, les périodes chaudes et sèches accentuent la demande hydrique, tandis que les saisons froides et pluvieuses peuvent favoriser des risques d'inondation.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum El Aid (W-Mila). Les principaux résultats obtenus dans cette étude sont les suivants :

1. Minéralisation et origine géochimique :

- ❖ Les eaux des puits présentent une minéralisation moyenne, directement influencée par la lithologie du système aquifère.
- ❖ Le faciès hydrochimique dominant (chloruré, sulfaté calcique et magnésien), identifié par le diagramme de Piper, révèle :
 - Une dissolution des formations évaporitiques (halite, gypse)
 - Une possible contribution anthropique (eaux usées, engrais agricoles).

2. Potabilité des eaux : Les normes de potabilité de l'OMS (2022) confirment que tous les paramètres physico-chimiques sont adaptés à la consommation humaine.

3. Aptitude à l'irrigation : Le diagramme SAR-conductivité indique la classification des eaux en C3S1 :

- ❖ Salinité moyenne à élevée (risque modéré de salinisation des sols)
- ❖ Faible alcalinité (risque négligeable de sodisation)

Pour protéger les ressources en eau et prévenir la détérioration de la qualité des eaux souterraines dans la région, il est nécessaire d'élaborer une stratégie globale et d'adopter une gestion intégrée pour surveiller l'état et la quantité d'eau à travers :

- (1) Essayer d'élaborer des lois et règlements qui empêchent le forage illégal de puits qui conduisent à une surexploitation supplémentaire des ressources en eau souterraine ;
- (2) Surveillance continue de l'état des puits pour les maintenir et les protéger contre l'assèchement, les dommages ou la contamination ;
- (3) Construction de stations de traitement d'eau qui amélioreront la qualité de l'eau potable.
- (4) Éduquer le public sur la gestion durable des eaux souterraines pour mieux gérer les eaux souterraines surexploitées et souligner l'importance des eaux souterraines,
- (5) Recommandations agricoles : utilisation possible pour des cultures tolérantes au sel (ex : orge), sous réserve des conditions suivantes :
 - Mise en place d'un système de drainage efficace afin de prévenir l'accumulation des sels dans la zone racinaire.
 - Suivi régulier de la conductivité électrique (CE) des sols pour contrôler les risques de salinisation.

Références bibliographie



A

Afri Mehannaoui, (1998). Contribution à l'étude physico-chimique et biologique de l'oued Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents. Mémoire de magistère en Ecologie. Université Mentouri, Constantine. P 238.

Allia Zineb and Lalaoui Meriem (2024). Formation mechanism of hydrochemical and quality evaluation of shallow groundwater in the Upper Kebir sub-basin, Northeast Algeria. *Journal of Groundwater Science and Engineering* V olume12Numéro1Pages78-91.

Alloway, B. J., et Ayres, D. C. (1997). *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic & Professional.

Andriamiradis L., (2005). Mémento technique de l'eau. 2eme édition: Degremont, p. 8.

APHA (American Public Health Association). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Edition. Washington, DC.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). CRC Press/Balkema.

Appelo, C. A. J., et Postma, D. (1996). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2^e éd.). A.A. Balkema Publishers.

Ayed W.(2016). Thèse de doctorat : Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines : cas des puits de la région d'El-Harrouche (Skikda), p156.

B

Barbier et Barbier,V.(2011). Nitrates et pesticides dans l'eau destinée à la consommation humaine. L'O.R.E. (Observation régionale de l'environnement). Les dossiers de l'environnement en Poitou-Charentes 25p.

Baud, J. (2006). *Pollutions industrielles et nuisances: Évaluation et gestion des risques*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Baurant, (1971). L'eau : Milieu vivant. Chaire de Zoölogie appliquée.Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux. P5.

Baziz N, (2008). Étude sur la qualité de l'eau potable et risque potentiels sur la sante cas de la ville de Batna. Mémoire magister. Université colonel ELHADJ LAKHDAR BATNA, P154.

Bchitou, R.,(2001). Le suivi des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du moyen Sebou : Elaboration d'un plan d'expérience afin d'éliminer le chrome. Thèse de doctorat d'Etat, Faculté des Sciences Université Mohammed V-Agdal Rabat.

Belkhir, L. et al. (2010): "A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data", *International Journal of Environmental Research* 4(4), 541-550.

Références bibliographiques

- Benlabed,(2018).** Carte pluviométrique d'Algérie du Nord ANRH 1993.
- Bensaoula F., Adjim M. Et Bensalah M. (2007).** L'importance Des Eaux Karstiques Dans L'approvisionnement En Eau De La Population De Tlemcen. Larhyss Journal, N° 06, Pp. 57-64.
- Bliefert, Claus., Perraud, Robert., (2008).** Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. p : 271,290, 291.
- Blinda M., et Thivet G. (2009).** Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives, Vol 20 N°1,p 9-16.
- Boeglin Jean-Claude,(1998)** Propriétés des eaux naturelles, Technique de ingénieur, traité environnement, p110.
- Boeglin, J.C (2006)** Contrôle Des Eaux Douces Et De Consommation Humaine. Dans: Techniques De L'ingénieur W1: Technologie Des Eaux. Techniques De L'ingénieur. Chap.P4 210, Pp : 1-24.
- Boglin Jean-claude, (2001).** Propriétés des eaux naturelles. Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1 110.
- Boglin Jean-claude, (2001).** Propriétés des eaux naturelles. Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1 110.
- Bohy, M.,(2003).** Caractérisation de sources de pollution composées d'un mélange de solvants chlores en aquifère alluvial, Expérimentations en laboratoire et sur site contrôlé associées à la simulation numérique. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Botkin, D. B., et Keller, E. A. (2011).** *Environmental Science: Earth as a Living Planet*. John Wiley & Sons.
- Bouafia H.,(2015).** Hydrodynamique souterraine et transfert des réservoirs profonds (couplage architecture stratigraphique vulnérabilité et risque de pollution) dans la région de Khenchela. Mémoire de magister, Université d'Annaba, 133p.
- Bouziani M. (2000).** L'eau de la pénurie aux maladies, Edition ibn khaldoun, p247.
- Brasilia, (2013).** Manuel pratique d'analyse de l'eau. 4ème édition. 54, 57, 63 p.
- Bremond R et Vuichard R.,(1973).** Les paramètres de la qualité de l'eau. Ed La documentation française. Paris, p.173-179.
- BRGM, (2007).** Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006 : Résultats et interprétation. Brimblecombe. , mary Ann, Cunningham. , William P,Cunningham. , William, Freedman, 1:131-134.

C

Catherine, N., Dupont, J., et Morel, L. (2009). *Gestion durable des ressources en eau*. Presses Universitaires de Lyon.

CE. (2011). Commission Européenne. L'eau, une ressource pour la vie, Comment la directive-cadre sur l'eau contribue à protéger les ressources de l'Europe Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne p 25.

Chapman, D. (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2nd Edition, UNESCO, WHO, UNEP.

CIFFQE. (2011). Conseil interministériel fédéral de formation sur la qualité de l'eau Qualité de l'eau 101: introduction aux microsystemes d'approvisionnement en eau potable Manuel version 1.1.

Clark, I. D. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes* (1st ed.).

Conway, D., & Schipper, E. L. F. (2011). *Adaptation to Climate Change in Africa Challenges and Opportunities Identified from Ethiopia*.

Cruyter K (1993). La qualité de l'eau à la sortie du robinet: Revue de tribune de l'eau. Éditions Cebedoc.p.75.

D

Daniel, T.C., Edward, D.R., Gilmour, J.T., Moore, P.D., Shereve, B.R., and Wood, B.H., (1998). Decreasing Metal Runoff from Poultry Litter with Aluminium Sulfate. *J. Env. Qual*, 27, 92-99.

Dassamior, A. (2022). *Gestion intégrée des ressources en eau au Sahel*. Institut de l'Eau et de l'Environnement.

De Villers J, Squilbin M, yourassowsky C., (2005). *Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface*. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement.Ramade, 2000).

Debieche T.,(2002).Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : application à la basse plaine de la sybousse Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat en science, Université de Franche-Comté. UFR des sciences et techniques, 235p.

Defranceschi M .,(1996). L'eau dans tous ses états. Edition: Ellipses, p.61.

Degrémont ,(1991).Water Treatment Hand book.

Degremont G. (2005). *Mémento technique de l'eau*, Tome 1, 10ème édition, Edit. Tec et doc, p3- 38.

Dinnat, E.P., (2003). La détermination de la salinité de surface des océans à partir de mesures radiométriques hyperfréquences en bande L. Thèse de Doctorat. Université Paris VI.

Références bibliographiques

Djabri. L (1996). Mécanismes de la pollution vulnérabilité des eaux de la Seybouse, origine géologiques, industrielles, agricoles et urbaines, Thèse de doctorat d'état, université d'Annaba, Algérie, p102.

Drever, J. I. (1997). The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments (3rd ed.). Prentice Hall.

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.

Durozoy G. (1960). Coupe géologique à travers la plaine de chelghoum laid : Schéma structural du sous bassin haut Rhumel : Etude géologique de la région de Châteaudun du Rhumel.

Dussart B., (1966). Etude des eaux continentales. Gauthier- Villars, Ed., Paris.

Duvignaud P, (1980). La Synthèse Ecologique, 2èmeédition, Doin Editeurs, Paris. 380 P.

E

El-yamani, 2006). **El Yamani M. (2006).** Qualité des eaux : environnement et milieux. Edition Afsset. Paris.

F

FAO (2000). Fertilizers and their use. Food and Agriculture. Organization of the United Nations.

FAO (2004). *Use of phosphate fertilizers and environmental impacts.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fiambsch, B, (1998). Change from chlorine résidual distribution to no chlorine residual distribution in groundwater system. Water supply. Vol 6 N°3/4. Germany, p.145-152.

Freeze, R. A., et Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall.

G

Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., et Cosby, B. J. (2004). The nitrogen cascade. *BioScience*, 54(4), 341–356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)

Gaujous D., (1995). La pollution des milieux aquatiques : Aide mémoire. 2eme édition : Lavoisier, p. 49.

Gauthier Villars, (1982) .Précis d'écologie, 4ème édition, p525.

Geldreich, E. (1996). Microbial Quality of Water Supply in Distribution Systems. CRC Press.

Références bibliographiques

Gény P., Waechter P. Et Yatchinovsky A. (1992). Environnement Et Développement Rural: Guide De La Gestion Des Ressources Naturelles, Editions Frison-Roche (Ministère De La Coopération Et Du Développement, Agence De Coopération Culturelle Et Technique). 418 P.

Ghanimi, L. (2014). *Le cycle du phosphore dans les sols et les eaux : impacts et gestion durable*. Université de Tunis, Thèse de doctorat.

Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020) – *Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 48, 431-463.

Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*. Oxford University Press.

Graindorge, J., (2015). Guide des analyses de la qualité de l'eau. Ed. Territorial éditions, paris. 126. 142. 147.162. 165. 183 p.

Graini-L, (2011). Contrôle de la pollution de l'eau par méthode acousto-optique. Mémoire Magister Option : Optique appliquée. UNIVERSITE FERHAT ABBASSETIF. P 2.

Guergazi, S., Achour, S., (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration, Larhyss Journal, 4, 119- 127.

H

Hammadi D et Harendi H., (2015). Gestion intégrée des ressources en eaux dans le bassin versant de l'oued El Nil (Jijel- Nord-est Algérien). Mémoire de master, Université de Jijel, 95p.

HAMOUD, (2018) . Situation géographique de la zone d'étude.

HCEFLCD., (2007) . Etude diagnostique de la zone humide AL Massira-Faija, cercle d'EL Brouj et Cercle de Settati (Maroc), 242p.

Hem, J. D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.

HERAOU A. (2011). Mémoire Pour l'Obtention du diplôme de Magister évolution des politiques de l'habitat en Algérie le l.s.p comme solution à la crise chronique du logement cas d'étude la ville de Chelghoum El Aid p64.

Hill, M. K. (2010). *Understanding Environmental Pollution*. Cambridge University Press.

Hiscock, K. M., et Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology: Principles and practice* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Hounslow, A. W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press (Lewis Publishers), Boca Raton.

I

Idrissi, L.,(2006).étude et développement de nouvelles méthodes électrochimiques pour la détermination des ions orthophosphate, nitrite, nitrate et ammonium. Thèse de doctorat d'état. Université Mohammed v – agdal.146p.

ISO « International Organization for Standardization » (1989).Qualité de l'eau -Dosage des chlorures- Titrage au nitrate d'argent avec du chromate comme indicateur (Méthode de Mohr).

ISO « Organisation internationale de normalisation » (1984) : Qualité de l'eau – Dosage du calcium – Méthode titrimétrique à l'EDTA.5p.

J

Jeanluc celleric., (2002). La dégradation de la qualité de l'eau dans le réseau. Edition. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Direction de l'espace rural et de la forêt. Paris.p.102.

JORA (2014). Journal officiel de la république algérienne-JORA. 2014. Décret exécutif n° 14 - 96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

K

Kabata-Pendias, A., et Pendias, H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press.

Kaid Rassou, K., (2009). Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Semlalia - Marrakech.

Karaouet, L., et Bourafa, D. (2016). Hydrogeological study of the groundwater resources in northeastern Algeria. Journal of Water Resources, 12(3), 45–60.

Kaushal, S. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. Frontiers in Ecology and the Environment, 8(9), 461-466.

Kettab A., Mitiche R.,et Bennaçar N (2008). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, Vol 21 N°2, p 247–256.

Khedidja, A and Boudoukha A (2016): Caractérisation statistique et hydrochimique de l'aquifère superficiel de tadjnanet-chelghoum laid (Nord-Est algérien). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°28, Dec 2016, pp. 181-197.

Khoubache I,et Laouar N. (2006), Etude de la pollution organique des eaux de l'Oued Kebir (W.Jijel). Diplôme d'ingénieur d'état. Univ de Jijel. Fac des Sciences. Pp 61.

Kumar, M. et al. (2021) "Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes using hydrochemical studies in Nalbari district, Assam, India", Environmental Earth Sciences 80(3).

Références bibliographiques

L

Langmuir, D. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall.

Lanteigne J., (2003). Encyclopédie de l'agora.

Later L et Terki T., (1998). Contribution à l'étude hydrogéologique et modélisation de la plaine de l'oued Djendjen (wilaya de Jijel). Mémoire d'ingénieur, Université de Constantine, 176 p.

Lazhar G., (2011). Contrôle de la pollution de l'eau par méthode acousto-optique. Mémoire de magister : Université FERHAT ABBAS-SETIF, 106 p.

Leclerc, H., Schwartzbrod, L., & Dei-Cas, E. (2002). Microbial agents associated with waterborne diseases. Critical Reviews in Microbiology, 28(4), 371-409.

Leynaud G(1968). Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique B.T.I. Ministère de l'agriculture.

M

Margat, J. et Andréassian, V., (2021) *L'eau*. 3^e éd. Paris: Presses Universitaires de France, coll. "Que sais-je ?", n° 4193, 128 p.

Marsily, G. (1995). *Les eaux souterraines*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Mcgraw-Hill, (1999). McGraw-Hill., 1999. Hand book of environmental engineering calculations.

Mebarki A. (1982). , Le bassin du Kebir Rhumel, Ressources en eaux et aménagement en Algérie, Thèse doctorat 3ème cycle, Université de Nancy II, 303p.

Mebarki. (A. 2005) Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, Département de l'aménagement du territoire, 360 p.

Meddi, M., Assani, A. A., & Meddi, H. (2020). Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water*, 12(5), 1473.

Mekaoui A et Bennour S., (2016). Bassin versant de la moyenne Seybouse pollution des eaux de surface approche qualitative et cartographique. Mémoire de master, Université de Guelma, 157p.

Mens et Derouane., (2000). État des nappes de l'eau souterraine de Wallonie.

Références bibliographiques

Merouani S. et Bouguedah A., (2013). Etude de la pollution chimique et la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla. Mémoire master : Université Kasdi Merbah Ouargla, 59 p.

Metahri, (2012). Metahri s., (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par les procédés mixtes : cas de la STEP EST de la wilaya de Tizizou, thèse de doctorat : département d'agronomie. Université Mouloud MAMMERI de Tizi ousou, Algérie, 148 p.

Mihoubi .N, (2007). Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du bassin de Hammam Grouz. Mémoire de Magistère. Université des frères Mentouri, Constantine.

Mihoubi. N. (2009). Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du bassin de Hammam Grouz. Mémoire de Magistère. Université des frères Mentouri, Constantine.

Milgrom, P; Roberts, J; Ruffix ,B.(2003). Economie, organisation et management. Edition : De Boeck université Belgique ; 387p.

Morin G., Cluis D., Couillard D., Jones H et Gauthier J.,(1983). Modélisation de la température de l'eau à l'aide du modèle quantité-qualité CEQUEAU ; Québec.

Musy, A. et Higy,C. (2004). Hydrologie: une science de la nature (1ère éd). Presse polytechniques et universitaires romandes. Amazon, France.

N

Nouayti N, Khattach D, Hilali M.,(2015) . Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). J. Mater. Environ. Sci. 6 (4), pp1068-1081.

O

Office National des Statistiques Algérie. (ONS-2022). Annuaire statistique de l'Algérie 2021. (Données officielles sur la population et les secteurs économiques.).

Oke, T. R. (1982). *The energetic basis of the urban heat island.* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1-24.

OMS (1994). Directives de qualité pour l'eau de boisson ; volume 1, recommandations, Organisation mondiale de la Santé, 2ème édition, p202.

OMS (2017). Organisation mondiale de la Santé. (2017). *Directives de qualité pour l'eau de boisson : quatrième édition, incorporant le premier addendum.* Organisation mondiale de la Santé.

Références bibliographiques

OMS,(2009). The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2009. World Heath Organisation .

OMS,(2017). Organisation Mondiale de la Santé .*Guidelines for Drinking-Water Quality.* 4^e édition. Genève : OMS. <https://www.who.int>.

OMS., (2008). Directives de Qualité pour l'Eau de Boisson. 2eme Edition, Volume 2, critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 1150 p.

Organisation mondiale de la Santé. (2006). *Directives de qualité pour l'eau de boisson : recommandations* (3e éd., Vol. 1). Organisation mondiale de la Santé.

Ouahdi A., (1995). Les maladies à transmission hydrique. Santé plus Alger N°45.

P

Potelon, J. L., et Zysman, K. (1998). *Le guide des analyses de l'eau potable* (Rapport). La Lettre du Cadre Territorial.

R

Rabiet, M., (2006). Contamination de la ressource en eau par les eaux usées dans un bassin versant méditerranéen apport des éléments majeurs, traces et terres rares. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.

Ramade F., (1998). Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Ed iscience internationale, Paris, p. 786.

Ramade F., (2000). Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Edi science internationale, Paris, p.1075.

Ramade F.,(2002).Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement.Paris.p.569.

Raymond, (1997). Le traitement des eaux, presses inter polytechnique.

Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (Vol. 60). U.S. Department of Agriculture.

Rodier J. (1997). L'analyse De L'eau (Eaux Naturelles ,Eaux Résiduaire Et Eaux De Mer), 8^{ème} Edition ,Dunod, Paris. p66.

Rodier J., (2009). Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaire. Eau de mer.9^{ème} édition. Ed. Dunod bordas, Paris , p.1526.

Rodier, J. (1996). Analyse De L'eau (Eau Naturelles, Eaux Résiduaire, Eau De Mer), 8^{ème}Edition, paris. 1260 -1335 p.

Rodier, J. (2016). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaire, eau de mer.* Dunod.

Rodier, J., (1984). L'analyse de l'eau. Dunod, Paris, France, 1365p.

Références bibliographiques

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, physicochimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris, 1384 p.

Rodier, J., Legude, B., Merlet, N., et coll, (2009). L'analyse de l'eau. 9th Edition. Dunod.1579 p.

Rousseau, N., Roy, N., Cantin, P., et Cardinal, P.,(2004). Etude de la qualité de l'eau potable dans sept bassin versant et impact potentiels que la santé. Méthodologie. MENV, MESS, MAPAQ, ISBN 2-550- 43507, Envrodoq ENV/2004/0311, 35p.

Roux J. C. (1990). Les Secrets De La Terre : L'eau Source De Vie. Eéditions De Brgm, Orléans Et La Compagnie Du Lierne, Paris. 64 P.

S

Saidi S., (2014). La qualité des eaux du sous bassin versant de l'oued aissi. Mémoire ingénieure. Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 169 p.

Sarkar, S.K., Saha, M., Takada, H., Bhattacharya, A., Mishra, P., and Bhattacharya, B., 2007. Water quality management in the lower stretch of the river Ganges, east coast of India: **Castany G., (1982).** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition: Dunod.p.58.

Shinn, E. A. (1941). *Groundwater movement in limestone formations.* Journal of Hydrology, page, 123–135.

Smedley, P. L., et Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters.

Strickland, J. D. H., et Parsons, T. R. (1972). Determination of reactive nitrate. A practical handbook of seawater analysis (pp. 71–80). Ottawa: Fisheries Board of Canada.

T

Thiollet Scholts, M., (2004). Construction d'un indicateur de qualité des eaux de surface vis-à-vis des produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant viticole. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., & Schindler, D. (2001). *Forecasting agriculturally driven global environmental change.* Science, 292(5515), 281-284.

Touchart L, (2003). Hydrologie : Mers, Fleuves Et Lacs. Armand Colin. Vuef. 190 P.

U

U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (L. A. Richards, Ed.; Agriculture Handbook No. 60). U.S. Department of Agriculture.

Références bibliographiques

UNESCO (2022) – *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible.*

UNICEF.,(1999). Manuel sur l'eau. N°2 , p. 42-43.

UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation.*

V

Valentin N.,(2000). Gestion des eaux : Alimentation en eau assainissement. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, p. 137.

VASCO R., (2017).Nos ressources sont limitées, évitons de les gaspiller. Thème Cutline de Chris Peason.

Vilaginés ,R . (2003) .Eau, Environnement et santé publique .ED . Lavoisier2ème edi Paris .198p .

Vilaginés, (2000). Eau Environnement et santé publique : Introduction à l'hydrologie. 2ème édition. P 218.

Villa J.M. (1980) Extrait de Sétif 1/200000.

W

Wakida, F. T., et Lerner, D. N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: A review and case study. *Water Research*, 39(1), 3–16.

Wilcox, L.V. (1948). *La qualité de l'eau pour l'irrigation* (Bulletin technique n° 962). Département de l'Agriculture des États-Unis.

World Health Organization (2011). Guidelines for drinking-water quality, Third edition incorporating the first and second addenda, volume 1,668 p.

World Health Organization. (2006). *Guidelines for drinking-water quality*

World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda.*