

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

Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda

المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي بسكيكدة

Département des Sciences Naturelles

قسم العلوم الطبيعية



Mémoire de fin d'étude
مذكرة التخرج

Thème :
الموضوع :

تقييم وتحليل جودة المياه في سد قنيطرة ومحيطه (أم الطوب، سكيكدة):
الواقع والتحديات المستقبلية

En vue de l'obtention du diplôme de : Professeur d'Enseignement Secondaire

لنيل شهادة : أستاذ التعليم الثانوي

من إنجاز الطالبين:

بونويولطفي & درويش تسنيم

أعضاء لجنة المناقشة :

د. قاسم حبيبة	رئيسا	أستاذ محاضر-أ- بالمدرسة العليا للأساتذة (ENSET) سكيكدة
د. خلفاوي فيصل	مشرفا	أستاذ محاضر-أ- بالمدرسة العليا للأساتذة (ENSET) سكيكدة
د. كحال أمينة	مناقشا	أستاذ محاضر-ب- بالمدرسة العليا للأساتذة (ENSET) سكيكدة

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

The image displays the Basmala in a highly stylized, cursive Arabic calligraphic font. The text is written in black ink on a white background. Each letter is intricately connected to the next, forming a dense, flowing script. Small, black arrows and numbers (1 through 5) are placed around the letters to indicate the correct stroke order and direction for writing. The calligraphy is centered on the page, with a thin blue horizontal line above and below it.

شكر وتقدير

الحمد لله أولاً وآخراً، ظاهراً وباطناً، خالق العلم ومُعلم الإنسان ما لم يعلم، له الفضل والمنّة أن وفّقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، بعد مسيرة ملؤها السعي والمثابرة والتحدي.

لا يسعنا في هذا المقام إلا أن نتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان لمشرفنا الفاضل الدكتور خلفاوي فيصل، الذي لم يبخل علينا بعلمه، ولا بتوجيهه، فكان رفيقاً في الدرب، وموجهاً في كل مرحلة من مراحل هذا البحث. إن كلماته المشجعة وملاحظاته الدقيقة كان لها الأثر البالغ في تجويد هذا العمل وبلوغه صورته النهائية.

كما نخص بالشكر والتقدير عضوي لجنة المناقشة، الدكتورة كحال آمنة والدكتورة قاسم حبيبة، على كريم تفضلهما بقراءة هذا العمل المتواضع، وعلى ما قدّمته من توجيهات علمية دقيقة وملاحظات بناءة أسهمت في تطويره وتنقيحه.

ولا ننسى أن نتوجه بخالص الامتنان إلى أساتذتنا الأفاضل في قسم علوم الطبيعة بالمدرسة العليا للأساتذة للتعليم التكنولوجي - سكيكدة، وإلى زملائنا في دفعة 2020.

وإن فاتنا ذكر أحد ممن كان له الفضل أو الأثر، فليعذرنا، وله منا الشكر الخالص.

وجزى الله الجميع خير الجزاء..

بونويو لطفي ودرويش تسنيم

الإهداء

الحمد لله الذي بنوره نُهتدي، وبحكمته نرتقي، وبفضله نبليج المرام، ونمضي على درب الأحلام بثبات و يقين.
الحمد لله حمداً يليق بجلاله، حمداً لا ينقطع مداه، ولا يغيض عطاؤه، له الحمد حتى يرضى، وله الحمد إذا
رضي، وله الحمد بعد الرضا، في كل حينٍ وحال.

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع، أولاً، وقبل كل أحد، إلى من كانا لي وطنًا وملاذًا وسكينةً، إلى من غرسا في
داخلي بذور الطموح، وسقياها بصبرٍ وأملٍ لا يُقاس، وسهرا على أن أبلغ يومًا ما ظننته مستحيلًا:

إلى من كانا لي وطنًا، دعاءً في الخفاء، وسندًا في العلن.. إلى أبي العزيز، يا من كنت الجدار الذي استندت
عليه حين مالت الدنيا، والنبع الذي لا ينضب من الحكمة والرضا لك من القلب ألف شكرٍ، ومن الروح دعاءً
لا يخبو..

وإلى أمي الغالية، يا نبضًا سكن بين أضلعي، يا دعاءً يمشي أمامي، يا من جعلت من قلبها متسعًا لكل
ضعفي، ومن دعائها وقودًا لكل نجاح، يا حبًا لا تشبهه محبة يا من علمتني أن الحنان قوة، وأن الصبر نصر،
وأن الدعاء يختصر المسافات بين الحلم والواقع. أنتِ سر النجاح وروحه، وملاك الرحمة في دربي، فلك كل
الامتنان الذي تعجز عنه الكلمات...

لكما كل فصول هذا الإنجاز، فأنتم بدايته، وأنتم مجده وتمامه.

إلى أختي الحبيبة، والفؤاد الأنيس، زهرة القلب ورفيقة الروح، البلسم في أوقات التعب، والنور الذي يبدد
العتمة، والحنان حين يغيب العالم... لك في القلب مقام لا يزول، وذكري لا تبتهت، ولك من روحي كل
عرفانٍ ومحبة..

وإلى الرفاق، وزينة الأيام: "فراس"، "حسام"، "سيف الدين"، "رائد"، "رامي"، "عبد الكريم"، "أكرم"،
"أسامة"، "شهاب"، "رفيق"، "أيمن"، "أحمد"، "يحيى"، "وسيم"، "إسماعيل" .. لكم ألف تحية ..
وإلى كل من عبر حياتي وكان فيها بذرة خير ...

وإلى أساتذتي الكرام، ومشرفي الأفاضل ..

وأخص بالذكر الأستاذ "خلفاوي فيصل" والأستاذ "بلبكاوي جمال" والاستاذة "برماد زهية" أهديكم هذا
العمل المتواضع، تقديرًا لما بذلتموه من جهد، وما منحنتمونا من علم وتوجيه. كنتم مشاعل نور في طريق المعرفة،
وعونًا صادقًا في كل مرحلة. لكم خالص الشكر، ووافر التقدير، وجزءًا أصيل من هذا الإنجاز.

وإلى نفسي ..

إليك يا أنا، يا من عبرت طريقًا مليئًا بالأسئلة، بالتعب، بالليالي الطويلة، بالتحديات التي تَرَبَّصت في كل
زاوية .. إليّ أنا ... إلى من آمن بالحلم منذ البدايات، وسعى إليه بخطى ثابتة ونفسٍ مطمئنة ...

وأخيرًا .. فهذا ليس إهداءً يُوضع في الصفحة الأولى ..

بل هو إشعار غير مرئي، يُعلّق على باب اللحظة، مكتوب عليه: "مرّ من هنا إنسانٌ، حمل الفكرة على
كتفه، وسقاها من تعبهِ، وابتسم".

لا أملك ختمًا ذهبيًا أضعه في نهاية هذا الإهداء، لكنني أترك شيئًا آخر ... أترك ومضة.
ومضة تشبه وميض فكرةٍ فجرت طريقًا، أو صمّتًا احتوى كل العجز ثم تنفّس حلمًا .. هذا الإهداء ليس
مديحًا، ولا امتنانًا رسميًا، بل هو نافذة مفتوحة على قلبي.

إن أمعنت النظر، ستراه يقطر من بين السطور ..

لا تسأل: "لمن هذا الإهداء؟" بل اسأل: كمّ من الأرواح مرّت فيه دون أن تُذكر؟ "كمّ من أثرٍ صغير أصبح
سُلّمًا لهذا الارتقاء؟"

أنا فقط كتبت .. أما ما وراء الخبر .. فلك أن تلمح، أن تفسّر، أو أن تبتسم وتمضي ..

الحمد لله وكفى، والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى، وعلى آله ومن وقي ..

بونويو لطفي

الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ}

إله لا يطيب الليل إلا بشكره ولا يطيب النهار إلا بطاعته ولا تطيب اللحظات إلا بذكره الله جل جلاله
الى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة "سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم"

في اللحظة أكثر فخرا اهدي عملي هذا..

الى من علمتني الأخلاق قبل الحروف، الى من غرست في قلبي حب العلم والاصرار وحب مادة "العلوم الطبيعية"، الى
من كانت دعواتها رفيقة دربي، الى اليد التي ازالتي عن طريقتي الاشواك، الى من أحمل اسمه بكل فخر، الى النور الذي
أنار دربي، الى من سهروا الليالي من أجلي، وتحملوا العناء في سبيل ان أكون كما انا اليوم، الى من أوصاني بحما الله برا
واحسانا "والداي الكريمان" أطال الله في عمرهما والبسهما لباس الصحة والعافية.

الى من جمعنا معهم بيت واحد وكانوا خير سند، رفاق الخطوة الأولى والأخيرة، أختي الغالية " أسماء"، إخوتي الأعزاء
"فارس، خير الدين، مصطفى" و "زوجاتهم الكريمات وأولادهم".

الى خير ما أهدتني الأيام "زوجي"

حديث العهد في حياتي، وقديم الأثر في قلبي، كنت الحضور الأجل في نهاية هذا المشوار، كنت سننًا وعوضًا جاء في
وقته، أهديك هذه اللحظة، كأول ثمرة تُزهر في ظلنا المشترك، راجية من الله أن يجعل كل خطواتنا القادمة مليئة
بالنجاحات والسعادة، يدًا بيد، وقلبًا بقلب لنبني نحو الجنة سلمًا.

الى من شاركتني السكن بالإقامة الجامعية، إلى من كانت البيت والعائلة الثانية والأخت وسط الغربة، الى شقيقة الروح
والسند في الأوقات الصعبة "مودة"، أهديك شكري وامتناني لكل لحظة جميلة جمعتنا، كل دعمٍ منك كان طاقة تُحييني
من جديد، دمتِ صديقة العمر ورفيقة الأيام.

الى خلي، بعضي وكلبي، إلى من تسكن قلبي كابنة، الى رفيقة القرآن "عفاف عوابدية"

الى مصدر الهامي وطاقتي، الى النبض الذي يُوقظ فيّ الشغف، الى مارشيلو "شروق بودور"

الى اختي، رفيقتي في السفر ومقاعد الدراسة "ايناس بوشلوح"

الى من جمعني بهم الإقامة الجامعية في أولى الخطى، الى الرفقة التي خففت رهبة البدايات "مرورة غاغة" و "خديجة

عدالة"

الى خير ماجادت بهم الصدف: "مروة عيسوس" "يسرى فنوح"، "رانيا ذيب"، "رجاء عفايفية"، "دعاء عطاييلية"

الى رفيقات القلب وأخواتي: "أميمة"، "نجاة"، "جميلة" و"ملاك"

كنتنّ النور الذي أضاء وحدتي، تشاركنا الأيام بجلوها ومرّها، سهرنا، ضحكنا وبكيننا.. لم تكن الإقامة الجامعية مجرد محطة عابرة، بل كانت حياة، وكان أجمل ما فيها: أنننّ.

الى من سكن النفس صدقا ووفاءً، الى الصديقات المخلصات "مروة" "إيمان" "لينة"

الى الطيبين الذين اوقعوا بقلبي أثرا يروى بالدعوات والذكر الحسن: "هبة" "فاقي" "عمي فارس" "عمي سليم" "عامل
عون المدرسة" "الاستاذة سماح"

الى زملاء التخصص وأخص بالذكر: "اماني" و"الطفي" .. معكما كان الدرب أسهل، المصاعب أخف والطموح أكبر.

الى من علمني حرفا طيلة مساري الدراسي ولم يبخل بعطاءه "أساتذتي الأفاضل" كل باسمه ومقامه وأخص بالذكر:
"الاستاذة عزوزة"، "الاستاذة ميراد" و"الدكتور جمال بلبكاي"

الى من كان قدوة لا بالأقوال فقط، بل بالأفعال والأخلاق التي تركت فينا أثرا لا يُمحي، الى من قدّم لنا يد العون
والمساعدة ووجهنا لإتمام هذا العمل، الدكتور "فيصل خلفاوي"

الى آل مشروع "حافضة الذكر"، مشروع "من التيه الى الطمأنينة"، الى اداريات المشروع على رأسهن "نور الهدى بن
فردوي"، عسى أن نجتمع زمراً في الجنة ويقال لنا {ادخلوها بسلام آمنين}

الى أولئك الذين رسموا أحلامهم على جدران الجامعات. وحملوا دفاترهم في طريقهم إلى الشهادة ...

الى "طلبة غزة الجامعيين" الذين رحلوا قبل أن تكتمل الحكاية. قبل أن يُنادى بأسمائهم يوم التخرج، فصاروا نورا لا
ينطفئ في سماء العلم والكرامة. سلاما على أرواحكم الطاهرة، وموعدا عند رب لا ينسى ..

الى من علمتني العطاء بدون انتظار، الى من علمتني مبدأ جبر الخواطر، الى من كانت لي أمّا في عُربتي وجسراً يمتدّ بي
نحو الخير والجنة بإذن الله، الى روح الروح "الاستاذة فوزية" فمهما بلغت من نور لا أنسى يديها التي مدت لي في
الظلام، جزاك الله عني خير الجزاء، ورفع قدرك في الدنيا والآخرة.

الى نفسي التي راهنت على النجاح، اصبري وصابري فلا يزال الطريق طويلا.

والى كل من اتسع قلبي لهم وضافت هذه الورقة عن ذكرهم، أهديكم عملي المتواضع عرفانا لكم بالجميل، وتقديرا
لجهودكم، لكم من القلب شكر لا يُقال، بل يُحسّ، ودعاء لا ينقطع.

والحمد لله على حسن التمام والختام.

درويش تسنيم

تقييم وتحليل جودة المياه في سد قنيطرة ومحيطه (أم الطوب، سكيكدة): الواقع والتحديات المستقبلية

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الوضع الحالي لجودة المياه في سد القنيطرة ومحيطه، في ظل ما تشهده المنطقة من ضغوط بيئية متزايدة نتيجة النشاطات الصناعية، الزراعية والتوسع العمراني. وقد تم في البداية تقديم نظرة شاملة حول التلوث البيئي، مع التركيز على تلوث المياه كمظهر رئيسي يهدد الصحة العامة والتوازن البيئي، إضافة إلى شرح أنواع الملوثات ومصادرها وآثارها المختلفة.

ثم تم التطرق إلى المعايير المعتمدة في قياس جودة المياه، من خلال عرض المؤشرات الفيزيائية، الكيميائية، والبيولوجية، وكذلك أهم التقنيات التحليلية والتجهيزات الحديثة التي تُستخدم في رصد التغيرات النوعية للمياه. كما تم اعتماد المعايير الوطنية والدولية كمرجع لتقييم نتائج التحاليل.

ومن أجل فهم أفضل للعوامل المؤثرة في جودة المياه، تم تحليل الخصائص الطبيعية والبيولوجية والمناخية لمنطقة الدراسة، بما في ذلك البنية الطبوغرافية، التكوينات الجيولوجية، وتوزيع الشبكة الهيدروغرافية، مع أخذ النشاط المنجمي في منجم سيدي قمبر كعامل بيئي رئيسي في التلوث.

اعتمدت الدراسة على تحليل بيانات ميدانية وسجلات سابقة تمتد من 2016 إلى 2020، لتقييم التطور الزمني والمكاني لجودة المياه في سد القنيطرة ووادي السوق، باستخدام مجموعة من المؤشرات مثل: درجة الحرارة، العكارة، الأوكسجين الذائب، المواد المغذية (النترات، الفوسفات)... وقد أظهرت النتائج وجود تدهور تدريجي في نوعية المياه، مرتبط بزيادة الضغوط البشرية.

وفي ضوء ذلك، تم تحديد جملة من التحديات البيئية والصحية التي تواجه المنطقة، واقتراح حزمة حلول تشمل تقوية نظام المراقبة، اعتماد معالجة متقدمة، وتطوير أدوات النمذجة الرقمية لتوقع التغيرات واتخاذ قرارات مناسبة.

الكلمات المفتاحية:

تلوث المياه، جودة المياه، سد القنيطرة، المؤشرات الفيزيوكيميائية، التحليل الزمني والمكاني، منجم سيدي قمبر.

Évaluation et analyse de la qualité de l'eau dans le barrage de Guénitra et ses environs (Ain Kechra, Skikda) : situation actuelle et défis futurs

Résumé

Cette étude vise à évaluer l'état actuel de la qualité des eaux du barrage de Guénitra et de ses environs, dans un contexte de pressions environnementales croissantes dues aux activités industrielles, agricoles et à l'expansion urbaine. Une première partie a été consacrée à une vue d'ensemble de la pollution environnementale, avec un accent particulier sur la pollution de l'eau, en abordant ses sources, ses types et ses impacts sanitaires et écologiques.

L'étude s'est ensuite intéressée aux normes et indicateurs utilisés pour évaluer la qualité de l'eau, en s'appuyant sur des paramètres physiques, chimiques et biologiques, ainsi que sur les techniques modernes d'analyse et de surveillance. Les normes nationales et internationales ont servi de références dans l'interprétation des résultats.

Pour mieux comprendre les facteurs influençant la qualité de l'eau, l'étude a examiné les caractéristiques naturelles, géologiques et climatiques de la région, notamment la topographie, la composition géologique, et le réseau hydrographique, en intégrant également l'impact environnemental du site minier de Sidi Kamber.

La méthodologie adoptée repose sur l'analyse de données de terrain et d'archives couvrant la période de 2016 à 2020. L'évaluation temporelle et spatiale de la qualité des eaux du barrage et de l'oued Souk a été réalisée à l'aide d'indicateurs tels que la température, la turbidité, l'oxygène dissous, les nutriments (nitrates, phosphates), etc. Les résultats ont mis en évidence une dégradation progressive de la qualité des eaux liée aux activités humaines.

Sur cette base, les principaux défis environnementaux et sanitaires ont été identifiés, et des solutions ont été proposées, notamment le renforcement des systèmes de suivi, l'adoption de traitements plus avancés, et l'utilisation de modèles numériques pour anticiper les évolutions et soutenir la prise de décision.

Mots-clés :

Pollution de l'eau, qualité de l'eau, barrage de Guénitra, indicateurs physico-chimiques, analyse spatio-temporelle, mine de Sidi Kamber

Assessment and Analysis of Water Quality in the Guenitra Dam and Its Surroundings (Oum Toub, Skikda): Current Situation and Future Challenges

Abstract

This study aims to assess the current state of water quality in the Guenitra Dam and its surroundings, amid increasing environmental pressures caused by industrial, agricultural, and urban activities. It begins with an overview of environmental pollution, focusing specifically on water pollution, its types, sources, and its health and ecological impacts.

The research then addresses the standards and indicators used to evaluate water quality, considering physical, chemical, and biological parameters, as well as modern analytical and monitoring techniques. Both national and international standards were used as references in interpreting the results.

To better understand the factors influencing water quality, the study analyzed the region's natural, geological, and climatic characteristics, including topography, geological formations, and the hydrographic network, while also considering the environmental impact of the Sidi Kamber mining site.

The methodology relied on field data and past records covering the period from 2016 to 2020. A temporal and spatial assessment of water quality in the Khenegta Dam and Oued Souk was carried out using several indicators, such as temperature, turbidity, dissolved oxygen, and nutrients (nitrates, phosphates). The results revealed a gradual deterioration of water quality associated with increasing human pressures.

Based on these findings, major environmental and health challenges were identified, and a set of solutions was proposed, including enhanced monitoring systems, the adoption of advanced treatment methods, and the development of digital models to forecast changes and support decision-making.

Keywords:

Water pollution, water quality, Guenitra Dam, physico-chemical indicators, spatio-temporal analysis, Sidi Kamber mine

الفهرس

.....	الشكر والعرفان
.....	الإهداء
.....	المخلص
.....	قائمة الاشكال
.....	قائمة الصور
.....	قائمة الجداول
.....	مقدمة عامة

الفصل الأول: عموميات حول تلوث المياه.

01.....	تمهيد
01.....	ا. التلوث البيئي
01.....	1. تعريف التلوث البيئي
02.....	2. أنواع التلوث
02.....	1.1. التلوث الطبيعي
02.....	1.2. التلوث الصناعي
02.....	3. درجات التلوث
02.....	1.3. التلوث المقبول
02.....	2.3. التلوث الخطر
03.....	3.3. التلوث المدمر
03.....	4. تعريف الملوثات
03.....	ا. الماء والتلوث
03.....	1. مصادر المياه في الطبيعة
04.....	2. أهمية المياه للحياة على الكرة الأرضية
05.....	3. متوسط الاستهلاك اليومي للمياه في الأغراض المختلفة
06.....	4. مجالات استهلاك المياه
07.....	5. تعريف تلوث الماء
08.....	6. ملوثات الماء

09.....	7. مصادر تلوث المياه
10.....	8. أنواع تلوث الماء
10.....	1.8. التلوث الطبيعي
11.....	2.8. التلوث الحراري
11.....	3.8. التلوث بالمبيدات
11.....	4.8. التلوث بمياه الصرف الصحي
11.....	5.8. التلوث البكتيري
12.....	6.8. التلوث بالطحالب
12.....	7.8. المخلفات الصناعية
12.....	8.8. التلوث الإشعاعي
12.....	9.8. التلوث البيولوجي
13.....	9. آثار تلوث الماء
13.....	1.9. الآثار الصحية على الإنسان
14.....	2.9. الآثار البيئية لتلوث الماء
15.....	10. الاتجاهات والإجراءات اللازمة لحماية المياه من التلوث
16.....	11. دورة تنقية المياه
16.....	خاتمة

الفصل الثاني: الطرق والأساليب المستخدمة في تحليل جودة المياه

17.....	مقدمة
17.....	1. مفهوم جودة المياه
17.....	1.1. تعريف جودة المياه
18.....	2.1. مؤشرات جودة المياه
18.....	3.1. فئات جودة المياه
18.....	4.1. أهمية قياس جودة المياه
19.....	2. المعايير والمقاييس الدولية لجودة المياه
20.....	1.2. معايير جودة المياه
20.....	1.1.2. المعايير الفيزيائية لجودة المياه
23.....	2.1.2. المعايير الكيميائية لجودة المياه

31.....	3.1.2. المعايير البيولوجية لجودة المياه
33.....	2.2. متطلبات جودة المياه
33.....	3.2. معايير الجودة المحلية وتطبيقها في الجزائر
34.....	3. تقنيات التحليل المستخدمة في قياس جودة المياه
34.....	1.3. تحليل المعايير الفيزيائية
35.....	1.1.3. اللون
35.....	2.1.3. الطعم والرائحة
36.....	3.1.3. درجة الحرارة
36.....	4.1.3. العكارة
37.....	2.3. تحليل المعايير الكيميائية
38.....	1.2.3. طرق التحليل المحمولة
39.....	2.2.3. طرق التحليل المحمولة
40.....	3.3. تحليل المعايير البيولوجية
40.....	1.3.3. اختبار الوجود-العدم (P-A)
40.....	2.3.3. طريقة العدد الأكثر احتمالاً (MPN)
41.....	3.3.3. الترشيح عبر الغشاء (MF)
42.....	4. التقنيات الحديثة في مراقبة جودة المياه
42.....	1.4. الأدوات التكنولوجية
44.....	2.4. النماذج الرياضية والبرمجيات
44.....	1.1.4. أنواع نمذجة الماء
45.....	2.2.4. البرمجيات والنماذج الرياضية لتقييم جودة الماء
46.....	خاتمة

الفصل الثالث: الإطار الطبيعي والمناخي لمنطقة القنيطرة

47.....	المقدمة
47.....	I. الإطار الطبيعي للحوض الفرعي للقنيطرة
47.....	1. الموقع الجغرافي
48.....	2. استخدام الأراضي في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة
48.....	1.2. الغطاء النباتي

49.....	2.2. السكان
51.....	3.2. منجم سيدي قمبر
54.....	4.2. سد الفنيطرة
57.....	II. الخصائص الهيدرولوجية والمناخية للمنطقة
57.....	1. محطة قياس الأمطار
58.....	2. العوامل المناخية
58.....	1.2. هطول الأمطار
58.....	1.1.2. المتوسط الشهري لهطول الأمطار
59.....	2.1.2. المتوسطات الشهرية للأمطار
59.....	3. درجات الحرارة
60.....	4. مخطط المطر-الحرارة (الأمبرو-حراري)
61.....	5. الشبكة الهيدروغرافية
62.....	1.5. الارتفاعات النموذجية
63.....	III. الإطار الجيولوجي لمنطقة الدراسة
63.....	1. الجيولوجيا الإقليمية
64.....	1.1. السمات الجيولوجية الكبرى للقبائل الصغيرة
64.....	1.1.1. القاعدة القبائلية
65.....	2.1.1. الظهرة القبائلية
65.....	3.1.1. السلاسل ذات الطابع الفليشي
65.....	4.1.1. السلاسل التلية
66.....	5.1.1. الأوليجوسين والميوسين القبائلي والأوليستوستراتومات
66.....	6.1.1. النشاط البركاني
67.....	2. الجيولوجيا المحلية
67.....	1.2. التكوينات المتحولة
67.....	1.1.2. الشَّيْست
67.....	2.1.2. الغنايس
68.....	2.2. الصخور النارية
69.....	3.2. التشكيلات الرسوبية

69.....	1.3.2. السلسلة الكلسية أو الظهيرية القبائلية
69.....	2.3.2. الفليش الموريتاني
69.....	3.3.2. الأوليغو-ميوسين القبائلي (OMK)
69.....	4.3.2. العصر الرباعي
70.....	3. جيولوجيا موقع سد قنيطرة
70.....	1.3. الأساس الصخري
70.....	2.3. التكوينات السطحية
71.....	الخاتمة

الفصل الرابع: تقييم الوضع الحالي لجودة المياه في سد القنيطرة ومحيطه وتحديات المستقبل

72.....	المقدمة
72.....	1. المنهجية والمعطيات المستخدمة
73.....	2. تحليل البيانات
73.....	1.2. التحليل الزمني لجودة مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)
74.....	1.1.2. المعايير الفيزيائية المقاسة في الموقع (<i>in-situ</i>)
77.....	2.1.2. المعايير الكيميائية الرئيسية
84.....	3.1.2. المعايير الأزوتية والفسفورية (Paramètres azotés et phosphorés)
88.....	2.2. التحليل المكاني لجودة مياه واد السوق (2023)
89.....	1.2.2. تطوّر المؤشرات الفيزيوكيميائية لمياه وادي السوق
94.....	3. التحديات الحالية والمستقبلية لنوعية وجودة المياه في منطقة سد قنيطرة ومنجم سيدي قمير
95.....	1.3. التحديات الحالية
95.....	2.3. التحديات المستقبلية
96.....	3.3. الاستراتيجية المقترحة لمواجهة هذا التحدي البيئي والصحي
98.....	خاتمة

.....	خاتمة عامة
.....	نصائح وتوجيهات
.....	قائمة المراجع
.....	الملاحق

الفصل الثاني: الطرق والأساليب المستخدمة في تحليل جودة المياه.

- الشكل II.1. درجة الحموضة في الماء ص 24
- الشكل II.2. طرق قياس العكارة ص 37
- الشكل II.3. استخدام شريط الاختبار لقياس الملوثات الكيميائية ص 40
- الشكل II.4. أنابيب متعددة (10) وتجاويف متعددة على طبق قابل للتخلص ص 42
- الشكل II.5. طريقة الترشيح عبر الغشاء لتحليل جودة المياه ص 43
- الشكل II.6. تعزيز جودة الماء: الملوثات، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات ص 44
- الشكل II.7. المبدأ الأساسي للاستشعار عن بُعد وفقاً للمركز الكندي للاستشعار عن بُعد ص 45

الفصل الثالث: الإطار الطبيعي والمناخي لمنطقة الفنيطرة.

- الشكل III.1. موقع منطقة الدراسة ص 48
- الشكل III.2. استخدام الأراضي في الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 49
- الشكل III.3. تطور السكان في الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 50
- الشكل III.4. نقاط التصريف الحضري المختلفة في الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 51
- الشكل III.5. تحديد موقع العروق ومنجم سيدي قمبر المهجور ص 53
- الشكل III.6. تحديد موقع سد الفنيطرة ص 54
- الشكل III.7. تطور الواردات المائية لسد الفنيطرة وفقاً للتساقطات المطرية (2000-2021) ص 56
- الشكل III.8. المتوسط الشهري لهطول الأمطار في حوض التصريف الفرعي لفنيطرة (2020/2019 - 1991/1990) ص 58
- الشكل III.9. متوسطات الأمطار الموسمية لمحطة فنيطرة (1991/1990 - 2020/2019) ... ص 59

- الشكل III.10. درجات الحرارة المتوسطة الشهرية للحوض الفرعي لوادي قنيطرة - (2020/2019 - 1991/1990) ص 60
- الشكل III.11. المخطط المطري-الحراري لمحطة قنيطرة (1991/1990 - 2020/2019) ص 61
- الشكل III.12. الشبكة الهيدروغرافية للحوض الفرعي لوادي قنيطرة ص 62
- الشكل III.13. خريطة الارتفاعات في الحوض الفرعي لوادي قنيطرة ص 63
- الشكل III.14. المجالات الكبرى للأصل الألبى في البحر الأبيض المتوسط الغربي ص 64
- الشكل III.15. الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة (حسب فيلا 1980) ص 68

الفصل الرابع: تقييم الوضع الحالي لجودة المياه في سد القنيطرة ومحيطه وتحديات المستقبل.

- الشكل VI.1. منحني تطور قيم الأس الهيدروجيني في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 75
- الشكل VI.2. منحني تطور تراكيز البقايا الجافة (RS) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 76
- الشكل VI.3. منحني تطور قيم الموصلية الكهربائية (CE) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 77
- الشكل VI.4. منحني بياني لتطور تراكيز الكلوريد (Cl^-) في سد قنيطرة (2016-2020) ص 78
- الشكل VI.5. منحني بياني لتطور تراكيز الكبريتات (SO_4^{2-}) في سد قنيطرة (2016-2020) ص 79
- الشكل VI.6. منحني بياني لتطور تراكيز البيكربونات (HCO_3^-) في سد قنيطرة (2016 - 2020) ص 80
- الشكل VI.7. منحني بياني لتطور تراكيز الكالسيوم (Ca^{2+}) في سد قنيطرة (2016 - 2020) .. ص 81
- الشكل VI.8. منحني بياني لتطور تراكيز البوتاسيوم (K^+) في سد قنيطرة (2016 - 2020) ص 82
- الشكل VI.9. منحني بياني لتطور تراكيز المغنيزيوم (Mg^{2+}) في سد قنيطرة (2016 - 2020) .. ص 83
- الشكل VI.10. منحني بياني لتطور تراكيز الصوديوم (Na^+) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 84
- الشكل VI.11. منحني بياني لتطور تراكيز النترات (NO_3^-) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 86
- الشكل VI.12. منحني بياني لتطور تراكيز النيتريت (NO_2^-) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 87
- الشكل VI.13. منحني تطور تراكيز الأمونيوم (NH_4^-) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ص 88

-
- الشكل 14.VI. منحنى تطور تراكيز الأمونيوم (PO_4^{-3}) في مياه سد قنيطرة (2016-2020) ... ص 89
 - الشكل 15.VI. خريطة توزيع نقاط أخذ العينات من واد السوق (ماي 2019) ص 90
 - الشكل 16.VI. تطور قيم الأس الهيدروجيني و الموصلية الكهربائية في واد السوق (ماي 2019) ص 91
 - الشكل 17.VI. تطور تراكيز الأنيونات (HCO_3 , SO_4 , Cl) في واد السوق (ماي 2019) ص 92
 - الشكل 18.VI. تطور تراكيز الكاتيونات (Ca , Mg , Na) في مياه واد السوق (ماي 2019) ص 93
 - الشكل 19.VI. تطور تراكيز العناصر الآزوتية (NO_3 , NO_2) في مياه واد السوق (ماي 2019) ص 94
 - الشكل 20.VI. تطور تراكيز المعادن الثقيل (Cu Zn Pb Cd) في مياه واد السوق (ماي 2019) ص 96

الفصل الأول: عموميات حول تلوث المياه.

- الجدول I.1. الاستهلاك اليومي للمياه ص 07
- الجدول I.2. تصنيف العناصر الملوثة ص 09

الفصل الثاني: الطرق والأساليب المستخدمة في تحليل جودة المياه.

- الجدول II.1. أنواع معايير جودة المياه ص 20
- الجدول II.2. العلاقة بين التمعدين والتوصيلية الكهربائية ص 23
- الجدول II.3. تصنيف المياه حسب تركيز العسر الكلي ص 29
- الجدول II.4. شبكة جودة مياه السدود المعتمدة من طرف ANRH قسنطينة ص 32
- الجدول II.5. معايير منظمة الصحة العالمية والمعايير الجزائرية ص 34
- الجدول II.6. منظمة الصحة العالمية للمعايير الفيزيائية ص 35
- الجدول II.7. ملاحظات حول اللون والملوثات المحتملة ص 35
- الجدول II.8. ملاحظات حول الرائحة والملوثات المحتملة ص 35
- الجدول II.9. طرق التحليل لبعض المعايير الكيميائية ص 37

الفصل الثالث: الإطار الطبيعي والمناخي لمنطقة الفنيطرة.

- الجدول III.1. خصائص شبكة الصرف الصحي في الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 51
- الجدول III.2. خصائص العروق في مكن سيدي قمبر ص 53
- الجدول III.3. خصائص الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 55
- الجدول III.4. إمدادات المياه من الروافد في الحوض الفرعي لوادي الفنيطرة ص 56
- الجدول III.5. إحصائيات محطة قياس الأمطار لسد فنيطرة 1991/1990 - 2020/2019 ص 57

قائمة الاختصارات

- AAS**: مطيافية الامتصاص الذري
- ANBT**: الوكالة الوطنية للسدود والتحويلات
- Ce-QUAL-W2**: نموذج ثنائي الأبعاد للهيدروديناميكا وجودة المياه
- COD**: الطلب الكيميائي على الأوكسجين
- DO**: الأوكسجين المذاب
- EDTA**: حمض الإيثيلين ديامين تترا أسيتيك
- EC**: التوصيلية الكهربائية
- FTU**: وحدة تعكر الفورمازين
- GPS**: نظام التموضع العالمي
- HPLC**: كروماتوغرافيا السائل عالية الأداء
- HEC-RAS**: نظام تحليل الأنهار – مركز الهندسة الهيدرولوجية
- ICP**: البلازما المقترنة حثيًا
- IoT**: إنترنت الأشياء
- MF**: الترشيح بالغشاء
- MIKE**: برنامج نمذجة للمياه والبيئة
- ML**: التعلم الآلي
- MPN**: العدد الأكثر احتمالاً
- NPP**: الإنتاجية الأولية الصافية
- NTU**: وحدة التعكر النيفيلومترية
- pCi**: بيكو كوري
- Protozoa**: الأوليات (كائنات مجهرية)
- pH**: الأس الهيدروجيني

QUAL2K: نموذج جودة مياه المجاري المائية

SWAT: أداة تقييم التربة والمياه

T: درجة الحرارة

TED: الجرعة المكافئة الكلية

TH: القساوة الكلية

THMs: ثلاثي الهالوميثانات

TON: رقم العتبة للرائحة

TTN: رقم العتبة للطعم

TS: المواد الصلبة الكلية

TDS: المواد الصلبة الذائبة الكلية

TIP4P: نموذج الإمكانيات الجزئية بأربع نقاط

UCV: وحدة اللون الحقيقي

USEPA: وكالة حماية البيئة الأمريكية

USGS: هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية

WASP: برنامج محاكاة تحليل جودة المياه

مقدمة عامة

تُعد المياه أحد العناصر الأساسية للحياة على سطح الأرض، إذ لا يمكن للكائنات الحية أن تحيا دونها، فهي تشكل ما يفوق 70% من كتلة أجسام الكائنات الحية، وتلعب دورًا جوهريًا في العمليات الحيوية والفيزيائية على كوكبنا. وبالرغم من وفرة الماء على سطح الأرض، إلا أن نسبة المياه العذبة القابلة للاستعمال البشري تبقى ضئيلة جدًا، مما يجعل الحفاظ على جودتها واستدامتها من أهم التحديات البيئية والاقتصادية والصحية التي تواجه المجتمعات الحديثة.

لقد أفرز النمو الديمغرافي المتسارع، والتوسع العمراني، والتطور الصناعي والزراعي، أنماطًا استهلاكية ضاغطة على الموارد المائية، وأسهم بشكل كبير في تدهور نوعية المياه في العديد من الأنظمة البيئية. ويُعد تلوث المياه من أبرز أشكال التدهور البيئي، لما له من تأثيرات مباشرة على صحة الإنسان، وتوازن النظم البيئية، واستقرار الموارد الطبيعية. وتتعدد مصادر هذا التلوث بين ما هو طبيعي، وما هو ناتج عن أنشطة بشرية، تشمل المياه المستعملة، والمخلفات الصناعية، والأسمدة الكيميائية، والمبيدات، والتسربات المعدنية، وغيرها.

وفي هذا السياق، برزت أهمية تقييم جودة المياه، باعتباره عملية علمية تهدف إلى تحديد مدى صلاحية المياه للاستخدامات المختلفة (الشرب، الري، الصناعة، إلخ)، بناءً على مجموعة من المؤشرات والمعايير الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المعتمدة دوليًا ومحليًا. ولا يقتصر هذا التقييم على وصف الحالة الراهنة، بل يشكل أداة استراتيجية للتخطيط البيئي، واتخاذ القرارات الملائمة لإدارة الموارد المائية بفعالية.

من هذا المنطلق، تتناول هذه الدراسة حالة سد القنيطرة ومحيطه في منطقة أم الطوب ولاية سكيكدة، لما له من أهمية حيوية كمصدر رئيسي لتزويد السكان بالمياه، ولاعتباره نقطة تقاطع بين الأنشطة البشرية والبيئية. وتُعد المنطقة المعنية نموذجًا مصغرًا للتحديات التي تواجهها العديد من المناطق الريفية والجبالية في الجزائر، حيث تتفاعل المعطيات الطبيعية والمناخية والبيولوجية مع الضغوط البشرية، مفرزة أوضاعًا متباينة لجودة المياه.

إن التعمق في فهم الإطار الطبيعي، والهيدرولوجي، والمناخي، والبيولوجي للمنطقة، وتحليل الخصائص الفيزيوكيميائية والبيولوجية للمياه، يشكل الأساس العلمي لتقييم الوضع البيئي العام، والتنبؤ بالمخاطر المستقبلية، واقتراح سبل الإدارة الرشيدة والفعالة. وعليه، فإن هذه الدراسة تسعى إلى تسليط الضوء على واقع جودة المياه في سد القنيطرة، عبر منهجية علمية تحليلية، تركز على بيانات ميدانية ومخبرية، وتُوجّه بالنظر إلى المعايير المعتمدة، مع استشراف آفاق التحسين والحماية في ظل التغيرات البيئية والمجتمعية المتسارعة.

الفصل الأول:

عموميات حول تلوث المياه

تمهيد

البيئة هي المجال الذي يحيط بالإنسان، وتشمل جميع العوامل المادية وغير المادية التي تدعم الحياة الطبيعية. لكن، للأسف، تعرضت البيئة للاختلال بسبب الأنشطة البشرية المتعددة، مثل الاستخدامات غير المشروعة للموارد والأنشطة اليومية التي تمارسها المجتمعات. نتيجة لهذا التلوث، فقد تغيرت بعض مكونات البيئة وتعرضت الأنظمة البيئية لتحديات كبيرة.

1. التلوث البيئي

1. تعريف التلوث البيئي

في تعريف التلوث، لا يوجد اتفاق شامل على صيغة واحدة، لكن معظم التعريفات تتقاطع في مضمونها، وبالتالي يمكننا تعريف التلوث كالتالي:

- التلوث هو أي تغيير في مكونات البيئة الحية أو غير الحية، سواء بشكل كمي أو كيميائي، بحيث تتجاوز قدرة الأنظمة البيئية على استيعابه دون التأثير على توازنها. يشمل ذلك إدخال مواد غريبة وغير مألوفة إلى مكونات البيئة مثل الهواء، والمياه، والتربة، مما يؤدي إلى تغيير في الخصائص الفيزيوكيميائية أو البيولوجية لهذه الأوساط. وعندما تصل هذه المواد إلى مستويات معينة، فإنها تؤثر سلباً على الكائنات الحية كافة.
- كما يمكن تعريف التلوث بأنه التغيرات التي تحدث في البيئة المحيطة بالكائنات الحية نتيجة لأنشطة الإنسان اليومية. هذه التغيرات قد تؤدي إلى ظهور مواد أو موارد غير ملائمة للبيئة الطبيعية للكائن الحي، مما يسبب اختلالاً في التوازن البيئي. يُعتبر الإنسان العامل الرئيس في تحديد ما إذا كانت هذه المواد ستتحول إلى موارد نفعية أو ضارة. على سبيل المثال، يمكن استخدام الفضلات البيولوجية للحيوانات كمخصبات للتربة الزراعية إذا تم التعامل معها بشكل صحيح، ولكن إذا تم التخلص منها في المياه، فإنها قد تؤدي إلى انتشار الأمراض والأوبئة. (العربي بن النذير والعلمي نواصر، 2020)

2. أنواع التلوث

1.2. التلوث الطبيعي

يُتصد بالتلوث الطبيعي التلوث الذي ينجم عن ظواهر طبيعية تحدث دون تدخل الإنسان، كالملوّثات التي تنبعث من البراكين والغازات والزلازل والفيضانات وغيرها. هذه الظواهر لا يمكن السيطرة عليها أو تنظيمها، بالرغم من الأضرار الكبيرة التي تسببها للبيئة. كما أن التنظيم القانوني لحماية البيئة لا يشمل هذا النوع من التلوث، بل يقتصر على التلوث الناتج عن الأنشطة البشرية المتعمدة.

2.2. التلوث الصناعي

التلوث الصناعي هو التلوث الذي يحدث نتيجة الأنشطة البشرية المختلفة، التي تشمل العمليات الصناعية والزراعية والترفيهية وغيرها من الأنشطة اليومية التي تساهم في تسيير حياة الإنسان. مع تطور العلوم والتكنولوجيا، تزداد هذه الأنشطة، مما يؤدي إلى زيادة التلوث. ويعود المصدر الرئيسي لهذا النوع من التلوث إلى المصانع والسيارات والفضلات الصناعية والزراعية والمنزلية وغيرها. (مجاجي، 2018)

3. درجات التلوث

ينقسم التلوث إلى ثلاث درجات وفقاً لشدته وتأثيره على البيئة:

1.3. التلوث المقبول

يمثل هذا النوع من التلوث درجة منخفضة من التلوث لا يصاحبها مخاطر بيئية كبيرة. حيث لا يتأثر النظام البيئي بشكل ملحوظ بهذا التلوث، إذ يبقى ضمن الحدود المسموح بها ضمن النظام البيئي. يُعتبر هذا النوع من التلوث شائعاً في معظم المناطق حول العالم، حيث لا توجد بيئة خالية تماماً من التلوث، وذلك بسبب إمكانية انتقال الملوثات بأنواعها عبر العوامل المناخية أو الأنشطة البشرية.

2.3. التلوث الخطر

في هذه المرحلة، تتجاوز كمية ونوعية الملوثات الحد المسموح به ضمن النظام البيئي، مما يؤدي إلى التأثير السلبي على المكونات البيئية الطبيعية والبشرية. غالباً ما ينتج هذا النوع من التلوث عن الأنشطة الصناعية

المكثفة، مثل التعدين والصناعات الكيماوية، فضلاً عن الاعتماد الكبير على الفحم والبتروك كمصادر للطاقة. ولذلك، يُعتبر التلوث الخطر أكثر شيوعاً في الدول الصناعية والدول المجاورة لها.

3.3. التلوث المدمر

يمثل هذا النوع من التلوث المرحلة التي ينهار فيها النظام البيئي بشكل كامل، مما يجعله غير قادر على أداء وظائفه الطبيعية نتيجة لفقدان التوازن البيئي بشكل جذري. حادثة تشيرنوبل في المفاعلات النووية في الاتحاد السوفيتي سابقاً تُعد مثالاً بارزاً على التلوث المدمر، حيث انهار النظام البيئي كلياً. تحتاج المناطق المتأثرة إلى سنوات عديدة لاستعادة توازنها البيئي، بتدخل بشري مكثف وبمبالغ مالية كبيرة. وفقاً لدراسات علمية، يُقدر أن المنطقة المتضررة والمنطقة المحيطة بها قد تحتاج إلى حوالي خمسين عاماً لإعادة التوازن البيئي وعودة الأنماط الحياتية الطبيعية. (الشحات، 2011)

4. تعريف الملوثات

الملوثات هي المواد أو الكائنات الدقيقة التي تُسبب أضراراً للإنسان أو تُساهم في حدوث الأمراض. تُعد كلمة "التلوث" مصطلحاً عاماً يشير إلى وجود مادة غير مرغوب فيها في بيئة معينة. على سبيل المثال، يُعد زيت البترول مادة نافعة ومطلوبة عند استخراجها من باطن الأرض، لكنه يصبح ضاراً وغير مرغوب فيه عندما ينتشر على سطح المياه، مما يشكل خطراً على صحة الإنسان والكائنات البحرية مثل الأسماك. (الزرقعة، 2010)

II. الماء والتلوث

1. مصادر المياه في الطبيعة

يُقدّر إجمالي الموارد المائية في العالم بحوالي 1.337 * 10⁸ مليون متر مكعب. يشكل القسم الأكبر من هذه المياه مياهًا مالحة، حيث تبلغ نسبتها حوالي 97.3%، وتوجد أساساً في المحيطات. أما المياه العذبة، فتُقدّر نسبتها بحوالي 2.7% فقط من إجمالي المياه على سطح الأرض. وتنقسم المياه العذبة إلى نوعين رئيسيين: المياه السطحية والمياه الجوفية.

▪ **المياه السطحية:** هي كل المياه الموجودة على سطح الأرض وتشمل الأنهار، البحيرات العذبة، البرك، السيول، وكذلك المصادر الاصطناعية مثل القنوات والخزانات.

▪ **المياه الجوفية:** تُعتبر مصدرًا ثمينًا وتوزع على نطاق واسع تحت سطح الأرض، وهي تُعدّ أكبر مصدر للمياه العذبة.

تُعد المناطق الصحراوية والجافة من أكثر المناطق احتياجًا للمياه الجوفية، نظرًا لندرة الموارد المائية السطحية فيها وتنقسم المياه الجوفية إلى نوعين:

▪ المياه الجوفية المتجددة

هي المياه المخزنة في طبقات جوفية بين الصخور، حيث يتم تجديدها بشكل طبيعي عبر كميات من المياه التي تتسرب إلى هذه الطبقات لتغطية النقص الذي يحدث نتيجة السحب منها خلال السنة.

▪ المياه الجوفية غير المتجددة

هي المياه المخزنة في طبقات جوفية منذ عصور قديمة، وتعود غالبًا إلى فترات ممطرة. لا تتلقى هذه المياه تغذية طبيعية بالكميات الكافية لتغطية النقص الناتج عن السحب منها، أو تصل إليها كميات محدودة من المياه لا تفي بالحاجة مقارنةً بالمياه المسحوبة خلال السنة. (سويد، 2018)

2. أهمية المياه للحياة على الكرة الأرضية

تعتبر المياه من أهم العناصر الأساسية التي تعتمد عليها الحياة على كوكب الأرض، وهي تمثل مكونًا حيويًا في تكوين الكائنات الحية. يمكن توضيح أهمية المياه من خلال النقاط التالية:

- **التركيب الحيوي للكائنات الحية:** يشكل الماء 75% من وزن جسم الإنسان والحيوان، و90% من تكوين النباتات. يعتبر المحتوى المائي في الكائنات الحية أساسيًا لبقاء الجسم في حالة سليمة، حيث يؤدي فقدان الجسم لـ 10% من محتواه المائي إلى اختلال في وظائفه الفسيولوجية، بينما يؤدي فقدان 20% إلى الموت.
- **دوره في العمليات الحيوية:** يساهم الماء في عمليات المضغ والبلع والهضم وامتصاص المواد الغذائية. كما يدخل في تركيب جميع إفرازات الجسم.

- **إخراج الفضلات:** يساعد الماء الجسم في التخلص من الفضلات والمواد الإخراجية عن طريق إذابتها، مما يسهل خروجها مع البول والعرق.
 - **تنظيم درجة حرارة الجسم:** يعمل الماء على تلطيف درجة حرارة الجسم وتنظيمها، مما يساعد في الحفاظ على التوازن الحراري للجسم.
 - **دوره في التربة والنباتات:** لا يستطيع النبات الحصول على المواد الغذائية من التربة إلا إذا كانت هذه المواد مذابة في الماء، مما يجعل الماء عنصرًا حيويًا لعملية نمو النباتات.
 - **النظافة العامة:** يُعد الماء عنصرًا ضروريًا في عمليات النظافة الشخصية والعامة، مثل غسل الأطعمة والخضراوات والفواكه، وكذلك في أداء الأعمال المنزلية المتنوعة.
 - **إعداد المنتجات الغذائية:** دخل الماء في العديد من العمليات الصناعية، بما في ذلك إعداد وتصنيع المنتجات الغذائية.
 - **استخدامات صناعية:** يُستخدم الماء في عمليات التبريد في المصانع المختلفة، مما يساهم في الحفاظ على درجات حرارة مناسبة أثناء الإنتاج.
 - **الموارد البحرية:** توفر المياه كميات هائلة من الأسماك، التي تعد مصدرًا غذائيًا هامًا للإنسان، بالإضافة إلى اللؤلؤ المستخرج من البحار، والذي يمثل مصدرًا ذا قيمة اقتصادية. كما ورد في القرآن الكريم: "وهو الذي سخر البحر لتأكلوا منه لحمًا طريًا وتستخرجوا منه حلية تلبسونها".
 - **النقل البحري:** تُستخدم المياه كوسيلة لنقل السفن التي تحمل المسافرين والمواد الخام والبضائع، مما يساهم في تقليص المسافات بين الدول وتسريع عمليات النقل التجارية.
- تُعتبر المياه بذلك من العوامل الحيوية التي تدعم جميع جوانب الحياة على الأرض، من تكوين الكائنات الحية إلى الأنشطة الاقتصادية والصناعية المختلفة.

3. مجالات استهلاك المياه

قد يختلف الاستهلاك حسب الأغراض التي يستخدم فيها الماء، مثل:

- الاستخدام المنزلي: للشرب، والطهي، والتنظيف.
- الاستخدام الزراعي: لري المحاصيل.
- الاستخدام الصناعي: لتشغيل المعدات والتصنيع.
- الاستخدام في الإطفاء: كميات كبيرة من المياه لمكافحة الحرائق.

4. متوسط الاستهلاك اليومي للمياه في الأغراض المختلفة

يبلغ متوسط استهلاك الفرد من المياه عالميًا ما بين 130 و200 لتر يوميًا، مع تفاوت كبير يعتمد على

عدة عوامل، منها:

- الظروف المناخية: المناطق ذات المناخ الحار والجاف قد تحتاج إلى كميات أكبر من المياه مقارنة بالمناطق ذات المناخ المعتدل.
- تكاليف المياه: تأثير أسعار المياه على استهلاكها، حيث قد يؤدي ارتفاع التكلفة إلى تقليل الاستخدام.
- نوع الإمداد المائي: إذا كان الإمداد المائي مستمرًا أو منقطعًا يؤثر على كميات المياه المستهلكة.
- عادات وتقاليد السكان: تختلف عادات الاستخدام من منطقة لأخرى بناءً على الثقافة المحلية والعادات اليومية.
- ضغط الماء داخل شبكة المياه: يؤثر ضغط المياه في الشبكة على كمية المياه التي يمكن استخدامها يوميًا.
- عدد السكان: في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية، قد يزداد الاستهلاك بشكل ملحوظ.
- مصادر المياه الخاصة: وجود مصادر مياه خاصة (مثل الآبار أو الخزانات) قد يؤثر على كمية المياه المستهلكة.
- المسطحات الخضراء والحدائق: المناطق التي تحتوي على مساحات كبيرة من الحدائق والمسطحات الخضراء تحتاج إلى كمية أكبر من المياه للري.

- **نظام سحب المياه:** يختلف الاستهلاك بشكل كبير بين النظام الذي يعتمد على العدادات (حيث يتم مراقبة الاستهلاك) والنظام الذي لا يعتمد على عدادات، حيث يزيد السحب العشوائي من المياه بدون عداد من كمية الاستهلاك.
 - **الوضع المادي للأفراد:** الأشخاص ذوو الدخل المرتفع قد يكون لديهم استهلاك أكبر للمياه نتيجة لتحسين مستوى المعيشة.
 - **الأنشطة الصناعية:** يختلف استهلاك المياه وفقاً لنوعية الأنشطة الصناعية في المنطقة، فبعض الصناعات تحتاج إلى كميات كبيرة من المياه.
 - **الاحتياجات الخاصة:** بعض القطاعات مثل مراكز الإطفاء تحتاج إلى كميات كبيرة من المياه، مما يساهم في زيادة الاستهلاك في هذه المجالات.
- تؤثر كل هذه العوامل بشكل كبير في كمية المياه المستهلكة على مستوى الفرد والمجتمع.

الجدول 1.1. الاستهلاك اليومي للمياه (د. طلعت ابراهيم الاعوج، 1999)

متوسط الإستهلاك اليومي من المياه للفرد الواحد	
الغرض	الماء المستهلك للفرد الواحد بالتر/اليوم
الشرب	2.3
الطبخ	4.5
الوضوء والاعتسال	18.2
غسل الملابس	13.6
غسل أدوات المطبخ وتنظيف البيت	13.6
الاستحمام	27.3
داخل دورات المياه	27.3

5. تعريف تلوث الماء

يُعرّف تلوث الماء بأنه حدوث تغييرات في خصائصه الفيزيائية والكيميائية تجعله غير صالح للاستخدام. يتمثل ذلك في إضافة مواد ملوثة أو دخيلة إلى الماء مثل المواد الكيميائية، الكائنات الدقيقة (مثل البكتيريا)، أو حتى الطاقة الحرارية والإشعاعية التي تؤثر على الأنظمة البيئية المائية، سواء كانت مياه سطحية (مثل البحيرات،

الأنهار، والجداول) أو مياه جوفية. يؤثر التلوث في جميع هذه الأنظمة البيئية بشكل سلبي، حيث تصبح المياه مكدرّة، وقد تنبعث منها رائحة كريهة أو تطفو عليها النفايات. وفي بعض الحالات، قد لا تكون هناك أي مؤشرات مرئية أو شمّية للتلوث، إلا أن المياه قد تكون مشبعة بمواد كيميائية غير مرئية أو غير قابلة للشم، مما يجعل تحديد التلوث يتطلب استخدام معايير علمية دقيقة لقياس جودة المياه وتمييز ما إذا كانت ملوثة أم لا.

(Jerry A. Nathanson, 2019)

6. ملوثات الماء

تنقسم المواد الملوثة للمياه إلى ثماني مجموعات رئيسية، كل منها يحتوي على مكونات ذات خصائص أو تأثيرات معينة تؤثر على نوعية المياه. وهذه المجموعات هي:

- **المواد البيولوجية المسببة للأمراض:** تتضمن هذه المواد الكائنات الدقيقة مثل البكتيريا الممرضة التي تؤثر على صحة الإنسان، وتسبب أمراضًا مثل حمى التيفويد، الكوليرا، حمى الباراتفويد، والدوسنتاريا.
- **المواد السامة:** تشمل هذه المجموعة مواد سامة مثل الزرنيخ، الرصاص، الزئبق، الكاديوم، بالإضافة إلى أنواع متعددة من المركبات الكيميائية العضوية مثل المبيدات، المذيبات، المنظفات، والزيوت والدهون.
- **المغذيات غير العضوية:** تتضمن هذه المواد النيتروجين والفسفور، التي تنتج عن استخدام الأسمدة في الأراضي الزراعية وتؤدي إلى تلوث المياه.
- **المركبات الكيميائية الذائبة في الماء:** تشمل هذه المركبات الأملاح، الأحماض، وأيونات المعادن الثقيلة، والتي تذوب في الماء وتؤثر على جودته.
- **المواد الصلبة المعلقة:** تشمل الأتربة والمواد غير الذائبة التي تتواجد في الماء على شكل جسيمات معلقة.
- **المواد المشعة:** تشمل المواد المشعة مثل اليورانيوم والراديو، والتي تلوث المياه وتعتبر من العوامل السامة.
- **الحرارة:** تؤثر الحرارة على ذوبانية الأوكسجين في الماء، مما يسبب نقص الأوكسجين في المياه وبالتالي يؤثر على الكائنات الحية المائية.
- **المخلفات التي تستهلك الأوكسجين الحيوي:** تشمل المواد العضوية التي تستهلك الأوكسجين في المياه أثناء تحللها، مما يؤدي إلى انخفاض مستوى الأوكسجين الحيوي في الماء.

الجدول 2.I. تصنيف العناصر الملوثة

الملوّثات	معايير التصنيف
<ul style="list-style-type: none"> • مواد قابلة للإزالة أو عائمة • مواد معلقة • المواد الغروية • مواد قابلة للذوبان 	الحجم
<ul style="list-style-type: none"> • مواد قابلة للتحلل الحيوي • قابل للتحلل بسهولة • قابل للتحلل ببطء • مواد غير قابلة للتحلل الحيوي 	قابلية الذوبان
<ul style="list-style-type: none"> • المواد العضوية • المواد غير العضوية 	التركيب الكيميائي

7. مصادر تلوث المياه

تتعدد مصادر تلوث المياه ويمكن تقسيمها إلى عدة أنواع رئيسية تشمل:

- **المصادر الطبيعية:** مثل الجو، المعادن الذائبة، تحلل المواد النباتية، والجريان السطحي للأملاح والمواد الكيميائية.
 - **المصادر الزراعية:** فهي تتضمن انجراف التربة بواسطة المياه، المخلفات الحيوانية الناتجة عن مزارع الإنتاج الحيواني والدواجن، الأسمدة الكيميائية والمبيدات الزراعية، بالإضافة إلى مياه الري.
 - **مياه الصرف:** وتشمل الصرف الصحي، مياه الصرف الصناعي، مركبات الصرف البحرية، وكذلك الحوادث البحرية التي تؤدي إلى تلوث المياه.
- هناك أيضًا مصادر أخرى متنوعة تشمل الأنشطة البشرية مثل أنشطة البناء، استخراج المعادن من المناجم، المياه الجوفية الملوثة، أماكن تجمع القمامة، ومواقع إنتاج الأسمنت. (العابد ابراهيم، 2015)

8. أنواع تلوث الماء**1.8. التلوث الطبيعي**

يُعتبر التلوث الطبيعي ظاهرة دائمة في البيئة المائية. حيث تُساهم المخلفات العضوية الناتجة عن الكائنات الحية، في تلوث المياه منذ ظهور هذه الكائنات على سطح الأرض. تتدفق هذه المخلفات إلى المسطحات المائية مع تدفق المياه الجارية، أو عند هطول الأمطار على التربة والصخور والرواسب المعدنية. رغم أن هذا التلوث طبيعي، إلا أن الأنشطة البشرية مثل إزالة الغابات وتدمير الغطاء النباتي قد تسهم في زيادة شدته.

2.8. التلوث الحراري

يحدث هذا النوع من التلوث في المناطق القريبة من محطات توليد الطاقة الكهربائية والمصانع التي تستخدم المياه للتبريد. حيث تضيف هذه المنشآت مياه بدرجة حرارة مرتفعة إلى المسطحات المائية، مما يؤدي إلى اختلال التوازن البيئي وتضرر الحياة النباتية والحيوانية في المياه، مما يعد أكثر خطورة في بعض الحالات من التلوث الناتج عن المواد الكيميائية الملوثة.

3.8. التلوث بالمبيدات

تعتبر المبيدات الزراعية من أخطر ملوثات المياه وأوسعها انتشارًا. يؤدي الإفراط في استخدامها إلى تلوث التربة والمياه، حيث تبقى نسبة كبيرة منها (حوالي 15%) في التربة لفترات طويلة قبل أن تختفي آثارها. وعند هطول الأمطار، يمكن أن تنتقل هذه المبيدات إلى المسطحات المائية، مما يؤثر سلبًا على الكائنات الحية، بما في ذلك النباتات التي تمتص هذه المبيدات وتتراكم فيها، ما يسبب انتقالها إلى الحيوانات التي تتغذى عليها.

4.8. التلوث بمياه الصرف الصحي

تمثل مياه الصرف الصحي ملوثًا خطيرًا، إذ تحتوي على فضلات عضوية، مواد كيميائية، بكتيريا، فيروسات، وغيرها من الكائنات الدقيقة. يتم تصريفها غالبًا إلى المسطحات المائية دون معالجتها، ما يؤدي إلى تلوث المياه بالمواد العضوية والمنظفات الكيميائية والبكتيريا الضارة والمعادن الثقيلة، الأمر الذي يسبب انخفاضًا في مستويات الأوكسجين ويؤدي إلى نفوق الكائنات المائية وتعفن المياه. كما تساهم في انتقال الأمراض المعدية عبر المياه.

5.8. التلوث البكتيري

نظرًا لفقر المياه النقية إلى العناصر الغذائية، لا تستطيع معظم البكتيريا النمو فيها، لكن بعضها قد يعيش فيها لفترات طويلة. وتشكل مياه الصرف الصحي المصدر الرئيسي لتلوث مياه الشرب بالبكتيريا الممرضة. في حال كانت مياه الصرف ناتجة عن أشخاص مرضى، تصبح مصدرًا خطرًا للأمراض المعدية مثل التيفوئيد والكوليرا والدوسنتاريا. لذلك، يُنصح دائمًا باختبار المياه ميكروبيولوجيًا وكيميائيًا لضمان سلامتها.

6.8. التلوث بالطحالب

تؤثر الطحالب على نوعية المياه عن طريق تغيير خصائصها مثل اللون والطعم والرائحة. وعادة ما تزداد هذه الطحالب بسبب تلوث المياه بمخلفات الصرف، حيث تعتبر هذه المخلفات سمادًا جيدًا لها. بالإضافة إلى التأثيرات البيئية، تؤدي الطحالب إلى مشاكل اقتصادية مثل تلف السفن التي تترسب عليها الطحالب، مما يسبب زيادة استهلاك الوقود وانخفاض سرعة السفن.

7.8. المخلفات الصناعية

يشكل تلوث المياه بالمواد الكيميائية الناتجة عن الأنشطة الصناعية مشكلة بيئية معقدة. من أبرز هذه الملوثات المعادن الثقيلة مثل الرصاص والزرنيق والكاديوم والنحاس والزنك، التي تؤثر سلبيًا على نوعية المياه.

8.8. التلوث الإشعاعي

يُعتبر التلوث الإشعاعي من أخطر أنواع التلوث البيئي، حيث يصل المواد المشعة إلى المياه نتيجة للتجارب النووية، تشغيل المفاعلات، محطات الطاقة النووية، أو تخزين النفايات المشعة في البحار والمحيطات. يؤدي ذلك إلى زيادة تركيز المواد المشعة في المياه ويشكل تهديدًا كبيرًا للحياة.

9.8. التلوث البيولوجي

يتسبب تلوث المياه بمياه الصرف الصحي في إدخال بكتيريا وفيروسات ضارة إلى البيئة المائية، مما يؤدي إلى تدهور نوعية المياه. وعندما يتم تصريف هذه المياه إلى المسطحات المائية دون معالجتها، تتعرض الكائنات المائية والمجتمعات المحيطة لهذه التهديدات. (هاني عبد القادر عمارة، 2011)

9. آثار تلوث الماء

1.9. الآثار الصحية على الإنسان

يرتبط تلوث الماء ارتباطاً وثيقاً بحدوث مشكلات صحية خطيرة للإنسان، إذ يُعد الماء وسيلة رئيسية لنقل الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض. تنتقل هذه الكائنات من شخص لآخر عبر استهلاك المياه الملوثة. يعاني سكان المناطق المتضررة من الأمطار الغزيرة والفيضانات، سواء في الدول المتقدمة أو النامية، من انتشار الأمراض المرتبطة بتلوث الماء. على سبيل المثال، يعتمد 10% من سكان العالم على الغذاء والخضراوات التي تروى بمياه ملوثة. من أبرز المشكلات الصحية التي يسببها تلوث الماء:

- أمراض الجهاز التنفسي.
- الإسهال.
- اضطرابات عصبية.
- أمراض القلب والأوعية الدموية.

يُلاحظ أن معدل الوفاة بسبب السرطان أعلى في المناطق الريفية مقارنة بالمناطق الحضرية، إذ يستخدم سكان الريف المياه غير المعالجة للشرب وغيره من الاستخدامات. كما يشكل تلوث الماء بالمواد الكيميائية خطراً خاصاً على النساء الحوامل، حيث يسبب انخفاض وزن الجنين ويؤثر سلباً على صحته عند الولادة. أما تلوث الماء بالمعادن، فيؤدي إلى مشاكل صحية مثل تساقط الشعر، تليف الكبد، والفشل الكلوي.

يمكن تصنيف الأمراض الناتجة عن تلوث الماء وفقاً لنوع المسبب، كما يلي:

• أمراض بكتيرية

- الإسهال: بسبب شرب المياه الملوثة بالبراز.
- الكوليرا: تسببها بكتيريا الضمة الكوليرية.
- داء الشيغيلات (الدوسنتاريا الباسيلية): تسببه بكتيريا الشيغيلا.
- السالمونيا (التيفويد): تسببه بكتيريا السالمونيللا في المياه الملوثة.

• أمراض فيروسية

- التهاب الكبد الفيروسي.
- التهاب الدماغ: ينتقل عن طريق بيض البعوض الكيولي من الماء الملوث.
- فيروس شلل الأطفال.

• أمراض طفيلية

- داء خفيات الأبواغ.
- الأميبا.
- داء زُحار الجيارديا.

2.9. الآثار البيئية لتلوث الماء

ينجم عن تلوث الماء العديد من الآثار السلبية التي تؤثر في البيئة بشكل عام، ومنها:

- **المطر الحمضي**: يتكون المطر الحمضي نتيجة تلوث الهواء بجزيئات الكبريت التي تضر الأسماك والنباتات في البحيرات والأنهار.
- **تغيرات كيميائية في الماء**: يؤدي التلوث إلى تغيير الحموضة ودرجة الحرارة والموصلية في المياه، مما يؤثر بشكل مباشر على الحياة البحرية.
- **القضاء على مصادر الغذاء البحرية**: التلوث المائي يهدد الحياة البحرية ويؤدي إلى تدمير أو تدهور مصادر الغذاء البحرية، مما يؤثر في التوازن البيئي للمساحات المائية.
- **التراكم الحيوي**: يتسبب التلوث في تراكم الملوثات في أجسام الكائنات الحية، مثل الزئبق، الذي يصعب تحليله أو إخراجها من الجسم. تنتقل هذه الملوثات إلى الكائنات التي تتغذى عليها، بما في ذلك الإنسان من خلال استهلاك المأكولات البحرية.
- **التحولات البيئية**: يؤدي تلوث الماء إلى تغييرات في النظام البيئي، قد لا تؤدي هذه التحولات إلى تدمير النظام البيئي بالكامل، ولكنها تضعفه وتقلل من كفاءته في التعامل مع الضغوط البيئية الأخرى مثل تدمير المواطن الطبيعية أو تغير المناخ. (Mehtab, 2017)

10. الاتجاهات والإجراءات اللازمة لحماية المياه من التلوث

توجد مجموعة من الوسائل والأساليب التي يمكن تطبيقها للحد من تلوث المسطحات المائية، ومنها:

- معالجة المياه الملوثة قبل تصريفها إلى المسطحات المائية: تعد معالجة المياه الناتجة عن الأنشطة البشرية من الإجراءات الضرورية للحد من التلوث، حيث يتم تنقية المياه وإزالة الملوثات قبل تصريفها في المسطحات المائية.

- استخدام الوسائل الميكانيكية لاحتجاز النفط الطافي على سطح المياه: يتم استخدام تقنيات ميكانيكية مثل الفلاتر والشبكات لاحتجاز النفط والمركبات الأخرى التي تطفو على سطح المسطحات المائية، مما يساعد في الحد من تلوث المياه بهذه المواد.

- إزالة الطحالب والنباتات المائية الملوثة: يتم التخلص من الطحالب والنباتات المائية بوسائل ميكانيكية وبشكل دوري، مما يمنع إعادة نموها ويقلل من تراكم الحشرات والطفيليات الضارة. كما يساعد هذا الإجراء في تقليل الحاجة لاستخدام المبيدات الحشرية، وبالتالي يقلل من تلوث المياه بتلك المواد.

- تقليل تلوث المياه الناتج عن المبيدات الحشرية: من خلال استخدام مواد كيميائية أقل ضرراً وأكثر فعالية في تصنيع المبيدات الحشرية، يمكن تقليل تأثير المبيدات على المسطحات المائية.

- التعامل مع التلوث الحراري للمياه: يمكن معالجة التلوث الحراري الناجم عن المياه الساخنة الناتجة من المصانع ومحطات توليد الطاقة، عن طريق استخدام برك تبريد أو أبراج خاصة، حيث يتم تبريد المياه قبل تصريفها في المسطحات المائية.

- سن قوانين وتشريعات صارمة: من الضروري أن يتم فرض تشريعات إلزامية على أصحاب المصانع والشركات لمعالجة المياه الملوثة قبل تصريفها في المسطحات المائية.

- التوعية المجتمعية: من خلال وسائل الإعلام المختلفة (المرئية، المسموعة، والمقروءة)، يجب توعية المواطنين بأهمية الحفاظ على المياه وضرورة تجنب الأفعال الملوثة مثل:

- عدم إلقاء القاذورات أو المواد السامة في المياه.

- تجنب التبرز والتبول في المسطحات المائية.

- عدم إلقاء الفضلات أو النفايات أو الحيوانات النافقة في المياه.
 - عدم التخلص من المواد الكيميائية الصناعية أو التجارية في المسطحات المائية.
- كما تتضمن الشريعة الإسلامية العديد من النصوص التي تحث على حماية المياه من التلوث، حيث ورد في القرآن الكريم قوله تعالى: "كُلُوا واشربوا من رزق الله ولا تعثوا في الأرض مفسدين"، مما يشير إلى مسؤولية الإنسان في الحفاظ على الموارد الطبيعية وعدم التسبب في فسادها. وقد روى جابر رضي الله عنه عن النبي صلى الله عليه وسلم قوله: "لا يبولن أحدكم في الماء الراكد ثم يغتسل فيه"، وذلك لتجنب الأمراض الناتجة عن التلوث، مثل مرض البلهارسيا. كما قال صلى الله عليه وسلم: "اتقوا الملاعن الثلاثة: البراز في الماء، وفي الظل، وطريق الناس"، مما يشير إلى تحريمه للملوثات التي قد تتسبب في ضرر للآخرين. وهذا يعكس القاعدة الفقهية التي تنص على أن "درء المفاسد مقدم على جلب المصالح".

11. دورة تنقية المياه

- تتضمن عملية تنقية المياه عدة مراحل رئيسية تهدف إلى إزالة الملوثات وتحسين جودة المياه، وهذه المراحل هي كما يلي:
- أ. **التصفية:** في هذه المرحلة، يتم إزالة الأجسام أو القطع الصلبة الكبيرة التي قد تعيق عمل المضخات أو تؤثر في العمليات اللاحقة لتنقية المياه.
 - ب. **الترويب:** تهدف هذه المرحلة إلى إزالة المواد التي تسبب تعكر المياه. يتم إضافة مواد كيميائية مجلطة مثل كبريتات الألومنيوم إلى المياه لتسريع تجميع الجسيمات الصغيرة التي لا تتسبب بسهولة، مما يساعد على تكوين جزيئات أكبر يمكن التخلص منها لاحقًا.
 - ج. **التنديف:** خلال هذه المرحلة، يتم تجميع الندف الناعمة التي تكونت في مرحلة الترويب. الهدف من هذه العملية هو تكوين جزيئات أكبر تسهل ترسيبها في مراحل لاحقة.
 - د. **الترسيب:** يُعد الترسيب المرحلة الثانية في عملية الترويب، حيث يتم فيها إزالة المواد المتدفقة من الماء عن طريق السماح للجسيمات الثقيلة بالاستقرار في قاع الحوض، مما يساهم في جعل الماء أكثر نقاءً.

هـ. **الترشيح:** بعد مرحلة الترسيب، يتم تمرير الماء من خلال وسط ترشيح، مثل الرمل، لاحتجاز المواد العالقة التي لم يتم إزالتها في عملية الترسيب. هذه العملية تساعد في الحصول على ماء صافٍ.

و. **التعقيم:** في هذه المرحلة الأخيرة، يتم تعقيم المياه باستخدام مواد مثل الكلور أو الأوزون أو الأشعة فوق البنفسجية. الهدف هو القضاء على البكتيريا الضارة والعوامل الممرضة التي قد تكون موجودة في الماء. تمثل هذه المراحل مجموعة متكاملة تساهم في توفير مياه نقية وصالحة للاستهلاك البشري.

خاتمة

يُعتبر التلوث ظاهرة ناتجة عن الأنشطة البشرية بشكل رئيسي، حيث لم تشهد الطبيعة أبدًا تدميرًا لنفسها دون تدخل الإنسان. وعلى الرغم من كل النعم التي تقدمها البيئة للإنسان، من خيرات طبيعية وحياء رفاهية، إلا أن الإنسان لم يقدر هذه النعم، بل على العكس، ساهم في تدمير النظام البيئي سواء بشكل مباشر أو غير مباشر، بقصد أو دون قصد. ومع تقدم الإنسان في اكتساب التقنيات الحديثة والمبتكرة في مختلف مجالات الحياة، تزداد ظاهرة التلوث وتنتشر. فالمصانع ووسائل النقل تعد من أبرز المصادر الملوثة للبيئة، وتؤثر بشكل سلبي على صحة الإنسان، مما أدى إلى ظهور العديد من الأمراض والأوبئة في عصرنا الحالي. العالم اليوم يواجه تحديًا كبيرًا ويجب أن يعي خطورة هذه الظاهرة. إذا لم تُتخذ إجراءات فعالة للحد منها، فإنها ستؤدي إلى تدمير الإنسان والطبيعة معًا.

الفصل الثاني:

الطرق والأساليب المستخدمة في تحليل جودة المياه

مقدمة

تعد جودة المياه أحد العوامل الحاسمة في استدامة الموارد المائية وحماية الصحة العامة والبيئة. يُعتبر تقييم جودة المياه عملية ضرورية لفهم مدى ملاءمتها للاستهلاك البشري والاستخدامات الصناعية والزراعية والبيئية. يعتمد هذا التقييم على مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تُحدد وفق معايير دولية ومحلية لضمان سلامة المياه وصلاحياتها للاستخدامات المختلفة.

يتناول هذا الفصل الطرق والأساليب المستخدمة في تحليل جودة المياه، بدءًا من المفاهيم الأساسية لجودة المياه ومعاييرها المختلفة، وصولًا إلى التقنيات الحديثة المستخدمة في مراقبتها. كما يستعرض دور الأدوات التحليلية، سواء في المختبرات أو باستخدام أجهزة محمولة، في قياس الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للمياه. بالإضافة إلى ذلك، يناقش الفصل تأثير العوامل البيئية والأنشطة البشرية على جودة المياه، وأهمية تطبيق استراتيجيات فعالة للحفاظ على الموارد المائية وضمان استدامتها.

1. مفهوم جودة المياه

2.1. تعريف جودة المياه

جودة المياه تُعرف بأنها "مقياس لمدى ملاءمة المياه لاستخدام معين بناءً على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المختارة" وفقًا للمسح الجيولوجي الأمريكي (USGS). وفقًا لهذا التعريف، تُعد جودة المياه مؤشرًا يعكس مدى ملاءمتها لتلبية احتياجات البشر، سواء للاستهلاك المباشر أو للأغراض المنزلية والصناعية، بالإضافة إلى توافرها مع المتطلبات البيئية للحياة البرية والنظم الإيكولوجية المائية.

دراسة جودة المياه ضرورية لتأثيرها المباشر على صحة الإنسان والاستخدامات الاقتصادية والبيئية. فالتغيرات في جودتها قد تؤثر سلبيًا على سلامة الاستهلاك وكفاءة الاستخدام الصناعي، وتخل بتوازن النظم البيئية. لذا يُعد تقييمها الدقيق أساسًا لإدارة الموارد المائية وتحقيق الاستدامة. (رعاية المياه، 2023)

3.1. مؤشرات جودة المياه

هي مقاييس كمية وقيم رقمية تستخدم لتقييم جودة المياه بشكل موضوعي، وتعتمد على مجموعة من المعايير الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. والتي تلعب دورًا حاسمًا في تقييم حالة المسطحات المائية والمجري المائية، حيث تسمح بمقارنة جودتها وتصنيفها بدقة. من خلال تحليل هذه المؤشرات يمكن تحديد مدى ملاءمة المياه وصلاحيته لمختلف الاستخدامات. وتقييم تأثير الأنشطة البشرية على جودتها، وتتبع التغيرات التي تطرأ عليها

بمرور الوقت. (الفطامه، صبوح، و جعفر، 2022)

4.1. فئات جودة المياه

تُصنّف حسب استخدامها إلى:

- للاستهلاك البشري: تضمن سلامة المياه للشرب والاستخدام اليومي.
- للاستخدام الصناعي والمنزلي: ملائمة للأغراض الصناعية والمنزلية.
- للبيئة: تحافظ على التوازن البيئي والأنظمة الطبيعية. (رعاية المياه، 2023)

5.1. أهمية قياس جودة المياه

تهدف المعايير والمبادئ التوجيهية المتعلقة بقياس جودة المياه إلى حماية الموارد المائية وضمان استدامتها من خلال تحديد الحدود المسموح بها للملوثات المختلفة. وتتباين هذه المعايير وفقًا للاستخدام المقصود للمياه، سواء للشرب أو الأغراض الترفيهية أو الري الزراعي أو للحفاظ على النظم البيئية المائية. تُعد معايير جودة مياه الشرب من أهم هذه المعايير، حيث تسعى إلى ضمان سلامة إمدادات المياه العامة من أي ملوثات قد تهدد الصحة العامة. تتولى الهيئات المعنية بحماية البيئة، مثل وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA)، مسؤولية وضع وتنفيذ هذه المعايير، بالتعاون مع الجهات الحكومية المعنية وطنياً ومحلياً. وبالإضافة إلى حماية صحة الإنسان، تشمل المعايير المتعلقة بجودة المياه أيضًا معايير لحماية الحياة المائية، بما في ذلك الأسماك والحياة البرية التي تعتمد على المياه كمصدر للغذاء والمأوى.

تُعد تقييمات جودة المياه أداة أساسية في إدارة الموارد المائية، حيث تساهم في تحديد مستوى التلوث في مصادر المياه المختلفة وتحديد طبيعة الملوثات. وبناءً على هذه التقييمات، يمكن وضع استراتيجيات فعالة للحد من التلوث، خاصة في ظل الضغوط المتزايدة على الموارد المائية نتيجة للتوسع في الأنشطة الزراعية والصناعية والاستخدامات المنزلية. تساهم هذه الاستراتيجيات في الحفاظ على جودة المياه وضمان استدامتها والحفاظ على التنوع البيولوجي في النظم البيئية المائية وضمان استمراريتها. (U.S. Geological Survey, 2001)

2. المعايير والمقاييس الدولية لجودة المياه

تُعد جودة الماء من العوامل الأساسية التي تؤثر على الصحة العامة والبيئة. ولضمان صلاحيته للاستهلاك، تختبر جودة الماء من عشرة طرق وفق مجموعة من الشروط أو الخصائص التي تعكس نقاء وسلامته:

- الأول: لونه، أن يكون صافياً.
- الثاني: رائحته، ألا تكون كريهة.
- الثالث: طعمه، عذبا حلواً، كما النيل والفرات.
- الرابع: وزنه، خفيفاً.
- الخامس: جريانه.
- السادس: منبعه.
- السابع: بروزه للشمس والرياح، لتصفيته.
- الثامن: حركته، سريع الجريان والحركة.
- التاسع: الوفرة، غزيراً، حيث يساهم في دفع الفضلات والأوساخ الملوثة.
- العاشر: مصبه، في اتجاه طبيعي، من الجنوب إلى الشمال أو من الغرب إلى الشرق.

تعتبر هذه الأوصاف الأكمل للجودة المثالية للمياه، التي لا تتوافر إلا في الأنهار المذكورة في الصحيحين: من حديث أبي هريرة رضي الله عنه قال - قال رسول الله ﷺ "سيحان وجيحان والنيل والفرات كل من أنهار الجنة".

(عمارة، 2013، صفحة 159)

1.2. معايير جودة المياه

معايير جودة المياه ثلاثة أنواع: الفيزيائية، الكيميائية، والبيولوجية. يتم تلخيص هذه المعايير في الجدول 1.

الجدول 1.II. أنواع معايير جودة المياه. (Summers, 2020, p. 4)

المعايير الفيزيائية	المعايير الكيميائية	المعايير البيولوجية
التعكر (TUR)	الرقم الهيدروجيني (pH)	البكتيريا
درجة الحرارة (T)	الحموضة	الطحالب
اللون	القلوية	الفيروسات
الطعم والرائحة	الكلوريد (Cl ⁻)	البروتوزوا (Protozoa)
المواد الصلبة (TS)	المتبقي من الكلور	
الموصلية الكهربائية (EC)	الأرثوفوسفات (PO ₄ ³⁻)	
	النيتروجين (N)	
	الفلورايد (F ⁻)	
	الحديد والمنغنيز (Fe & Mn)	
	النحاس والزنك (Cu & Zn)	
	العسر (TH)	
	الأوكسجين المذاب (DO)	
	الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)	
	الطلب البيوكيميائي للأوكسجين (BOD)	
	المواد السامة غير العضوية و العضوية	
	المواد المشعة	

1.1.2. المعايير الفيزيائية لجودة المياه

• التعكر

التعكر هو مقياس لمدى تشويش الماء نتيجة لوجود غمامة تؤثر على قدرة الضوء في المرور من خلاله. يتمثل مصدر التعكر في المواد العالقة مثل الطين، الرواسب، المواد العضوية، العوالق، وغيرها من الجسيمات

الدقيقة التي توجد في الماء. (Summers, 2020, p. 4)

يتم قياس باستخدام جهاز "nephelometric turbidimeter"، الذي يعبر عن مستوى التعكر بوحدة NTU أو TU. تُعادل وحدة TU مقدار 1 ملغ/لتر من السيليكا في التعليق. يمكن ملاحظة التعكر الذي يتجاوز 5

NTU بالعين المجردة، بينما قد يتجاوز التعكر في المياه الطينية 100 NTU. (Summers, 2020, p. 5)

• درجة الحرارة

تؤثر بشكل كبير على خصائص الماء التي تتعلق بجودته للاستهلاك، مثل قابليته للشرب، لزوجته، ذائبيته، الروائح، والتفاعلات الكيميائية. كما أن العديد من عمليات المعالجة، مثل الترسيب، والمعالجة بالكلور، والطلب الأوكسجين البيولوجي (BOD) تعتمد على درجة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، تؤثر درجة الحرارة على عملية امتصاص المعادن الثقيلة الذائبة في الماء. يشير البحث إلى أن معظم الأفراد يفضلون شرب الماء عندما تكون درجة حرارته تتراوح بين 10-15°C. (Summers, 2020, p. 5)

تتأثر درجة حرارة الماء بعوامل متعددة، منها درجة حرارة الهواء المحيط، والتغيرات الموسمية، والظروف الجيولوجية، وعمق المياه بالنسبة لسطح الأرض. (Gaujou, 1995) وتتسم المياه السطحية في الأنهار والبحيرات والخزانات بتباين كبير في درجات الحرارة حسب الفصول، إذ يمكن أن تتراوح بين 2 درجة مئوية في الشتاء و30 درجة مئوية في الصيف. أما فيما يتعلق بالأسباب البشرية لارتفاع درجة الحرارة، فتُعزى بشكل رئيسي إلى المحطات الحرارية والنووية، التي تمثل حوالي 70 إلى 80% من هذه الظاهرة، بينما تساهم الصناعات المعدنية والكيميائية والغذائية في النسبة المتبقية. (Guerraiche, 2017)

• اللون

يكتسب الماء لونه نتيجة للمواد المتحللة من الكائنات العضوية مثل النباتات، وكذلك المواد غير العضوية مثل التربة والحجارة والصخور. على الرغم من أن اللون لا يشير إلى مشاكل صحية، إلا أنه يعد غير مرغوب فيه من الناحية الجمالية. يتم قياسه عن طريق مقارنة عينة الماء مع محاليل قياسية أو أقراص زجاجية ملونة. تُعرّف وحدة اللون بأنها اللون الناتج عن محلول يحتوي على 1 ملغ/لتر من البلاطين (كلوريد البوتاسيوم البلاطيني (K₂PtCl₆)). يمكن تصنيف لون عينة الماء إلى نوعين:

- اللون الظاهر: يشمل اللون الناتج عن المكونات المذابة والعالقة في العينة.
- اللون الحقيقي: يتم قياسه بعد تصفية العينة لإزالة المواد العالقة.

يتم تصنيف اللون على مقياس يتراوح من 0 (صافٍ) إلى 70 وحدة لونية، حيث يعادل الماء النقي عديم اللون 0 وحدة لونية. (Summers, 2020, p. 5)

• الطعم والرائحة

يمكن أن يكون الطعم والرائحة في الماء بسبب وجود مواد أجنبية مثل المركبات العضوية، المواد غير العضوية، أو الغازات الذائبة. قد تكون هذه المواد مصدرها طبيعيًا أو ناتجة عن الأنشطة المنزلية أو الزراعية .

يتم تحديد القيمة العددية للطعم أو الرائحة من خلال قياس حجم العينة A وتخفيفها بمقدار معين من العينة B من الماء المقطر عديم الرائحة، بحيث يصبح الطعم أو الرائحة الناتجة عن الخليط قابلاً للكشف عند حجم الخليط الإجمالي 200 مل. يتم التعبير عن وحدة الرائحة أو الطعم باستخدام الرقم العتبي بوحدات TON (الرقم العتبي للرائحة) أو TTN (الرقم العتبي للطعم)، وفقاً للمعادلة التالية:

$$\text{TON أو TTN} = (A + B) / A \quad (\text{Summers, 2020, p. 6})$$

• المواد الصلبة

المواد الصلبة في الماء يمكن أن توجد إما في حالة ذائبة أو عالقة. يتم تحديد هذين النوعين من المواد الصلبة عن طريق تصفية عينة الماء باستخدام مرشح من الألياف الزجاجية. تُعرف المواد الصلبة العالقة بأنها المواد التي تُحتجز في أعلى المرشح، بينما تمر المواد الصلبة الذائبة عبر المرشح مع الماء.

عند تبخير الجزء المصفى من عينة الماء في طبق صغير، تُعرف المواد الصلبة المتبقية بالمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS). يُعبّر عن المواد الصلبة الكلية (TS) بالمعادلة التالية:

$$\text{(TSS) المواد الصلبة العالقة الكلية} + \text{(TDS) المواد الصلبة الذائبة الكلية} = \text{(TS) المواد الصلبة الكلية}$$

يمكن تصنيف المياه بناءً على كمية المواد الصلبة الذائبة الكلية لكل لتر كما يلي:

- المياه العذبة: أقل من 1500 مجم/لتر TDS .
- المياه المالحة: من 1500 إلى 5000 مجم/لتر TDS .
- المياه المالحة الشديدة: أكثر من 5000 مجم/لتر TDS . (Summers, 2020, pp. 6-7)

• الموصلية الكهربائية (EC)

الموصلية الكهربائية (EC) للماء هي مقياس لقدرة المحلول على توصيل التيار الكهربائي. بما أن التيار الكهربائي يُنقل عبر الأيونات في المحلول، فإن الموصلية تزداد مع زيادة تركيز الأيونات. لذلك، تُعد الموصلية

الكهربائية من المعايير الرئيسية المستخدمة لتحديد صلاحية المياه للاستخدام في الري ومكافحة الحرائق. تُعتبر المياه النقية غير موصلة جيدة للكهرباء. الموصلية الكهربائية النموذجية للمياه هي كما يلي:

▪ المياه فائقة النقاء: 5.5×10^{-6} S/m

▪ مياه الشرب: 0.005–0.05 S/m

▪ مياه البحر: 5 S/m

يمكن استخدام الموصلية الكهربائية لتقدير قيمة المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) وفقاً للمعادلة التالية:

$$\text{TDS (مجم/لتر)} \cong \text{EC (dS/m أو ميكرومهو/سم أو } (0.7 - 0.55) \times$$

تُستخدم هذه القيمة لتقدير قوة الأيونات، وخاصة في تطبيقات إعادة شحن المياه الجوفية باستخدام مياه الصرف

المعالجة. الطريقة الأكثر شيوعاً لقياس الموصلية الكهربائية هي الطريقة الكهربائية. (Summers, 2020, p. 8)

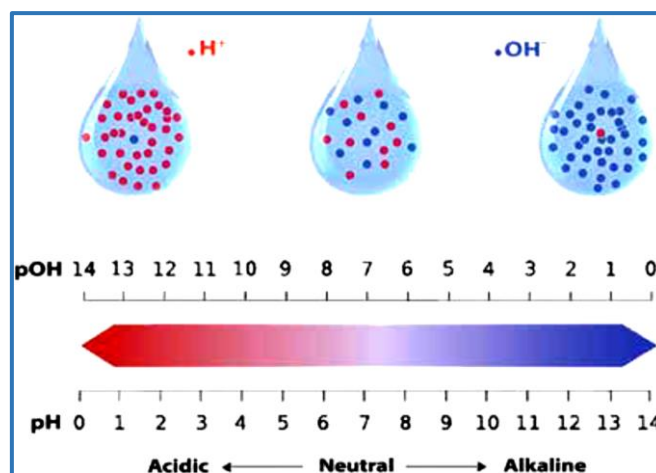
الجدول 2.II. العلاقة بين التمدن والتوصيلية الكهربائية. (Rodier, Legube, & Merlet, 2009)

معدل التمدن	التوصيلية الكهربائية (EC)
تمعدن ضعيف جداً	$CE < 100 \mu\text{s/cm}$
تمعدن ضعيف	$100 < CE < 200 \mu\text{s/cm}$
تمعدن متوسط	$200 < CE < 333 \mu\text{s/cm}$
تمعدن متوسط معزز	$333 < CE < 666 \mu\text{s/cm}$
تمعدن كبير	$666 < CE < 1000 \mu\text{s/cm}$
تمعدن مرتفع	$CE > 1000 \mu\text{s/cm}$

2.1.2. المعايير الكيميائية لجودة المياه

• الأس الهيدروجيني (pH)

يُعد مقياس الـ pH من المعايير الأساسية لتقييم جودة المياه، حيث يعبر عن قوة الحمضية أو القاعدية ويُعرف على أنه اللوغاريتم السالب لتركيز أيونات الهيدروجين في المحلول. كما هو موضح في الشكل يتراوح الـ pH من 0 إلى 14، حيث يُعتبر الرقم 7 محايداً، ويشير الـ pH الأقل من 7 إلى الحموضة، بينما يشير الرقم الأكبر من 7 إلى القاعدية. يكون الماء النقي محايداً في الظروف العادية، حيث يتراوح الـ pH حول 7.0، بينما الأمطار الطبيعية عادةً ما تحتوي على pH حوالي 5.6 بسبب ثاني أكسيد الكربون في الجو .



الشكل II.1. درجة الحموضة في الماء. (Summers, 2020, pp. 8-9)

تتراوح قيم الـ pH الأمانة لمياه الشرب بين 6.5 و 8.5. يُظهر التغير في وحدة واحدة على مقياس الـ pH تغيراً بعشرة أضعاف في الحموضة أو القاعدية. يمكن قياس الـ pH باستخدام طريقتين: الكهرومترية والطريقة اللونية. تعتبر درجة الحموضة (pH) من العوامل الأساسية التي تؤثر في نوعية المياه وصلاحياتها لمختلف الاستخدامات. فقد يؤدي ارتفاعها أو انخفاضها بشكل مفرط إلى تأثيرات سلبية على جودة المياه والأنظمة البيئية. زيادة درجة الحموضة تسبب طعماً مرّاً، وتقلل من فعالية تطهير المياه بالكلور. كما يرتبط ارتفاعها بزيادة مستويات الأوكسجين في الماء، وانخفاضها يؤدي إلى تآكل المعادن والمواد الأخرى. (Summers, 2020, pp. 8-9)

• الحموضة

تُعرف الحموضة بأنها مقياس لتركيز الأحماض في المحلول. وفيما المياه، فإن الحموضة تمثل القدرة الكمية للماء على معادلة قاعدة قوية إلى مستوى pH محدد، وهو ما يعكس قدرة الماء على امتصاص أو تقليل تأثير الأحماض. غالباً ما تكون الحموضة في المياه ناتجة عن تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء، بالإضافة إلى الأحماض المعدنية والأملاح المحللة مثل كبريتات الحديد والألمنيوم. تؤثر الأحماض في العديد من العمليات البيئية والكيميائية، مثل التآكل، والتفاعلات الكيميائية، والنشاطات البيولوجية. يتم قياس درجة الحموضة عادة من خلال عملية المعايرة باستخدام هيدروكسيد الصوديوم القياسي (N0.02)، ويُستخدم الفينولفثالين كمؤشر لتحديد النقطة النهائية للمعايرة. (APHA, 2005)

• القلوية

تعرف قلوية المياه بقدرتها على معادلة الأحماض، وهي ناتجة عن مجموع جميع القواعد القابلة للمعايرة الموجودة فيها. يُعتبر قياس قلوية المياه ضروريًا لتحديد كمية الجير والصودا المطلوبة في عمليات معالجة المياه. تعود قلوية المياه بشكل أساسي إلى وجود أيونات الهيدروكسيد (OH^-)، وأيونات البيكربونات (HCO_3^-)، وأيونات الكربونات (CO_3^{2-}) أو مزيج من اثنين منها. ومع ذلك، فإن وجود أيونات الهيدروكسيد (OH^-) وأيونات البيكربونات (HCO_3^-) معًا في الماء غير ممكن، حيث يتفاعلان لتكوين أيونات الكربونات (CO_3^{2-}).

يتم تحديد القلوية عن طريق المعايرة بمحلول حمضي قياسي (حمض الكبريتيك تركيز 0.02N)، باستخدام مؤشرات انتقائية مثل الميثيل البرتقالي أو الفينول فثالين. تشير المستويات المرتفعة من الحموضة أو القلوية في المياه غالبًا إلى التلوث الصناعي أو الكيميائي، ويمكن أن تنشأ هذه الظواهر أيضًا من مصادر طبيعية مثل البراكين. توفر الحموضة والقلوية في المياه الطبيعية تأثيرًا عازلًا يحمي الكائنات المائية، بما في ذلك الأسماك، من التغيرات المفاجئة في درجة الحموضة (pH). (Summers, 2020, p. 10).

• الكلوريد

يُعد الكلوريد من العناصر التي تتواجد بشكل طبيعي في المياه الجوفية والجداول والبحيرات. ومع ذلك، فإن وجود تركيزات مرتفعة نسبيًا من الكلوريد في المياه العذبة (تزيد عن 250 ملغ/لتر) يُمكن أن يكون مؤشرًا على تلوث ناجم عن مياه الصرف الصحي. تدخل أيونات الكلوريد إلى المياه السطحية من مصادر متعددة، تشمل الصخور الغنية بالكلوريد، والجريان الزراعي، ومياه الصرف الصحي.

لا تُسبب أيونات الكلوريد (Cl^-) في مياه الشرب تأثيرات صحية ضارة على الصحة العامة، إلا أن التركيزات العالية منها قد تؤدي إلى ظهور طعم مالح غير مرغوب فيه لدى معظم الأفراد. وعلى الرغم من أن الكلوريد نفسه ليس ضارًا للبشر، إلا أن الصوديوم، كعنصر من مكونات ملح الطعام (NaCl)، يرتبط بأمراض الكلى والقلب. بالإضافة إلى ذلك، تُعد الكميات الصغيرة من الكلوريد ضرورية لوظائف الخلايا الحيوية في الكائنات الحية، بما في ذلك النباتات والحيوانات.

يُلاحظ أن كلوريد الصوديوم يُضفي طعمًا مالحًا على المياه عند تركيز 250 ملغ/لتر، بينما لا يتم الكشف عن طعم كلوريد المغنيسيوم أو الكالسيوم عادةً إلا عند مستويات أعلى، تصل إلى حوالي 1000 ملغ/لتر. وفقًا للمعايير الدولية لمياه الشرب، يُوصى بألا تتجاوز مستويات الكلوريد في المياه العامة 250 ملغ/لتر لضمان جودة المياه.

توجد العديد من الطرق لقياس تركيز الكلوريد في المياه، إلا أن الطريقة الأكثر شيوعًا هي طريقة المعايرة باستخدام نترات الفضة، نظرًا لدقتها وسهولة تطبيقها. (Summers, 2020, p. 10)

• الكلور المتبقي

الكلور (Cl_2) لا يتواجد بشكل طبيعي في المياه، بل يتم إضافته للتطهير. وعلى الرغم من أن الكلور في حالته الغازية يعد مادة سامة، إلا أن تركيزه في المحاليل المائية المخففة لا يشكل خطرًا على صحة الإنسان. في مياه الشرب، يُعتبر التركيز المتبقي المثالي للكلور حوالي 0.2 ملغ/لتر. يساهم هذا التركيز المتبقي في ضمان جودة صحية عالية للمياه في نظام توزيع المياه. يمكن للكلور أن يتفاعل مع المواد العضوية الموجودة في المياه، مكونًا مركبات سامة تُسمى ثلاثي الهالوميثانات (THMs)، وهي مواد مسرطنة مثل الكلوروفورم ($CHCl_3$). عادةً ما يتم قياس الكلور المتبقي في المياه باستخدام أدوات مقارنة الألوان أو أجهزة الطيف الضوئي، التي توفر دقة وموثوقية في قياس التركيزات المختلفة للكلور المتبقي. (Summers, 2020, p. 11)

• الكبريتات

تُعد أيونات الكبريتات (SO_4^{2-}) من المركبات التي توجد بشكل طبيعي في المياه. وعادةً ما يُعزى ارتفاع تركيزها في المياه الطبيعية إلى تسرب الرواسب الطبيعية من كبريتات الصوديوم (ملح غلاوبر) أو كبريتات المغنيسيوم (ملح إبسوم). في حال تم استهلاك مياه شرب تحتوي على تركيزات مرتفعة من الكبريتات، قد يحدث ظهور طعوم غير مستساغة أو تأثيرات مسهلة غير مرغوب فيها، إلا أن هذه التركيزات لا تشكل خطرًا كبيرًا على الصحة العامة. (Mackenzie & David, 2008)

• الأروثوسفات

يتواجد الفوسفور بالشكل الطبيعية بكميات محدودة في المياه السطحية، ويُعدّ عنصرًا رئيسيًا يؤثر في إنتاجية النظم البيئية المائية. (Rousseau, Roy, Cantin, & Cardinal, 2004) يلعب هذا العنصر دورًا جوهريًا في دعم نمو الطحالب، حيث يمكن أن يساهم في تعزيز تكاثرها، مما يؤدي إلى ظاهرة التخثث (Eutrophication) في مياه البحيرات. تُصنّف الفوسفات ضمن الأنيونات التي تمتلك قدرة عالية على التثبيت بواسطة التربة. يُعتبر تركيز الفوسفات الذي يتجاوز 0.5 ملغ/لتر مؤشرًا واضحًا على وجود تلوث. (Sarkar, et al., 2007) ووفقًا للمعايير الجزائرية لجودة مياه الشرب، فإن الحد الأقصى المسموح به لتركيز هذا الأيون هو 0.5 ملغ/لتر.

• النيتروجين

يتواجد النيتروجين في المياه بأربعة أشكال رئيسية: النيتروجين العضوي، نيتروجين الأمونيا، نيتروجين النتريت، ونيترجين النتريت. في حالة تلوث المياه بمياه الصرف الصحي، يكون معظم النيتروجين في شكلين هما النيتروجين العضوي والأمونيا، حيث تتحول هذه المركبات بفعل الكائنات الدقيقة إلى نيتريتات ونيترات. يعد النيتروجين في شكل النتريت من المغذيات الأساسية لنمو النباتات، وقد يُعتبر عاملاً محددًا لنموها. يمكن أن يؤدي التركيز المرتفع للنتريت في المياه السطحية إلى تحفيز نمو الطحالب بشكل سريع، مما يساهم في تدهور جودة المياه. كما يمكن أن تنتقل إلى المياه الجوفية نتيجة لاستخدام الأسمدة الكيميائية في المناطق الزراعية.

(Summers, 2020, p. 11)

• الفلوريد

تُساهم كميات معتدلة من أيونات الفلورايد (F^-) في مياه الشرب في تعزيز صحة الأسنان بشكل فعال. يعتبر التركيز الذي يصل إلى حوالي 1.0 ملغ/لتر فعالًا في الوقاية من تسوس الأسنان. ومع ذلك، فإن تناول كميات مفرطة من الفلورايد يؤدي إلى حدوث تلون في الأسنان، وهي حالة تُعرف بتسمم الفلورايد السني. يتم تحديد المستويات القصوى المسموح بها من الفلورايد في إمدادات المياه العامة بناءً على المناخ المحلي. ففي المناطق ذات المناخ الدافئ، يكون الحد الأقصى المسموح به من الفلورايد في مياه الشرب هو 1.4 ملغ/لتر، بينما في

المناطق الباردة قد يصل إلى 2.4 ملغ/لتر. (Summers, 2020, p. 11)

• الحديد والمنغنيز

رغم أن الحديد (Fe) والمنغنيز (Mn) لا يشكلان تهديدًا صحيًا مباشرًا، إلا أن وجودهما في مياه الشرب يمكن أن يسبب طعمًا مرًا ملحوظًا حتى في التركيزات المنخفضة جدًا. تتواجد هذه المعادن عادة في المياه الجوفية في شكل أيونات الحديد الثنائي (Fe^{2+}) والمنغنيز الثنائي (Mn^{2+}). وعند تعرض هذه الأيونات للهواء، فإنها تتحول إلى الأشكال غير القابلة للذوبان مثل الحديد الثلاثي (Fe^{3+}) والمنغنيز الثلاثي (Mn^{3+})، مما يؤدي إلى تعكير المياه وجعلها غير مقبولة لدى معظم الأفراد.

يتم قياس تركيز الحديد والمنغنيز في المياه بالعديد من الطرق التحليلية المتقدمة مثل التحليل الطيفي سواء للامتصاص الذري، للامتصاص الذري بالهبوب، للامتصاص الذري بالبخر البارد، للامتصاص الذري بالتيار الكهربائي، وكذلك التحليل الطيفي باستخدام البلازما المقترن بالحث (ICP). (APHA, 2005)

• النحاس والزنك

يعد كل من النحاس (Cu) والزنك (Zn) غير سامين عند وجودهما بتركيزات منخفضة، وضروريين لنمو النباتات والحيوانات ولصحة الإنسان. ومع ذلك يمكن أن يتسبب في جعل طعم المياه غير مرغوب فيه. عند التركيزات المرتفعة، يمنح الزنك مظهرًا حليبيًا للمياه. يتم قياس تركيزات النحاس والزنك باستخدام نفس أساليب التحليلية لقياس الحديد والمنغنيز. (Summers, 2020, p. 11)

• العسر

مصطلح يُستخدم للإشارة إلى خصائص المياه ذات التركيزات العالية من المعادن المذابة. تعد أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) والمغنيسيوم (Mg^{2+}) هي المسبب الرئيسي للعسر في المياه. تدخل هذه الأيونات إلى المياه من خلال تفاعلها مع التربة والصخور، توجد عادة على شكل بيكربونات وكبريتات، وأحيانًا على شكل كلوريدات ونترات. عادةً ما تكون المياه الجوفية أكثر عسرة من المياه السطحية. وينقسم العسر إلى نوعين رئيسيين:

- العسر المؤقت: الناتج عن البيكربونات والبيكربونات، ويمكن إزالته عن طريق الغليان.
- العسر الدائم: الذي يبقى بعد الغليان، ناتج في الغالب عن الكبريتات والكلوريدات.

يتم قياس العسر عادة بطريقة المعايرة بحمض الإيثيلين ديامين تترأسياتك (EDTA) مع مؤشرات إيبيوكروم

بلاك وأزرق. ويُعبر عنه بوحدات ملغ/لتر من كربونات الكالسيوم (CaCO₃). (Summers, 2020, p. 12)

الجدول 3.II. تصنيف المياه حسب تركيز العسر الكلي. (Tchobanoglous, Peavy, & Rowe, 1985)

تركيز العسر (مليغرام/لتر كربونات الكالسيوم)	التصنيف
< 50 mg/L as CaCO ₃	مياه لينية
350–150 mg/L as CaCO ₃	مياه متوسطة
150–300 mg/L as CaCO ₃	مياه صلبة
> 300 mg/L as CaCO ₃	مياه شديدة الصلابة

• الأكسجين المذاب

يُعتبر الأكسجين المذاب (DO) معيار أساسي لجودة المياه، وهو من الاختبارات الرئيسية لتحديد تلوث المياه. كلما زاد تركيز الأوكسجين المذاب في المياه (الأكسجين قابل للذوبان في الماء بنسب منخفضة)، تحسنت جودتها. يختلف مقدار الأكسجين المذاب في المياه بناءً على مجموعة من العوامل مثل الضغط، ودرجة الحرارة، وملوحة المياه. من ناحية صحية، لا يشكل الأكسجين المذاب خطراً مباشراً على صحة الإنسان، إلا أن المياه التي تحتوي على كميات قليلة أو منعدمة من الأوكسجين قد تكون غير مستساغة للبعض. تستخدم ثلاث طرق رئيسية لقياس تركيز الأوكسجين المذاب في المياه: الطريقة اللونيترية، التي تُعد سريعة وغير مكلفة، وطريقة المعايرة باستخدام وينكلر التي تُعتبر الطريقة التقليدية، وأخيراً الطريقة الكهربائية. (Summers, 2020, p. 13)

• الطلب البيوكيميائي للأكسجين (BOD)

يُعد الطلب البيوكيميائي للأكسجين (BOD) مقياساً هاماً لتحديد كمية الأكسجين التي تستهلكها الكائنات الدقيقة في المياه، أثناء تحليل المواد العضوية إلى مصدر غذائي ومركبات بسيطة مثل ثاني أكسيد الكربون والماء فتستفيد الكائنات الدقيقة من الطاقة المنبعثة للنمو والتكاثر. خلال هذه العمليات، يتم استهلاك الأكسجين المذاب (DO) في المياه. وفي حال عدم تعويضه بشكل مستمر باستخدام وسائل طبيعية أو صناعية، فإن تركيز الأكسجين المذاب سينخفض مع استمرار تحلل المواد العضوية بواسطة الكائنات الدقيقة. تُعرف الحاجة إلى الأكسجين بالطلب البيوكيميائي للأكسجين (BOD). (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003)

• الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)

يُعد الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD) مقياسًا هامًا لتحديد كمية الأوكسجين المطلوبة لتحلل كل المواد العضوية في الماء، سواء القابلة أو غير القابلة للتحلل. يعتمد هذا المقياس على اختبار كيميائي يتم فيه استخدام مواد مؤكسدة قوية مثل ثنائي كرومات البوتاسيوم، إلى جانب حمض الكبريتيك والحرارة، وتظهر النتيجة خلال فترة زمنية قصيرة لا تتجاوز ساعتين. (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003)

• المواد السامة

أ. **المواد السامة غير العضوية:** توجد مجموعة متنوعة من المواد السامة غير العضوية في المياه، يمكن أن تشكل تهديدًا لصحة الإنسان حتى بكمياتها الصغيرة. بعضها ينشأ من مصادر طبيعية، والعديد منها ينتج عن الأنشطة الصناعية وجراء الإدارة غير السليمة للنفايات. يمكن تصنيف هذه المواد إلى:

▪ **المركبات المعدنية:** تشمل بعض المعادن الثقيلة السامة: الكاديوم (Cd)، الكروم (Cr)، الرصاص (Pb)، الزئبق (Hg)، الفضة (Ag)، الزرنيخ (As)، الباريوم (Ba)، الثاليوم (Tl)، والسيلينيوم (Se)، تتمتع بتأثيرات ضارة ومتنوعة، تختلف من معدن إلى آخر. بعضها قد يكون سمومًا حادة وقاتلة مثل الزرنيخ والكروم، بينما يمكن أن يؤدي بعضها مثل الكاديوم، الزئبق، الرصاص، والثاليوم إلى أمراض مزمنة. يمكن تحديد تركيزها باستخدام تقنيات قياس متقدمة مثل جهاز الامتصاص الذري، الطيف الضوئي، أو البلازما المقترنة الحثية (ICP) في حال وجود تراكيزات منخفضة.

▪ **المركبات غير المعدنية:** تشمل هذه الفئة مركبات مثل النترات (NO_3^-) والسيانيد (CN^-)، عادة ما يتم قياس السيانيد باستخدام أساليب لونية، تيتريومترية، أو كهربائية.

ب. **المواد السامة العضوية:** يوجد أكثر من 100 مركب عضوي في المياه تم تصنيفها كمركبات سامة، ليست طبيعية بل هي صنع الإنسان. تشمل المبيدات، والمذيبات، والمنظفات والمعقمات ويتم قياسها باستخدام تقنيات تحليلية متقدمة، مثل التحليل الكروماتوغرافي الغازي (GC)، والتحليل الكروماتوغرافي السائل عالي الأداء (HPLC)، والطيف الكتلي. (Summers, 2020, pp. 14-15)

• المواد المشعة

مصدرها النفايات الناتجة عن محطات الطاقة النووية، والصناعات والأبحاث الطبية التي تستخدم المواد الكيميائية المشعة، بالإضافة إلى تعدين خامات اليورانيوم. عند تحلل هذه المواد، يتم إطلاق إشعاعات بيتا وألفا وغاما. وحدة النشاط الإشعاعي المستخدمة في تطبيقات جودة المياه هي البيكو كوري لكل لتر (pCi/L) ، حيث يعادل 1 pCi ما يقارب تحلل ذرتين في الدقيقة. تتوفر العديد من الأساليب التحليلية المتقدمة لقياس هذه المواد. غاز الرادون يشكل مصدر قلق صحي كبير حيث إنه يحدث بشكل طبيعي في المياه الجوفية ويعد من الغازات شديدة الثقل. فيما يتعلق بمياه الشرب توجد معايير معتمدة تُستخدم بشكل شائع لقياس الجسيمات ألفا، الجسيمات بيتا، المصادر الفوتونية، بالإضافة إلى الراديوم 226 و-228، واليورانيوم. (Summers, 2020, p. 15)

3.1.2. المعايير البيولوجية لجودة المياه

تُعد الكائنات الحية مؤشرات مهمة لجودة المياه، حيث يساهم التنوع المتوازن في تقييم صحة النظم البيئية باستخدام مؤشر تنوع الأنواع (SDI). كما تُستخدم بعض الكائنات كدلائل على وجود ملوثات. يحتفظ جسم الإنسان بتوازن طبيعي للميكروبات في الجهاز الهضمي ومنها بكتيريا القولون. (Summers, 2020, p. 15)

• البكتيريا

تُعد البكتيريا كائنات أحادية الخلية. تتخذ أشكال خلوية رئيسية: الشكل العصوي (Bacillus)، والشكل الكروي (Coccus)، والشكل الحلزوني (Spirellus). سريعة التكاثر في الظروف البيئية المناسبة مثل وفرة الغذاء، درجة الحرارة المثلى، ومستوى الأس الهيدروجيني (pH). يتيح هذا النمو السريع للبكتيريا إمكانية اكتشافها وعدّها على وسط غذائي مناسب. تتنوع بناءً على خصائصها الأيضية: البكتيريا الهوائية (Aerobic Bacteria)، البكتيريا اللاهوائية (Anaerobic Bacteria)، البكتيريا المتحملة (Facultative Bacteria). تتسبب في العديد من الأمراض الخطيرة المنقولة عن طريق المياه، مثل التيفوئيد، والحمى نظيرة التيفوئيد،

والبريميات، والتولاريميا، والزحار، والكوليرا. (Summers, 2020, p. 16)

• الطحالب

تُعد الطحالب كائنات نباتية مجهرية تحتوي على أصباغ التمثيل الضوئي، مما يمكنها من القيام بعملية البناء الضوئي. وتصنّف ككائنات ذاتية التغذية (Autotrophic Organisms)، تلعب دورًا محوريًا في معالجة مياه الصرف الصحي، حيث تساهم في تحسين جودة المياه. على الرغم من أهميتها، تُعتبر مصدرًا للإزعاج في إمدادات المياه بسبب المشكلات المرتبطة بالطعم والرائحة التي تسببها. كما يمكن أن تشكل بعض أنواع الطحالب

تهديدات بيئية وصحية خطيرة. (Summers, 2020, p. 16)

• الفيروسات

تُعتبر الفيروسات من أصغر التراكيب البيولوجية المعروفة، حيث تحتوي على كافة المعلومات الجينية الضرورية لتكاثرها بشكل مستقل. ولا يمكن ملاحظتها إلا باستخدام مجهر إلكتروني عالي القدرة. هي كائنات طفيلية تعتمد على مضيف حي للبقاء والتكاثر، ويمكنها المرور عبر المرشحات التي تمنع مرور البكتيريا. تُعد الفيروسات الممرضة المنقولة عبر المياه من مسببات أمراض مثل التهاب الكبد الفيروسي وشلل الأطفال. يمكن تعطيل الفيروسات المنقولة عبر المياه من خلال عملية التعقيم في محطات معالجة المياه. (Summers, 2020, p. 16)

• الأوليات

تُعد الأوليات كائنات حيوانية مجهرية أحادية الخلية، تتغذى على الجسيمات العضوية الصلبة والبكتيريا والطحالب، وتُعتبر مصدرًا غذائيًا للحيوانات متعددة الخلايا على مستويات غذائية أعلى. تتميز بقدرتها على تكوين الأكياس (Cysts)، وهي هياكل مقاومة يصعب القضاء عليها بعمليات التعقيم التقليدية. تعيش الأوليات المائية بشكل حر في الماء، وتُعرف أحيانًا بالعوالق الحيوانية (Zooplankton). (Summers, 2020, p. 16)

• الكائنات المؤشرة

تُعد بكتيريا الكوليفورم من المؤشرات البيولوجية الهامة التي تُستخدم لتقييم جودة المياه ودرجة تلوثها. توجد الكوليفورم الممرضة بشكل طبيعي في الجهاز الهضمي للبشر، حيث يتم إفراز ملايين منها مع الفضلات البشرية. وبالتالي فإن المياه التي تعرضت للتلوث مؤخرًا بالمجاري تحتوي عادة على بكتيريا الكوليفورم.

أحد الأنواع المميزة من الكوليفورم التي توجد في مياه الصرف الصحي المنزلية هو إشريكية قولونية ("E. coli" أو Escherichia coli). وتُعتبر بكتيريا الكوليفورم كائنات مقاومة للبيئة، حيث تتمكن من البقاء في المياه لفترة أطول مقارنة بمعظم الميكروبات الممرضة الأخرى. تُستخدم عادة طريقتان لاختبار وجود بكتيريا الكوليفورم في المياه: طريقة الترشيح بالغشاء وطريقة التخمر في الأنابيب المتعددة. (Summers, 2020, p. 17)

2.2. متطلبات جودة المياه

تختلف متطلبات جودة المياه بناءً على الاستخدام المقترح لها. كما ذكر Tchobanoglous وآخرون، "المياه التي تعتبر غير صالحة لاستخدام معين قد تكون مناسبة تمامًا لاستخدام آخر، ويمكن اعتبار المياه مقبولة لاستخدام معين إذا لم تكن مياه ذات جودة أفضل متوفرة". يجب أن تتوافق متطلبات جودة المياه مع المعايير التي تضعها الهيئات الحكومية. (Tchobanoglous, Peavy, & Rowe, 1985)

3.2. معايير الجودة المحلية وتطبيقها في الجزائر

في الجزائر، تم وضع تنظيمات محلية تهدف إلى ضمان جودة المياه، حيث تم تحديد المعايير الخاصة بجودة المياه للاستهلاك البشري عبر الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية. تتضمن هذه المعايير مجموعة من القيم الحدية التي تتعلق بالمعايير الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، وقد تم تحديد معايير الصلاحية للشرب بموجب القرار الصادر في 26 يوليو 2000 في الجريدة الرسمية رقم 00/51. (JORA, 2011, p. 25)

الجدول 4.II. شبكة جودة مياه السدود المعتمدة من طرف ANRH قسنطينة. (Touhari F., 2018)

المعايير	الوحدة	مقياس الجودة		
		سيئة جدًا	سيئة	متوسطة
T	°C	30<	25 إلى 30	22 إلى 25
pH		9<	8.5-9	6.5-8.5
O2 المذاب	%	30>	30-50	50-90
NH4+	mg/l	3<	0.1-3	0.01-0.1
NO2	mg/l	3<	0.1-3	0.01-0.1
NO3	mg/l	40<	20-40	10-20
DBO5	mg/l	15<	10-15	5-10
DCO	mg/l	50<	40-50	20-40

الجدول 5.II. معايير منظمة الصحة العالمية (OMS, 2006) والمعايير الجزائرية (JORA, 2011)

المعايير الجزائرية (JORA 2014)	المعايير حسب منظمة الصحة العالمية (2006)	الوحدة	المعيار
15	لا توجد قيمة مرجعية	ملغم/لتر بلاتين	اللون
4	مقبول	نسبة التخفيف	الرائحة عند 25°C
4	مقبول	نسبة التخفيف	المذاق عند 25°C
5	5	NTU	العكارة
25	25	درجة مئوية	درجة الحرارة
200	/	ملغم/لتر	الكالسيوم
150	/	ملغم/لتر	المغنيسيوم
500	250	ملغم/لتر	الكلوريد
6.5 - 9	6.5 - 9.5	pH	أيونات الهيدروجين
500	200	ملغم/لتر من CaCO ₃	الصلابة
2800	لا توجد قيمة مرجعية	μS/cm	الموصلية عند 20°C
0.5	لا توجد قيود	ملغم/لتر	الأمونيوم
12	250	ملغم/لتر	البوتاسيوم
لا توجد قيمة مرجعية	لا توجد قيمة مرجعية	O ₂ %	الأوكسجين الذائب
1.5	1.5	ملغم/لتر	الفلوريد
0.3	لا توجد قيمة مرجعية	ملغم/لتر	الحديد
50	50	ملغم/لتر	النترات
400	500	ملغم/لتر	الكبريتات
200	لا توجد قيمة مرجعية	ملغم/لتر	الصوديوم
5	لا توجد معايير	ملغم/لتر	الفوسفور
1500	/	ملغم/لتر	المتبقي الجاف

3. تقنيات التحليل المستخدمة في قياس جودة المياه

1.3. تحليل المعايير الفيزيائية

المعايير الفيزيائية للمياه يمكننا قياسها باستخدام حواسنا: مثل العكارة، اللون، الطعم، الرائحة ودرجة الحرارة.

بشكل عام، نعتبر أن المياه ذات جودة جيدة إذا كانت صافية، ذات طعم جيد، خالية من الروائح ومبردة.

الجدول 6.II. منظمة الصحة العالمية للمعايير الفيزيائية (OMS, 2006)

المعيار	إرشادات منظمة الصحة العالمية
اللون	جمالي فقط، لا توجد قيمة مقترحة للصحة
الرائحة	جمالي فقط، لا توجد قيمة مقترحة للصحة
درجة الحرارة	جمالي فقط، لا توجد قيمة مقترحة للصحة
العكارة	أقل من 1 NTU ويفضل أن تكون أقل بكثير للحصول على تعقيم فعال أقل من 5 NTU للأنظمة الصغيرة لإمداد المياه

2.1.3. اللون

عادةً ما يتم تقييم لون عينة المياه من خلال الملاحظة البصرية البسيطة. ويمكن أيضًا قياسه من خلال المقارنة مع سلسلة من المحاليل المعيارية. يمكن اكتشاف مستويات اللون التي تزيد عن 15 وحدة لون حقيقية (UCV) في كوب من الماء، على الرغم من أنها لا تشكل خطرًا على الصحة.

الجدول 7.II. ملاحظات حول اللون والملوثات المحتملة (CAWST, 2013)

الملاحظة	الملوثات المحتملة
الرغوة	المنظفات
أسود	النمو البكتيري، المنغيز
بني، أصفر أو أحمر	الحديد
بني داكن أو أصفر	التانينات والصبغات النباتية
رواسب بيضاء أو ترسبات	المعادن المذابة، العسر

3.1.3. الطعم والرائحة

على الرغم من أن الطعم والرائحة لا يشكلان خطرًا مباشرًا على الصحة، إلا أنهما يشيران إلى تلوث كيميائي أو بيولوجي. كما أنهما من أهم خصائص المياه من وجهة نظر المستخدم.

الملاحظة	الملوثات المحتملة
رائحة ترابية، مغطاة، عفنة	البكتيريا الخاصة تسمى الأكتينوميكيتات
رائحة عشب، تبن، خشب	مشتقات من الطحالب وأحيانًا يطلق عليها نباتات متعفنة
رائحة مستنقعية، رائحة البيض الفاسد	الكبريت الطبيعي أو الناتج عن الإنسان
رائحة الكلور	الكلور المتبقي بعد التطهير

الجدول 8.II. ملاحظات حول الرائحة والملوثات المحتملة (CAWST, 2013, pp. 5.2-5.3)

4.1.3. درجة الحرارة

لا تحمل درجة الحرارة أي دلالة فيما يتعلق بالتلوث. يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة للمياه إلى تعزيز نمو الكائنات الدقيقة، مما يسبب مشكلات في الطعم، والرائحة، واللون، والتآكل. يمكن قياس درجة حرارة المياه باستخدام مقياس حرارة تقليدي أو رقمي. (CAWST, 2013, p. 5.3)

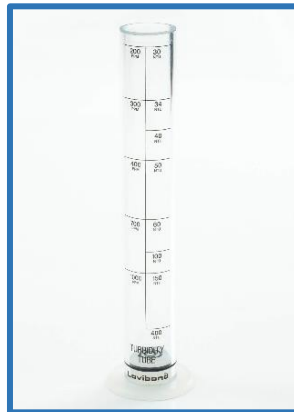
5.1.3. العكارة

يتم قياسها بوحدات العكارة النفلومترية (NTU) أو بوحدات العكارة فورمازين (FTU). العكارة العالية غالبًا ما ترتبط بوجود مستويات مرتفعة من الكائنات الدقيقة الممرضة. هناك ثلاث طرق لقياس العكارة:

- **التقدير البسيط:** اختبار لقياس العكارة يتمثل في ملء زجاجة بلاستيكية شفافة بسعة 2 لتر بمياه العينة. القدرة على رؤية شعار عبر الزجاج تعبر عن عكارة أقل من 50 NTU.
- **أنبوب العكارة:** أنبوب العكارة هو وسيلة بسيطة ورخيصة لتقييم العكارة. على الرغم من أنه يصعب قراءة المستويات التي تقل عن 10 NTU باستخدام أنبوب العكارة، إلا أنه مفيد في الميدان ولا يتطلب بطاريات.
- **مقياس العكارة الرقمي:** يوفر قياسات دقيقة للعكارة وهو مفيد بشكل خاص للمستويات الأقل من 10 NTU وعلى الرغم من كونه أكثر تكلفة وأكثر هشاشة إلا أنه أكثر دقة. (CAWST, 2013, pp. 5.3-5.4)



3 مقياس العكارة الرقمي



2 أنبوب العكارة



1 التقدير البسيط

الشكل II.2. طرق قياس العكارة. (CAWST, 2013)

2.3. تحليل المعايير الكيميائية

هناك ثلاث ملوثات كيميائية رئيسية يجب مراعاتها عند تقييم جودة المياه نظرًا لتأثيراتها الصحية الخطيرة وانتشارها الواسع، وهي: الزرنيخ والفلوريد اللذان قد يتواجدان طبيعيًا، والنترات الناتجة عن الأنشطة الزراعية. كما ينبغي توجيه الاهتمام إلى المعايير التي تؤثر على القبول الجمالي للمياه، مثل الحديد والمنغنيز ومستوى المواد الذائبة الكلية (الملوحة). لا توجد مياه "نقية" فعليًا في الطبيعة، حيث تحتوي جميع المياه على مواد كيميائية تم غسلها من البيئة. في معظم الحالات، تكون مستويات المواد الكيميائية الطبيعية مفيدة أو لها تأثيرات بسيطة. هناك طريقتان رئيسيتان لتحليل المياه: التحليل الميداني والتحليل المخبري. تُفضل المنظمات غير الحكومية استخدام أطقم تحليل ميدانية محمولة لسهولة استخدامها في المواقع، بينما تعتمد المعاهد الحكومية والمراكز البحثية والجامعات على التحليل المخبري لضمان دقة النتائج. (CAWST, 2013, p. 6.1)

الجدول 9.II. طرق التحليل لبعض المعايير الكيميائية (CAWST, 2013, p. 6.3)

المنتج الكيميائي	طرق التحليل الممكنة
الألمنيوم	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
الزرنيخ	مختبر، طقم تحليل محمول باستخدام طريقة غوتزيت
الكاديوم	مقياس الضوء، مختبر
الكور (الحر)	شرائط اختبار، طقم اختبار حمام السباحة، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء
الكروم	مختبر
النحاس	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
السيانيد	مختبر
الفلوريد	مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
الحديد	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
الرصاص	مختبر
المنغنيز	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
الزئبق	مختبر
الرقم الهيدروجيني (pH)	شرائط اختبار، مقياس pH رقمي، مختبر
النترات	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
النيتريت	شرائط اختبار، مقارنة بالأقراص الملونة، مقياس الضوء، مختبر
السيلينيوم	مختبر
المواد الذائبة الكلية	مقياس التوصيل الرقمي، مختبر

1.2.3. طرق التحليل في المختبر

تستخدم المختبرات طرقًا متعددة لتحليل الملوثات الكيميائية في المياه، وهذه الطرق تختلف من حيث مستوى التعقيد والتكلفة من بينها:

- **الطريقة اللونية (Colorimetric):** تعتمد على إضافة كواشف كيميائية إلى عينة المياه، حيث تتفاعل مع العنصر الكيميائي المطلوب تحليله، مما ينتج عنه مركب يمتص طول موجة معين. يتم قياس امتصاص الضوء باستخدام جهاز لوني أو مطياف ضوئي، ويتم مقارنة النتائج مع معايير معروفة.
 - **الطرق باستخدام الأقطاب الكهربائية (Electrode Methods):** تعتمد على استخدام أقطاب أيونية لقياس تركيز الأيونات في العينة. من أبرز التطبيقات استخدام قطب كهربائي لقياس درجة الحموضة (pH) في المياه.
 - **الكروماتوغرافيا (Chromatography):** يتم فيها تمرير العينات عبر عمود به مادة تمتص انتقائياً بعض العناصر الكيميائية. المركبات المختلفة تمر عبر العمود بسرعات متفاوتة بناءً على تفاعلها مع المادة. يتم قياس تركيز العناصر باستخدام كاشف عند مخرج العمود.
 - **مطياف الامتصاص الذري (AAS – Atomic Absorption Spectroscopy):** تستخدم هذه التقنية لتحليل المعادن في المياه. يتم تسخين العينات في فرن أسطوانى من الجرافيت، ويتم تحديد تركيز المعادن من خلال قياس امتصاص الضوء بطول موجة معين بواسطة ذرات المعدن.
 - **بلازما الطيف المزوج (ICP – Inductively Coupled Plasma):** تستخدم هذه التقنية أيضًا لتحليل المعادن من خلال تحويل العينات إلى ذرات واكتشاف المعادن باستخدام التحليل الطيفي للانبعاث الذري أو التحليل الطيفي الكتلي.
- تتميز طرق التحليل اللوني وطرق الأقطاب الكهربائية بأنها أقل تعقيدًا وأقل تكلفة، مما يجعلها مناسبة للمختبرات الأساسية. أما الكروماتوغرافيا وAAS، فهي أكثر تكلفة وتعقيدًا، وتستخدم في المختبرات المركزية أو المرجعية. بينما تعتبر طرق ICP من التقنيات الأكثر تعقيدًا وتكلفة، وتقتصر استخدامها في الدول النامية بسبب محدودية

الموارد. (CAWST, 2013, p. 6.4)

2.2.3. طرق التحليل المحمولة

تتميز مجموعات التحليل المحمولة بسهولة استخدامها في الميدان، لكنها غالبًا ما تكون أقل دقة مقارنة بالطرق المخبرية. ورغم ذلك، توفر هذه المجموعات أدوات فعالة لتقييم المعايير الكيميائية بسرعة. من الضروري التحقق من صلاحية طريقة التحليل قبل استخدامها. أكثر طرق التحليل المحمولة شيوعًا هي:

- **شرائط الاختبار (الفعالة):** هي وسيلة سهلة وغير مكلفة لقياس الملوثات الكيميائية في الميدان، لكنها أقل دقة مقارنة بالطرق المخبرية لأنها تعتمد على التفسير البصري. تأتي في عبوات فردية لحمايتها من العوامل البيئية. يتم غمر المنطقة التفاعلية في العينة، ثم مقارنة اللون مع جدول الألوان. تختلف طرق التنغيم وفترات الانتظار حسب النوع، وقد تؤدي الأخطاء في هذه العمليات إلى نتائج غير دقيقة.



الشكل II.3. استخدام شريط الاختبار لقياس الملوثات الكيميائية. (CAWST, 2013, pp. 6.5-6.6)

- **مقارنات الأقراص الملونة:** هي أدوات شائعة لقياس المعايير الكيميائية مثل الكلور، الفلوريد، النترات، الحديد والمنغنيز. يتم استخدامها مع مجموعة من الأقراص الملونة القابلة للتبديل، حيث يتم مقارنة اللون الناتج من التحليل مع الألوان القياسية الموجودة على القرص. رغم أنها قد توفر دقة أكبر من شرائط الاختبار، إلا أنها تتطلب معدات إضافية وتعتبر أكثر تكلفة. كما أنها تعتمد أيضًا على التحديد البصري لتركيز المادة الكيميائية،

مما قد يؤثر على دقتها. (CAWST, 2013, p. 6.6)

- **مقياس اللون والضوء (Colorimeter and Photometer):** هي أدوات رقمية تستخدم مصدر ضوء لقياس التركيز الكيميائي في الماء. تقدم هذه الأجهزة نتائج أكثر دقة وقابلة للتكرار حيث يتم عرض النتائج بشكل رقمي. كما أنها قادرة على اكتشاف مجموعة واسعة من المواد الكيميائية ولها نطاق رقمي أوسع. لكنها أكثر تكلفة، وتحتاج إلى مصدر طاقة والتدريب لاستخدامها بشكل صحيح.

• **العدادات الرقمية:** بعض مجموعات التحليل المحمولة تتضمن عدادات رقمية لقياس معلمات مثل الرقم الهيدروجيني (pH) والتوصيلية الكهربائية (CE). تتميز هذه العدادات بسهولة الاستخدام ودقتها العالية مقارنة بطرق أخرى مثل شرائط الاختبار. ومع ذلك، تتطلب العيوب الرئيسية معايرة دورية، استبدال البطاريات، والحذر من الأعطال المحتملة نتيجة لحساسيتها للمعدات الإلكترونية. (CAWST, 2013, p. 6.7)

• **مجموعات تحليل الزرنيخ:** تُستخدم مجموعات تحليل الزرنيخ للكشف عن التلوث بالزرنيخ في مياه الشرب، خصوصاً عند المستويات المنخفضة. بعد التلوث الواسع في المياه الجوفية، تم تطوير مجموعات محمولة تعتمد على طريقة "غوتريت". الحد الأدنى للكشف في معظم المجموعات هو 10 µg/L، لكن الدقة تكون شبه كمية عند التركيزات المنخفضة > 100 µg/L. تُعد هذه المجموعات أكثر فعالية في تحديد ما إذا كانت العينات تحتوي على الزرنيخ بمستوى أعلى من 50 µg/L، وهو الحد المقبول لمياه الشرب في العديد من الدول الملوثة بالزرنيخ (CAWST, 2013, p. 6.8).

3.3 تحليل المعايير البيولوجية

1.3.3 اختبار الوجود-العدم (P-A)

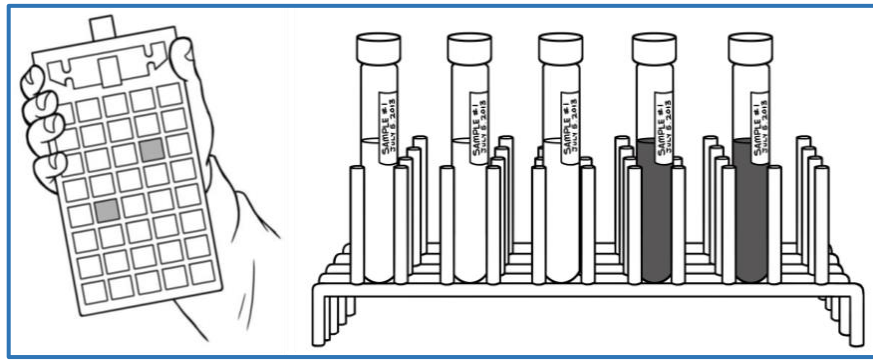
هو اختبار نوعي يعتمد تغيير اللون لتحديد وجود التلوث البكتيري في عينة الماء، حيث يتغير لون العينة إذا كانت البكتيريا موجودة. هذا الاختبار لا يوفر معلومات عن كمية البكتيريا في العينة. يُستخدم عادة في حالات تكون فيها الكوليفورمات المقاومة للحرارة نادرة، ويحدث فيها التلوث بمستويات منخفضة. لكن في حالات التلوث الكبير أو عند الحاجة لتحديد مستوى التلوث بدقة، تُفضل الطرق التحليلية الكمية مثل اختبار "NPP" أو الترشيح عبر الغشاء. لا يوفر هذا الاختبار معلومات حول مستوى التلوث أو فعالية إزالة البكتيريا عبر تقنيات معالجة المياه (TED). (CAWST, 2013, p. 7.14)

2.3.3 طريقة العدد الأكثر احتمالاً (MPN)

هي تقنية تحليلية تُستخدم لتقدير عدد البكتيريا المؤشرة المحتمل وجودها في عينة الماء. يتم إضافة عينات من الماء المعالج إلى وسط الزرع في أنابيب معقمة، حيث تُحضان عند درجة حرارة معينة لفترة زمنية محددة.

عادة ما تُستخدم ثلاث أو خمس أنابيب، لكن يمكن استخدام عشر أنابيب لزيادة الحساسية. يتم أيضًا استخدام أطباق قابلة للتخلص تحتوي على تجويفات صغيرة بدلاً من الأنابيب لتسهيل الإجراءات. يتم تقدير العدد الأكثر احتمالاً للبكتيريا إحصائيًا من خلال عد الأنابيب أو التجويفات التي تظهر نتيجة إيجابية، ومقارنتها مع جدول مرجعي. تُسجل النتائج بوحدات MPN لكل 100 مل من العينة.

تحليل MPN هو طريقة بسيطة لتحليل *E. coli* في الميدان، ويتميز بقدرته على تحليل المياه العكرة. ومع ذلك، يظل تقديرًا إحصائيًا قد يحتوي على هامش خطأ، وقد يصبح مكلفًا ويزيد من النفايات بسبب استخدام الأطباق القابلة للتخلص.



الشكل 4.II. أنابيب متعددة (10) وتجاويف متعددة على طبق قابل للتخلص. (CAWST, 2013, p. 7.16)

3.3.3. الترشيح عبر الغشاء (MF)

هو إحدى الطرق الدقيقة لتحديد عدد البكتيريا المؤشرة في المياه، تُنفذ إما في المختبرات أو باستخدام مجموعات تحليل محمولة. في البداية، يتم امتصاص 100 مل من عينة الماء عبر ورقة ترشيح باستخدام مضخة يدوية صغيرة. بعد الترشيح، يتم احتجاز البكتيريا على الورقة، التي توضع بعد ذلك في صحن بتري يحتوي على وسط مغذي. تُحضر أطباق بتري في بيئة محكمة من حيث الحرارة والزمن، وفقًا للظروف المناسبة لكل نوع من المؤشرات البكتيرية. بعد الحضانة، تصبح المستعمرات البكتيرية مرئية بالعين المجردة أو باستخدام عدسة مكبرة، حيث يختلف حجم ولون المستعمرات بحسب نوع البكتيريا والوسط المستخدم. يتم بعد ذلك عد المستعمرات البكتيرية لحساب عدد وحدات تشكيل المستعمرات (CFU) لكل 100 مل من العينة.

الترشيح عبر الغشاء طريقة دقيقة لتحليل العينات الكبيرة من المياه قد يواجه صعوبة في تحليل المياه ذات العكارة العالية أو التي تحتوي على طحالب وجسيمات المعلقة قد تسد الغشاء، مما يعيق نمو البكتيريا المؤشرة. كما أن وجود معادن أو مركبات سامة قد يؤثر على نتائج التحليل. (CAWST, 2013, pp. 7.17-7.18)



الشكل II.5. طريقة الترشيح عبر الغشاء لتحليل جودة المياه. (CAWST, 2013)

4. التقنيات الحديثة في مراقبة جودة المياه

تعدُّ مراقبة جودة المياه (WQM) مهمةً جوهرية تستدعي اتباع نهجٍ متعدد التخصصات يشمل دراسة العوامل المؤثرة في جودة المياه (WQ)، وتطوير استراتيجيات شاملة تهدف إلى تحسين وإدارة الموارد المائية.

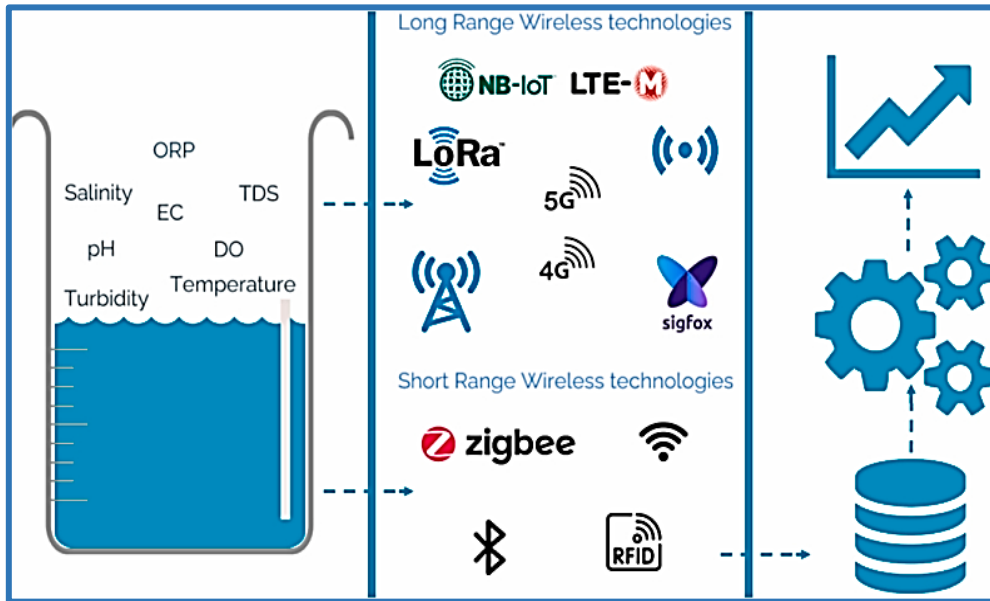
1.4. الأدوات التكنولوجية

تخضع جودة المياه لمجموعة من القوانين والمعايير التي تستدعي مراقبة مستمرة لضمان الامتثال لها. وفي هذا السياق، يُوفّر إنترنت الأشياء تقنيات حديثة وإمكانات متقدمة للمحافظة على جودة المياه. (Alahi MEE, 2018)

تعتمد هذه التقنية على أجهزة مترابطة تعمل في بيئات متنوعة مثل الأنهار، البحيرات، المناطق الساحلية، بالقرب من المجمعات الصناعية. ومن خلال المراقبة المنتظمة لمتغيرات المياه، يُمكن لنظام إنترنت الأشياء عبر تكامل الأجهزة المتصلة إنشاء منصة ذكية تُنبه الجهات المعنية فور حدوث تغييرات غير طبيعية. (Khatri N, 2018)

يمثل إنترنت الأشياء نظامًا ذكيًا متكاملًا قادرًا على مراقبة جودة المياه في الوقت الفعلي، مع تقديم تفسيرات دقيقة للبيانات التي يتم جمعها. (Dupont C, 2018)

يُعتبر هذا النهج وسيلة فعّالة وموثوقة واقتصادية لإدارة البيئة، والتخفيف من المشكلات البيئية والصحية ذات الصلة. (Maher, 2018) إنترنت الأشياء هو مفهوم حاسوبي يشير إلى التوسع في الاتصال بالإنترنت، حيث يتم تحويل الأجهزة التقليدية إلى أجهزة متصلة بالشبكة. (Yue W Bishop R Scudder ML Craig DC, 1997) تقوم الفكرة الأساسية لهذا المفهوم على استخدام عدد كبير من الأجهزة الذكية القادرة على استشعار البيئة المحيطة، وجمع البيانات المتعلقة بها، ثم معالجتها ونقلها، ما يسمح بتحليل البيئة والتفاعل معها بطرق ذكية وفعّالة. (Sisinni E, 2018) دمج أجهزة إنترنت الأشياء (IoT) مع خوارزميات التعلم الآلي (ML) يعزز إدارة جودة المياه عبر جمع البيانات وتحليلها في الوقت الفعلي، مما يُمكن من الكشف المبكر عن مشكلات الجودة والاستجابة السريعة لها. يساهم هذا التكامل في تحديد مصادر التلوث، تقييم تأثير الأنشطة البشرية، وتطوير استراتيجيات مستدامة لإدارة المياه. كما يُبرز إمكانيات IoT و ML في مجالات متعددة كمعالجة مياه الصرف وإدارة المياه المنزلية والصناعية، مما يُحسن الامتثال للمعايير التنظيمية وإدارة المياه بكفاءة.



الشكل 6.II. تعزيز جودة الماء: الملوثات، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات.

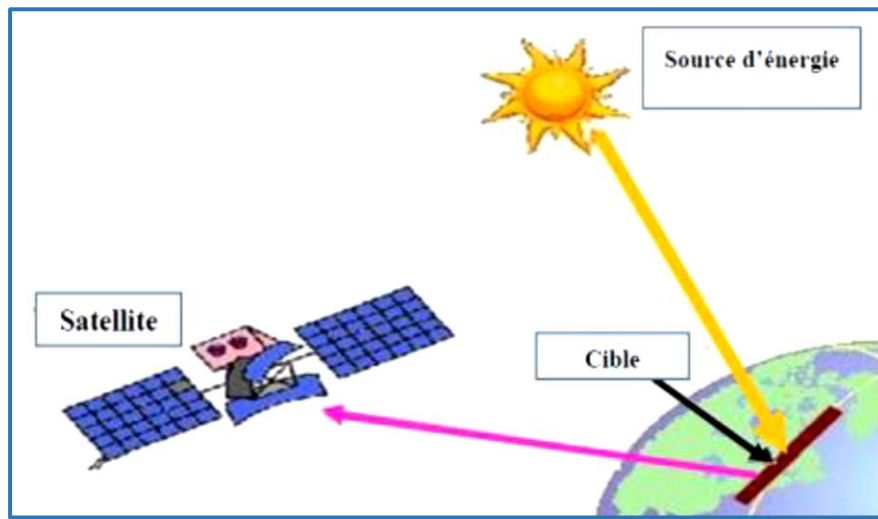
(Ismail Essamlali, Hasna Nhaila, & Mohamed El Khaili, 2024, p. 3)

كما تُعد تقنيات الاستشعار عن بُعد أداة فعّالة لمراقبة معايير جودة المياه، مثل العكارة، الكلوروفيل، والحرارة. تتيح أجهزة الاستشعار البصرية والحرارية المثبتة على القوارب والطائرات والأقمار الصناعية جمع معلومات مكانية وزمنية دقيقة، مما يساهم في مراقبة التغيرات الحاصلة في هذه المعايير لتطوير ممارسات الإدارة الهادفة

إلى تحسين جودة المياه. من المتوقع أن تُسهم إطلاقات الأقمار الصناعية المزودة بأجهزة استشعار ذات دقة طيفية ومكانية محسنة في تعزيز استخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد لتقييم ومراقبة معايير جودة المياه.

يتيح دمج البيانات المستشعرة عن بُعد مع تقنيات GPS توفير أداة قوية للمراقبة والتقييم المستمر للمجري المائية. يمكن استخدام هذه البيانات لإنشاء قاعدة بيانات جغرافية دائمة، مما يسهم في توفير مرجعية لعمليات المقارنة المستقبلية. ومن خلال الاستخدام المتكامل لهذه البيانات، يمكن الاستشاريون ومديرو الموارد الطبيعية

من تطوير خطط إدارة فعّالة لتطبيقات متعددة في مجال إدارة الموارد الطبيعية. (Jerry C. Ritchie, 2003)



الشكل 7.II.7. المبدأ الأساسي للاستشعار عن بُعد وفقاً للمركز الكندي للاستشعار عن بُعد. (CCT, 2008)

2.4. النماذج الرياضية والبرمجيات

نمذجة الماء هي عملية محاكاة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والحركية للماء باستخدام تقنيات حسابية أو تجريبية. يتم استخدامها لفهم سلوك الماء في أنظمة مختلفة مثل الأنظمة البيئية والهيدرولوجية والصناعية.

(Ghosh S & Mujumdar P, 2009)

1.2.4. أنواع نمذجة الماء

- **النمذجة الجزيئية:** تُستخدم لفهم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للماء على مستوى الجزيئات. من خلال محاكاة التفاعلات بين الجزيئات باستخدام تقنيات الديناميكا الجزيئية. يُعد نموذج TIP4P الأشهر في هذا المجال يتمتع بدقة عالية في تقدير الكثافة والحرارة النوعية للماء. (Jorgensen, W. L., Chandrasekhar, J.,

Madura, J. D., 1983)

• **نمذجة الهيدرولوجيا:** تهدف إلى محاكاة حركة الماء فوق وتحت سطح الأرض. تُستخدم هذه النماذج لتحليل تدفق المياه وإدارة الموارد المائية. على سبيل المثال، نموذج SWAT (Soil and Water Assessment Tool) يُستخدم على نطاق واسع لدراسة تأثير استخدام الأراضي والمناخ على دورة المياه. (Arnold, 1998)

• **نمذجة جودة المياه:** تركز على دراسة توزيع الملوثات وتفاعلها في البيئة المائية. تُعتبر هذه النماذج أدوات أساسية لتحليل التأثير البيئي للأنشطة البشرية. نموذج (Water Quality Analysis Simulation Program) WASP هو أحد النماذج البارزة التي تُستخدم لدراسة جودة المياه وتقييم السياسات البيئية. (Ambrose, 1993)

2.2.4. البرمجيات والنماذج الرياضية لتقييم جودة الماء

• نموذج QUAL2K

نموذج QUAL2K هو أحد النماذج الخطية المستخدمة لتقييم جودة المياه في الأنهار والجداول. يعتمد النموذج على معادلات تفاضلية تصف التفاعلات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية في الماء. يُستخدم هذا النموذج بشكل واسع لتحليل تأثير الأنشطة البشرية على جودة المياه. (Chapra, 2008)

• نموذج CE-QUAL-W2

هذا النموذج ثنائي الأبعاد يُستخدم لتقييم جودة المياه في البحيرات والخزانات. يركز على تحليل طبقات المياه الرأسية والأفقية، ما يجعله مناسباً لدراسة التلوث الحراري وتوزيع العناصر الغذائية. (Cole & Wells, 2008)

• نموذج MIKE 11

هو برنامج متقدم يُستخدم لمحاكاة تدفق المياه وجودتها في الأنهار. يوفر النظام أدوات مرنة لتقييم التلوث والمواد الكيميائية المذابة، بالإضافة إلى قدرات متقدمة في النمذجة الهيدروديناميكية. يُستخدم MIKE 11 بشكل خاص في المشاريع البيئية الكبرى. (DHI, 2007)

• برمجيات أخرى

- AQUATOX: يُستخدم لتقييم تأثير الأنشطة البشرية على الأنظمة البيئية المائية.
- HEC-RAS: يُستخدم لتحليل تدفق المياه وتقييم تأثير الملوثات على جودة المياه.
- EPANET: يركز على تحليل جودة المياه في شبكات التوزيع.

تمثل نماذج الماء أدوات فعالة لفهم السلوك المائي والتنبؤ بتأثير التغيرات المناخية والأنشطة البشرية على الموارد المائية. كما تُساهم في دعم القرارات المتعلقة بإدارة الموارد المائية بطريقة مستدامة. (Vijay & Woolhiser, 2002)

خاتمة

تُعد جودة المياه من القضايا الجوهرية التي تؤثر على الصحة العامة والأنظمة البيئية والاستخدامات الصناعية والزراعية، مما يستدعي تطوير منهجيات تحليل دقيقة وفعالة لضمان سلامتها واستدامتها. يسلط هذا الفصل الضوء على الأساليب المتنوعة المستخدمة في تقييم جودة المياه، بدءًا من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، ووصولًا إلى التقنيات التحليلية المتقدمة التي تساهم في مراقبة مستويات التلوث والتغيرات الطارئة على الموارد المائية.

تبرز أهمية تطبيق هذه الأساليب في قدرتها على تقديم بيانات دقيقة وموضوعية تُسهم في توجيه السياسات البيئية، وتحسين إدارة الموارد المائية، والحد من التأثيرات السلبية للأنشطة البشرية على جودة المياه. كما أن التكامل بين النماذج الرياضية، وتكنولوجيا إنترنت الأشياء، والاستشعار عن بُعد يعزز من كفاءة عمليات التحليل والمراقبة، مما يُمكن من اتخاذ قرارات استباقية لحماية المياه من التدهور.

في ظل التحديات البيئية المتزايدة، يظل تطوير استراتيجيات فعالة لرصد جودة المياه والتحكم في مصادر التلوث ضرورة ملحة لضمان استدامة هذا المورد الحيوي. وعليه، فإن تبني تقنيات تحليل متقدمة وتطبيق سياسات صارمة في إدارة المياه يُعدّ من الركائز الأساسية لتحقيق التنمية المستدامة والحفاظ على التوازن البيئي للأجيال القادمة.

الفصل الثالث:

الإطار الطبيعي والمناخي لمنطقة القنيطرة

المقدمة

يقع سد القنيطرة في شمال شرق الجزائر، في منطقة تتميز بخصائص فيزيائية-جغرافية ومناخية خاصة. يستعرض هذا الفصل الموقع الجغرافي، الظروف المناخية، والإطار الجيولوجي لهذه المنطقة، التي تتميز بوجود منجم سيدي قمبر المهجور. هذا المنجم، الغني بمعادن مثل ZnS و PbS، يُعتبر مصدرًا محتملاً للتلوث المعدني. ويثير قرب هذا المنجم من السد مخاوف بشأن تأثيره على جودة المياه، وهو مسألة رئيسية للحفاظ على هذا النظام البيئي الاستراتيجي.

I. الإطار الطبيعي للحوض الفرعي للقنيطرة

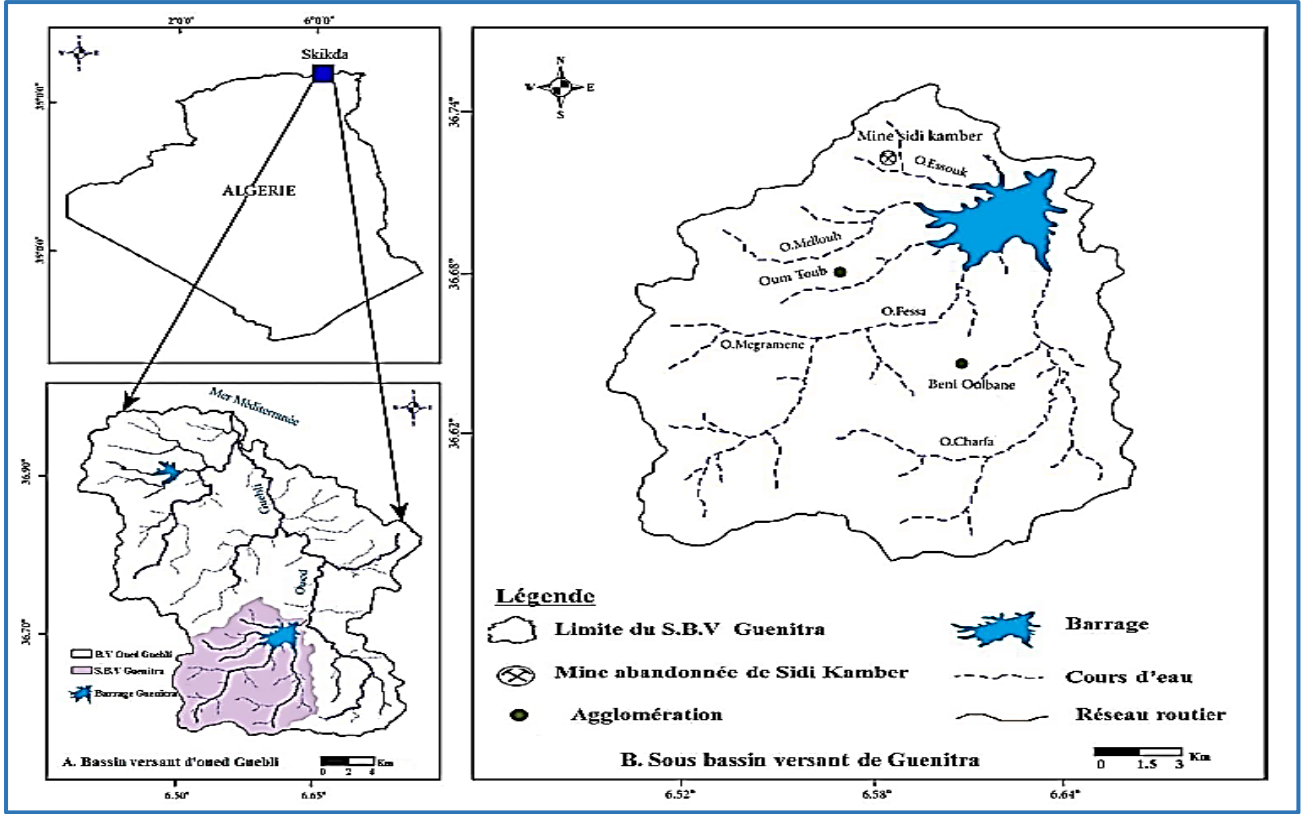
1. الموقع الجغرافي

يقع الحوض الفرعي للقنيطرة (بمساحة 202 كم²) على بعد حوالي ثلاثين كيلومترًا جنوب غرب ولاية سكيكدة (شمال شرق الجزائر). يشغل هذا الحوض الجزء الجنوبي الغربي من حوض وادي القابلة (بمساحة 993 كم²)، والذي ينتمي إلى حوض الساحل القسنطيني الأوسط (0307). يتميز الحوض الفرعي للقنيطرة بشبكة هيدروغرافية كثيفة، حيث يتم تصريفه بواسطة خمسة أودية رئيسية تغذي سد القنيطرة (بسعة إجمالية 125 هكتومتر مكعب)، وهي: وادي فسة، وادي شرفا، وادي مقرمان، وادي ملوح، ووادي السوق (الشكل 1.111).

- وادي فسة: ينبع من جنوب غرب سلسلة نوميدية سيدي إدريس، وهو الرافد الرئيسي في منطقة الدراسة.
- وادي شرفا: يمر عند سفح تضاريس وعرة على الحد الشرقي للحوض الفرعي.
- وادي مقرمان ووادي ملوح: يحدان قرية أم الطوب من الجهتين.
- وادي السوق: يعبر المنطقة التعدينية لسيدي قمبر، وتتميز منحدراته بأنها الأكثر انحدارًا.

تتميز هذه الأودية بنظام جريان غير منتظم للغاية؛ فهي تكون شديدة السيول في الشتاء وجافة في الصيف، مما يعكس تباينًا كبيرًا في الإمدادات إلى السد. تكون هذه الإمدادات كبيرة في الموسم المطير وتكاد تكون معدومة

في فترة الجفاف. (Hadeif S., 2023)



الشكل 1.III.1. موقع منطقة الدراسة (Mecibah, 2017)

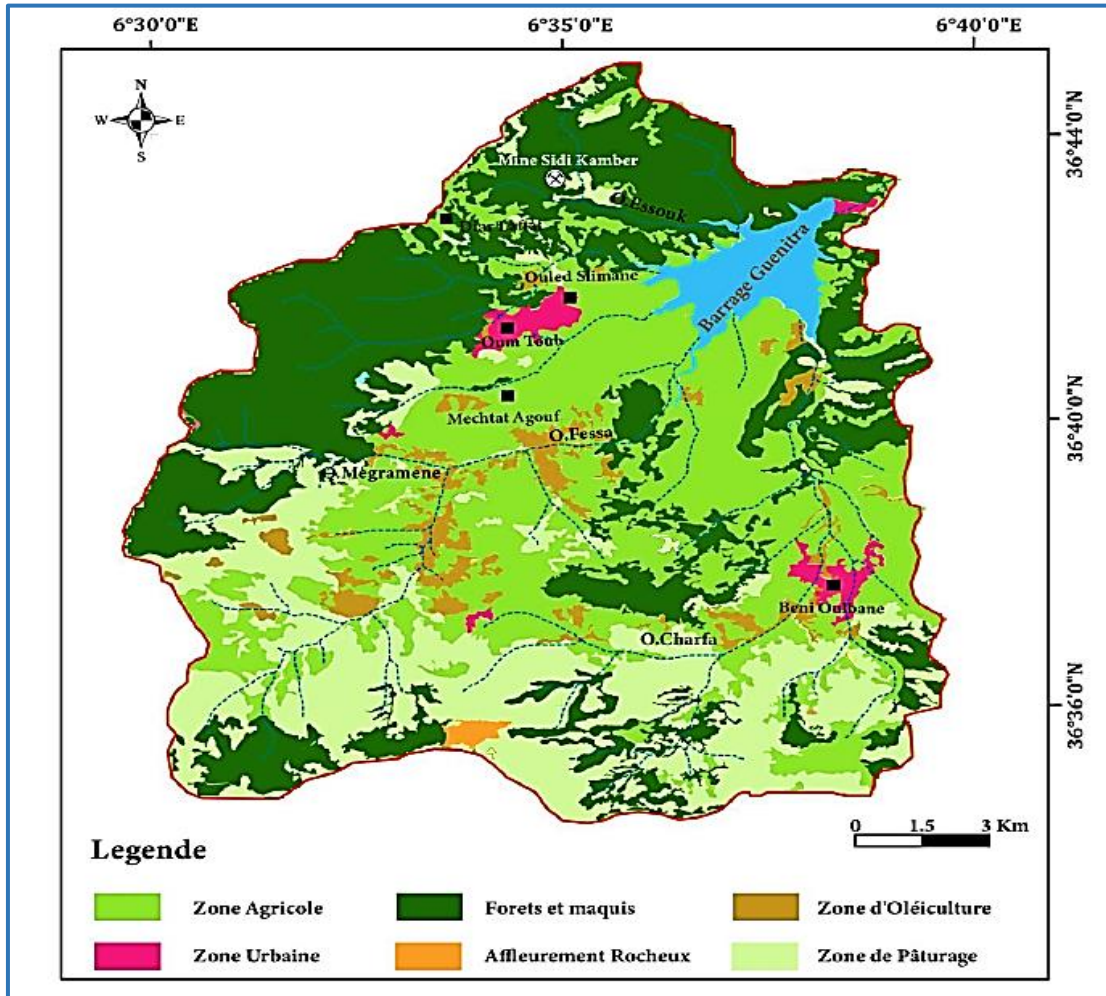
2. استخدام الأراضي في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة

يلعب استخدام الأراضي في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة دورًا حاسمًا في فهم الديناميات البيئية والنظم الإيكولوجية المحلية. يجب مراعاة عدة عوامل أساسية، بما في ذلك الغطاء النباتي، توزيع السكان، وكذلك وجود المناطق الحضرية والصناعية. تسهم هذه الأخيرة بشكل مباشر في تلوث المجاري المائية من خلال مخلفاتها، مما يؤثر بشكل ملحوظ على جودة المياه.

1.2. الغطاء النباتي

يشكل الغطاء النباتي عاملاً رئيسياً في الدورة الهيدرولوجية، حيث يعمل كمرشح طبيعي تمر عبره الأمطار قبل أن تصل إلى التربة وتواصل دورتها نحو البحر (Hadeef S., 2023) (Aylward, 2005). بالإضافة إلى ذلك، يلعب الغطاء النباتي دوراً حاسماً في الحماية من أشكال التعرية المختلفة، لا سيما في المناطق ذات الانحدارات الشديدة. يتميز الحوض الفرعي لوادي القنيطرة بغناه بالغابات والأحراش. في الجزء الجنوبي، تسيطر أشجار

الزيتون، في حين توجد أشجار مثمرة حول قرية أم الطوب. علاوة على ذلك، تضم المنطقة نباتات متنوعة تشمل 104 نوع نباتي.



الشكل 2.III. استخدام الأراضي في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (Hadeif S., 2023)

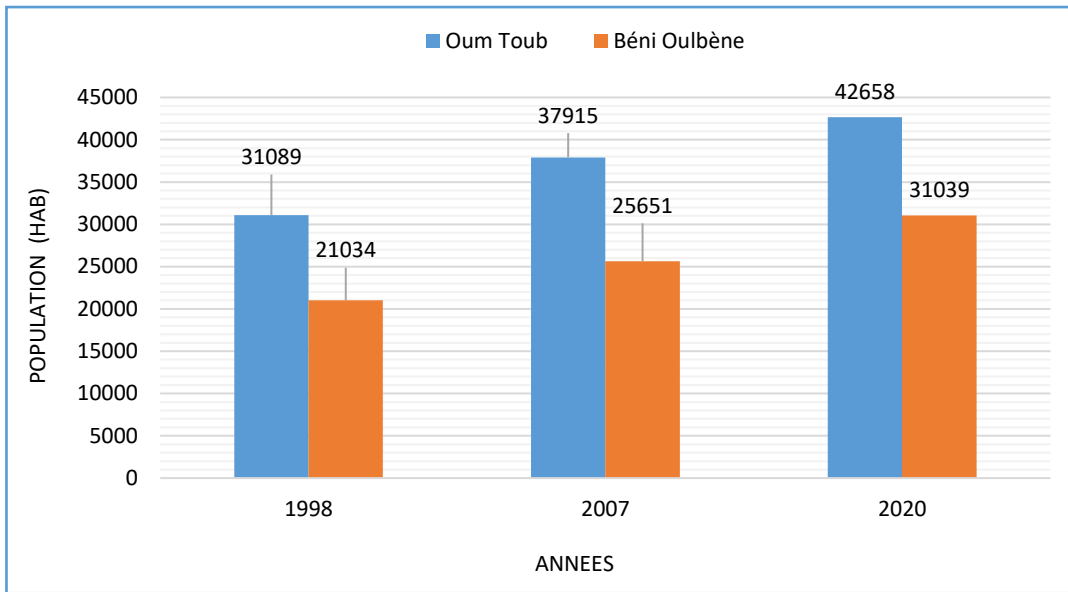
2.2. السكان

تؤثر توزيع وتنظيم وأنشطة السكان بشكل كبير على احتياجات المياه الصالحة للشرب، وكميات المياه العادمة المنتجة، وكذلك على الديناميكيات العامة للبيئة. في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة، يتميز هذا التوزيع بعدم الانتظام المرتبط بظروف المعيشة. يتركز السكان بشكل رئيسي في مدينتين كبيرتين، أم الطوب وبني ولبان، بينما تسكن المناطق الريفية على شكل مشاتي متفرقة. (Mecibah, 2017)

شهدت بلدية أم الطوب نموًا ديموغرافيًا ملحوظًا، حيث ارتفع عدد السكان من 31,089 نسمة في عام 1998 إلى 37,915 نسمة في عام 2007، ليصل إلى 42,658 نسمة في عام 2020. ويتمركز معظم السكان في

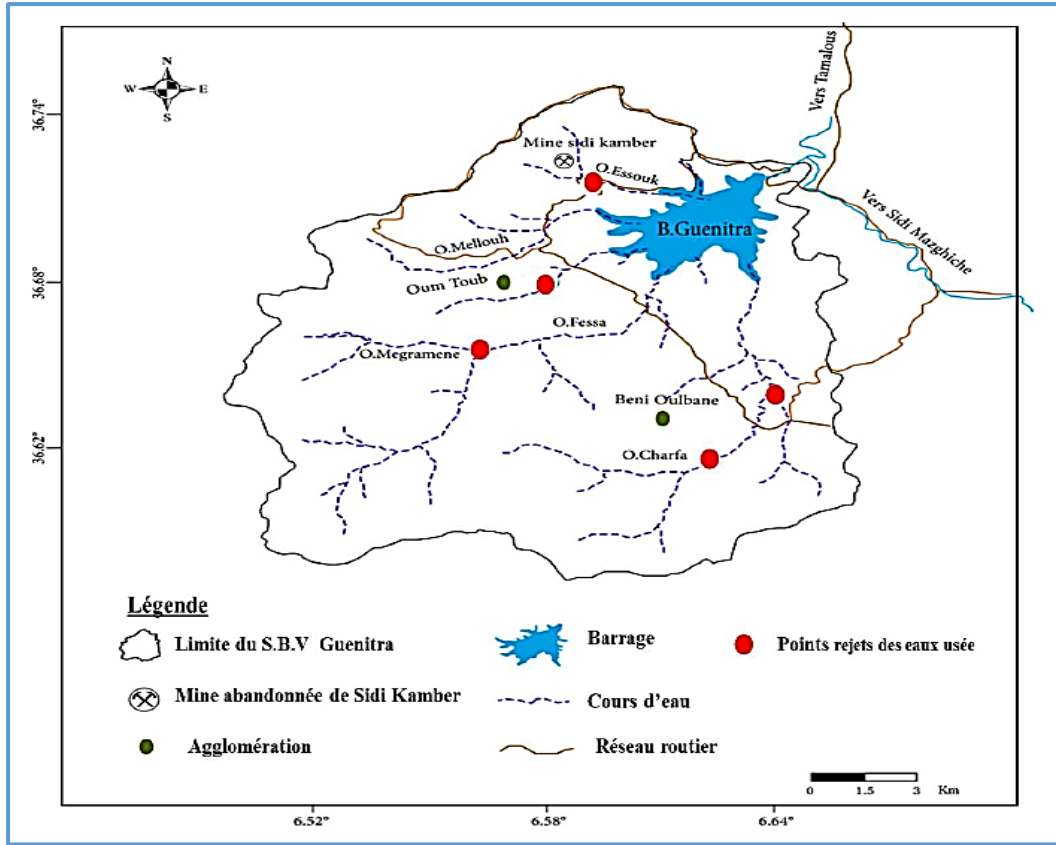
البلدية نفسها وكذلك في المناطق المحيطة بها، مثل مشنة أقوف، أولاد سليمان، سيدي كامبر، وديار الفطاط، حيث تكون ظروف المعيشة نسبياً مواتية (الشكل 2.iii).

من جهتها، سجلت بلدية بني ولبان زيادة في عدد السكان من 21,034 نسمة في عام 1998 إلى 25,651 نسمة في عام 2007، لتصل إلى 31,039 نسمة في عام 2020 (الشكل 3.iii). تعكس هذه التطورات الديموغرافية تركّزاً متزايداً للسكان في المراكز الحضرية وضواحيها، مما يؤثر مباشرة على إدارة الموارد المائية والبنى التحتية البيئية.



الشكل 3.III. تطور السكان في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (ONS, 2020)

شبكة تزويد المياه الصالحة للشرب تغطي التجمعات السكانية في المراكز الرئيسية وبعض التجمعات الثانوية، مع استهلاك يومي للمياه يقدر بحوالي 16,000 م³/اليوم، أي بمعدل 250 ل/فرد/اليوم. (ANBT, subdivision) أما باقي الحوض الفرعي لوادي القنيطرة ، فيتم تصريف المياه العادمة عبر الحفر الصحية. وفي التجمعين السكنيين (أم الطوب وبني ولبان)، يتم استخدام نظام صرف صحي موحد بطول إجمالي يقارب 36,780 مترًا طولياً، حيث يتم تصريف المياه العادمة مباشرة في خمسة نقاط صرف (الشكل 4.III) دون معالجة، بحجم إجمالي يبلغ 1.555 هكتومتر مكعب/السنة. (الجدول 1.III).



الشكل 4.III. نقاط التصريف الحضري المختلفة في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (Hadeff S., 2023)

الجدول 1.III. خصائص شبكة الصرف الصحي في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (Mecibah, 2017)

البلدية	التجمع السكاني (1000 هكتار > عدد السكان)	طول الشبكة (م)	حجم المياه المستعملة (م ³ /السنة)	الوسط المستقبل
أم الطوب	مقر البلدية	21080	0.855	وادي + شعبة
	الشعبة	2100	0.210	شعبة
	سيدي كمبر	1400	0.130	شعبة
بني ولبان	مقر البلدية	10000	0.330	وادي
	بولحجار	2200	0.030	وادي

3.2. منجم سيدي قمبر

تحتضن الجزائر العديد من المواقع التعدينية، معظمها مغلق ومهجور اليوم بسبب ضعف جدواها الاقتصادية. من بين هذه المواقع بودوخة (Pb-Zn) وسيدي كمبر (Pb-Zn) (Issaad, et al., 2019) (Boukhalfa C. , 2007). تولد هذه المواقع كميات كبيرة من التربة والنفايات المشبعة بالمعادن الثقيلة، والتي تمثل مصدراً كبيراً للتلوث.

يساهم تصريف الأسطح والتسرب المائي للمعادن الثقيلة في التلوث المستمر للأنظمة البيئية المحيطة، مما يؤدي إلى تأثيرات سلبية على البيئة والكائنات الحية.

منجم سيدي قمبر، الذي يقع على بعد حوالي 2 كم من سد القنيطرة والقريب من وادي السوق، هو أحد المواقع التعدينية المغلقة والمهجورة الأكثر إثارة للقلق (Boukhalfa & Chaguer, 2012) (Medjram & Khelfaoui, 2014) (Gherib, Bedouh, Messai, & Menad, 2017) (Issaad, et al., 2019) (Khelfaoui, et al., 2020). تعود تاريخ هذه المنطقة إلى العهد النوميدي. تم اكتشافه من جديد في عام 1879، وبدأت الاستغلال الصناعية في عام 1890 على عروق دار الحانوت، مع إنتاج محدود تعرض لتوقعات متكررة. في عام 1913، بدأ المنجم نشاطه المنتظم، حيث وصل في عام 1938 إلى إنتاج سنوي قدره 678 طنًا من الغالينا (PbS) و146 طنًا من مزيج من خامات الزنك (سفاليريت ZnS، باريتين، بايريت، كالكوبيريت، إلخ). كان المنجم يغطي مساحة حوالي 2271 هكتارًا وكان يستغل سلسلة من العروق الكبريتية.

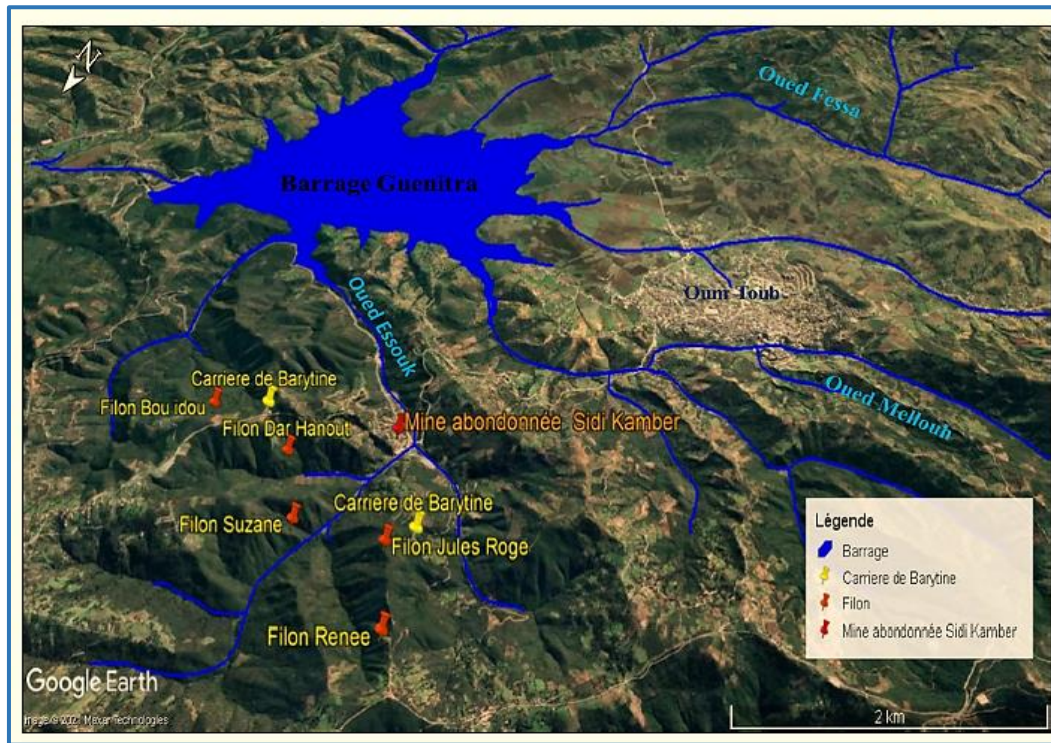
في عام 1976، تم وقف استغلال الرصاص والزنك، رغم أن استخراج الباريت استمر في العراء حتى عام 1984، وهو العام الذي تم فيه إغلاق المنجم بشكل نهائي (Oumdjbeur, 1986) (Boukhalfa C. , 2007) (Issaad, et al., 2019) (Gherib, Bedouh, Messai, & Menad, 2017) (Khelfaoui, et al., 2020).

يتكون منجم سيدي قمبر من سلسلة عروق باريت-كبريتية موجهة شمال شرق - جنوب غرب. العروق الرئيسية المحددة من الشرق إلى الغرب: جانيت، أليس، بو-إيدو، دار الحانوت، سوزان، جول-روجر، ورينيه (الجدول 2.iii؛ الشكل 5.iii). هذه العروق التي غالبًا ما تكون متفرعة وغنية بالمعادن تتمتع بأهمية عملية. ميلها حاد وتتراوح أطوالها بين 300 و 2500 متر، سمك يتراوح بين 0.1 و 2 متر. (SONAREM, 1966-1967)

الجدول 2.III. خصائص العروق في مكن سيدي قمبر. (SONAREM, 1966-1967)

العروق	الطول (م)	اتجاه العروق	السمت، الزاوية والميل	السمك المتوسط للعرق (م)
Renee	1000	NE 10-20	NW 280-290 ; 55-85	0.30
Jule	700	NE 5-15	NW 275-285 ; 60-90	0.23
Roget	450	NNE 0-20	WNW 270-290 ; 60-90	0.22
Suzanne	800	NE 35-40	SE 125-130 ; 60-90	0.20
Bou-Idou	2500	NE 20-30	/	/
Alice	300	NE 20	/	/
Jeannette	750	NE 20	/	/

(Hadeif S., 2023)



الشكل 5.III. تحديد موقع العروق ومنجم سيدي قمبر المهجور. (Hadeif S., 2023)

تتميز القوى المعدنية للعروق وتركيزات المعادن الثقيلة بتفاوت كبير. العروق الأكثر أهمية هي تلك التي تقطع الميكا شيبست، حيث تكون عادة مستمرة نسبياً في الاتجاه وتتميز بالقوى القصوى وتكون الأغنى بكبريتيد الرصاص والزنك (رينيه، جول، دار الحانوت). كانت تركيزات الرصاص والزنك في المعادن على التوالي 17.66% و 18.88% (ORGM, 1971) يتكون التركيب المعدني للخام على النحو التالي:

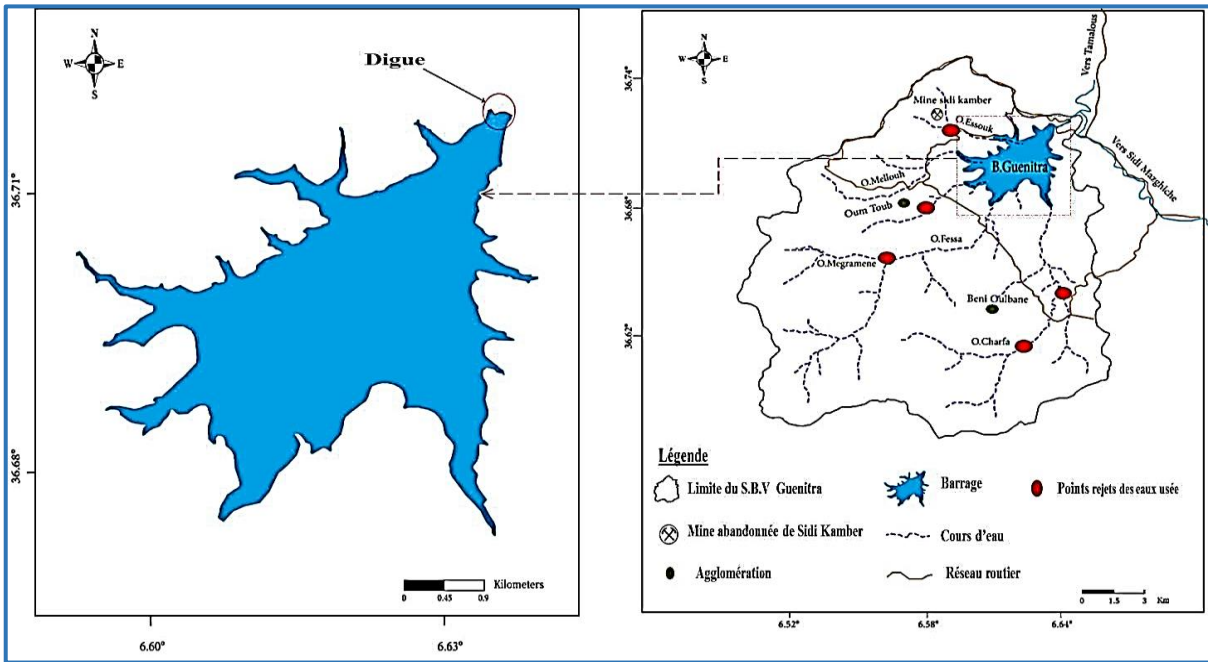
- غالينا PbS (Sb ،Mo ،Bi ،Se ،Zn ،Cr ،Ag 1% ،S 13.4% ،Pb 86.6%)
- سفاليريت ZnS (Fe حتى 20% ،S 9% ،Zn 67.1%)
- باريتين BaSO₄ ،In ،Cd ،Ca ،Mn ،Sn ،Hg. نادرًا ما توجد مراكزيت، بايريت، فالكوبيريت، بيروهوتيت، وأحيانًا بعض البلورات الصغيرة من الكوارتز والحجر الجيري، بلورات من الكوارتز والكالسيت.

(Beddai, 1976)

تحتوي النفايات التعدينية القادمة من منجم سيدي قمبر غالبًا على كميات كبيرة من الباريت التي يمكن استعادتها أو إعادة استغلالها (حجم أكوام النفايات التعدينية يبلغ حوالي 63,000 م³). هذه النفايات المخزنة على السطح معرضة للعوامل الجوية، مما يعزز تسرب المعادن السامة إلى البيئة أو التصريف الحمضي للموقع، وهو ما يمثل دائمًا مصدرًا رئيسيًا للتلوث في وادي السوق، ومن ثم تلوث سد القنيطرة . (Boukhalfa C. , 2007)

4.2. سد القنيطرة

تم بناء سد القنيطرة ، المعروف أيضًا "البركة"، بين عامي 1974 و 1984، وهو العام المتزامن مع الإغلاق النهائي لمنجم سيدي قمبر. يقع السد في أسفل الحوض الفرعي لوادي القنيطرة ، على مجرى وادي فاسة، على بعد حوالي 60 كيلومترًا إلى الجنوب من عاصمة ولاية سكيكدة. يمتلك السد قدرة إجمالية تبلغ 125 مليون متر مكعب، وقدرة مفيدة تبلغ 115.5 مليون متر مكعب وحجم قابل للتنظيم يصل إلى 48 هكتومتر مكعب سنويًا.



الشكل 6.III. تحديد موقع سد القنيطرة . (Mecibah, 2017).

يتميز سد القنيطرة بمساحة تقدر بـ 202 كم² وقدرة تخزين تقارب 125 مليون متر مكعب. يلخص (الجدول 3.III). الخصائص الرئيسية للسد (ANBT, subdivision).

يتميز حوض القنيطرة بشبكة هيدروغرافية كبيرة مع كثافة تصريف تبلغ (4.04 كم²/كم). يعد وادي فاسة هو المجرى المائي الرئيسي بالإضافة إلى الروافد الأخرى مثل: وادي شارفا الذي يمتد على طول قاعدة تضاريس ورة عند الحد الشرقي للحوض الفرعي، ووادي ماغرامين ووادي ملوح ووادي السوق، الذي يعبر المنطقة التعدينية لسيدي قمبر والتي تمتاز بأعلى انحدار (Medjram & Khelfaoui, 2014). تقدر المساهمة السنوية المتوسطة لجميع هذه الأودية في السد بحوالي 55 هكتومتر مكعب في السنة. يتم حساب هذا التقدير استنادًا إلى مساحات كل حوض فرعي. (الجدول 4.III) يوضح النسبة المقدرة لإمدادات المياه من كل رافد إلى سد القنيطرة .

الجدول III. 3. خصائص الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (ANBT, subdivision)

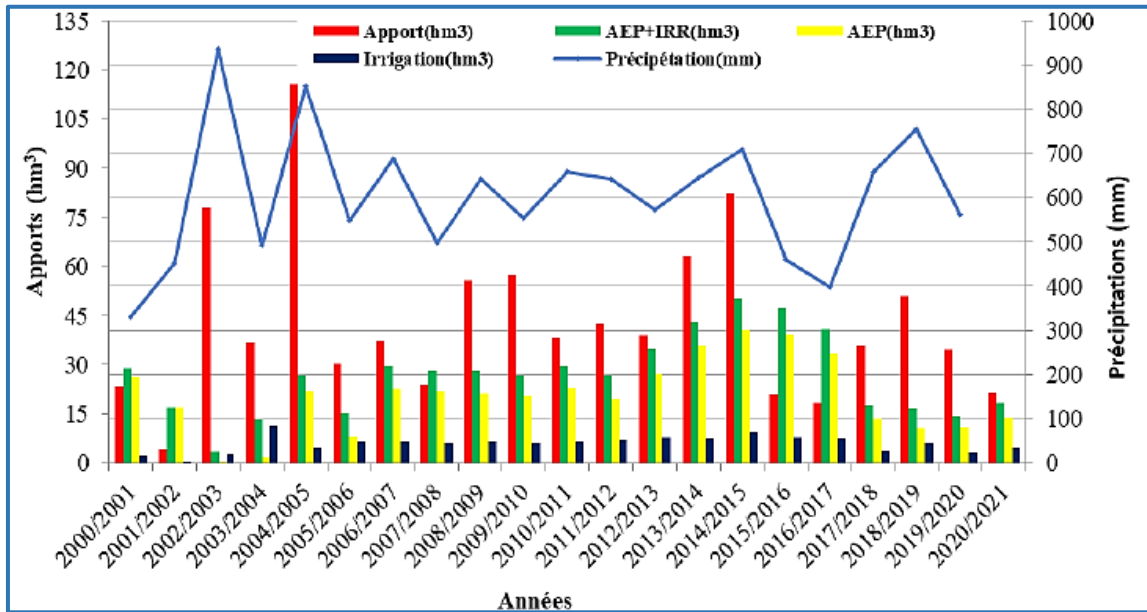
الخصائص	القيمة والوحدة	الخصائص	القيمة والوحدة
الحجم السنوي القابل للتعديل	48 مليون م ³	تصريف المشروع المقدر (عام T = 1000)	1500 م ³ /ثانية
منسوب الاحتجاز العادي	164 م	تصريف الأعمال (عام T = 50)	200 م ³ /ثانية
منسوب الاحتجاز الأدنى	167.70 م	مستوى قاع القناة	452.50 م
منسوب الاحتجاز الأقصى	163.70 م	طول قناة التحويل	452.50 م
ارتفاع الحوض	110 م إلى 1364 م	المقطع العرضي	دائري
معدل الأمطار السنوي	840 ملم	القطر الداخلي	5 م
متوسط التدفق السنوي	55 مليون م ³ أي 1.74 م ³ /ثانية	الميل	0.5 %
السد ترابي بنواة مركزية	ارتفاع السد عن القاع 58 م، العرض عند القاعدة 350 م، وطوله 480 م	التدفق الأقصى	230 م ³ /ثانية (عند H=18 م)
مناسيب مأخذ المياه	134.15 م، 144.6 م، 154.5 م	حوض التخمين	طول 27.50 م عرض 13 م
التصريف المطرود	211 م ³ /ثانية	طبيعة الأساس	الجرانيت، المارن، الحجر الرملي، الشست

الجدول III.4. إمدادات المياه من الروافد في الحوض الفرعي لوادي القنيطرة . (Hadeb & Hizir, 2018)

الحوض الفرعي	المساحة (كم ²)	نسبة المساهمة (%)
واد فاسا	76.94	38.1
واد شرفة	70.33	34.8
واد مافرمان	21.95	10.9
واد ملح	11.65	5.8
واد السوق	12.49	6.2
واديان أخرى	8.62	4.2

يلعب سد القنيطرة دورًا مركزيًا في تأمين إمدادات المياه للمنطقة، حيث يضمن توفير مياه الشرب لحوض سكاني كبير، بما في ذلك مدينة سكيكدة (37,000 م³/يوم) والمناطق الصناعية (16,000 م³/يوم)، بالإضافة إلى ري مساحات زراعية واسعة (5,654 هكتار).

تكشف تحليل البيانات التي قدمتها ANBT على مدى 21 عامًا عن إمداد متوسط سنوي يبلغ 43.37 هكتومتر مكعب في الخزان. يتم تخصيص هذه الموارد المائية بشكل رئيسي لمياه الشرب (20.50 هكتومتر مكعب/سنة) وبدرجة أقل للري (5.98 هكتومتر مكعب/سنة)، كما هو موضح في الشكل III.7.



الشكل III.7. تطور الواردات المائية لسد القنيطرة وفقًا للتساقطات المطرية (2000-2021). (Hadeb S., 2023)

2023)

تتعرض المياه السطحية لحوض سد القنيطرة لضغط بشري كبير نتيجة لتصريف المياه العادمة المنزلية والصناعية، والجريان الزراعي المحمل بالمنتجات الكيماوية الزراعية، ومياه التسرب من منجم سيدي قمبر المهجور، الغنية بالمعادن الثقيلة. هذه الملوثات المتعددة تساهم تدريجياً في تدهور جودة مياه السد.

II. الخصائص الهيدرولوجية و المناخية للمنطقة:

يلعب المناخ دوراً مركزياً في الدورة الهيدرولوجية، حيث يتحكم في التوزيع المكاني والزمني لموارد المياه. فهم الخصائص الهيدرولوجية-المناخية، مثل الأمطار، ودرجة الحرارة، والتبخر-التنح، أمر ضروري لتحليل آليات إعادة تغذية المياه وتداولها سواء السطحية أو الجوفية.

بالتوازي، تؤثر الخصائص الفيزيائية الجغرافية للحوض المائي بشكل مباشر على استجاباته الهيدرولوجية، لا سيما نظام الجريان، وفقاً للمعايير الشكلية المتنوعة. وتشمل هذه المعايير شكل الحوض، مساحته، محيطه، ارتفاعه، انحداره، واتجاهه.

تتيح هذه العوامل الهندسية، التي يتم قياسها من خلال خرائط محددة أو عبر تقنيات ونماذج رقمية، تحليلاً دقيقاً للسلوك الهيدرولوجي لأي حوض مائي.

1. محطة قياس الأمطار

يتوفر الحوض الفرعي لوادي قنيطرة على محطة قياس أمطار واحدة، تقع عند مستوى السد (محطة قنيطرة). لتحليل تغيرات العوامل المناخية في هذه المنطقة، تم استغلال بيانات هطول الأمطار ودرجات الحرارة التي تغطي فترة 30 عاماً (91/1990 - 20/2019). تم تلخيص الإحداثيات الجغرافية وخصائص المحطة المناخية المستخدمة في هذه الدراسة في الجدول أدناه.

الجدول III.5. إحداثيات محطة قياس الأمطار لسد قنيطرة (1991/1990 - 2020/2019).

(ANBT, subdivision)

المحطة	الرمز	X (كم)	Y (كم)	الارتفاع (م)	الفترة الزمنية للملاحظة
قنيطرة	30724	851.49	386.59	169	2020/2019-1991/1990

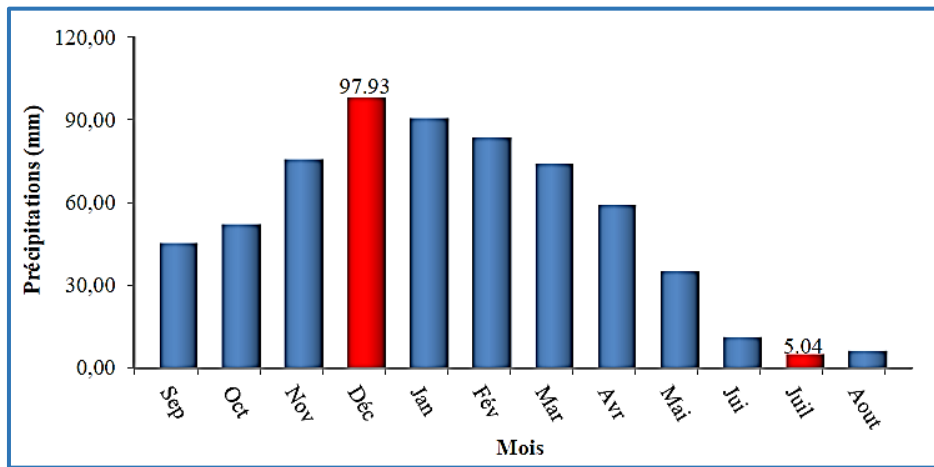
2. العوامل المناخية

1.2. هطول الأمطار

يشكل هطول الأمطار عاملاً أساسياً في تحديد المناخ لمنطقة معينة، ويعتبر عنصراً جوهرياً في ميزانية المياه. يلعب دوراً حيوياً في تغذية المياه الجوفية، وتزويد المجاري المائية، بالإضافة إلى ملء السدود والخزانات الجبلية. ومع ذلك، يتميز توزيعه بتفاوت كبير وعدم انتظام، سواء من عام لآخر أو من موسم لآخر. يتيح قياس هطول الأمطار ليس فقط تقدير كمية المياه المتساقطة، بل أيضاً تقييم كمية المياه التي تساهم في الجريان السطحي. (Zeghaba, 2018) (Khadri, 2018) (Hamzaoui, 2019).

1.1.2. المتوسط الشهري لهطول الأمطار

يوضح الرسم البياني التالي (الشكل 8.III) توزيع المتوسط الشهري لهطول الأمطار في محطة فنيطرة خلال فترة مراقبة تزيد عن 30 عاماً (1991/1990 - 2020/2019).

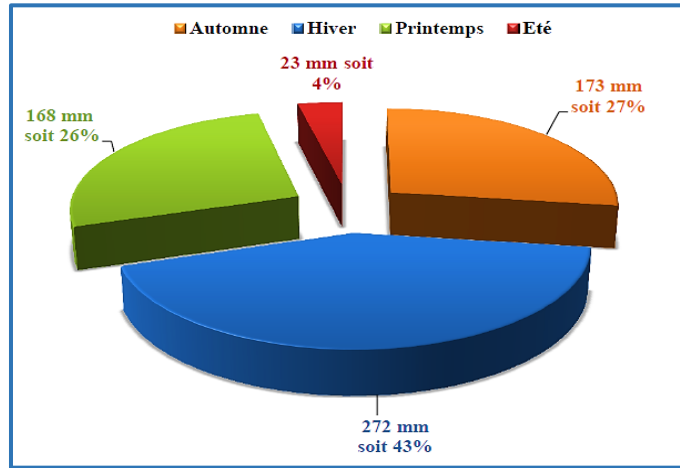


الشكل 8.III. المتوسط الشهري لهطول الأمطار في حوض التصريف الفرعي لفنيطرة (ANBT, subdivision) (2020/2019 - 1991/1990)

يُظهر المدرج التكراري تبايناً في هطول الأمطار من شهر لآخر؛ حيث تُعتبر أشهر نوفمبر، ديسمبر، جانفي، فيفري، مارس و أبريل الأكثر مطراً. على النقيض، تُعد أشهر جوان، جويلية و أوت الأقل مطراً. تم تسجيل المتوسط الشهري الأقصى لهطول الأمطار في شهر ديسمبر بمعدل 97.93 مم، بينما تم تسجيل الحد الأدنى في شهر جويلية، المعروف بأنه أكثر شهور السنة جفافاً، بمعدل 5.04 مم.

2.1.2. المتوسطات الشهرية للأمطار

تُتيح دراسة الأمطار الموسمية فهم توزيع وإيقاع هطول الأمطار من موسم إلى آخر. يتم توزيع الأمطار السنوية على المواسم الأربعة الزراعية كما يلي: الخريف (سبتمبر، أكتوبر، نوفمبر)، الشتاء (ديسمبر، جانفي، فيفري)، الربيع (مارس، أفريل، ماي)، والصيف (جوان، جويلية، أوت) (الشكل 9.III).



الشكل 9.III. متوسطات الأمطار الموسمية لمحطة قنيطرة (1991/1990 - 2020/2019).

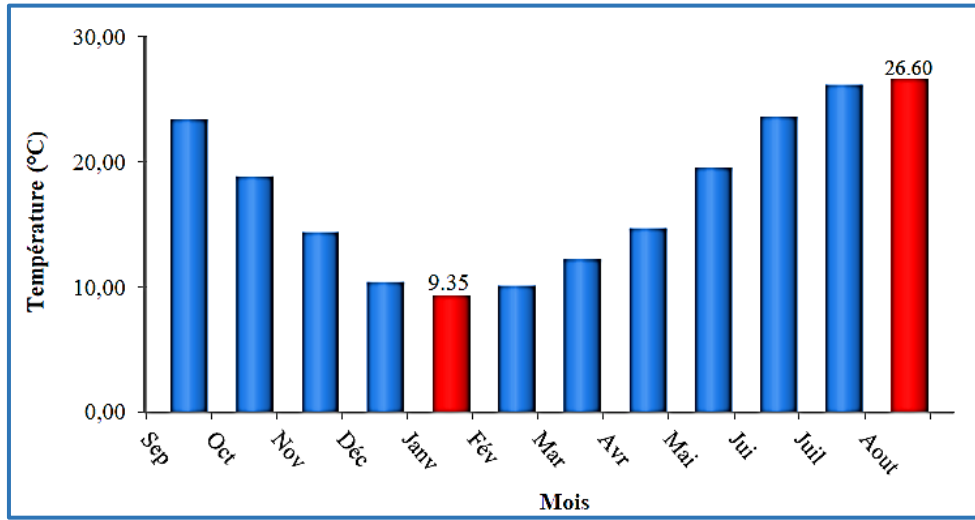
(ANBT, subdivision)

وفقاً للنتائج الموضحة في الشكل أعلاه (الشكل 9.III)، يعتبر فصل الشتاء الأكثر غزارة في تساقط الأمطار، حيث يبلغ إجمالي الأمطار 272 ملم، ما يمثل 43% من الأمطار السنوية. أما متوسطات التساقطات المطرية لفصلي الخريف والربيع فهي تبلغ على التوالي 173 ملم (27%) و168 ملم (26%). في المقابل، يُعد فصل الصيف الموسم الأكثر جفافاً، حيث يسجل إجمالي قدره 23 ملم فقط، أي ما يعادل 4% من التساقطات السنوية.

3. درجات الحرارة

تلعب درجة الحرارة المتوسطة، سواء كانت شهرية أو سنوية، دوراً حاسماً في التأثير بشكل مباشر، وبالتفاعل مع معايير مناخية أخرى (الهطول، الإشعاع الشمسي، الرطوبة الجوية، إلخ)، ومع العوامل البيوجغرافية، على عمليات التبخر. كما تؤثر على العجز المائي السنوي والموسمي، مما يجعلها أحد العوامل الرئيسية التي تتحكم في مناخ منطقة معينة. (Zeghaba, 2018) (Khadri, 2018) (Zeghaba, 2018) (Hamzaoui, 2019).

تمثل البيانات الحرارية التي جمعتها محطة الأرصاد الجوية في قنيطرة على مدى 30 عامًا (1991/1990 - 2020/2019) في الشكل التالي (الشكل 10.III).



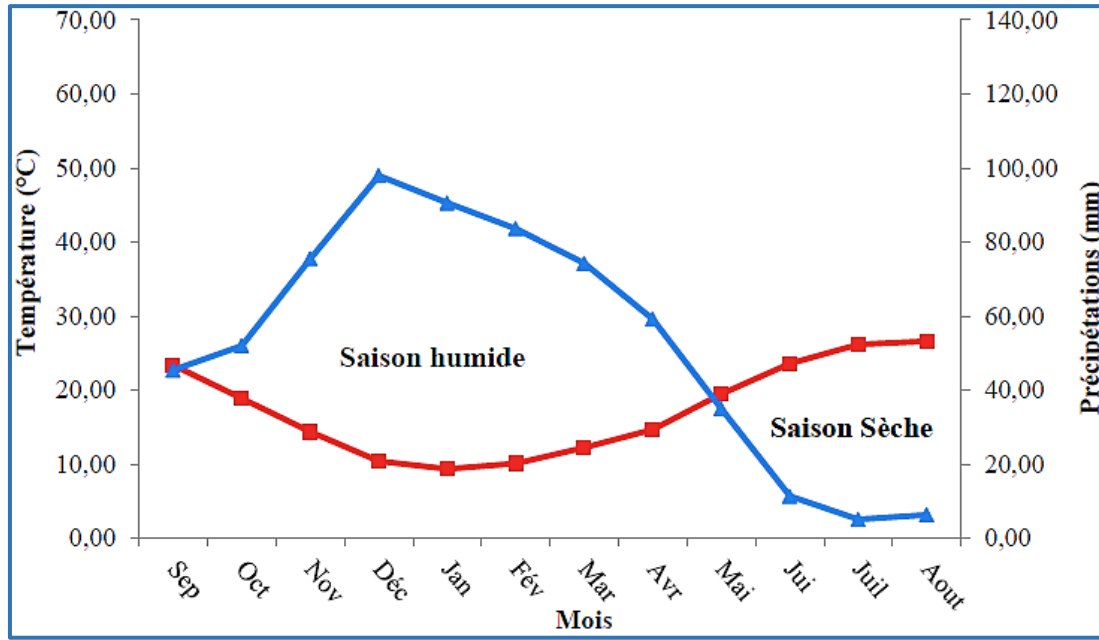
الشكل 10.III. درجات الحرارة المتوسطة الشهرية للحوض الفرعي لوادي قنيطرة (ANBT, subdivision). (2020/2019 - 1991/1990)

وفقاً للمدرج التكراري لدرجات الحرارة المتوسطة الشهرية، تم تسجيل أعلى درجة حرارة في شهر أوت حيث بلغت 26.60 درجة مئوية، بينما تم تسجيل أدنى درجة حرارة في شهر جانفي بقيمة 9.35 درجة مئوية. وبذلك، يُعتبر شهر أوت الأكثر حرارة، في حين يُعد شهر جانفي الأكثر برودة.

4. مخطط المطر-الحرارة (الأميرو-حراري)

يعتمد التصنيف المناخي الذي وضعه غوسين (1953 و 1957) على مفهوم "الشهر الجاف"، والذي يُعرّف من خلال العلاقة $P \leq 2T$ ، وكذلك على مدة الموسم الجاف. تؤدي هذه المنهجية إلى مخططات يتم فيها تمثيل درجات الحرارة بمقياس مزدوج مقارنة بتلك الخاصة بهطول الأمطار. (Dahmani, 2010).

استناداً إلى بيانات الهطول ودرجات الحرارة التي تم تسجيلها في محطة غينيترا على مدى 30 عامًا، تم إنشاء مخطط (الشكل 11.III)، حيث يُبرز التناوب بين موسمين مختلفين: موسم جاف يمتد من مايو إلى سبتمبر، وموسم رطب يمتد من أكتوبر إلى أبريل.



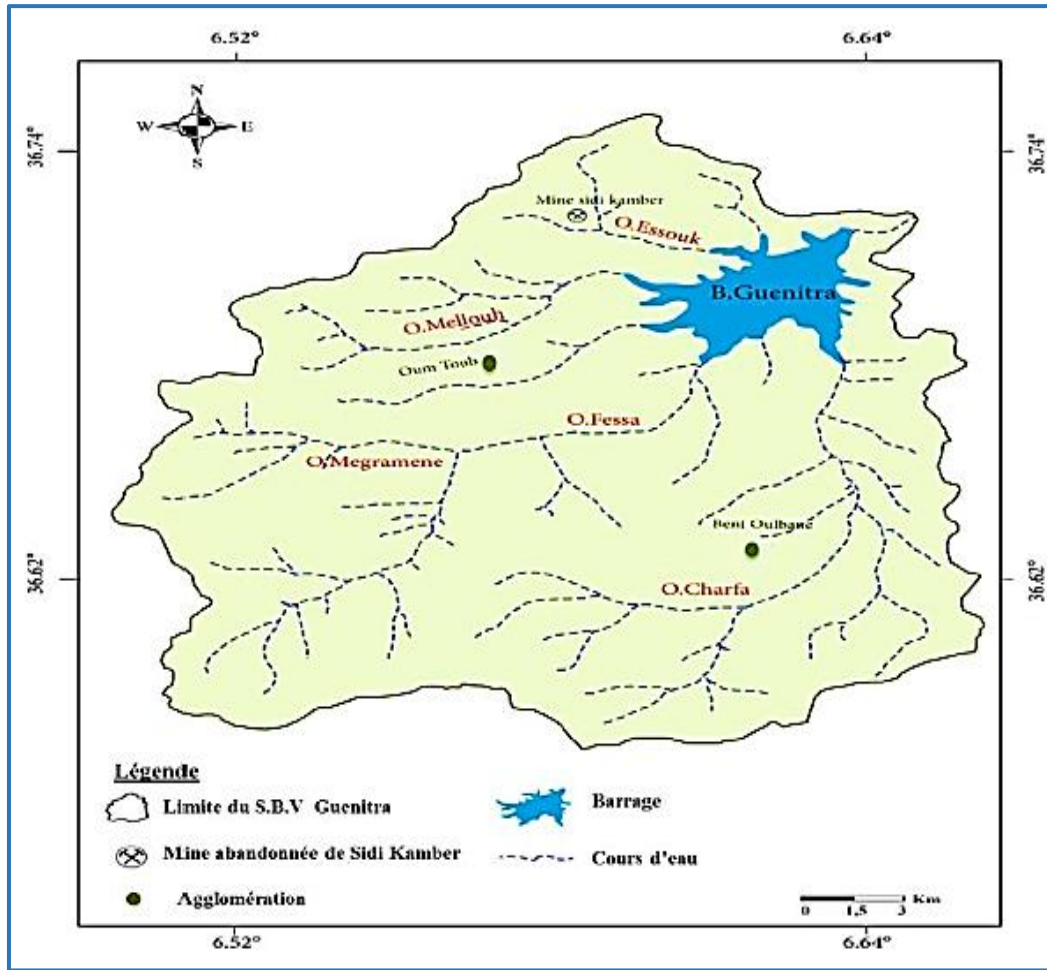
الشكل 11.III. المخطط المطري-الحراري لمحطة قنيطرة (1991/1990 - 2020/2019).

(HadeF S., 2023)

5. الشبكة الهيدروغرافية

تشير الشبكة الهيدروغرافية إلى مجموعة القنوات الطبيعية، سواء دائمة أو مؤقتة، التي تضمن تدفق مياه الجريان السطحي وتجمعها نحو نقطة تصريف واحدة تُعرف بالمخرج. تُعد هذه الشبكة واحدة من الخصائص الأساسية للحوض المائي. تتأثر كثافتها وشكلها بعدة عوامل بيئية وجيولوجية. (Khadri, 2018) (Zahi, 2014) يغطي الحوض الفرعي لواد قنيطرة (الشكل 12.III) مساحة تقدر بـ 202.6 كم²، ويتلقى متوسط طبقة مائية سنوية يبلغ 635.83 مم.

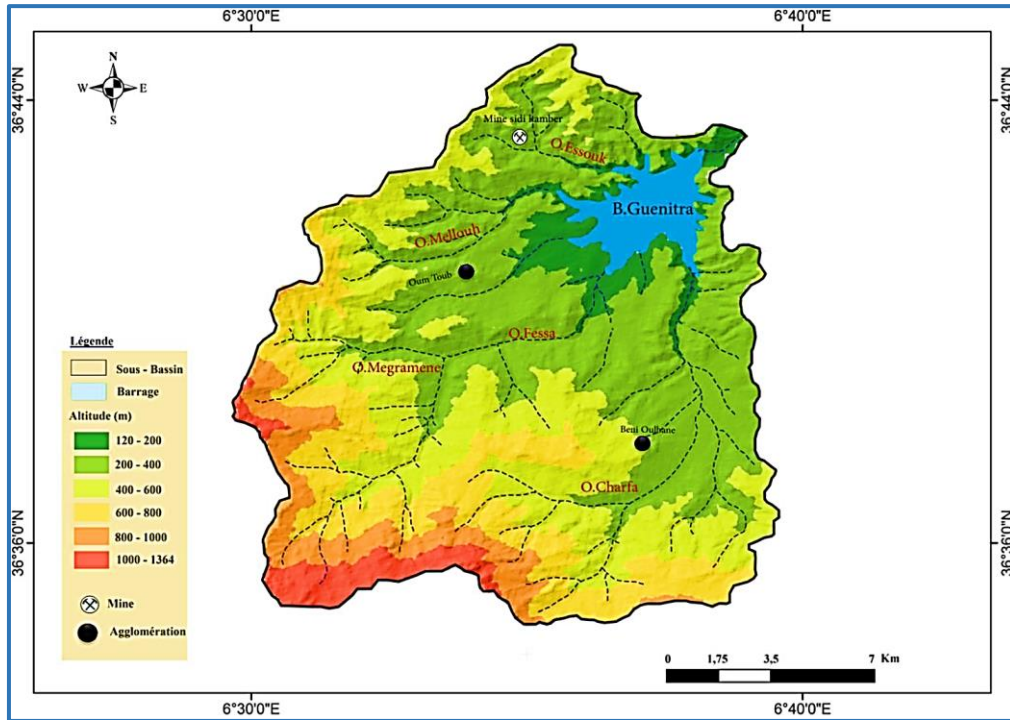
وتتميز شبكته الهيدروغرافية بالكثافة، حيث تبلغ قيمتها 4.04 كم²/كم²، وتهيمن عليها واد فسا، الذي يُعتبر المجرى المائي الرئيسي الذي يغذي السد. هذا المجرى المائي، مع روافده العديدة، يوفر تدفقات مائية كبيرة، خاصة خلال الموسم الممطر (الشتاء). (HadeF & Hizir, 2018)



الشكل 12.III. الشبكة الهيدروغرافية للحوض الفرعي لواد قنيطرة . (Hadeif S., 2023)

1.1.5. الارتفاعات النموذجية

من خلال المنحنى الهيسوغرافي، يمكن تحديد قيم الارتفاع الوسيط أو الارتفاع ذو التردد 2/1؛ وهو قيمة الارتفاع التي تقسم مساحة الحوض بحيث تمثل 50% من مساحة الحوض القيمة التي تتوافق مع تردد 50%. يظهر الحوض الفرعي لواد غينيترا ارتفاعاً متوسطاً (H_{moy}) يقارب 492.54 متراً وارتفاعاً وسيطاً يقارب 530.28 متراً (الشكل 13.III). الارتفاع الوسيط أعلى من الارتفاع المتوسط، مما يظهر وجود عدم تماثل في الارتفاعات على مستوى الحوض الفرعي.



الشكل 13.III. خريطة الارتفاعات في الحوض الفرعي لوادي قنيطرة . (Hadeb S., 2023)

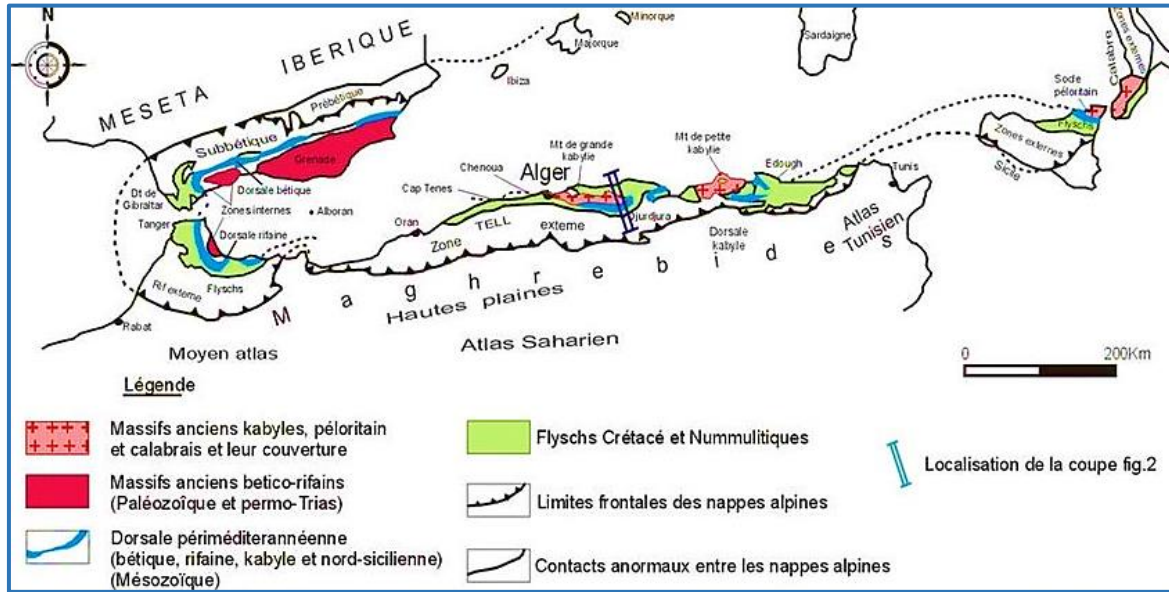
III. الإطار الجيولوجي لمنطقة الدراسة

تلعب الجيولوجيا من خلال تحديد طبيعة وهيكـل الصخور دوراً رئيسياً في تحليل العمليات الهيدروولوجية والهيدروكيميائية. في حوض قنيطرة أظهرت الأبحاث الجيولوجية (Vila, 1969) (Raoult, 1974) (Bouillin, 1977) (Marre, 1987) تركيبة معقدة. يتكون هذا الحوض بشكل رئيسي من صخور بلورية تنتمي إلى الأساس الكابيلي، والتي يعود عمرها إلى العصور البروتروزويكية والفترة الكامبرية السفلى. إلى هذه الأساس، توجد غطاء ميزوزويكي مكون من السلسلة الجيرية، والفليس الموريتاني، وفي جزء أقل، الفليس المسلي. كما تلاحظ وجود وحدات جبلية بشكل متفرق، التي تشهد على التاريخ الجيولوجي المتنوع لهذه المنطقة. هذه الخصائص الجيولوجية تؤثر بشكل مباشر على الديناميكيات المائية والتفاعلات بين المياه السطحية والمياه الجوفية.

1. الجيولوجيا الإقليمية

تعتبر السلسلة الجبلية الألبية في شمال إفريقيا، والمعروفة باسم "سلسلة المغاربية"، جزءاً من الأوروجين الألبية المحيطي المتوسطي (Durand Delga, 1969) الذي يعود إلى الحقبة الجيولوجية الثلاثية. تمتد هذه السلسلة على مسافة 2000 كيلومتر من الغرب إلى الشرق، بدءاً من جنوب إسبانيا وصولاً إلى القوس الكلابري-الصقلي.

وتتميز هذه السلسلة بهيكل معقد يتكون من وحدات هيكلية مختلفة تنتمي إلى ثلاثة مجالات من الشمال إلى الجنوب: الداخلي، المتوسط، والخارجي (الشكل 14.III).



الشكل 14.III. المجالات الكبرى للأصل الألبني في البحر الأبيض المتوسط الغربي. (Durand Delga, 1969)

1.1 السمات الجيولوجية الكبرى للقبائل الصغيرة

تقع كتلة القبائل الصغيرة شمال سلسلة الأطلس التلي، ويمتد على طول أكثر من 150 كيلومتراً على طول الساحل المتوسط، بين جيجل في الغرب وكتلة فلفلة (سكيكدة) في الشرق، بعرض شمالي جنوبي يبلغ حوالي 50 كيلومتراً. وهو يشكل أوسع انتشار للصخور المتحولة البلورية على الساحل الجزائري. تجمع بنيته المعقدة وحدات ألوكتونية (الوحدات المغترية) من المجالات الداخلية والخارجية، بالإضافة إلى طبقات فليش، بما في ذلك، محلياً، تداخلات من صخور نارية تعود إلى الميوسين.

1.1.1 القاعدة القبائلية

توجد هذه القاعدة بشكل رئيسي غرب سكيكدة. تتكون من كتل صخرية متحولة بلورية (غنايس، رخام، أمفيبوليت، ميكاشيست وشيست) وفوق متحولة تعرضت للتفتت والإنصهار تحت تأثير الجرانيتات هرشينية.

(Durand Delga, 1969) ، (Bouillin, 1977) (Mahdjoub, 1991) .

2.1.1. الظهرة القبائلية

يطلق عليها جلانجود (1933) سلسلة جبال كلسية، أو فيشير (1903) سلسلة لياسية. وقد أدخل دوراند ديلاغا (1969) اسم الظهرة القبائلية، وتمثل الغطاء للقاعدة القبائلية. تتكون أساساً من تكوينات كربونية مثل كتلة سيدي دريس التي تتميز ببنية تكتونية على شكل حراشف.

في الواقع، يمكن تمييز العديد من السلاسل من الشمال إلى الجنوب: الظهرة الداخلية، والظهرة الوسطى، والظهرة الخارجية. (Raoult, 1974) (Durand Delga, 1969) (Lemoy, 1969) (Durand Delga, Raoult, & Villa, 1967) (Mahdjoub, 1991) (Bouillin, 1979)

3.1.1. السلاسل ذات الطابع الفليشي

في الجزائر، نميز بشكل تقليدي عدة أنواع من الفليش، من بينها الفليشات الكريتاسية القبائلية التي تمثل تكوينات بحرية عميقة ترسبت بفعل تيارات الطمي. وهي تشكل دائماً أراضٍ ألوكتونية (مغترية) تمثلها الفليشات الموريتانية والفليشات الماسيلية (Gélar, 1969)، (Bouillin, 1979).

وهناك نوع ثالث من الفليش يتميز به، وهو الفليش النوميدي الذي تظهر سلسلته التي تعود إلى العصر الأوليغوسيني والميوسيني دائماً على شكل طبقة.

4.1.1. السلاسل التلية

تسيطر على هذه السلاسل واجهات صخرية طينية-كلسية تعود إلى العصر النيوكومي (Bouillin, 1979)، وهي تتوافق مع مختلف الواجهات الصخرية للتكوين التلي التي يمكن تلخيصها على النحو التالي:

- أ. واجهات صخرية طينية-كلسية من النيوكومي إلى اللوتيسي.
- ب. واجهات صخرية من نوع الكلسيات الدقيقة والطبقات الرقيقة من الراديولاريت من المالم.
- ج. واجهات صخرية طينية-كلسية تحتوي على أمونيت من النيوكومي البارميني.
- د. مارن مع مستويات من الكونجولوميرات من السينوني.

5.1.1. الأوليجوسين والميوسين القبائلي والأوليستوستراتمات

يتكون التكوين الرسوبي للمنطقة من ثلاثة مستويات ليثولوجية متميزة :

- أ. مستوى أساسي يعود إلى نهاية العصر الأوليجوسيني، يتكون من بَحْت وكونجولوميرات ذات حصى متعددة الأصول نشأت بشكل أساسي من الصخور المتحولة لقاعدة القبائل الصغيرة.
- ب. مستوى متوسط يتكون من بيليتات ميكائية غنية بفتات القاعدة ولعدسات كونجولوميراتية.
- ج. مستوى علوي يتكون من بيليتات سيليسية تحتوي راديولاريات ودياتومات، وربما يعود إلى العصر الأكويتاني. الأوليستوستراتمات، ذات أصل تكتوني-رسوبي وتعود إلى العصر الأكويتاني السفلي والبورديغالييني، تتكون من فتات من الفليش الموريتاني والماسيلي، بالإضافة إلى تراكمات من تكوينات النموليوتيك الثاني والطبقات التيلية التي تستقر على الأوليجوسين والميوسين القبائلي. (Bouillin, 1979)، (Raoult, 1974)، (Vila, 1969).

6.1.1. النشاط البركاني

في عام 1965، بدأت دراسة منهجية للنشاط البركاني النيوجيني بشكل مشترك في كل الهيكل الألبى حول البحر الأبيض المتوسط (Satouh, 2007)، انطلاقاً من النتائج الأولى التي تم الحصول عليها في منطقة الأنديز، والتي تمثل مثلاً نموذجياً على هامش نشط. علاوة على ذلك، تم إجراء دراسة إحصائية ومقارنة للبيانات الجيوكيميائية والنوعية والزمنية لمختلف الكتل (Mahdjoub, 1991)، والتي سلطت الضوء على اختلافات محلية أو عامة تعتبر اليوم ذات دلالة على الحركات النسبية للصفائح التكتونية المشاركة في الإطار المتوسطي. في الأحواض الساحلية "ما بعد الطبقات"، ظهر نشاط بركاني كالكو-ألكالي وألكالي يعود إلى العصر الميوسيني والرباعي (Mahdjoub, 1991). توجد هذه الصخور البركانية في المناطق الساحلية غرب وهران، وفي المنطقة الجزائرية (مناطق شرشال، دلس، والثنية)، وحول خليج بجاية، وكذلك في كتلة القل، وبين منطقتي سكيكدة و عنابة. (Rosenbaum, Lister, & Duboz, 2002)

2. الجيولوجيا المحلية

بالنسبة لهذه الدراسة، قمنا بإعطاء الأفضلية للخريطة الجيولوجية على مقياس 1/500 000 لـ Vila (1980) وذلك للحصول على رؤية شاملة للمختلف السُحنات الجيولوجية للمنطقة. وعلى الرغم من أن دراسات أكثر محلية وتفصيلاً، مثل دراسة Mahdjoub (1991)، قد تم إجراؤها، هذه الخريطة مكنتنا من تحديد الوحدات الجيولوجية الرئيسية، ولا سيما الصخور البلورية لقاعدة القبائل الصغيرة، والرواسب الميزوزوية (السلسلة الكلسية) والفليشات، وكذلك التكوينات الأحدث من الأوليجوسين والميوسين. (Hadeb S., 2023)

1.2. التكوينات المتحولة

في الحوض الفرعي لغنيترا، تظهر تكوينات القاعدة القبائلية بشكل جيد في الجزء الشمالي الغربي، على الرغم من أنها تظهر في باقي المنطقة على شكل نوافذ تكتونية. وهي تمثل بشكل أساسي بالغنايس وأنواع مختلفة من الشيست، وفيما يلي وصف موجز لكل سُحنة:

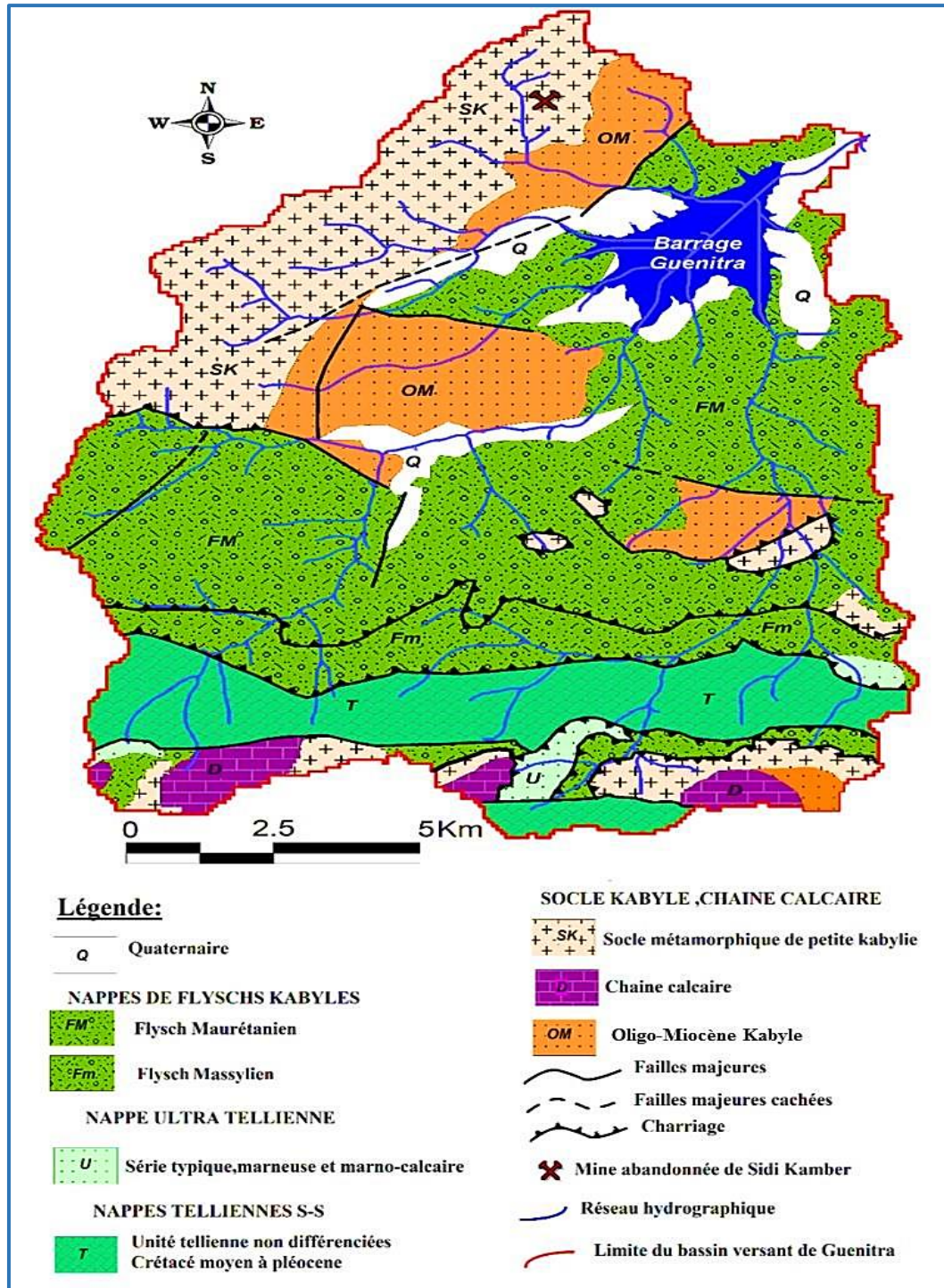
1.1.2. الشَّيْست

هي صخور ذات ألوان متغيرة (من الرمادي الغرافيتي شبه الأسود إلى الأخضر الفاتح)، ذات صفائح غالباً ما تكون متموجة، وهي منتشرة في منطقة منجم سيدي قمبر. غالباً ما ترتبط هذه الشَّيْست بأوردة من الكوارتز، وهناك نوعان منها: الشَّيْست البيوتيتي والشَّيْست الكلوريتي؛ أ. الميكاشيست هي شَّيْست غرافيتي أسود لامع بشكل أساسي، مقسمة إلى أوراق رقيقة غنية بالبيوتيت، وغالباً ما تكون مطوية وملتوية.

ب. الكلوريت شيست أقل شيوعاً، أسود إلى مخضر، غني بالإبر الدقيقة وشظايا الكلوريت.

2.1.2. الغنايس

تتكون من حبيبات متوسطة وكبيرة الحجم، مع رقائق مميزة عادة بطبقات فاتحة (بيضاء، رمادية، وردية) من الكوارتز والفلسبات، وهي كثيرة ومرئية بالعين المجردة. تظهر في منطقة دراستنا بنوعين: الناييس الفاتح العيني والناييس الداكن.



الشكل III.15. الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة (حسب فيلا 1980). (HadeF S., 2023)

2.2. الصخور النارية

التكوينات البركانية أقل تطوراً من التكوينات الأخرى. وهي تمثل بشكل رئيسي بـ ميكروجرانيتات فاتحة غنية بالفلسبات. تظهر في القاعدة على شكل أوردة و عروق.

3.2. التشكيلات الرسوبية

على مستوى التشكيلات الرسوبية، يحتل الفليش الموريتاني الجزء الأكبر من الحوض الفرعي. وفي الجزء العلوي من هذا الأخير، تتوزع التشكيلات الكربوناتيّة المتمثلة في الوحدات التلية والسلسلة الكلسية.

1.3.2. السلسلة الكلسية أو الظهيرية القبائلية

كما يوحي اسمها، فإن الضهر الكابيلي يتكون بشكل رئيسي من تكوينات كربونية تعود إلى الفترة الزمنية الممتدة من اللياس السفلي إلى اللوتيتين. وقد تم دراسة السلسلة الكلسية في التل الشرقي الجزائري من قبل راوولث Raoult (1974) و Vila (1980). وفي المنطقة المدروسة، تقع هذه السلسلة في الجزء الجنوبي على شكل شرائح تمتد لحوالي كيلومترين. وتختلف السحنة و السمك للصخور الكلسية من مكان لآخر، مما يؤثر بشكل كبير على جيومورفولوجيا و هيدروجيولوجيا للمنطقة.

2.3.2. الفليش الموريتاني

تم اقتراح تحديد عمر الفليش الموريتاني على أنه يمتد من المالم إلى اللوثيسي العلوي (Gélard, 1969). يتطور الفليش الموريتاني بشكل خاص، على شكل لوح انزلاقي، في الجزء المركزي من الحوض الفرعي المتجه نحو سد قنيطرة باتجاه المنبع، ينقلص انتشار هذا التكوين.

3.3.2. الأوليغو-ميوسين القبائلي (OMK)

يشير مفهوم (OMK) إلى مجموع التكوينات الحطامية غير المتوافقة على الصخور الأساسية القبائلية والتي يعود تاريخ قاعدتها إلى الأوليغوسين العلوي و/أو الأكويتاني السفلي (Raoult, 1974). نجد في الطينيات التابعة لـ (OMK) كتلاً من جميع الأحجام مستمدة أساساً من طبقات الفليش. تظهر تكوينات (OMK) بشكل رئيسي في المنطقة الشمالية والشمال غربية من الحوض الفرعي.

4.3.2. العصر الرباعي

التكوينات الحديثة التي ترسبت فوق جميع التكوينات القديمة الأخرى (Amrani, 2007) (Talhaoui, El Hmaidi, Jaddi, & Ousmana, 2020). تشكل هذه التكوينات الأخيرة مدرجات نهريّة تظهر على شكل سلاسل متداخلة

ومغطاة بمواد تتكون أساسًا من رواسب من جميع الأنواع: الطمي، والرمل، والطين الرملي، والحصى، والرمل، ودرجة أقل، من الترافرتين والحجر الجيري الطفلي. في المناطق المنخفضة، يشغل الرباعي بشكل رئيسي الجزء السفلي (حول السد).

3. جيولوجيا موقع سد قنيطرة

1.3. الأساس الصخري

تتجه البنية الرئيسية على الجانب الأيمن من الموقع تقريبًا في الاتجاه (ENE-WSW) وتضم:

- على الضفة اليسرى، صخور الغنايس المتشققة والمعاد تبلورها إلى غرانوليت، وهي على تماس بفالق إتجاهه (ENE) مع صخور الغنايس الغنية بالميكروالواقعة في المنبع المباشر لمصرف الفيضانات، تقطع العديد من الفوالق هذا الدعام.

- في قاع الوادي الأوسط، توجد صخور الشيست والفيالات الكوارتزيت ذات التورق المتفاوت.

- على الضفة اليمنى، تحت الرواسب المنحدية، تظهر سلسلة من الطبقات ذات الأصل الحطامي المائلة،

والتي تضم الكونغلوميرات والطين المتماسك (المارن) الملون والحجر الرملي. (Mecibah, 2017)

2.3. التكوينات السطحية

باستثناء الضفة اليسرى، حيث تغطية التكوينات الرخوة على الجانب الأيمن من الموقع تكاد تكون غير موجودة، فإن الأساس الصخري مغطى بطبقة ذات سمك متغير من الرواسب المنحدية والرواسب النهرية في قاع الوادي. تمت ملاحظة وإزالة عدة انزلاقات أرضية قديمة جزئيًا، وهي :

- على الضفة اليسرى، عند مستوى أسفل المنبع للسد المؤقت. يقع هذا الانزلاق على شيبات شديد التشقق

نتيجة لوجود فالق رئيسي يتجه NS-NNW-SSE.

الخاتمة

يتغذى الحوض الفرعي لوادي قنيطرة، الواقع جنوب غرب ولاية سكيكدة والذي تصب فيه خمسة أودية رئيسية، من مياه سد قنيطرة. يتعرض هذا الحوض، الخاضع لمناخ متوسطي شبه رطب، لتدهور في جودة مياهه بسبب التصريفات الحضرية والزراعية، إضافة إلى التلوث الناتج عن منجم سيدي قمير. أتاحت دراسة البيانات المناخية لفترة رصد مدتها 30 سنة تصنيف المنطقة المناخية كإقليم يتميز بمناخ متوسطي شبه رطب، له فصلان متميزان بوضوح: فصل ممطر رطب يتميز بكمية هطول أمطار مرتفعة ودرجات حرارة منخفضة، وفصل جاف أقل مطراً ودرجات حرارة مرتفعة نسبياً. يتراوح متوسط درجة الحرارة الشهرية بين 9,35 درجة مئوية (جانفي) و26,6 درجة مئوية (أوت)، بينما يتراوح متوسط الهطول الشهري بين 5,04 ملم (جوان) و97,93 ملم (ديسمبر).

تتضمن جيولوجيا الحوض الفرعي لوادي قنيطرة مجالات بنيوية مختلفة. الصخور المتحولة (القاعدة القبائلية) التي تعود إلى الحقبة البروتروزوية والعصر الباليوزوي الأدنى، والتي تغطيها أحياناً الطبقات الجيرية للحقبة الميزوزوية (السلسلة الكلسية)، تظهر بشكل رئيسي في الجزء الشمالي الغربي من الحوض الفرعي وأيضاً بدرجة أقل في الجزء الجنوبي. بالإضافة إلى ذلك، تُعد وحدات الأطلس التلي وتكوين الفليش الأكثر انتشاراً. تمثل تكوينات القاعدة القبائلية بشكل رئيسي صخور الغنايس وأنواع مختلفة من الشيست. تحتوي هذه التكوينات المتحولة على المعادن الكبريتية المختلفة؛ Pb-Zn-Fe-Ba في منطقة سيدي قمير. الصخور النارية، الممثلة فقط بواسطة الميكروغرانيت، أقل انتشاراً وتوجد كاختراقات (Dykes) في القاعدة القبائلية. أما تكوينات الفليش التي تعود إلى العصر الطباشيري فتشغل مركز الحوض الفرعي، بينما تسيطر التكوينات الكربونية (المارن، الحجر الجيري، المارن الكلسي) لوحدة الأطلس التلي على الجزء العلوي من الحوض.

الفصل الرابع:

تقييم الوضع الحالي لجودة المياه في سد القنيطرة ومحيطه وتحديات المستقبل

مقدمة

يُعدّ سد قنيطرة من أهم المنشآت المائية الاستراتيجية في ولاية سكيكدة، حيث يلعب دورًا حيويًا في تأمين المياه لمنطقة أم الطوب والمناطق المجاورة، سواء لأغراض الشرب أو الزراعة أو الاستخدامات الصناعية المحدودة. وتكتسي هذه المنشأة أهمية متزايدة في ظل الضغوط المتزايدة على الموارد المائية، الناتجة عن التغيرات المناخية والنمو السكاني وتوسّع الأنشطة الاقتصادية والزراعية.

يهدف هذا الفصل إلى تسليط الضوء على الوضعية الحالية لجودة مياه سد قنيطرة من خلال تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه، وذلك بالاعتماد على نتائج التحاليل الميدانية والبيانات المتوفرة من الهيئات المختصة. كما يتناول الفصل أبرز التحديات التي تواجه هذا المورد الحيوي، وعلى رأسها مصادر التلوث المختلفة، سواء كانت ناتجة عن الأنشطة الفلاحية أو عن مخلفات المناطق السكنية المجاورة، خاصة في ظل القرب الجغرافي من موقع المنجم القديم بسيدي قمبر.

1 . المنهجية والمعطيات المستخدمة

يرتكز هذا العمل على مقارنة تحليلية تجمع بين البعدين الزمني والمكاني لتقييم جودة المياه في منطقة الدراسة، بهدف تشخيص الوضع الحالي لسد قنيطرة ومجرى واد السوق المجاور له، وتحديد الاتجاهات المحتملة لتدهور أو تحسن نوعية المياه. تم الاعتماد في هذا التقييم على مجموعتين رئيسيتين من المعطيات:

• تحاليل فيزيائية وكيميائية لمياه سد قنيطرة

تم توظيف معطيات رصد للوكالة الوطنية للموارد المائية (ANRH) - وحدة قسنطينة، وذلك عبر شبكة مراقبة نوعية المياه السطحية. تمتد على فترة خمس سنوات، من سنة 2016 إلى سنة 2020. وتشمل هذه المعطيات قياسات دورية لمجموعة من المؤشرات الأساسية لجودة المياه، مثل الأس الهيدروجيني (pH)، الموصلية الكهربائية (CE)، المواد الصلبة (RS)، بالإضافة إلى العناصر الكيميائية الرئيسية، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ و HCO_3^- والعناصر الأزوتية والفسفورية (NO_3^- ، NO_2^- ، NH_4^+ ، PO_4^{3-}).

• تحاليل عينات من مياه واد السوق

بغرض تعميق الفهم حول تطور الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه واد السوق، الذي يتأثر بشكل مباشر بمخلفات منجم سيدي قمبر المهجور، تم الاعتماد على معطيات ناتجة عن حملات ميدانية لمتابعة أربع نقاط رئيسية لأخذ العينات على طول الوادي لسنة 2019. حيث يُعد هذا الأخير مساراً نشطاً لتصريف نفايات المنجم، خاصة خلال فترات التساقطات المطرية، حيث تنقل الجريان السطحي نحو مجرى الوادي، الذي يصب بدوره مباشرة في سد قنيطرة. وهو ما يُشكل تهديداً جدياً لنوعية مياه السد، من حيث التلوث الكيميائي والتدهور البيئي طويل المدى. (Hadeif, 2023)

وقد خضعت هذه المعطيات لمعالجة وتحليل باستعمال أدوات إحصائية ووصفية، بهدف إبراز الأنماط الموسمية والسنوية لتغير نوعية المياه، بالإضافة إلى إجراء مقارنات مكانية بين مختلف نقاط أخذ العينات، مما مكن من تحديد مصادر التلوث وتقييم امتداده داخل الحوض المائي المغذي للسد.

2 . تحليل البيانات

يهدف هذا الفصل إلى تقديم معالجة علمية للمعطيات المتوفرة حول جودة مياه سد قنيطرة، وذلك من خلال تحليل زمني ومكاني لمجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية. تسمح هذه المقاربة بالكشف عن الاتجاهات العامة لتطور نوعية المياه، وتحديد فترات التدهور أو التحسن، مع ربطها بالسياق البيئي والأنشطة المحيطة بالحوض.

1.2. التحليل الزمني لجودة مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

تكتسي دراسة تطور جودة مياه سد قنيطرة أهمية بالغة لضمان استدامة استخدامها، خاصة في مجالات الشرب والزراعة. يهدف هذا التحليل الزمني إلى تتبع التغيرات في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه خلال الفترة الممتدة بين 2016 و2020، مما يسمح بفهم ديناميكيات التلوث وتأثير العوامل الطبيعية والبشرية على المورد المائي. يعتمد هذا التحليل على بيانات دورية تُمكن من الكشف عن الاتجاهات والاختلالات المحتملة في جودة المياه.

1.1.2. المعايير الفيزيائية المقاسة في الموقع (*in-situ*)

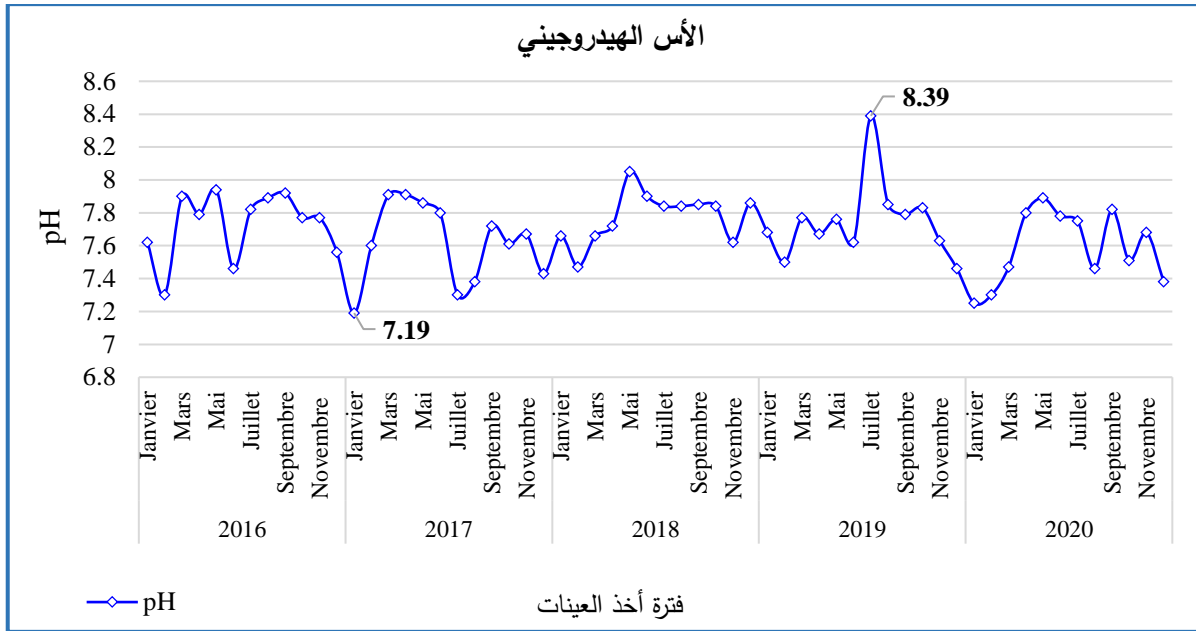
تشكل المعايير الفيزيائية المقاسة مباشرة في الميدان مؤشرات أولية وضرورية لتقييم الحالة العامة للمياه. تشمل هذه المعايير درجة الحرارة، ودرجة الحموضة (pH)، والموصليّة الكهربائية (CE)، وتُقاس باستخدام أجهزة محمولة تضمن دقة الملاحظات الميدانية. تُوفر هذه المعطيات فهماً فورياً للظروف البيئية في موقع أخذ العينات، كما تساهم في تفسير سلوك باقي المكونات الكيميائية والحيوية للمياه.

أ. تحليل تطور قيم الأس الهيدروجيني في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

أظهرت النتائج أن قيم الأس الهيدروجيني (pH) تراوحت بين 7.19 (جانفي 2017) و8.39 (جويلية 2019)، مما يدل على أن المياه كانت متعادلة إلى قاعدية خفيفة، متوافقة مع خصائص المياه السطحية في المناطق ذات الصخور الكلسية.

وبحسب معايير منظمة الصحة العالمية، فإن مجال (pH) المناسب يتراوح بين 6.5 و8.5، وقد بقيت مياه السد ضمن هذا النطاق طوال الفترة، مما يشير إلى غياب التلوث الحمضي واستقرار كيميائي نسبي للمياه. كما لم تُسجّل تجاوزات واضحة للحد الأعلى (8.5)، ما يدعم صلاحية المياه للري دون مخاطر حموضة كبيرة. لوحظت تغيرات فصلية طفيفة في pH، مع ارتفاع طفيف خلال الصيف (جويلية - أوت)، يُعزى إلى زيادة درجات الحرارة والنشاط البيولوجي مثل نمو الطحالب.

بناءً على هذه المعطيات، تُعتبر مياه سد قنيطرة خلال الفترة (2016-2020) مناسبة من حيث الأس الهيدروجيني للاستخدام الزراعي، دون الحاجة إلى تدخلات تصحيحية.



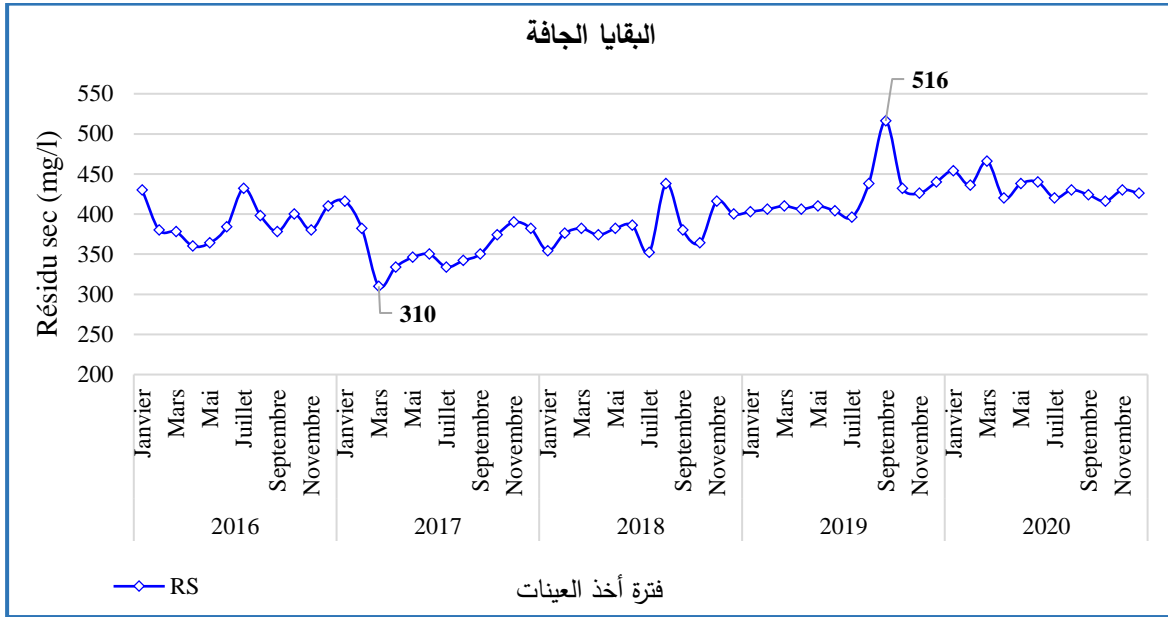
الشكل 1.VI. منحنى تطور قيم الأس الهيدروجيني في مياه سد قنيطرة (2016-2020).

ب. تحليل تطور تراكيز البقايا الجافة (RS) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

تعدّ البقايا الجافة (RS) مؤشراً أساسياً لتقدير كمية المواد الصلبة الذائبة في المياه، وهي تعكس بدرجة كبيرة جودة المياه ومدى ملاءمتها للاستخدامات المختلفة، لا سيما في المجال الزراعي والشرب. خلال الفترة الممتدة من سنة 2016 إلى سنة 2020، سجلت مياه سد قنيطرة قيماً متفاوتة للبقايا الجافة، تراوحت بين 310 ملغ/ل (مارس 2017) و516 ملغ/ل (سبتمبر 2019). تُظهر هذه القيم أنّ مستوى المواد الصلبة الذائبة بقي مستقرّاً نسبياً خلال السنوات الخمس، مع بعض التذبذبات الموسمية والسنوية.

وقد ظلّت جميع القيم المسجلة للبقايا الجافة ضمن الحد الأقصى الموصى به من قبل منظمة الصحة العالمية (1000 ملغ/ل)، مما يدل على أن المياه تحتفظ بتركيبية معدنية معتدلة لا تمثل خطراً على الصحة العامة أو على التربة عند استعمالها في الري. تُلاحظ أيضاً ذروة مرتفعة نسبياً في أشهر الصيف وخاصة في سبتمبر 2019 (516 ملغ/ل)، وهو ما يمكن أن يرتبط بانخفاض حجم المياه وزيادة التركيز نتيجة التبخر وارتفاع درجات الحرارة.

بصفة عامة، تُظهر البيانات أن نوعية مياه سد قنيطرة من حيث البقايا الجافة تبقى جيدة، ولا تُظهر مؤشرات مقلقة من حيث التدهور أو التملح، مما يجعلها صالحة لمختلف الاستخدامات التقليدية.

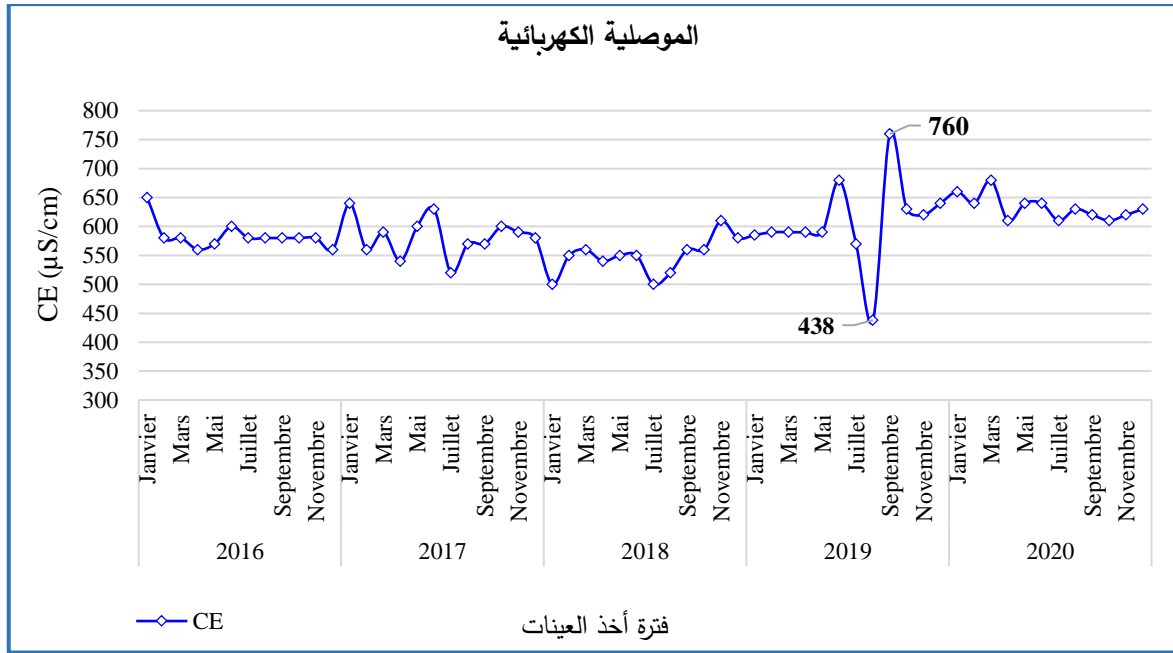


الشكل 2.VI. منحنى تطور تراكيز البقايا الجافة (RS) في مياه سد قنيطرة (2016-2020).

ج. تحليل تطور قيم الموصلية الكهربائية (CE) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

تراوحت قيم الموصلية الكهربائية في مياه سد قنيطرة بين 438 و 760 ميكروسيمنس/سم، مع استقرار نسبي في معظم الفترات ضمن 500-650 ميكروسيمنس/سم، مما يصنف المياه ضمن فئة "C2" حسب تصنيف Wilcox، مياه ذات ملوحة متوسطة صالحة للري مع مراقبة خاصة في التربة الثقيلة أو الحساسة للملوحة. جميع القيم المسجلة كانت أقل من الحد الأقصى الموصى به من منظمة الصحة العالمية (2500 ميكروسيمنس/سم)، ما يشير إلى غياب مخاطر الملوحة الحادة. الزيادة الملحوظة في سبتمبر 2019 (760 ميكروسيمنس/سم) تعزى لانخفاض حجم المياه وزيادة التبخر الصيفي، لكنها تبقى ضمن الحدود المقبولة للاستخدام الزراعي.

بناءً على التحليل الدوري للخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه خلال خمس سنوات، تعتبر مياه سد قنيطرة مناسبة للري دون الحاجة إلى معالجة، مع أهمية المراقبة الدورية خاصة في فترات الجفاف للحفاظ على استدامة الموارد الزراعية.

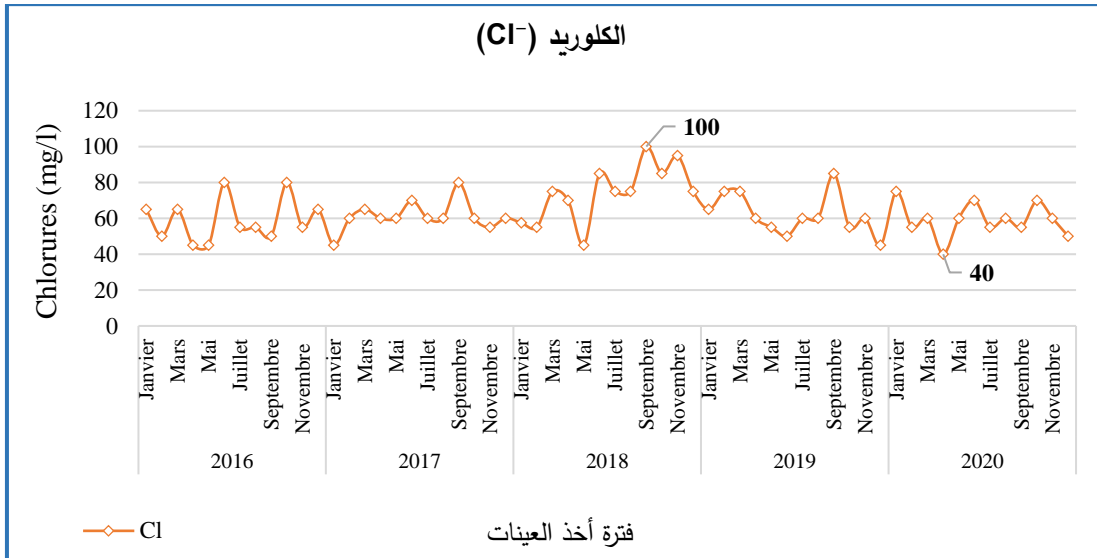


الشكل 3.VI. منحني تطور قيم الموصلية الكهربائية (CE) في مياه سد قنيطرة (2016-2020).

2.1.2. المعايير الكيميائية الرئيسية

أ. تحليل تطور تراكيز الكلوريد (Cl^-) في مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

يبين منحني تطور تراكيز الكلوريد (Cl^-) في مياه سد قنيطرة خلال الفترة من جانفي 2016 إلى ديسمبر 2020 تذبذبات دورية تعكس تأثير العوامل المناخية والأنشطة البشرية على جودة المياه. تراوحت التراكيز بين حوالي 45 و100 ملغ/ل، مع ذروة سجلت في صيف 2018 (أوت وسبتمبر) وصلت إلى حوالي 100 ملغ/ل، نتيجة ارتفاع درجات الحرارة وزيادة التبخر وانخفاض تدفق المياه مما أدى إلى زيادة تركيز الأملاح. في المقابل، شهد عام 2020 انخفاضاً ملحوظاً في التراكيز، ما قد يعكس تحسناً في التوازن الهيدرولوجي أو انخفاضاً في مصادر التلوث، فيما ظلت بقية السنوات (2016، 2017، 2019) مستقرة نسبياً عند قيم متوسطة. جميع القيم المسجلة كانت ضمن الحد الأقصى المسموح به لتركيز الكلوريد في مياه الشرب حسب منظمة الصحة العالمية (250 ملغ/ل). ومع ذلك، فإن تجاوز التركيز 80 ملغ/ل في بعض الفترات، خاصة خلال الجفاف، يستدعي مراقبة مستمرة، خصوصاً مع الاستخدام المحتمل للمياه في الشرب والري.



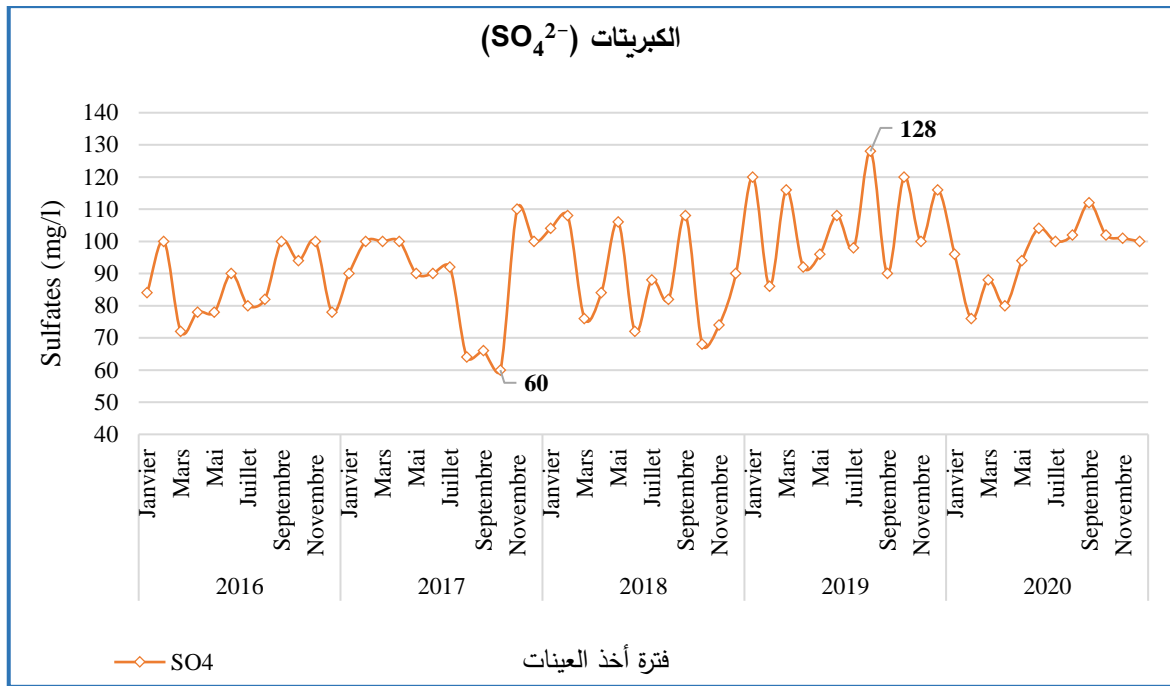
الشكل 4. VI. منحنى بياني لتطور تراكيز الكلوريد (Cl⁻) في سد قنيطرة (2016-2020).

ب. تحليل تطور تراكيز الكبريتات (SO₄²⁻) في مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

يعكس المنحنى الزمني لتغير تركيز الكبريتات في مياه سد قنيطرة خلال الفترة الممتدة من جانفي 2016 إلى ديسمبر 2020 حالة من الاستقرار النسبي، مع بعض التذبذبات الطفيفة الناتجة عن التغيرات الموسمية والظروف البيئية. تراوحت التراكيز بين حوالي 60 ملغ/ل و 120 ملغ/ل، مع تسجيل ذروة ملحوظة بين ماي ونوفمبر من سنة 2019، حيث تجاوزت القيم أحياناً عتبة 120 ملغ/ل.

أما أدنى تركيز فقد لوحظ في منتصف سنة 2017، حيث انخفض إلى ما دون 60 ملغ/ل، ويُرجّح أن يكون ذلك مرتبطاً بارتفاع منسوب التدفقات المائية خلال موسم الأمطار، مما أدى إلى تخفيف تركيز الأملاح في المياه. جميع القيم بقيت ضمن الحد الأقصى المسموح به من منظمة الصحة العالمية (250 ملغ/ل)، مما يشير إلى جودة جيدة للمياه وعدم وجود خطر صحي مباشر.

مع ذلك، قد يشير الارتفاع الطفيف التدريجي في بعض السنوات إلى تأثيرات تراكمية محتملة للأنشطة البشرية أو تصريف النفايات، مما يستدعي متابعة دورية وتحديد مصادر هذه التغيرات، خاصة عند مصبات الأودية المغذية للسد.



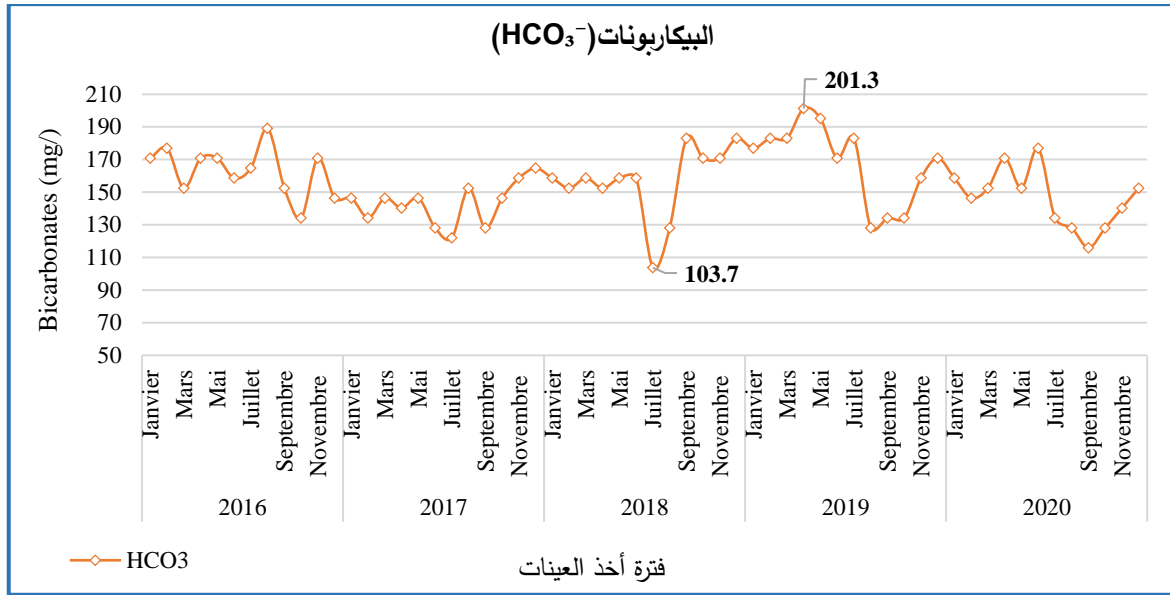
الشكل 5. VI منحنى بياني لتطور تراكيز الكبريتات (SO₄²⁻) في سد قنيطرة (2016-2020).

ج. تحليل تطور تراكيز البيكربونات (HCO₃⁻) في مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

تباينت القيم الشهرية بين 103.7 ملغ/ل (جويلية 2018) و 201.3 ملغ/ل (أفريل 2019). وقد شهدت سنة 2016 استقراراً نسبياً بمتوسط سنوي نحو 162.5 ملغ/ل، بينما سجلت 2017 انخفاضاً تدريجياً حتى 122 ملغ/ل في جويلية. في 2018، بلغ التركيز أدنى مستوياته في السلسلة الزمنية، فيما سجلت 2019 ارتفاعاً ملحوظاً تجاوز 200 ملغ/ل، في حين تميزت 2020 بتقلبات معتدلة مع انخفاض تدريجي حتى 115.9 ملغ/ل في سبتمبر.

تعزى هذه التغيرات إلى العوامل المناخية الموسمية (مثل الأمطار والتبخّر) والتفاعلات الجيوكيميائية الناتجة عن تجوية الصخور الكربوناتيّة، إضافة إلى تأثير الأنشطة الزراعية والبشرية خاصة في فترات الجفاف والجريان السطحي.

على الصعيد الصحي، لا تحدد منظمة الصحة العالمية حدًا أقصى للبيكربونات في مياه الشرب، إذ لا تشكل خطرًا مباشرًا، بل تؤثر على القلوية العامة وتوازن الحموضة (pH). القيم المسجلة في سد قنيطرة تظل ضمن النطاق الطبيعي للمياه العذبة القاعدية ومتوافقة مع المعايير الهيدروكيميائية المعتمدة.



الشكل 6.VI. منحني بياني لتطور تراكيز البيكاربونات (HCO_3^-) في سد قنيطرة (2020-2016)

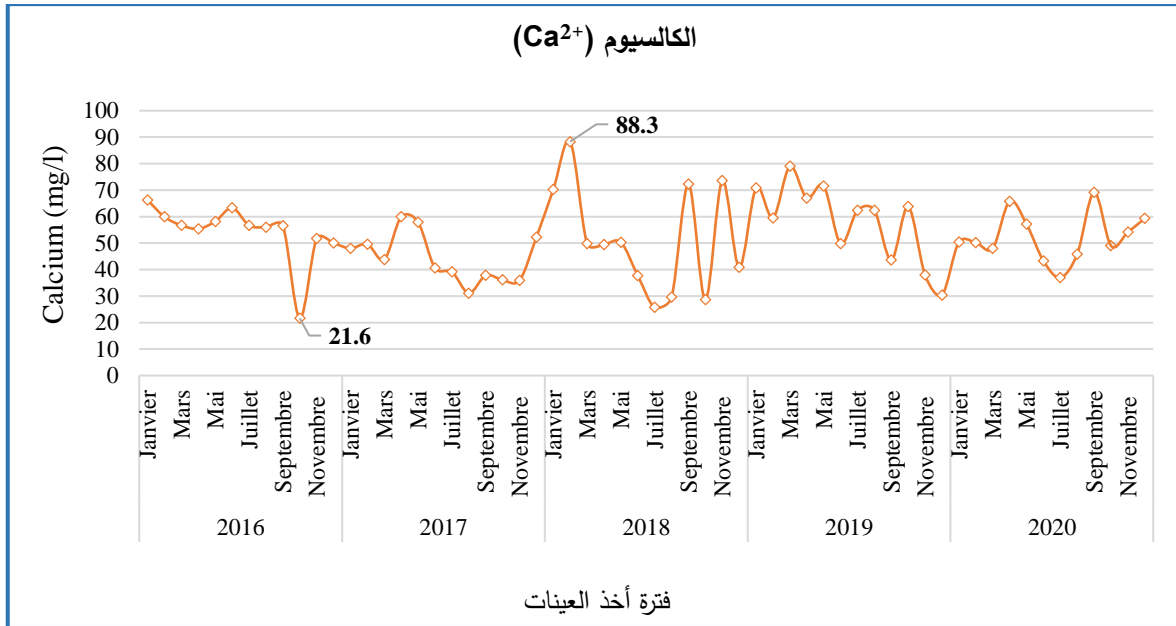
د. تحليل تطور تركيز الكالسيوم (Ca^{2+}) في مياه سد القنيطرة (2020 - 2016)

تم دراسة تطور تركيز الكالسيوم في مياه سد قنيطرة خلال الفترة 2020-2016 من خلال تحليل بيانات شهرية أظهرت تقلبات بين 21.6 ملغ/ل (أكتوبر 2016) و88.3 ملغ/ل (فيفري 2018).

شهدت سنة 2016 مستويات مرتفعة في الأشهر الأولى تلتها انخفاضات حادة، بينما تميزت 2017 بقيم منخفضة خاصة في الصيف، ويرجع ذلك إلى تأثير التخفيف نتيجة ارتفاع منسوب المياه أو تغير مصادر التغذية. في 2018، سجلت زيادة ملحوظة في جانفي وفيفري، تعزى إلى ذوبان الصخور الكلسية وتأثير التجوية الكيميائية الموسمية. أما 2019 فكانت التراكيز متوسطة مع ارتفاع نسبي في الربيع والصيف، في حين حافظت 2020 على قيم متوسطة مع ارتفاعات خفيفة في أبريل وسبتمبر.

هذه القيم تعكس الطبيعة الكربوناتية للمياه، إذ يُعد الكالسيوم عنصراً رئيساً في قلوية وقساوة المياه، وينشأ أساساً من ذوبان معادن الكلس والدولوميت في الحوض الهيدرولوجي، ويتأثر بالعوامل المناخية والأنشطة البشرية والتجوية الجيولوجية.

من الناحية الصحية، لا تحدد منظمة الصحة العالمية حداً أقصى لتركيز الكالسيوم في مياه الشرب، نظراً لفائدته الصحية، وتُظهر المياه المحللة تركيزات طبيعية ومقبولة ضمن معايير المياه العذبة.

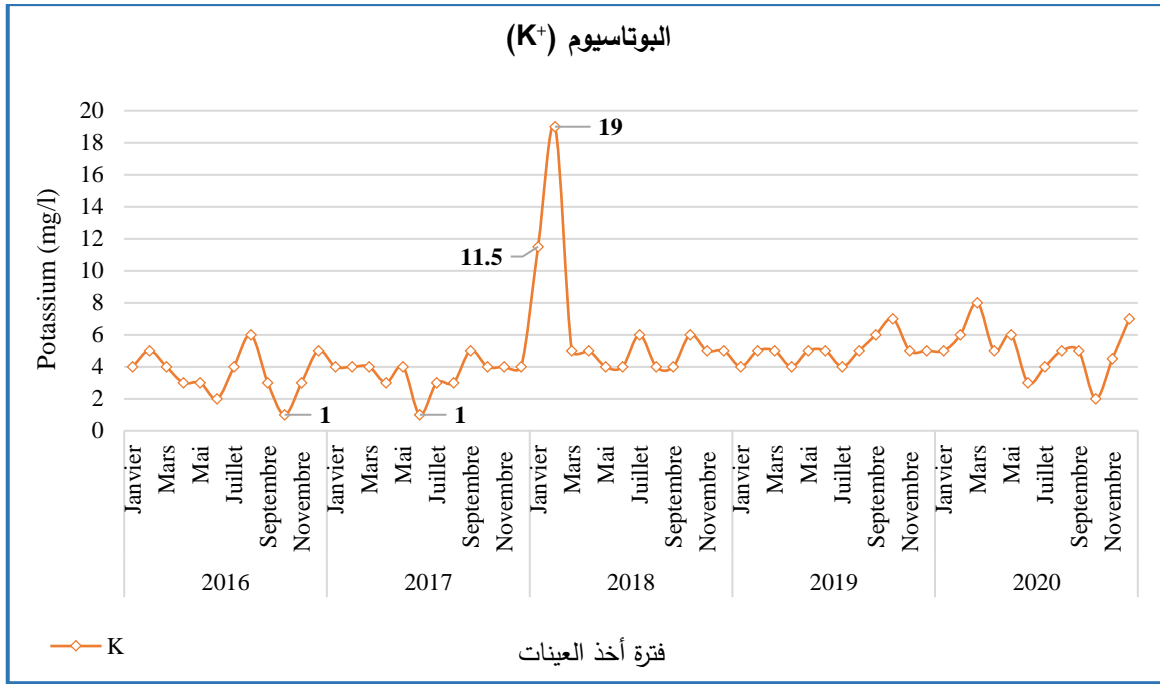


الشكل 7.VI. منحني بياني لتطور تراكيز الكالسيوم (Ca^{2+}) في سد قنيطرة (2016-2020).

هـ. تحليل تطور تركيز البوتاسيوم (K^+) في مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

أظهرت النتائج البيانية أن تركيز البوتاسيوم في مياه سد قنيطرة مستقر نسبياً خلال معظم فترة الدراسة، حيث تراوحت القيم عادة بين 3 و6 ملغ/ل، مما يعكس استقرار الظروف البيئية والهيدرولوجية في الحوض المائي. استثنائياً، سجل ارتفاع حاد في تركيز البوتاسيوم خلال بداية سنة 2018، حيث بلغ 11.5 ملغ/ل في جانفي و19 ملغ/ل في فيفري، وهو أعلى مستوى مسجل خلال فترة الدراسة. يُرجَّح أن هذه الذروة ناتجة عن تسرب ملوثات أو تفريغ غير مراقب لمخلفات منزلية أو صناعية غنية بالبوتاسيوم. بعد هذا الارتفاع المؤقت، عاد التركيز إلى مستوياته الطبيعية بدءاً من مارس 2018، واستمر الاستقرار حتى نهاية 2020. كما لوحظت بعض القيم المنخفضة في أكتوبر 2016 (1 ملغ/ل) وجوان 2017 (1 ملغ/ل)، ربما بسبب تأثير التخفيف الناجم عن السيول أو ارتفاع منسوب المياه.

في سنتي 2019 و2020، تراوحت القيم بين 4 و7 ملغ/ل مع ارتفاع طفيف في مارس 2020 (8 ملغ/ل) وانخفاض في أكتوبر من نفس السنة (2 ملغ/ل)، دون وجود تغيرات مفاجئة تدل على اضطرابات بيئية خطيرة. بشكل عام، تشير البيانات إلى أن تركيز البوتاسيوم في مياه سد قنيطرة يبقى ضمن الحدود البيئية المقبولة، مع ضرورة الاستمرار في المراقبة الدورية والتنسيق بين الجهات المعنية لمنع تكرار حالات الارتفاع المفاجئ.



الشكل 8.6: منحنى بياني لتطور تراكيز البوتاسيوم (K+) في سد قنيطرة (2016-2020)

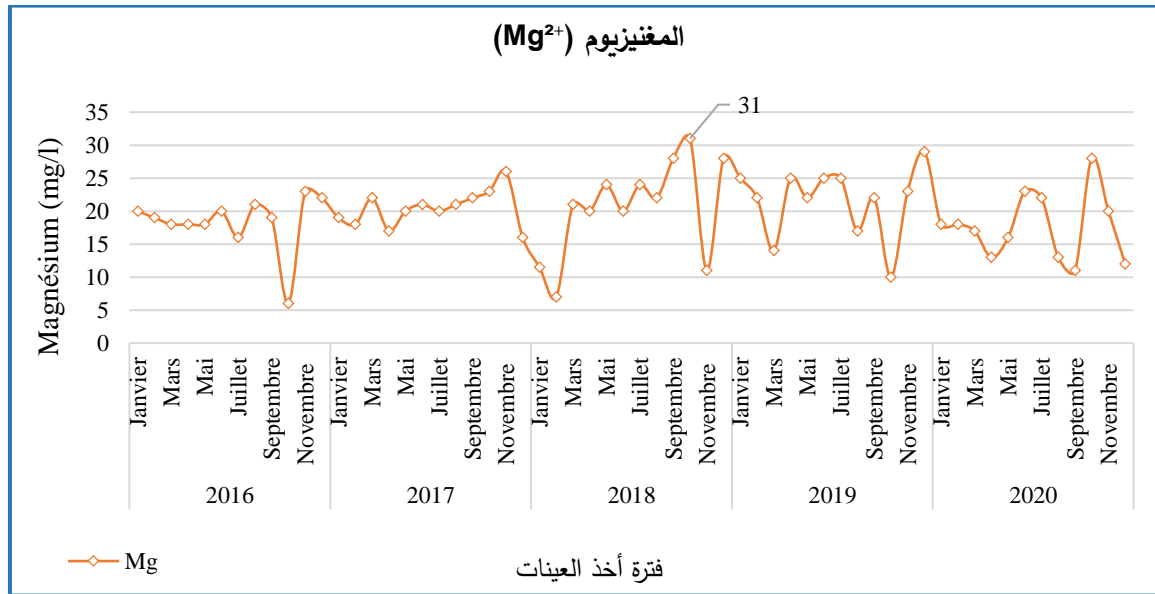
و. تحليل تطور تراكيز المغنيزيوم (Mg²⁺) في مياه سد القنيطرة (2016 - 2020)

أظهرت النتائج أن تركيز المغنيزيوم بقي طوال فترة الدراسة دون العتبة القصوى الموصى بها، مما يشير إلى غياب أي خطر صحي مرتبط بهذا العنصر في مياه السد. رغم هذا الاستقرار العام، لوحظت تقلبات دورية في القيم من سنة لأخرى ومن شهر لآخر.

في سنة 2016، تراوح التركيز بين 6 ملغ/ل (أكتوبر) كأدنى قيمة و23 ملغ/ل (نوفمبر) كأعلى قيمة، بمتوسط سنوي حوالي 18.5 ملغ/ل. أما سنة 2017، فتميزت بقيم منتظمة نسبياً بين 16 و26 ملغ/ل. في 2018، سجلت أدنى قيمة (7 ملغ/ل في فيفري)، تبعها ارتفاع تدريجي حتى بلغت ذروتها (31 ملغ/ل في أكتوبر). شهدت سنة 2019 نسبة مرتفعة نسبياً، تراوحت بين 10 ملغ/ل (أكتوبر) و29 ملغ/ل (ديسمبر)، مع متوسط سنوي يقارب 22 ملغ/ل. أما في 2020، فكانت هناك انخفاضات نسبية في بعض الأشهر، حيث بلغت القيم 11 ملغ/ل في سبتمبر و12 ملغ/ل في ديسمبر، لكنها ظلت ضمن مستويات آمنة بيئياً.

تعكس هذه التغيرات تأثير العوامل المناخية الموسمية، وعمليات الجريان السطحي، وتداخل مصادر مياه متعددة تؤدي إلى تذبذب مستويات المغنيزيوم. وعلى الرغم من عدم وجود مؤشرات تلوث بهذا العنصر، توصي الدراسة

بالاستمرار في الرصد الدوري لعناصر المياه الأساسية، بما فيها المغنيزيوم، لضمان الحفاظ على جودة المياه ومراقبة أي تغيرات مستقبلية محتملة.



الشكل 9.VI منحنى بياني لتطور تراكيز المغنيزيوم (Mg²⁺) في سد قنيطرة (2016-2020)

ي. تطور تراكيز الصوديوم (Na⁺) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

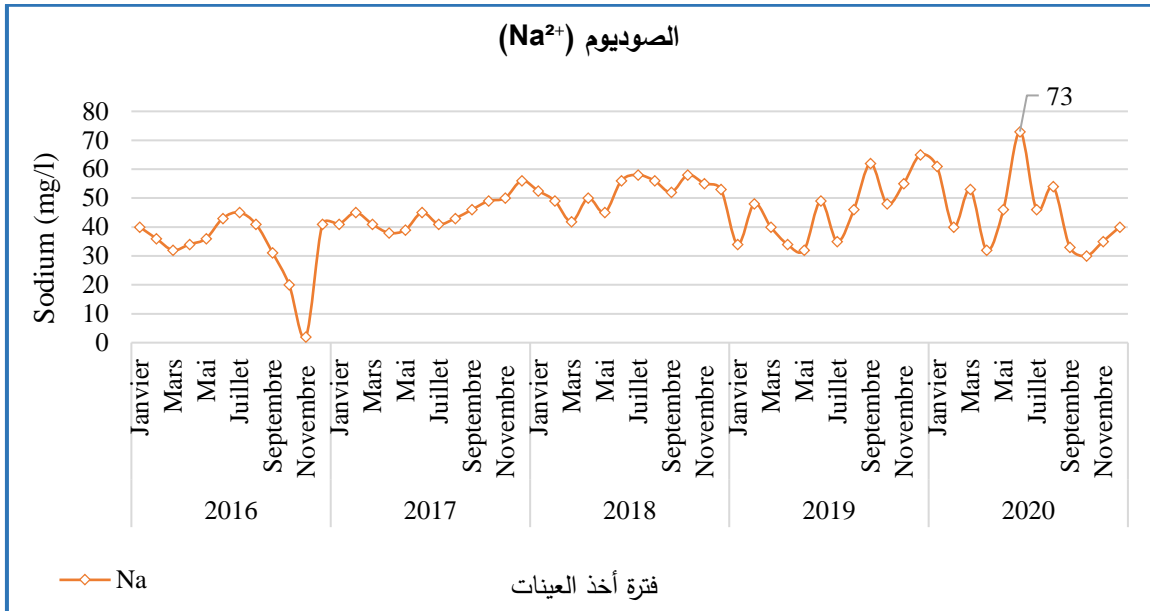
أظهرت النتائج أن تركيز الصوديوم في مياه سد قنيطرة ظل خلال كامل فترة الدراسة (2016-2020) دون الحد الأقصى المسموح به الذي حددته منظمة الصحة العالمية والبالغ 200 ملغ/ل، مما يشير إلى خلو المياه من تلوث صوديومي قد يؤثر على الصحة العامة. مع ذلك، لوحظت تذبذبات واضحة في تراكيز الصوديوم من سنة لأخرى.

في سنة 2016، تراوح تركيز الصوديوم بين 2 ملغ/ل (نوفمبر) كأدنى قيمة، و45 ملغ/ل (جويلية) كأقصى قيمة، مع تسجيل انخفاض مفاجئ في شهري أكتوبر ونوفمبر. خلال 2017، سُجلت زيادات تدريجية، حيث بلغت القيم ذروتها في ديسمبر عند 56 ملغ/ل، مما يعكس استقرارًا نسبيًا خلال تلك السنة.

تميزت سنة 2018 بقيم مرتفعة وثابتة نسبيًا مقارنة بالسنوات السابقة، إذ تراوحت بين 41.8 و58 ملغ/ل، مع بلوغ الحد الأعلى في أكتوبر. في 2019، استمر ارتفاع التركيز، حيث سُجلت أعلى قيمة خلال كامل فترة الدراسة في ديسمبر بـ65 ملغ/ل، بينما كانت أدنى قيمة 32 ملغ/ل في ماي.

أما في سنة 2020، فقد لوحظت بعض القيم المرتفعة، خاصة في جوان (73 ملغ/ل)، وهي أعلى قيمة مسجلة في كامل السلسلة الزمنية، لكنها بقيت ضمن الحدود المقبولة. كما سُجلت قيم أقل نسبياً في أكتوبر (30 ملغ/ل) ونوفمبر (35 ملغ/ل).

تشير هذه النتائج إلى أن تركيز الصوديوم في مياه سد قنيطرة يبقى ضمن الحدود البيئية والصحية المقبولة، مما يدعم إمكانية استخدام هذه المياه للشرب والري دون مخاطر صحية متعلقة بالصوديوم. ومع ذلك، توصي الدراسة بالمتابعة المستمرة لتركيز الصوديوم وموصلية المياه، لا سيما خلال فترات الصيف التي تشهد ارتفاعات ملحوظة، والتي قد تعكس تأثير التبخر أو تسرب مياه ملوثة إلى الحوض.



الشكل 10.6. منحنى بياني لتطور تراكيز الصوديوم (Na⁺) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

3.1.2 المعايير الأزوتية والفوسفورية (Paramètres azotés et phosphorés)

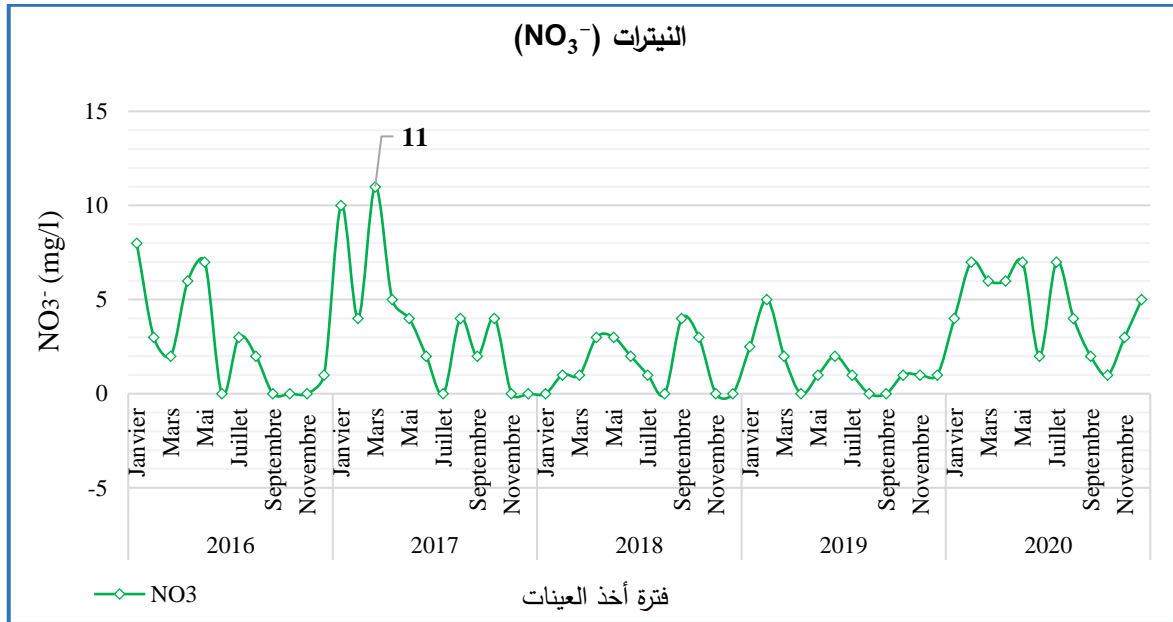
هذه المؤشرات مهمة جدًا لأنها تدل على التلوث العضوي والنشاط البشري والزراعي:

أ. تحليل تطور تراكيز النترات (NO₃⁻) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

خلال الفترة الممتدة من سنة 2016 إلى سنة 2020، أظهرت التحاليل الشهرية لمياه سد قنيطرة أن تركيز النترات بقي منخفضًا بشكل عام، حيث تراوحت القيم بين 0 و11 ملغ/ل، وهو ما يُعد أقل بكثير من الحد الأقصى الموصى به من طرف منظمة الصحة العالمية (50 ملغ/ل).

لوحظت أعلى قيمة خلال شهر مارس 2017 (11 ملغ/ل)، وقد تعود هذه الزيادة إلى ظاهرة الغسل المائي للتربة بعد موسم الأمطار، ما يؤدي إلى انتقال الأسمدة النيتروجينية إلى السد. في المقابل، سُجّلت العديد من القيم المتدنية جداً (0 إلى 2 ملغ/ل) على امتداد أشهر متعددة من السنوات الخمس، وهو ما يدل على غياب مصادر تلوث نيتروجيني مستمرة أو كثيفة في الحوض المائي المغذي للسد.

إن ثبات مستويات النترات عند نسب منخفضة يدل على جودة مقبولة للمياه من ناحية التلوث العضوي، ويعزز من إمكانية استخدامها في الري دون خطر تراكم النترات في التربة أو النباتات. كما يشير إلى أن الأنشطة الزراعية في منطقة الحوض المائي لم تؤثر بشكل ملحوظ على نوعية المياه خلال الفترة المدروسة.



الشكل 11.VI. منحني بياني لتطور تراكيز النترات (NO₃⁻) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

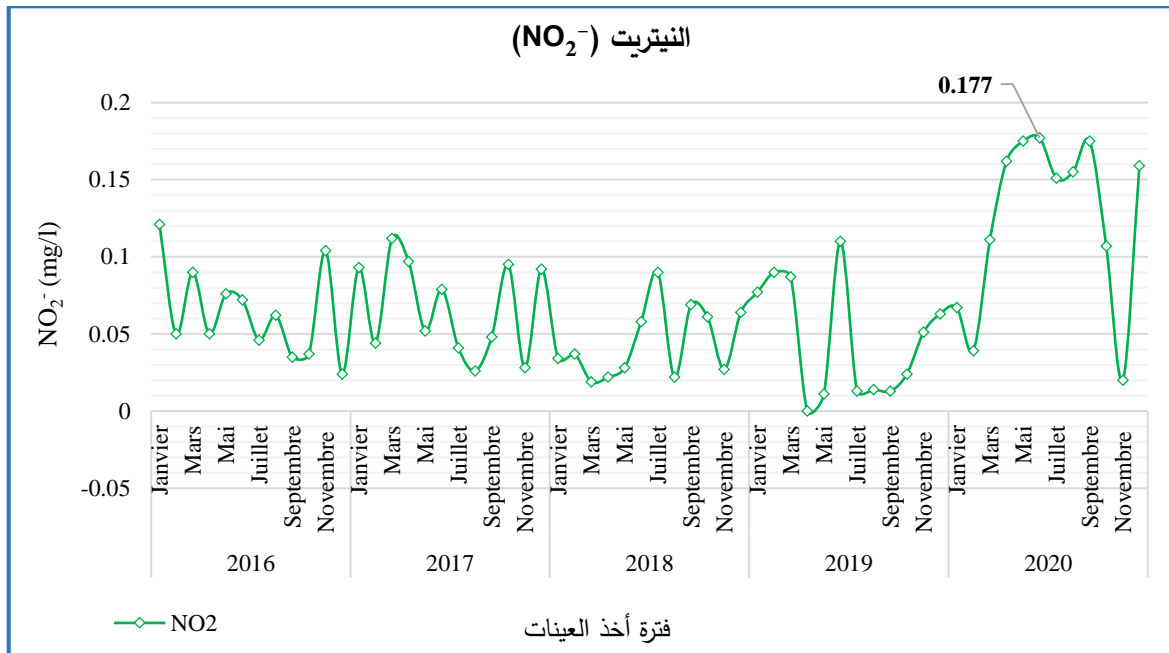
ب. تطور تراكيز النيتريت (NO₂⁻) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

تُعتبر النيتريت مركبًا آزوتيًا ذا سُمية نسبية عالية، ويُستخدم كمؤشر على التلوث العضوي الحديث في الوسط المائي، وينتج عن التحلل الجزئي للمواد العضوية أو تحويل النترات بواسطة البكتيريا تحت ظروف لا هوائية. ووفقًا لمنظمة الصحة العالمية، الحد الأقصى المسموح به في مياه الشرب والري هو 3 ملغ/ل.

أظهرت التحاليل الشهرية لمياه سد قنيطرة (2016-2020) أن تركيز النيتريت ظل منخفضًا ولم يتجاوز القيمة الحدية، حيث تراوحت بين 0 و 0.177 ملغ/ل، مع تسجيل أعلى القيم خلال 2020 (0.151-0.177 ملغ/ل)

في أبريل -سبتمبر)، وهي زيادات نسبية تبقى ضمن الحدود المقبولة، ومن المحتمل أن تعود لظروف بيئية محلية مؤقتة مثل نقص الأكسجين أو زيادة التحلل العضوي.

أما في الفترة 2016-2019، فقد سُجلت تراكيز أدنى (0.02-0.11 ملغ/ل) مما يعكس استقراراً نسبياً وجودة جيدة للمياه من حيث غياب التلوث الآزوتي الحاد. تُؤكد هذه النتائج أن مياه السد خالية من تلوث نيتريتي مقلق، مما يدعم استخدامها الآمن في الري والزراعة دون تأثيرات بيئية أو صحية سلبية.



الشكل 12.VI. منحنى بياني لتطور تراكيز النيتريت (NO₂⁻) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

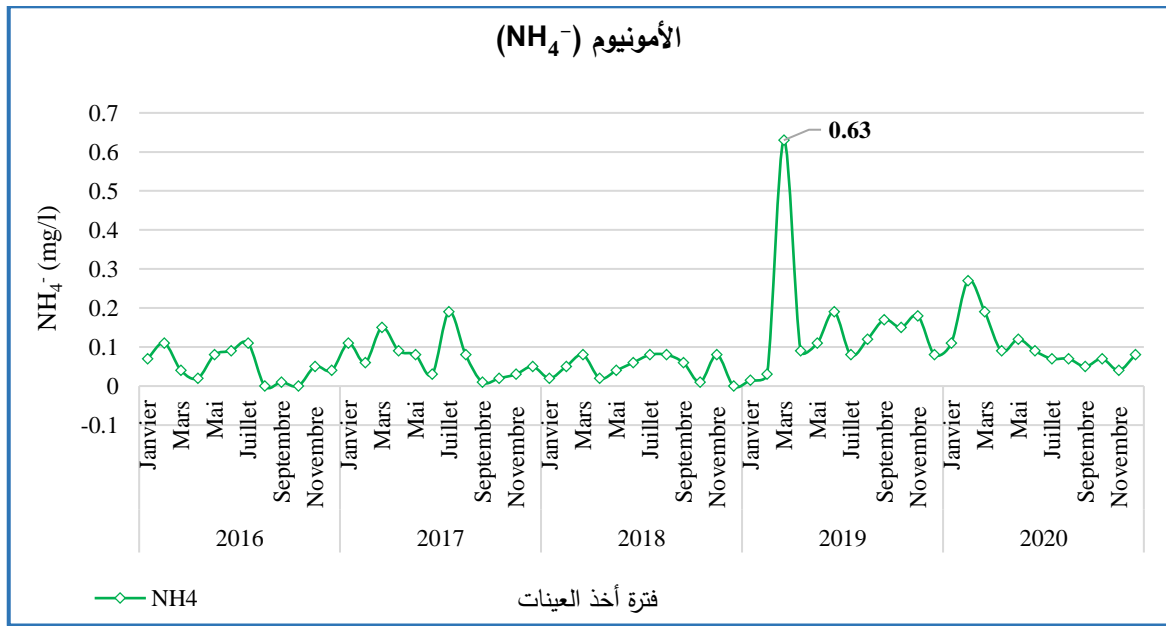
ج. تحليل تطور تراكيز الأمونيوم (NH₄⁺) في مياه سد قنيطرة (2016-2020)

يُعتبر أيون الأمونيوم (NH₄⁺) مؤشراً هاماً على التلوث العضوي الحديث الناتج عن التحلل اللاهوائي للمواد الآزوتية، وخاصة من المخلفات المنزلية والزراعية والصناعية. وحددت منظمة الصحة العالمية (OMS) الحد الأقصى المسموح به في مياه الشرب بـ 0.5 ملغ/ل، ويُستخدم أيضاً كمؤشر لجودة مياه الري.

أظهرت تحاليل مياه سد قنيطرة خلال الفترة 2016-2020 أن تركيز الأمونيوم ظل غالباً ضمن الحدود المقبولة، مع تسجيل ارتفاع واحد ملحوظ في مارس 2019 بلغ 0.63 ملغ/ل، متجاوزاً الحد المعياري، ويُرجح أن يعود إلى تصريف ملوثات مؤقتة أو نشاط بشري غير مراقب.

تراوحت بقية القيم بين 0 و 0.27 ملغ/ل، مع قيم منخفضة جداً في فترات معينة (أكتوبر وديسمبر 2016، وجانفي 2018)، مما يعكس فترات استقرار بيئي ونقاء نسبي. خلال 2020، سُجلت بعض الارتفاعات المعتدلة ضمن الحدود المسموح بها.

بصفة عامة، تشير النتائج إلى جودة جيدة لمياه السد من حيث التلوث العضوي الآزوتي، مع غياب تدهور مستمر، ما يؤكد سلامة المياه لاستخدامها في الشرب والري، مع ضرورة استمرار المراقبة المنتظمة.

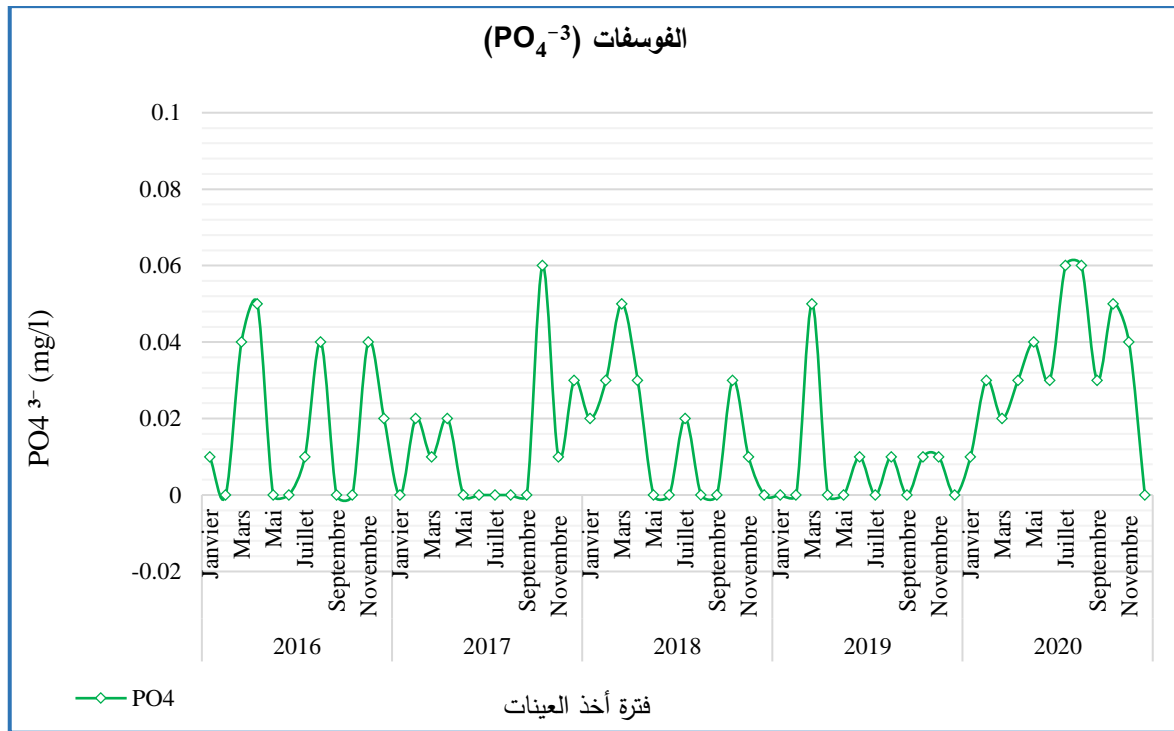


الشكل 13.VI. منحنى تطور تراكيز الأمونيوم (NH₄⁻) في مياه سد قنيطرة (2016–2020)

د. تحليل تطور تراكيز الفوسفات (PO₄³⁻) في مياه سد قنيطرة (2016–2020)

أظهرت تحاليل مياه سد قنيطرة للفترة 2016–2020 أن تركيز الفوسفات في المياه ظل منخفضاً جداً، متراوحاً بين 0 و 0.06 ملغ/ل، حيث سُجلت أعلى القيم في شهري جويلية وأوت 2020، لكنها بقيت ضمن الحدود البيئية المقبولة. كما كانت غالبية القيم المسجلة قريبة من الصفر، مما يدل على قلة مساهمة الفوسفات في تدهور جودة المياه.

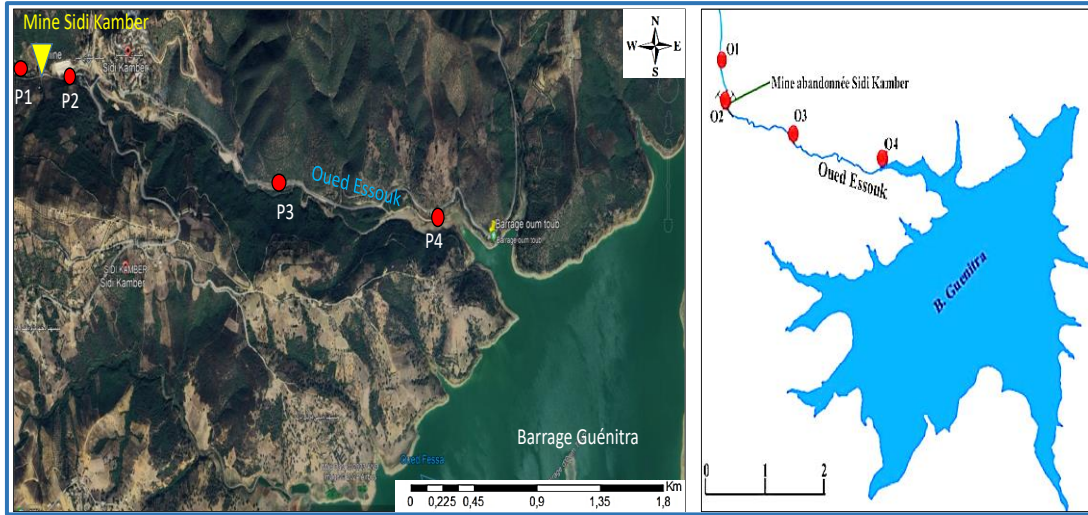
تعكس هذه النتائج فعالية الرقابة على الملوثات الزراعية والمنزلية في الحوض المغذي للسد أو انخفاض النشاط البشري المؤثر. وبناءً عليه، تُظهر مياه سد قنيطرة جودة بيئية جيدة من حيث تركيز الفوسفات، مع غياب أي مؤشر لاختلال بيئي مرتبط بهذا المركب خلال فترة الدراسة.



الشكل 14.VI. منحنى تطور تراكيز الأمونيوم (PO_4^{-3}) في مياه سد قنيطرة (2016-2020).

2.2. التحليل المكاني لجودة مياه واد السوق (2023)

يُشكّل منجم سيدي قمبر المهجور، الواقع في أعلى الحوض المائي المغذي لسد قنيطرة، مصدرًا رئيسيًا للتلوث المحتمل، نظرًا لطبيعته المعدنية وتراكم نفاياته المنجمية غير المعالجة. تُصرف هذه النفايات عبر مجرى وادي السوق، الذي يصب مباشرة في السد، مما يُعرض النظام المائي لخطر التدهور الكيميائي والبيئي، خاصةً في ظل إمكانية تشكّل صرف منجمي حمضي أو متعادل بفعل أكسدة المعادن الثقيلة. ولغرض تقييم التأثير المباشر لهذا المنجم على جودة المياه السطحية في وادي السوق وعلى مياه سد قنيطرة، تم التركيز على نتائج التحاليل الميدانية التي تم إجراؤها في ماي 2019 (هادف، 2023). وتُعدّ هذه البيانات مرجعًا مهمًا لتتبع التغيرات المكانية للخصائص الفيزيوكيميائية للمياه، ولإنتاج مؤشرات التلوث المعدني الناتج عن الأنشطة التعدينية السابقة في منطقة سيدي قمبر.



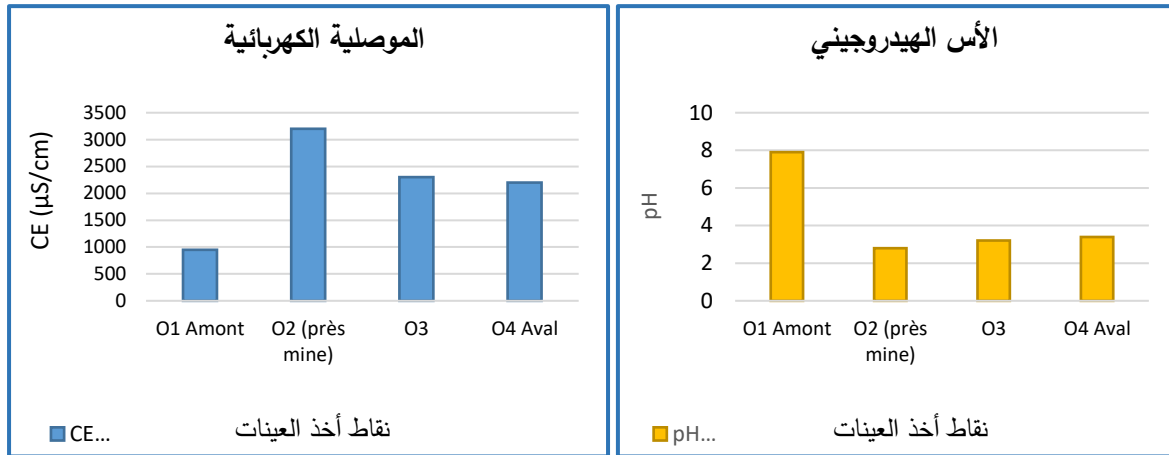
الشكل 15.VI. خريطة توزيع نقاط أخذ العينات من واد السوق (ماي 2019).

1.2.2. تطوّر المؤشرات الفيزيوكيميائية لمياه وادي السوق

أ. تحليل تطور قيم الأس الهيدروجيني و الموصلية الكهربائية في مياه وادي السوق (ماي 2019)

يُعد كل من الأس الهيدروجيني (pH) والموصلية الكهربائية من المؤشرات الفيزيوكيميائية الأساسية لتقييم جودة المياه، إذ يُعبّران عن درجة الحموضة أو القلوية، وكذلك كمية الأملاح الذائبة. وقد أظهرت نتائج حملة ماي 2019 انخفاضًا حادًا في قيمة pH على طول وادي السوق، خاصة بعد مروره بمنجم سيدي قمبر المهجور، حيث بلغت القيم ما بين 2.82 و 3.39، وهو ما يعكس وسطًا شديد الحموضة ناتجًا عن ظاهرة الصرف المنجمي الحمضي الناتج عن أكسدة البيريت، مما يؤدي إلى توليد حمض الكبريتيك وتدهور التوازن الكيميائي للمياه.

بالمقابل، سُجّلت زيادة ملحوظة في الموصلية الكهربائية، حيث تراوحت القيم بين 784 و 3250 ميكروزيمنز/سم، متجاوزة الحد المسموح به لمياه الشرب حسب منظمة الصحة العالمية (1500 ميكروزيمنز/سم). ويُعزى هذا الارتفاع إلى الذوبان المكثف للأملاح والمعادن من المخلفات المنجمية تحت تأثير المياه الحمضية، خاصةً مركبات الكبريتات، ما يدل على تلوث معدني واضح في مياه الوادي.



الشكل 16.VI. تطور قيم الأس الهيدروجيني و الموصلية الكهربائية في واد السوق (ماي 2019).

ب. تحليل تطور تراكيز الأنيونات في مياه وادي السوق (ماي 2019)

ترجع وجود البيكربونات في مياه وادي السوق إلى ذوبان التكوينات الكربوناتية في الجزء العلوي من الحوض الفرعي، حيث سجلت خلال حملة ماي 2019 تراكيز تتراوح بين 0 و 170.80 ملغ/ل. ويُلاحظ انخفاض ملحوظ في هذه التراكيز من المنبع نحو المصب، لتصبح منعدمة عند قيمة pH أقل من 4، نتيجة التغيرات الكيميائية المرتبطة بامتصاص العناصر النزرة من معادن المنجم المهجور مثل البارييت والغالينا والسفاليريت والبايرايت. ويساهم أيون البيكربونات في ترسيب معادن ثقيلة كالزنك والنحاس والرصاص والكاديوم. أما الكبريتات، فقد تراوحت تراكيزها بين 54.86 و 759.34 ملغ/ل، مع تزايد واضح من المنبع إلى المصب، مما يعكس تأثير الصرف المنجمي الحمضي الصادر عن منجم سيدي قمبر. هذا التزايد ترافق مع انخفاض في الـ pH و ارتفاع في الموصلية الكهربائية، مما يؤكد أن مصدر الكبريتات يعود إلى أكسدة الكبريتيدات المعدنية. فيما يخص الكلوريدات، فقد سجلت تراكيز بين 124.25 و 177.50 ملغ/ل مع تغيرات طفيفة على طول الوادي، ما يدل على أنها لا تخضع لتفاعلات الترسيب أو الامتصاص، وتتميز بانتقالية عالية في الوسط المائي.

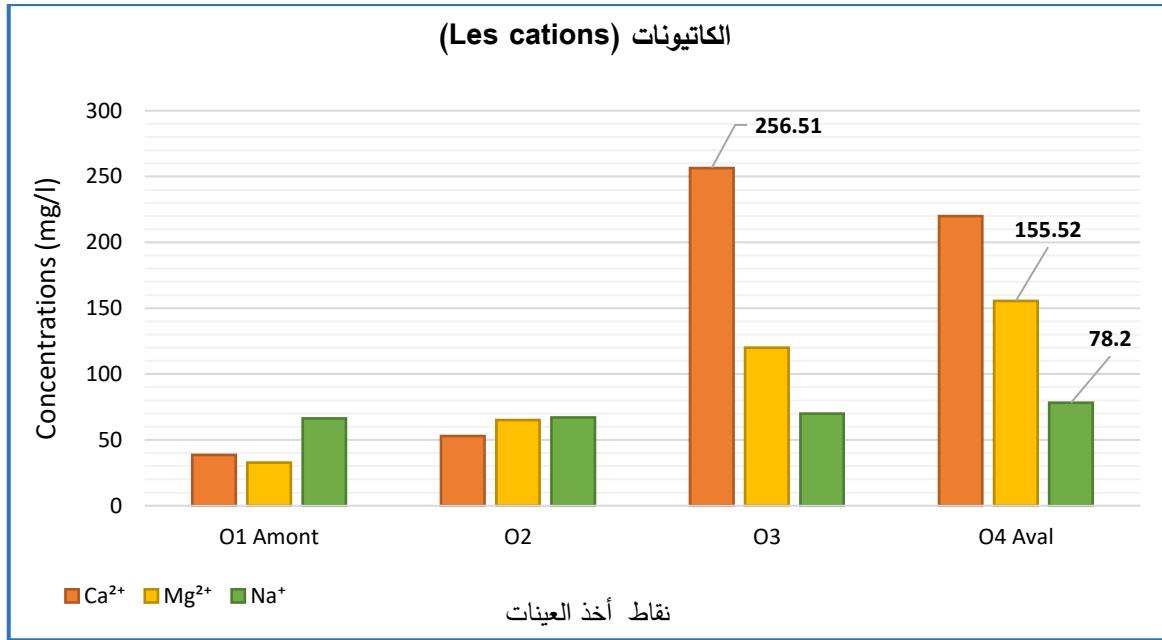


الشكل 17.VI. تطور تراكيز الأنيونات (HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) في واد السوق (ماي 2019).

ج. تحليل تطور تراكيز الكاتيونات في مياه وادي السوق (ماي 2019)

بشكل عام، تتراوح تراكيز الكالسيوم (Ca²⁺) في مياه وادي السوق خلال شهر ماي 2019 بين 38.48 و 155.52 ملغ/ل. في حين تتراوح تراكيز المغنيزيوم (Mg²⁺) بين 32.64 و 256.51 ملغ/ل، مما يلاحظ تطور متماثل نسبياً بين عنصري الكالسيوم والمغنيزيوم، حيث تُسجّل زيادة في التراكيز من المنبع نحو المصب. ويرتبط هذا الارتفاع بعملية ذوبان وتغسيل التكوينات التابعة للصخور المتحولة، مما يؤدي إلى تحييد الحموضة الناتجة عن أكسدة المعادن الكبريتيدية، هذا ما يؤدي بدوره إلى تلوّث الرواسب في المصب وكذلك في حوض السد.

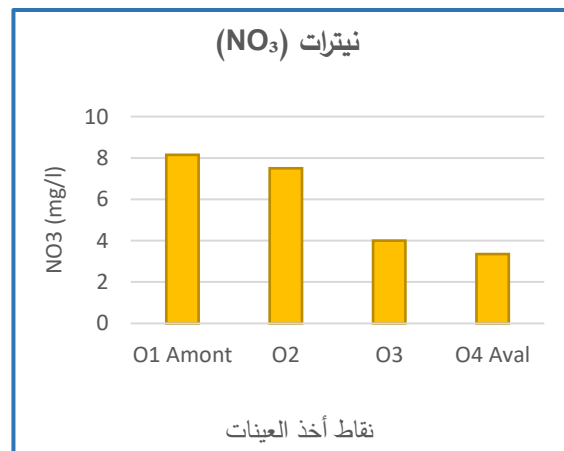
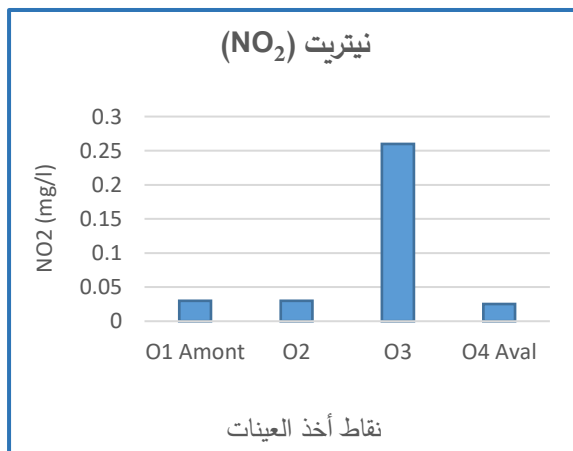
أما بالنسبة لتراكيز الصوديوم (Na⁺)، فتُظهر تغيراً طفيفاً، حيث تتراوح بين 66.4 و 78.2 ملغ/ل خلال شهر ماي 2019.



الشكل 18.VI. تطور تراكيز الكاتيونات (Ca, Mg, Na) في مياه واد السوق (ماي 2019).

د. تطور تراكيز العناصر الآزوتية والفوسفورية في مياه وادي السوق (ماي 2019)

تم تسجيل انخفاض ملحوظ في تراكيز النترات من المنبع نحو المصب في وادي السوق، حيث تراجع من 8.15 ملغ/ل إلى 3.35 ملغ/ل. وعلى العكس من ذلك، لوحظ ارتفاع في تراكيز النيتريت من المنبع إلى المصب، وذلك بالتزامن مع ازدياد الحموضة، لوحظ الإختفاء الكلي للأمونيوم، و يمكن تفسير هذا بحدوث عملية تحول للنترات إلى نترت ثم إلى أمونيوم، نتيجة الأكسدة القوية للمعادن الكبريتيدية الناتجة عن التصريفات المنجمية الحمضية الصادرة من المنجم المهجور بسيدي قمبر.



الشكل 19.VI. تطور تراكيز العناصر الآزوتية (NO₃, NO₂) في مياه واد السوق (ماي 2019).

هـ. تطور تراكيز المعادن الثقيلة في مياه واد السوق (ماي 2019)

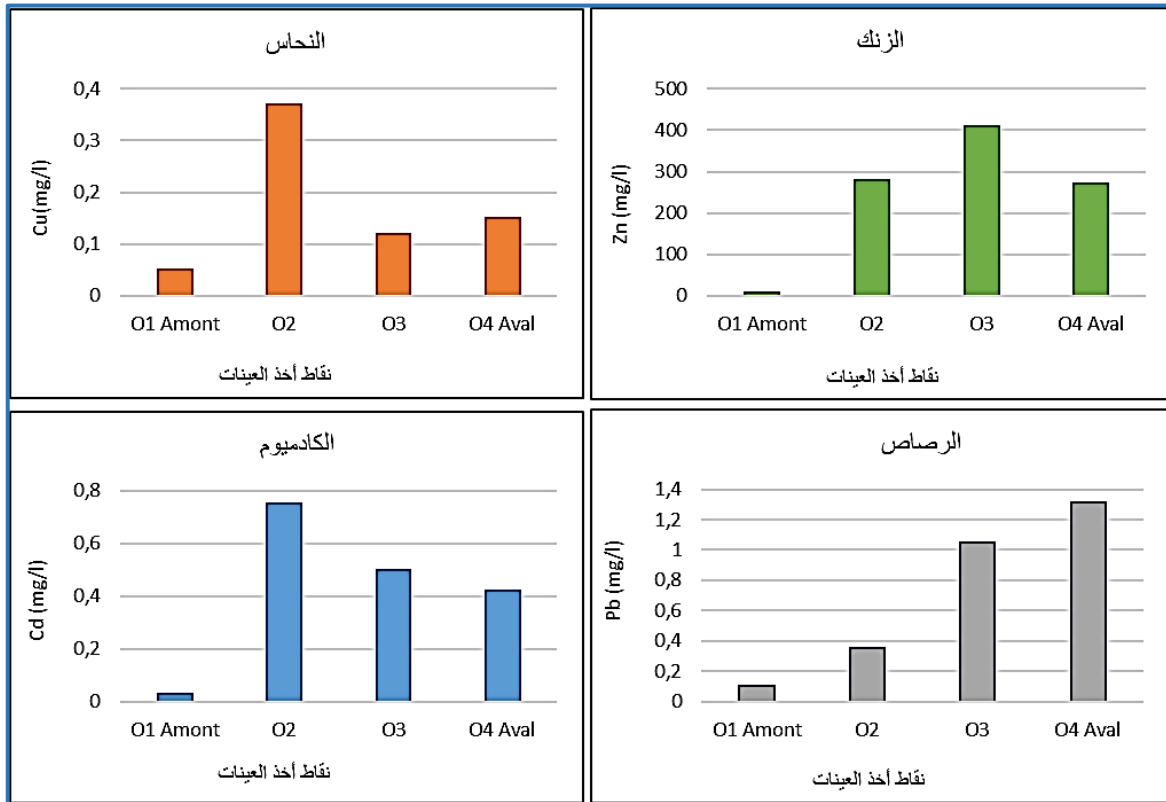
أظهرت التغيرات المكانية لتراكيز النحاس، الزنك، الرصاص والكاديوم في مياه وادي السوق أن الرصاص والزنك هما الأكثر وفرة، خاصة بالقرب من المنجم، ويعود ذلك إلى طبيعة التكوين الجيولوجي لهذا الأخير. فالمنجم يحتوي أساساً على معادن الكبريتيدات المعدنية، أبرزها كبريتيد الرصاص (PbS) المعروف بالغالين (Galène) وكبريتيد الزنك (ZnS) المعروف بالسفاليريت (Sphalérite). بينما تُسجل تراكيز منخفضة جداً لهذه المعادن في الجزء العلوي من الوادي. تُلاحظ تطورات متماثلة لتركيزات الزنك والرصاص بدءاً من موقع المنجم في اتجاه المصب، في حين يُسجل ارتفاع ملحوظ في تراكيز النحاس والكاديوم في الجزء الأوسط من الوادي (قرب المنجم) مع تشابه في مستويات تركيزهما. تتواجد هذه المعادن الأربعة بشكل رئيسي في الطور الذائب.

يُعتبر انتقال هذه المعادن عبر المياه السطحية محدوداً في الوسط المحايد أو القلوي، إلا أن هذا الانتقال يصبح أكثر نشاطاً في وسط حمضي. وتُعزى حركة هذه العناصر المعدنية عادة إلى تحولها من الأشكال الغروية أو الجزيئية إلى الشكل الذائب، حيث تتأثر هذه التحولات بعدة عوامل فيزيائية-كيميائية، مثل الأس الهيدروجيني (pH)، الأوكسجين، الملوحة والصلابة. فمثلاً، يؤدي انخفاض pH إلى زيادة تركيز المعادن بالشكل الأيوني نتيجة التنافس مع أيونات (H_3O^+) على مواقع الامتصاص، مما يُعزز من حركتها في الوسط الحمضي. بالتالي، في المجاري المائية المتأثرة بالصرف المنجمي الحمضي، تُوجد هذه المعادن أساساً في الطور الذائب. وفي حالة وادي السوق، تُبين النتائج أن الشكل الذائب هو السائد لدى المعادن الأربعة المدروسة. وقد أظهرت نتائج الحملة الميدانية زيادة في تراكيز المعادن الثقيلة من المنبع نحو المصب، مع تسجيل نمطين من التغير:

✓ قبل موقع الصرف المنجمي: تكون تراكيز المعادن أقل من الحدود الموصى بها من قبل منظمة الصحة العالمية (2011)، حيث تنخفض تراكيز المعادن بشكل أكبر مقارنة بانخفاض تركيز الكبريتات، مما يدل على وجود علاقة بين تركيزات المعادن وتراكيز أيونات الكبريتات.

✓ بعد موقع الصرف المنجمي: تُسجل تراكيز مرتفعة تتجاوز بكثير القيم الموصى بها من قبل منظمة الصحة العالمية، حيث تراوحت تراكيز الرصاص بين 0.1 و 1.31 ملغ/ل، والزنك بين 4.83 و 408.20 ملغ/ل، والكاديوم بين 0.18 و 0.45 ملغ/ل.

ويرجع هذا التدهور الكبير في جودة المياه أساساً إلى التصريفات الحمضية الناتجة عن أكسدة المعادن الكبريتيدية المعدنية المرتبطة بمنجم سيدي قمبر المهجور، مثل الغالينا (PbS)، السفاليريت (ZnS)، البيريت (FeS₂).



الشكل 20.VI. تطور تراكيز المعادن الثقيلة (Cu, Zn, Pb, Cd) في مياه واد السوق (ماي 2019).

3. التحديات الحالية والمستقبلية لنوعية وجودة المياه في منطقة سد قنيطرة ومنجم سيدي قمبر

تُعد منطقة سد قنيطرة ببلدية أم الطوب من أهم الأحواض المائية في شمال شرق الجزائر، نظراً لدورها المحوري في تأمين مياه الشرب والزراعة، فضلاً عن دورها الإيكولوجي في استقرار الأنظمة البيئية المجاورة. ومع ذلك، فإن نوعية المياه في هذه المنطقة أصبحت تشهد تراجعاً ملحوظاً، نتيجة لتراكم الضغوط البيئية الناتجة عن الأنشطة المنجمية القديمة والتغيرات المناخية، بالإضافة إلى الممارسات البشرية غير المستدامة.

1.3. التحديات الحالية

في ظل التغيرات البيئية المتسارعة والضغوط البشرية المتزايدة، تواجه نوعية المياه في منطقة سد قنيطرة ومنجم سيدي قمبر جملة من التحديات الراهنة التي تهدد استقرار النظام المائي المحلي. هذه التحديات ليست مشكل فقط في العوامل الطبيعية، بل تتفاقم بفعل مصادر التلوث الناتجة عن الأنشطة البشرية السابقة والحالية، مما يستدعي رصدًا دقيقًا وتحليلًا علميًا للتهديدات القائمة. من بين أبرز التهديدات الآتية:

- **التركيز العالي للمعادن الثقيلة**، لا سيما الرصاص والزنك والكاديوم في مياه وادي السوق، والذي يُعد أحد الروافد الرئيسية لسد قنيطرة. هذه التراكيز المرتفعة ناتجة مباشرة عن تحلل الكبريتيدات المعدنية مثل الغالين (PbS) والسفاليريت (ZnS) بفعل عمليات الأكسدة التي تحدث في ظل وجود المياه الحامضية الناجمة عن تصريفات المنجم المهجور بسيدي قمبر.

- **الطبيعة الجيولوجية للمنطقة** تلعب دورًا مضاعفًا في تعقيد الوضع البيئي، إذ أن الصخور الحاملة للمعادن تشكل مصدرًا مستمرًا للملوثات حتى في غياب النشاط المنجمي المباشر، مما يُطيل زمن التلوث ويُصعب معالجته بالطرق التقليدية.

- **عدم كفاءة نظام الصرف الطبيعي** في المنطقة الجبلية، حيث تفتقر التربة للقدرة على الاحتفاظ بالملوثات، ما يُسهّل انتقالها مباشرة نحو السد، خاصة خلال فترات الأمطار الغزيرة والانجراف السطحي.
- **نقص الحواجز البيئية الطبيعية** مثل الأحواض الترايبية أو المناطق الرطبة التي تعمل كمصافي بيولوجية، مما يجعل الملوثات تصل إلى السد دون خضوع لعمليات ترشيح أو ترسيب فعالة.

2.3. التحديات المستقبلية

- **التغيرات المناخية المتوقعة** ستؤدي إلى اختلال في دورة المياه في المنطقة، من خلال تقليص فترات الجريان السطحي وزيادة وتيرة الجفاف، مما يرفع من تركيز الملوثات في المياه نتيجة انخفاض الكمية العامة للمياه المتوفرة.

• توسع النشاط العمراني والزراعي بشكل عشوائي قد يؤدي إلى استنزاف الأراضي الزراعية القريبة من السد، مما يزيد من الضغط على الموارد المائية وتدهور نوعيتها، خاصة إذا استخدمت مياه ملوثة أو أسمدة كيميائية بكثافة.

• احتمالية انتقال الملوثات إلى السلسلة الغذائية من خلال ريّ المزروعات بمياه ملوثة، أو استهلاك المنتجات الزراعية المروية من مياه الوادي أو السد، ما يُشكل تهديدًا مباشرًا على الصحة العامة.

• تراكم الرواسب الملوثة في قاع السد بمرور الوقت يمكن أن يتحول إلى مصدر داخلي دائم لإعادة تلوث المياه حتى في حال تحسن الجريان السطحي، ما يستدعي التفكير في حلول لإزالة أو تثبيث هذه الرواسب.

3.3. الاستراتيجية المقترحة لمواجهة هذا التحدي البيئي والصحي

▪ تفعيل نظام مراقبة ميدانية مستمرة للمياه

من الضروري إنشاء شبكة دائمة لمراقبة جودة المياه على مستوى وادي السوق وسد قنيطرة، تضم نقاط قياس ثابتة، وأجهزة استشعار تُراقب باستمرار معايير نوعية المياه (pH ، التوصيلية، الأكسجين المذاب، المعادن الثقيلة، وغيرها). يجب أن تكون هذه البيانات متاحة للسلطات المحلية والباحثين لاتخاذ قرارات فورية ودقيقة عند ظهور مؤشرات تلوث.

▪ إزالة أو معالجة مصدر التلوث الأساسي (منجم سيدي قمبر)

يجب إطلاق مشروع بيئي لإزالة التراكبات السامة في المنجم المهجور أو تغليفها جيوتقنيا لمنع تسرب المواد الملوثة إلى وادي السوق، وذلك عبر تقنية الردم الهندسي أو تغطية الأحواض القديمة بطبقات عازلة. كما يمكن التفكير في إنشاء حاجز مائي أو نظام ترشيح طبيعي عند مصب الرافد قبل دخوله إلى السد.

▪ إنشاء محطات معالجة بيئية طبيعية

يمكن إقامة مناطق "عازلة" مزروعة بنباتات مائية مثل القصب في مصب وادي السوق قبل دخوله السد، تسمى بـ الأنظمة البيولوجية لمعالجة المياه (Constructed Wetlands)، حيث تقوم هذه النباتات بامتصاص جزء كبير من الملوثات والمعادن الثقيلة بشكل طبيعي وفعال.

▪ دمج المجتمعات المحلية والفلاحين في خطة الحماية

يجب إشراك الفلاحين والسكان المحليين من خلال حملات توعية ميدانية وتكوينات تقنية حول مخاطر التلوث وأهمية حماية المياه. كما يُمكن تقديم تحفيزات مالية أو تقنية لتشجيع استعمال ممارسات زراعية صديقة للبيئة (كالري بالتنقيط، تقليل الأسمدة الكيميائية، إلخ).

▪ تطبيق نظام إنذار مبكر للأزمات البيئية

اعتماد نظام رقمي أو تطبيقي (App/Web) يُرسل إشعارات فورية عند تجاوز مستويات المعادن أو تدهور نوعية المياه في نقطة معينة. هذا النظام يجب أن يكون تحت إشراف مديرية الموارد المائية بالتعاون مع الباحثين المحليين والجامعات.

▪ سن قوانين صارمة لمراقبة المياه والأنشطة المعدنية

ينبغي تحديث وتطبيق القوانين المتعلقة بحماية الموارد المائية بشكل صارم، لا سيما ما يخص الأنشطة المعدنية المهجورة، وإجبار السلطات المحلية على متابعة ما يُسمى بـ "المسؤولية البيئية بعد استغلال المناجم".

▪ اعتماد مقارنة الإدارة المتكاملة للموارد المائية (GIRE)

يعتمد تحسين جودة المياه في منطقة سد قنيطرة على تبني مقارنة الإدارة المتكاملة للموارد المائية (GIRE)، التي تركز على إشراك جميع الفاعلين في وضع وتنفيذ خطط مدروسة وشاملة. ويُقترح في هذا الإطار تصميم خطة جهوية تشاركية تُدمج فيها السلطات المحلية، الفلاحون، السكان، الباحثون، وممثلو المجتمع المدني، بهدف تحقيق توازن بين استغلال الموارد والحفاظ عليها. كما يستدعي الأمر إحداث منطقة حماية بيئية محيطة بالسد، يُمنع فيها القيام بأنشطة بشرية مكثفة على مقربة من ضفافه، وذلك لضمان فترات "راحة بيئية" تسمح للمنظومة المائية بالتجدد الطبيعي واستعادة توازنها الإيكولوجي.

تطبيق هذه الاستراتيجيات لا يتطلب فقط الإرادة السياسية بل أيضاً تعاوناً فعلياً بين الإدارات العمومية، الباحثين، والمجتمع المدني، لتأمين مستقبل مائي آمن وصحي في منطقة سد قنيطرة، مع تحويل التحديات البيئية الحالية إلى فرص للتنمية المستدامة المحلية.

خاتمة

في ضوء المعطيات السابقة، يتضح أن نوعية مياه سد قنيطرة خلال الفترة (2016-2020) تتسم عمومًا باستقرار نسبي في مختلف المعايير الفيزيائية والكيميائية، مع تسجيل بعض التذبذبات الموسمية التي تعكس تأثير العوامل المناخية والهيدرولوجية. إلا أن هذا الاستقرار الظاهري قد يُخفي مخاطر بيئية محتملة مرتبطة بالروافد التي تُغذي السد، وعلى رأسها واد السوق.

لقد أظهرت نتائج التحليل أن مياه واد السوق تعاني من تلوث ملحوظ بالمعادن الثقيلة، خاصة الرصاص والزنك، بتركيزات مرتفعة تتجاوز في بعض النقاط المعايير الموصى بها من طرف منظمة الصحة العالمية. هذا التلوث مرتبط أساسًا بالمنجم المهجور لسيدي قمبر، الذي يحتوي على كبريتيدات معدنية مثل الغالين (PbS) والسفاليريت (ZnS) بفعل أكسدة هذه المعادن، خصوصًا في بيئة حامضية ناتجة عن تصريف المناجم، تتحرر المعادن الثقيلة إلى المياه السطحية، ما يجعل واد السوق مصدرًا رئيسيًا لتدهور نوعية المياه.

وبما أن واد السوق يُعد أحد الروافد المغذية لسد قنيطرة، فإن هذا التلوث يُنذر بخطر انتقال الملوثات إلى مياه السد، مما قد يُؤثر سلبيًا على النظام البيئي وعلى جودة المياه المخصصة للشرب أو للري مستقبلاً.

إن مستقبل سد قنيطرة كمورد مائي حيوي مرتبط ارتباطًا وثيقًا بمدى قدرتنا على التعامل مع مصدر التلوث الرئيسي، ألا وهو المنجم المهجور لسيدي قمبر، واسترجاع التوازن البيئي للروافد المحيطة. إن الاستراتيجية المقترحة، المبنية على العلم والمشاركة المجتمعية، تمثل مدخلًا أساسيًا ليس فقط لإنقاذ هذا السد، بل لضمان حق الأجيال القادمة في مورد مائي نقي وآمن.

توصيات لحماية المنطقة:

انطلاقاً من النتائج المستخلصة من هذه الدراسة، وبالنظر إلى المؤشرات المقلقة المتعلقة بتدهور جودة المياه في وادي السوق وسد قنيطرة، تبرز الحاجة الملحة إلى تبني حزمة من الإجراءات الاستراتيجية والعلمية من أجل حماية هذا المورد الحيوي وضمان استدامته. وفي هذا الإطار، يُقترح ما يلي:

1. تفعيل نظام للرصد المنتظم لنوعية المياه

وصى بإنشاء برنامج مراقبة دورية لجودة المياه، مع التركيز على تحليل المعادن الثقيلة، نظراً لمخاطرها الصحية والبيئية. كما يُستحسن اعتماد وسائل تقنية حديثة لضمان دقة الرصد واستمراريته.

2. أشغال الترميم والعزل للمنجم المهجور

يُعدّ التدخل في المنجم المهجور أولوية للحد من تسرب الملوثات. ويُنصح بأشغال ترميم وعزل تقني تضمن منع التلوث، وفق معايير هندسية وبيئية دقيقة.

3. إعادة التأهيل البيئي للموقع المنجمي

يُوصى بتهيئة الموقع المنجمي من خلال تثبيت التربة، غرس الغطاء النباتي، ومعالجة مياه الصرف، بهدف استعادة التوازن البيئي والتقليل من التلوث المستقبلي.

4. تحسيس السكان المحليين والجهات الفاعلة

ينبغي تنظيم حملات توعوية موجهة للسكان المحليين والجهات الفاعلة، للتعريف بمخاطر التلوث وأهمية حماية الموارد المائية باعتبارها مسؤولية جماعية. ويمكن أن تشمل هذه الحملات تنظيم ورشات، نشرات إعلامية، ومبادرات مدرسية وشبابية تدعم السلوك البيئي المسؤول.

5. الإجراءات الوقائية والاستعجالية

نظراً للمخاطر المحتملة، يجب تبني خطة عاجلة لحماية نوعية المياه في سد قنيطرة، تشمل التدخل السريع، الوقاية، والمتابعة، لضمان الأمن المائي والبيئي في المنطقة.

خاتمة عامة

تمثل الموارد المائية أحد أعمدة الأمن البيئي والغذائي والاقتصادي للأمم، وقد أضحت اليوم مهددة بعدة تحديات متراكبة، في مقدمتها تدهور النوعية بفعل الضغوط البشرية المتزايدة وتغيرات المناخ. وقد بينت الدراسة المنجزة حول سد القنيطرة ومحيطه بولاية سكيكدة، مدى تعقيد إشكالية تلوث المياه، وتعدد أبعادها، سواء من حيث مصادر التلوث، أو طبيعة الملوثات، أو تأثيراتها الصحية والبيئية، مما يفرض تبني نظرة شمولية واستباقية في التعامل معها.

إن المعايينات والتحليل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تمت على مستوى مياه السد ومجاريه المغذية، كشفت عن وجود تفاوتات في مؤشرات الجودة، بعضها لا يزال ضمن الحدود المقبولة، فيما تنذر مؤشرات أخرى بتدهور تدريجي، خاصة في بعض النقاط ذات الاتصال المباشر بالأنشطة البشرية أو الصناعية. كما أن العوامل الجيولوجية والمناخية للمنطقة تُسهم بدورها في تعزيز بعض الظواهر مثل الترسيب، وتغير درجة الحرارة، ونمو الطحالب، مما يزيد من تعقيد منظومة التقييم.

لقد أبرزت هذه الدراسة بوضوح أن ضمان استمرارية المورد المائي لا يقتصر على الجانب الكمي فقط، بل يجب أن يرافقه حرص دقيق على النوعية، من خلال المراقبة المستمرة، واعتماد أدوات تحليل حديثة، وتطبيق معايير صارمة، إلى جانب إشراك كل الفاعلين المحليين، من سلطات ومجتمع مدني ومؤسسات بحث. كما أن مواجهة التحديات المستقبلية المرتبطة بجودة المياه تتطلب رؤية متكاملة، تجمع بين الجانب العلمي والتقني، وبين البُعد التربوي والمؤسسي، مع التركيز على الوقاية، وإعادة التأهيل، وتحسين سلوكيات الاستهلاك والتخلص من النفايات.

وفي الختام، فإن سد القنيطرة، كغيره من السدود في الجزائر، يخرن إمكانات كبيرة لخدمة التنمية المحلية والإقليمية، غير أن ذلك يظل رهيناً بمدى قدرتنا على حمايته من التلوث، وضمان تسييره بعقلانية واستدامة، حفاظاً على الصحة العمومية، وصوناً للتوازن البيئي، وتأميناً لحق الأجيال القادمة في مورد مائي نقي وآمن.

قائمة المراجع

قائمة المراجع العربية:

1. الشحات، ح. ن. (2011). الملوثات الكيميائية وآثارها على الصحة والبيئة: المشكلة والحل. دار النشر للجامعات.
2. العابد، إ. (2015). معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية (أطروحة دكتوراه غير منشورة). جامعة ورقلة، الجزائر.
3. الفطامة، ع. م.، صبوح، ح. ش.، وجعفر، ر. س. (2022). تقييم جودة المياه باستخدام الموديل الكندي CWQI: دراسة حالة نهر العاصي في محافظة حماة - سوريا. مجلة العلوم الهندسية وتكنولوجيا المعلومات، 6(3)، 5.
4. الزرقعة، م. ع. ن. (2010). تلوث المياه في محافظتي الشمال والوسطى وتأثيراتها على صحة الإنسان (رسالة ماجستير غير منشورة). الجامعة الإسلامية، غزة، فلسطين.
5. عمارة، ه. ع. (2013). الماء بين العلم والإيمان. المملكة الأردنية الهاشمية: دار زهران للنشر والتوزيع.
6. مجاجي، م. (2018). المدلول العلمي والمفهوم الثقافي للتلوث. مجلة الفكر، (5)، 98-115.
7. رعاية المياه. (2023، 12 أبريل). جودة المياه: المعلومات والأهمية والاختبار. تم الاسترداد في 10 جانفي 2025، من <https://carewater.solutions> /جودة-المياه-المعلومات-والأهمية-والاخذ/

قائمة المراجع الاجنبية:

8. Alahi MEE, P.-I. N. (2018). An Internet-of-Things enabled smart sensing system for nitrate. *IEEE Internet Things J*, 5(6), 4409-4417.
9. Ambrose, R. B. (1993). *WASP5, a hydrodynamic and water quality model: Model theory, user's manual, and programmer's guide*. Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency.
10. Amrani, A. (2007). *Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM+ de Landsat 7 et modèle numérique de terrain appliqués à l'étude morphogénétique de la haute et moyenne Moulouya (Maroc)*. Univ. Rabat, Thèse de doctorat.
11. ANBT. (s.d.). *Fiche technique du barrage de Guénitra (EL BARAKA)*. Agence Nationale des Barrages et Transferts.

-
12. APHA, A. P. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
 13. Arnold, J. G. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 73–89.
 14. Aylward, B. (2005). Land use, hydrological function and economic evaluation. Dans Unesco (Éd.), *Forests, water and people in the humid tropics* (pp. 100–117). Univ. Press.
 15. Beddai, O. F. (1976). *Minéralisation de Sidi-Kamber*. Laboratoire de Géologie appliquée, Université de Constantine.
 16. Bouillin, J. P. (1977). *Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia*. France: Univ. Paris VI.
 17. Bouillin, J. P. (1979). La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie)... *Mémoire de la Société Géologique de France, Bulletin*, 135, 1–84.
 18. Boukhalfa, C. (2007). Heavy metals in the water and sediments of wadi Essouk, Algeria... *African Journal of Aquatic Science*, 32(3), 245–249.
<https://doi.org/10.2989/AJAS.2007.32.3.3.302>
 19. Boukhalfa, C., & Chaguer, M. (2012). Characterisation of sediments polluted by acid mine drainage... *International Journal of Sediment Research*, 27, 402–407.
 20. CAWST, C. f. (2013). *Introduction à l'Analyse de Qualité de l'Eau*. Calgary, Alberta, Canada. Récupéré de: <https://www.pseau.org/outils/>...
 21. CCT, C. C. (2008). *TUTORIEL : Notions Fondamentales de Télédétection*. Centre Canadien de Télédétection.
 22. Chapra, S. C. (2008). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality*. Tufts University.

-
23. Cole, T. M., & Wells, S. A. (2008). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model*, version 3.6. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
 24. Dahmani, N. (2010). *Étude ethnobotanique de quelques plantes médicinales de la Kabylie*. Thèse de doctorat, Université de Bouira.
 25. DHI. (2007). *MIKE 11: A modeling system for rivers and channels*. User guide.
 26. Dupont, C., & C. P. (2018). IoT for aquaculture 4.0 smart and easy-to-deploy... *Global Internet of Things Summit, GloTS 2018*.
 27. Durand Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berberie. *Bulletin du Service de Carte géologique de l'Algérie*, 89–131.
 28. Durand Delga, M., Raoult, J. F., & Villa, J. M. (1967). Situation en fenêtre du secondaire... *Société Géol. France*, 101 pp.
 29. Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality. *Heliyon*, 10(3).
 30. Gaujou, D. (1995). *Pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire* (2^e éd.). Paris: Éditions Tec & Doc.
 31. Gélard. (1969). Le flysch schisto-gréseux de la bordure méridionale... *Bulletin de la Société géologique de France*.
 32. Gherib, A., Bedouh, Y., Messai, K., & Menad, A. (2017). Biomonitoring of maritime pollution... *International Journal of Environmental Studies*, 73, 214–225.
 33. Ghosh, S., & Mujumdar, P. (2009). Climate change impact assessment... *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D18).
 34. Guerraiche, Z. (2017). *Impact de la pollution urbaine sur les eaux de surface du Grand Constantinois*. Thèse de doctorat, Univ. Biskra.
 35. Hadeif, S. (2023). *Caractérisation physico-chimique des eaux du barrage de Guénitra*... Université de Jijel.
-

-
36. Hadeif, S., & Hizir, F. (2018). *La qualité des eaux superficielles du bassin versant de Guenitra...* Mémoire de master: Université de Jijel.
37. Hamzaoui, W. (2019). *Évaluation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines...* Thèse de doctorat, Univ. Annaba.
38. Haseena, M., Malik, M. F., Javed, A., Arshad, S., Asif, N., Zulfiqar, S., & Hanif, J. (2017). Water pollution and human health. *Environmental Risk Assessment and Remediation*, 1(3), 16–19. <https://doi.org/10.4066/2529-8046.100020>
39. Ismail Essamlali, Hasna Nhaila, & Mohamed El Khaili. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality. *Heliyon*, 10(3).
40. Issaad, M., et al. (2019). Environmental characterization of mine waste... *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali.*, 30, 427–441. <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00806-8>
41. Jerry C. Ritchie, P. V. (2003). Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 695.
42. JORA, J. O. (2011). *Décret exécutif n° 11-125, qualité de l'eau de consommation humaine*. Imprimerie Officielle.
43. Jorgensen, W. L., et al. (1983). Comparison of simple potential functions... *The Journal of Chemical Physics.*, 926–935.
44. Khatri, N., & S. A. (2018). An IoT-based. *Smart Innov, Syst Technol*, 79, 353–362.
45. Khadri, S. (2018). *Qualité des rejets urbains par temps de pluie...* Thèse de doctorat, Univ. Annaba.
46. Khelfaoui, M., et al. (2020). Chemical and mineralogical characterization... *Environmental Earth Sciences*, 79(12), 1–15.
47. Lemoy, C. (1969). *Contribution à l'étude géologique du massif du Filfila*. Thèse de doctorat, Univ. Nancy.
-

-
48. Mackenzie, L., & David, A. (2008). *Introduction to Environmental Engineering*. McGraw–Hill Companies.
 49. Mahdjoub, Y. (1991). *Cinématique des déformations...* Univ. USTHB.
 50. Maher, D. (2018). IoT for fresh water quality monitoring.
 51. Marre, A. (1987). *Étude géomorphologique du Tell oriental algérien...* Thèse de doctorat, Univ. Aix–Marseille.
 52. Mecibah, I. (2017). *Les ressources en eau et gestion intégrée...* Univ. Annaba.
 53. Medjram, M., & Khelfaoui, M. (2014). Study and evaluation of risk related to waters contamination... *Journal of Selçuk University...*, 268–274.
 54. Nathanson, J. A. (1999). *Basic environmental technology: Water supply, waste management, and pollution control* (3rd ed.). Prentice Hall.
 55. OMS, O. M. (2006). *Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking–water quality*. Geneva: OMS.
 56. ONS, w. (2020). *Statistiques de la wilaya de Skikda en 2020*.
 57. ORGM. (1971). *Rapport des travaux de recherche...* Sidi Kamber.
 58. Oumdjbeur, A. (1986). *Évaluation de la qualité physico–chimique des eaux...* Univ. de Savoie.
 59. Raoult, J. F. (1974). *Géologie du centre numidique...* Mémoire de la Société Géologique de France, 53, 121–163.
 60. Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd.). Dunod.
 61. Rosenbaum, G., Lister, G., & Duboz, C. (2002). Relative motions of Africa... *Tectonophysics*, 359, 117–129.
 62. Rousseau, N., et al. (2004). *Etude de la qualité de l'eau potable...* MENV, MESS, MAPAQ.
 63. Sarkar, S. K., et al. (2007). Water quality management in the lower stretch... *J. Clean Prod*, 15, 1559–1567.
-

-
64. Satouh, A. (2007). *Pétrogéochimie et minéralisations...* Univ. Annaba.
65. Sisinni, E., et al. (2018). Industrial internet of things... *IEEE Trans Ind Inf*, 14.
66. SONAREM. (1966–1967). *Société Nationale de Recherche...*
67. Summers, K. (2020). *Water Quality – Science, Assessments and Policy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77531>
68. Talhaoui, A., et al. (2020). Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE)... *European Scientific Journal (ESJ)*, 16, 64–82.
69. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Tata McGraw–Hill.
70. Tchobanoglous, G., Peavy, H. S., & Rowe, D. R. (1985). *Environmental Engineering*. New York.
71. Touhari, F., & M. M. (2018). Évolution de la qualité des eaux des barrages... *SAGREN*, 2(1), 41–57.
72. U.S. Geological Survey. (2001). *A Primer on Water Quality*. Science for a Changing World, 1.
73. Vijay, S. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 270–292.
74. Vila, J., & ?. (1969). Précisions sur les termes les plus récents... *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 268, 1461–1463.
75. Yue, W., Bishop, R., Scudder, M. L., & Craig, D. C. (1997). Simple synthetic entries into... *J Chem Soc, Perkin Trans*.

الملاحق

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda

المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي بسكيكدة

Département des Sciences Naturelles

القسم: العلوم الطبيعية



الرقم: 02/2025/أ.ق.ع.ط

Azzaba le : 2025/02/02 : عزابة في

إلى السيد : مدير الجزائرية للمياه لولاية سكيكدة (ADE de Skikda)

الموضوع: الموافقة على إجراء تريض تطبيقي على مستوى المخبر المركزي

يشرفني أن أتقدم الى سيادتكم المحترمة سيدي مدير الجزائرية للمياه لولاية سكيكدة بهذا الطلب والمتضمن الموافقة على إجراء تريض تطبيقي على مستوى المخبر المركزي للجزائرية للمياه لولاية سكيكدة وهذا من أجل إنجاز مذكرة تخرج بعنوان:

تقييم وتحليل جودة المياه في سد فنيطرة و محيطه (أم الطوب، سكيكدة):

الواقع والتحديات المستقبلية.

للطالبين : بونويو لظفي و درويش تسنيم، طلبة تخرج تخصص أستاذ تعليم ثانوي في العلوم الطبيعية، بالمدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي بسكيكدة (ENSET)، تحت إشراف الأستاذ د. خلفاوي فيصل ، (أستاذ محاضر " أ ").

نرفع لكم هذا الطلب ولكم واسع النظر في إتخاذ ما ترونه مناسبا.

تقبلوا منا أسى معاني الإحترام والتقدير.



رئيس قسم العلوم الطبيعية
ش. ارش رابح

خ. خ. خ.
مكلف ب. ب. ب.
وحدة سكيكدة

DRH
BM

est pour un stage Pratique de
10 jours à partir du 23/02/2025
jusqu'à 04/03/2025.

رئيس المختبر المركزي
سلجة مصطفى

