

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

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
Université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : des Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الأرض و الكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : Master Académique en Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

**Influence de la lithologie et des conditions géomorphologiques
sur la qualité des eaux de sources dans la région d'Ain
Makhlouf, Wilaya de Guelma (Nord-est Algérien)**

Membres de Jury

Président : F Zahi

Examineur: A Drouiche

Encadrant : S Djorfi

Co-Encadrant : Dj Rihia

Présenté par:

Boukendir Samah

Labiod Wissam

Année Universitaire 2020-2021

Numéro d'ordre (bibliothèque) :.....

REMERCIEMENTS

C'est une tache difficile de trouver les plus justes mots pour exprimer ses « mercis », c'est paradoxalement la dernière page qu'on rédige et qu'on croise en premier.

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la volonté et le pouvoir afin d'accomplir ce travail.

comme nous tenons à remercier nos familles pour les sacrifices qu'elles ont fait, et tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de notre mémoire de fin d'étude et en particulier un très grand remerciement à notre promoteur Monsieur : Djorfi Samir , pour son soutien moral et d'avoir encadré et suivi notre travail de près, avec sa rigueur scientifique, ses conseils durant l'évolution de ce travail . nous lui en sommes profondément reconnaissantes.

A Monsieur Rihia Djamel, pour sa modestie et ses idées claires, pertinentes et encouragements.

Nous remercions également aux membres de jury et qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail ; qu'ils soient assurés de notre profonde gratitude.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du Master Hydrogéologie.

Nous tenons également à s'excuser auprès des personnes qui nous ont aidés, les auteurs dont on a utilisés les documents sans les avoir citer dans les remerciements ou dans la bibliographie.

Enfin, nous remercions tout le personnel du département de géologie de l'université de Jijel.

Dédicace

Avec joie, fierté et respect, je dédie ce mémoire :

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi et pour leur amour et leur tendresse et leurs sacrifices.

À mon cher grand frère MOHAMED AYMEN À ma chère petite sœur INES .

À mes grands-parents, à mes tantes et mes oncles.

À mes cousins et mes cousines; À toute la famille BOUKENDIR et la famille ARIOUA.

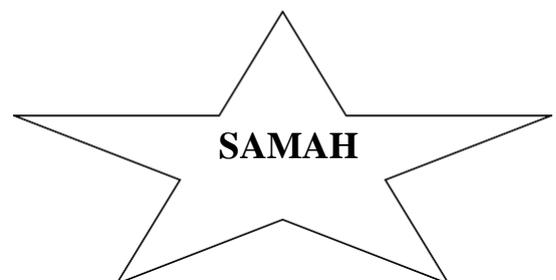
À mon binôme WISSAM et ça famille LABIOD.

Je ne peux pax finir sans remercier mon ami intime : KHAWLA.

À mes sœurs de la résidence universitaire : IMEN, WAFI, NIHAD, HADJER, NADIA, FIROUZ, DAYA, INES merci pour tous les bons moments qu'on a partagé ensemble.

Enfin je le dédie à tous mes amis que je n'ai pas cités et à tous ceux qui me connaissent.

À toute ma promotion d'Hydrogéologie.



Dédicace

Avec joie, fierté et respect, je dédie ce mémoire :

*Au plus beau sourire de ma vie, à la femme la plus merveilleuse qu'existe,
ma chère maman , À celui qui m'a appris que le monde est un combat et
que son arme est la connaissance, à l'homme le plus grand et le plus cher
de ma vie, mon cher père.*

À ceux qui ont été mon soutien, mes sœurs : Ahlam, Iman, Aya.

*À celui qui a cherché ma réussite, mon frère Amir, A mes frères
Oussama, Farés.*

Je présente un dédicace spécial à Nour, Soudjod, Ryham.

À mon fiancé Kiouche Nasr ddine

*À ceux qui m'ont appris à me relever, mon professeur, Dalouche Ahmed,
Brkat Soleiman.*

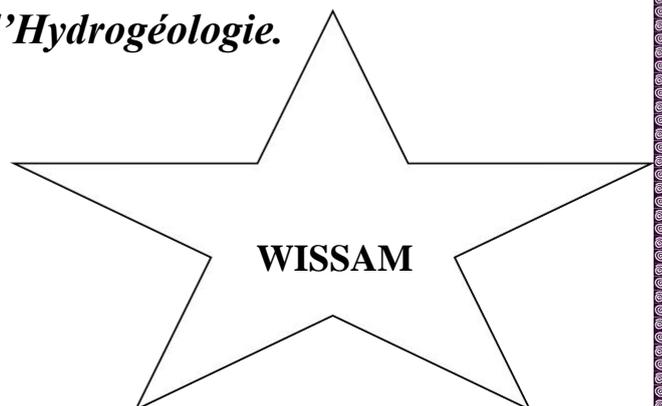
À mon binôme SAMAH et ça famille BOUKENDIR.

*Je ne peux pax finir sans remercier mes amis intimes : ASMA et
MALAK.*

*À mes sœurs de la résidence universitaire : AMEL, OUMAIMA,
DOUNIA, NOUHA merci pour tous les bons moments qu'on a partagé
ensemble.*

*Enfin je le dédie à tous mes amis que je n'ai pas cités et à tous ceux qui
me connaissent.*

À toute ma promotion d'Hydrogéologie.



Résumé

La région d'Ain Makhlouf est une région agricole située à l'Est Algérien ; elle appartient à la région des plaines Constantine et dispose actuellement des ressources en eau relativement limitées, l'un des importantes ressources sont les sources. Le développement industriel et surtout agricole, associé à la baisse de la croissance démographique outre la quantité, et la qualité et le potentiel de ces réserves, nous visons ici à l'identification et la détermination des caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine (sources), et évaluation de leur qualité pour une utilisation rationnelle. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de connaître les conditions hydroclimatiques, lithologiques, géomorphologiques et hydrochimiques de la région. Ont été relevés, et ici nous avons prélevé des échantillons d'eau et les avons soumis à des mesures sur site des paramètres physicochimiques (température, conductivité électrique, l'oxygène dissous et pH) et d'analyses au laboratoire de: PO_4 , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} . Nos résultats montrent que les eaux des sources de la région d'Ain Makhlouf sont dans la norme d'eau potable sauf quelques sources avec un degré de minéralisation plus élevée.

Mots clés : Qualité, potabilité, source, puits, retenue collinaire, Ain Makhlouf, Guelma.

Abstract

The region of Ain Makhoulf is an agricultural region located in eastern Algeria; it belongs to the region of the Constantine plains and currently has relatively limited water resources, one of the important resources are the sources. Industrial development and especially agricultural, associated with the decline in population growth in addition to the quantity, and the quality and the potential of these reserves, we aim here at the identification and the determination of the physical and chemical characteristics of the underground water (sources), and evaluation of their quality for a rational use. to achieve this objective it is necessary to recognize the hydroclimatic, lithological, geomorphological and hydrochemical conditions of the region. Were recorded, and here we took water samples and subjected them to on-site measurements of physicochemical parameters (temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen and pH) and laboratory analyzes of: PO_4 NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} .

Our results show that the waters of the Ain-Makhoulf region are in the form of drinking water in a few sources with a higher degree of natural demineralization.

Key words: Quality, potability, source, well, hill reservoir, Ain Makhoulf, Guelma.

منطقة عين مخلوف منطقة زراعية تقع شرقي الجزائر. تنتمي إلى منطقة سهول قسنطينة ولديها حاليًا موارد مائية محدودة نسبيًا ، ومن أهم الموارد هي الينابيع. التنمية الصناعية والزراعية بشكل خاص ، المرتبطة بانخفاض النمو السكاني بالإضافة إلى كمية هذه الاحتياطات ونوعيتها وإمكاناتها ، نهدف هنا إلى تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية (المصادر) ، وتقييم جودتها استخدام حكيم. لتحقيق هذا الهدف ، من الضروري معرفة الظروف المائية والمناخية والصخرية والجيومورفولوجية والهيدرو كيميائية في المنطقة. تم تسجيلها ، وهنا أخذنا عينات من المياه وأخضعناها لقياسات في الموقع للمعلمات الفيزيائية والكيميائية (درجة الحرارة ، والتوصيل الكهربائي ، والأكسجين المذاب ، ودرجة الحموضة) والتحليلات المعملية لـ: Ca^{2+} ، NH_4^+ ، NO_3^- ، PO_4 ، NO_2^- ، SO_4^{4-} ، Cl^- ، K^+ ، Na^+ ، Mg^{2+} .

تظهر نتائجنا أن مياه الينابيع في منطقة عين مخلوف تقع ضمن معيار مياه الشرب باستثناء عدد قليل من المصادر ذات درجة عالية من التمعدين في اتجاه مجرى النهر.

الكلمات المفتاحية: الجودة ، القابلية للشرب ، المصدر ، البئر ، خزان التل ، عين مخلوف ، قالمة

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I .Cadre physique

<i>I.1. Introduction</i>	3
<i>I.2. Situation géographique et administrative</i>	3
<i>I.3. Aspect géomorphologique</i>	4
<i>I.3.1. Les formes géomorphologiques</i>	4
<i>I.3.1.1. Le paysage collinaire</i>	4
<i>I.3.1.2. Les cuvettes</i>	4
<i>I.3.1.3. Les karsts</i>	4
<i>I.3.2. Description des unités topographiques</i>	5
<i>I.3.3. Le réseau hydrographique</i>	5
<i>I.4. Contexte socio-économique</i>	6
<i>I.5. Faune et flore</i>	7
<i>I.6 .Conclusion</i>	7

Chapitre II. Cadre Géologique et structural

<i>II.1. Introduction</i>	8
<i>II.2. Géologie régionale</i>	8
<i>II.2.1. Le domaine interne</i>	8
<i>II.2.1.1. Le socle kabyle</i>	8
<i>II.2.1.2. La Dorsale Kabyle (ou la chaîne calcaire)</i>	8
<i>a . La Dorsale interne</i>	8
<i>b . La Dorsale médiane</i>	8
<i>c . La Dorsale externe</i>	9
<i>II.2.2. Le domaine des flysch Crétacés-Paléogènes</i>	9
<i>II.2.2.1. Le flysch mauritanien</i>	9
<i>II.2.3.1. La série ultra tellienne</i>	9
<i>II.2.3.2. Les séries Telliennes sensu stricto</i>	9
<i>II.2.3.3. Les série pénitelliennnes et leur couverture Eocène à Nummulites</i>	10
<i>II.2.3.3. Les série pénitelliennnes et leur couverture Eocène à Nummulites</i>	10
<i>II.3 . Géologie locale</i>	10
<i>II.3.1. stratigraphie et lithologie</i>	11

<i>II.3.1.1 .Les formations du Crétacé.....</i>	<i>11</i>
<i>a. Aptien</i>	<i>11</i>
<i>b. Albien- Vraconien</i>	<i>11</i>
<i>c. Cénomaniens.....</i>	<i>11</i>
<i>d. Sénonien inférieur</i>	<i>11</i>
<i>e. Sénonien supérieur</i>	<i>11</i>
<i>II.3.1.1. la nappe tellienne (âge Paléocène)</i>	<i>12</i>
<i>II. 3.1.3. le Néogène</i>	<i>12</i>
<i>II.3.1.4. Le Mio- Plio – Quaternaire</i>	<i>12</i>
<i>II.4 . La tectonique</i>	<i>12</i>
<i>II.5. Aspect géomorphologique</i>	<i>13</i>
<i>II.6. Les grands ensembles morpho-dynamiques</i>	<i>13</i>
<i>II.6.1. une zone sensible aux mouvements de masse</i>	<i>13</i>
<i>II.6.2. une zone sensible aux ravinements.....</i>	<i>13</i>
<i>II.6.3. une zone affectée par l'érosion diffuse.....</i>	<i>14</i>
<i>II.7. Conclusion.....</i>	<i>14</i>
Chapitre III. Étude Hydroclimatologique	
<i>II.1. Introduction</i>	<i>15</i>
<i>III.2. Les données disponibles.....</i>	<i>15</i>
<i>III. 3. Analyse des paramètres climatiques</i>	<i>16</i>
<i>III.3. 1 .Les précipitation.....</i>	<i>16</i>
<i>III.3. 1.1. Précipitations moyennes mensuelles: (PMM).....</i>	<i>16</i>
<i>III.3.1.2.Variation interannuelle des précipitations.....</i>	<i>17</i>
<i>III.3.1.3 . Répartition saisonnière des précipitations.....</i>	<i>17</i>
<i>III.3.1.4. Coefficient pluviométrique interannuel (H).....</i>	<i>18</i>
<i>III.3.2. La température</i>	<i>19</i>
<i>III.3.2.1 .Température moyennes mensuelles</i>	<i>19</i>
<i>III.3.3. Relation températures-précipitations.....</i>	<i>20</i>
<i>III.3.3.1. Diagramme Ombro-thermique.....</i>	<i>20</i>
<i>III.3.3.2. Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte).....</i>	<i>21</i>
<i>III.3.3.3. Détermination des indices climatiques</i>	<i>22</i>
<i>a. Calcul de l'indice d'aridité</i>	<i>22</i>
<i>a.1. 'indice climatique de De Martonne (1923).....</i>	<i>22</i>
<i>a.2. 'indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923)</i>	<i>22</i>

III.3.3.4. Le bilan hydrique	23
a. Evapotranspiration potentielle et réelle.....	23
b. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	23
c. Evapotranspiration réelle (ETR).....	24
d. Etablissement du bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite.....	25
e. Interprétation du bilan hydrique	26
III.3.3.4. Ruissellement.....	28
III.3.3.5. Infiltration	28
III.4. Conclusion.....	28

Chapitre IV. Cadre Hydrogéologique

IV.1. Introduction	30
IV.2. Ressources hydriques	30
IV.2.1. Les eaux de surface.....	30
IV.2.2. Les eaux souterraines.....	31
IV.2.2.1. Inventaire des points d'eau.....	31
IV.2.2.2 .Les Puits	31
IV.2.2.3. Types de sources.....	31
a. Classification de Springer et Stevens (2009)	32
IV.2.2.4. Inventaire des différentes sources	32
IV.3. Aspect hydrogéologique	34
IV.3.1. Identification des nappes.....	36
IV.3.1.1. Aquifère à nappe libre dans les dépôts mio-plio- quaternaires	36
IV.3.1.2. Aquifère à nappe karstique.....	36
a. Dans les formations maestrichtiennes –sénonien supérieur	36
b. Dans les formations des calcaires Jurassiques.....	36
IV.3.2. Alimentation des nappes.....	36
IV.3.3. Etablissement de la carte piézométrique.....	37
IV.3.4. Interprétation de la carte piézométrique	38
IV.4. Le contexte hydrogéologique des principales sources	39
IV.5 .Conclusion.....	40

Chapitre V. Etude Hydrochimique

V.1. Introduction	42
V.2. Organigramme de travail	42
V.3. Matériel et méthodes.....	43

V.3.1. Echantillonnage et points de prélèvement	43
V.3.2. Mode d'échantillonnage	43
V.4. Mesures in situ (Analyses préliminaires).....	43
V.4.1. Paramètres physiques	44
V.4.1.1. La conductivité électrique.....	44
V.4.1.2. La température.....	45
V.4.1.3. L'oxygène dissous.....	46
V.4.1.4. Le potentiel d'hydrogène pH	47
V.4.2. Paramètres chimiques et leurs origines (Mesure au laboratoire).....	49
V.4.2.1. Les Cations	49
a. Dosage de calcium (Ca^{+2}).....	49
b. Magnésium (Mg^{+2}).....	50
c. Sodium (Na^{+}).....	51
d. Potassium (K^{+}).....	52
V.4.2.2. Les Anions.....	53
a. Dosage de Chlorures (Cl^{-}).....	53
b. Sulfates (SO_4^{2-}).....	54
c. Dosage de Bicarbonates (HCO_3^{-}).....	55
V.4.3. Les éléments indicateurs	57
a. Les nitrates (NO_3^{-}).....	57
b. Les nitrites (NO_2^{-}).....	57
c. Ammonium (NH_4^{+}).....	58
d. Phosphate (PO_4^{4-}).....	58
V.5. Les formules ioniques et faciès chimique	59
V.6. Représentation graphique des analyses chimiques	59
V.6.1. Diagramme de piper	59
V.6.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	60
V.7. Qualité des eaux et Normes	62
V.7.1. Conductivité.....	62
V.7.2. Bicarbonate HCO_3^{-}	62
V.7.3. Chlorure Cl	63
V.7.4. Magnésium Mg^{+2}	63
V.7.5. pH.....	63
V.7.6. Calcium Ca^{+2}	63

<i>V.7.7. Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)</i>	64
<i>V.8. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation</i>	64
<i>V.9. Conclusion</i>	66
<i>Conclusion Générale</i>	67
<i>Références Bibliographiques</i>	69

Liste des Figures

Fig.I.1. Situation géographique et administrative de la zone d'étude (Ain Makhlouf)	3
Fig.I.2. Géomorphologie de la région de Guelma (LayadiM , Hireche H 2020)	4
Fig.I.3 Carte du réseau hydrographique de la Commune d'Ain Makhlouf	6
Fig.II.4. Carte structurale schématique de la chaîne des Maghrébides montrant la disposition des zones internes et externes; d'après Durand Delga et Fontboté (1980).	10
Fig .II.5 . Carte géologique de la zone d'étude	11
Fig.III.6. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)	16
Fig.III.7. Représentation des précipitations interannuelles. Station d'Ain Makhlouf (1986-2020)	17
Fig.III.8. Précipitations moyennes saisonnières en %.	18
Fig.III. 9. Coefficients pluviométriques interannuel (H)	19
Fig.III. 10. Variation de la température moyenne mensuelle (1985-2020) pour la station d'Ain Makhlouf	20
Fig.III.11. Diagramme Ombrothermique	21
Fig .III.12. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)	27
Fig. IV.13. Carte d'inventaire des points d'eau dans la région d'Ain Makhlouf	33
Fig .IV.14. Carte hydrogéologiques schématique de la région d'Ain Makhlouf (Bouzidi et Guendouze, 1995, Modifié)	34
Fig.IV.15. Coupe hydrogéologique schématique dans la région d'Ain Makhlouf	35
Fig.IV.16. Carte piézométrique de la région d'Ain Makhlouf	37
Fig .V.17 Organigramme représentant le plan de travail	42
Fig.V.18. Carte d'inventaires des sources concernées par l'échantillonnage	43
Fig V.19. Carte d'isoconductivité électrique des eaux de quelques sources de la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	44
Fig.V.20 Carte d'égale température des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	46
Fig V.21. Carte d'égale Oxygène dissout des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	47
Fig.V.22. Carte d'égale pH des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	48
Fig .V.23. Carte d'égale teneur en Calcium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	49
Fig .V.24. Carte d'iso-teneur en Magnésium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	50
Fig .V.25. Carte d'iso-teneur es Sodium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)	51
Fig .V.26. Carte d'iso-teneur en Potassium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain	52

<i>Makhlouf (Mai 2021)</i>	
Fig .V.27. <i>Carte d'égale teneur en Chlorures des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf</i>	53
Fig .V.28. <i>Carte d'égale teneur en Sulfates des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	54
Fig.V.29. <i>Carte d'iso-teneurs en Bicarbonates des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	55
Fig.V.30. <i>Carte d'iso-teneur en Nitrates des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	56
Fig. V.31 <i>Cycle de l'azote</i>	57
Fig V. 32. <i>Diagramme de piper appliqué aux eaux souterraines de la plaine d'Ain Makhlouf</i>	59
Fig .V.33. <i>Représentation graphique des facies chimiques des eaux de sources de la commune d'Ain Makhlouf sur le diagramme Schoeller-Berkaloff (Mai 2021)</i>	60
Fig.V.34. <i>Diagramme de Richards des eaux de source dans la commune d'Ain Makhlouf</i>	63

Liste des tableaux

Tab .III. 1. <i>Coordonnées de la station météorologique d'Ain Makhlouf et période d'observation</i>	15
Tab.III.2. <i>.Précipitations moyennes saisonnières de la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)</i>	17
Tab.III.3. <i>Les valeurs de l'ETP calculées (ETP_c) pour chaque mois corrigé au moyen d'un d'un coefficient K</i>	24
Tab.III.4. <i>ETR selon Turc à la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)</i>	25
Tab.III.5. <i>Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)</i>	26
Tab.IV.6. <i>Inventaire des principales sources de la région d'Ain Makhlouf</i>	39
Tab V. 7. <i>Conductivité électrique des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	44
Tab .V. 8. <i>Températures (°c) de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	45
Tab.V.9. <i>L'oxygène dissous des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	46
Tab V.10. <i>pH des eaux souterraines de la plaine d'Ain Makhlouf (Mai 2021)</i>	48
Tab V. 11. <i>Facies chimiques des eaux selon le diagramme de schoeller-berkallof</i>	62
Tab V.12. <i>Classification des eaux de sources d'Ain Makhlouf selon la dureté (TH en °F).</i>	64

Liste des abréviations

DHW : Direction Hydraulique de la wilaya

% : Pourcentage

° : Degré

°C : Degré Celsius

m : Mètre

mm : Millimètre

dl/s : décilitre par seconde

P : Précipitation

T : Température

ETPc : Evapotranspiration Potentielle calculée

ETR : Evapotranspiration Réelle

BH : Bilan Hydrique

RFU : Réserve Facilement Utilisable

DA : Déficit Agricole

I : Infiltration

R : Ruissellement

DMS : degré, minute, seconde

AEP : Alimentation en eau potable

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est un élément biologique clé qui est à la fois une source de vie et un facteur de développement d'un pays.

La quantité et la qualité de l'eau dans le monde se sont considérablement détériorées ces dernières années, en raison d'émissions industrielles incontrôlées, d'une utilisation intensive d'engrais chimiques dans l'agriculture et d'une utilisation non durable des ressources naturelles et de l'eau. Cela a entraîné une modification chimique de l'eau, la rendant moins adaptée aux utilisations souhaitées.

Les conditions climatiques contrôlent le mouvement continu de l'eau présente sur Terre, et chaque perturbation d'une variable climatique (température, précipitation...) affecte directement ou indirectement le cycle hydrologique et par conséquent la ressource en eau souterraine qui fait partie intégrante du cycle de l'eau (infiltration), et est nécessaire pour contribuer aux changements dans le débit des sources d'eau.

Actuellement l'Algérie se trouve confrontée au de réserves superficielles, et à l'exploitation excessive des ressources souterraines ; ajouté à cela la pollution des eaux qui commence à se sentir dans certaines régions. En outre pour remédier à tous ces problèmes, une évaluation qualitative et quantitative, ainsi qu'une exploitation rationnelle des ressources en eaux superficielles et souterraines s'imposent.

Le contrôle de la qualité de l'eau est essentiel en santé publique car il a le potentiel de provoquer des changements catastrophiques sur le terrain, dans le corps humain, et même dans la santé de toute une communauté. A cet égard, notre travail consiste à réaliser une évaluation spatiale de la qualité physico-chimique des eaux de sources dans la région d'Ain Makhlouf.

La région d'Ain Makhlouf a fait l'objet d'études en biologie, en aménagement rural et en Hydrogéologie, mais en tant qu'étude hydrochimique ; notre projet de recherche intitulé :

«influence de la lithologie et des conditions géomorphologiques sur la qualité des eaux de sources dans la région d'Ain Makhlouf» est la première .L'objectif de cette étude; est de démontrer l'effet des facteurs lithologique, hydrogéologiques et géomorphologique sur la qualité de l'eau :

Dans cette optique, nous avons divisé notre travail en cinq chapitres interconnectés :

- ❖ Le premier chapitre : traite de la situation géographique, suivi d'une discussion sur les caractéristiques géomorphologiques et le réseau hydrographique de la région d'Ain Makhlouf.

- ❖ Le deuxième chapitre est consacré aux caractéristiques géologiques et structurales de la zone d'étude.
- ❖ Troisième chapitre est consacré à l'hydroclimatologie et à l'évaluation des différents termes du bilan hydrique (la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissèlement et l'infiltration), s'appuyant principalement sur les données pluviométriques et de température fournies par la station météorologique d'Ain Makhlouf.
- ❖ Le quatrième chapitre de ce mémoire est consacré à une étude hydrogéologique de la région, qui nous a permis d'identifier les différents systèmes aquifères ainsi que le nombre total de sources qui émergent à quelques niveaux.
- ❖ Le cinquième chapitre expérimental, portera les compagnes de prélèvement, d'analyses chimiques et d'interprétation, ainsi que sur la stratégie employée pour l'échantillonnage, les procédures et les protocoles expérimentaux globaux de toutes les techniques employées suivi des résultats obtenus.

Une conclusion générale résumant les principales conclusions avec un ensemble de recommandations et de suggestions.

Chapitre I :
Cadre Physique

I.1. Introduction

Pour toute étude hydrogéologique et hydro-chimique d'une région donnée, la description et l'analyse des différents aspects physiques est primordiale, partant du principe que la géographie est la base de toute étude de terrain, elle délimite le secteur étudié et détermine la distribution des facteurs physico-géographiques caractérisant cet espace.

I.2. Situation géographique et administrative

Ain Makhoulf est une commune méridionale de la wilaya de Guelma situant au Nord - Est algérien (Fig.1). elle remonte à l'ère coloniale elle est liée à l'arrivée des colons en 1887, d'où le nom qu'elle portait jusqu'à l'indépendance "Renier", c'est alors qu'on lui a donné le nom qu'elle porte actuellement, et reste au rang des communes appartenant à la Daïra d'Oued Zenati jusqu'en 1991 où elle fût nommée chef-lieu de la Daïra.

Elle est limitée au Nord par la commune de Sellaoua Announa, à l'Est par les communes d'Ain Soltane et d'Ain Larbi, au Sud par la commune de K'sar Sebihi (de la wilaya d'Oum El Bouaghi) et à l'Ouest par les communes de Tamlouka et d'Oued Zenati.

Le territoire communal s'étend sur une superficie de 197 Km² et fait partie d'un ensemble géographique jusque-là peu convoité par les activités économiques en raison de son excentricité par rapport aux principaux axes de développement.

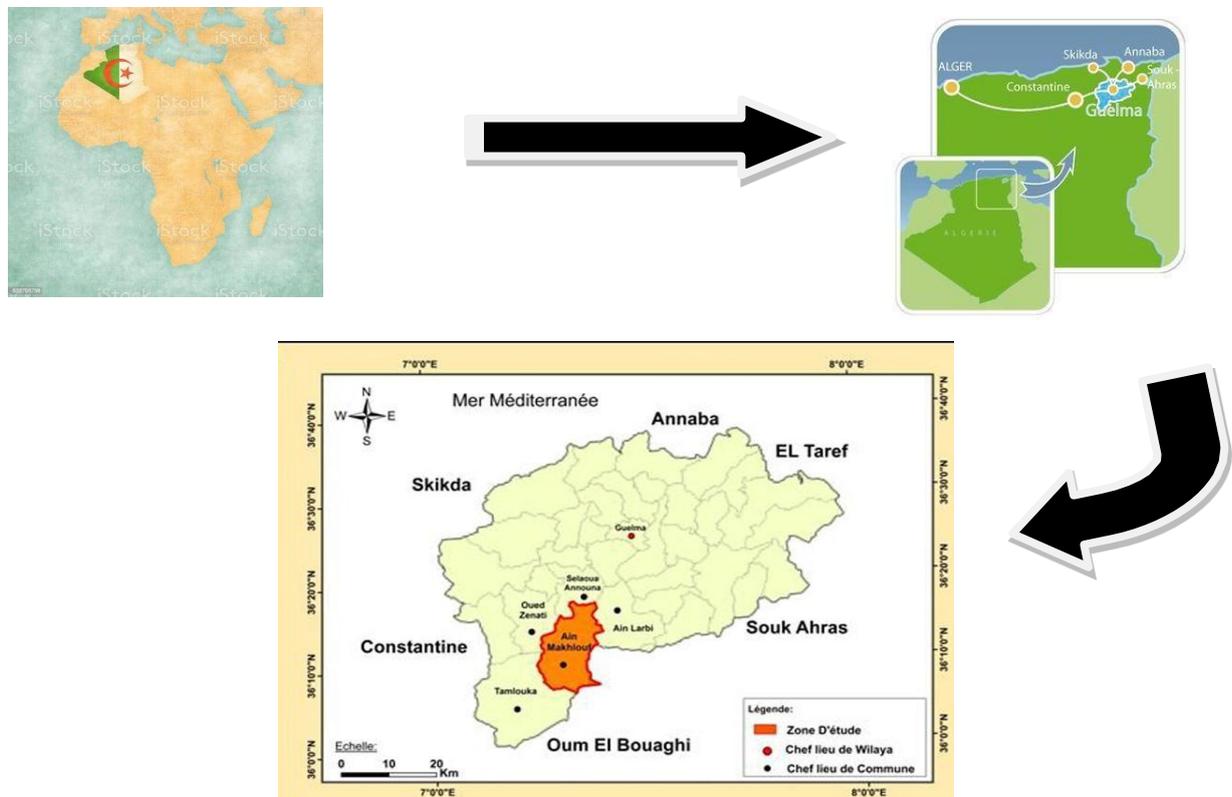


Fig .1.1.Situation géographique et administrative de la zone d'étude (Ain Makhoulf)

I.3. Aspect géomorphologique

La région d'Ain Makhoulouf rempli par un ensemble varié des sédiments pendant le Miocène et Quaternaire, à travers un relief diversifié (**Fig.I.2**) :

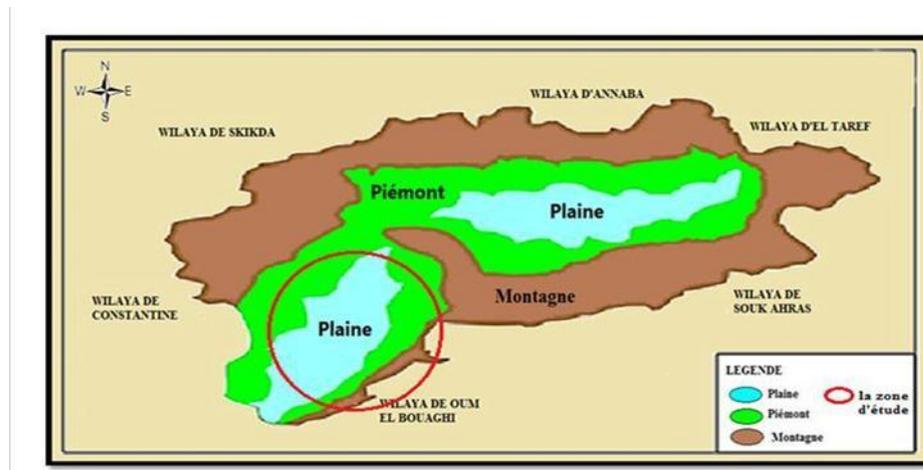


Fig.I.2. Géomorphologie de la région de Guelma (Layadi M , Hireche H 2020)

I.3.1. Les formes géomorphologiques

La topographie est un paramètre essentiel dans l'étude des systèmes d'écoulement, de tel sorte que la morphologie du paysage (altitude et pente) délimite des différents bassins versants hydrologiques. Elle conditionne les directions préférentielles de l'écoulement de l'eau.

L'altitude est également à la base des différences de potentiel créant un déplacement de l'eau (en surface ou dans le sol) des points hauts vers les points bas.

Les formes géomorphologiques existantes sont liées à la tectonique qui a affecté la région, et à l'accumulation pendant le miocène et le quaternaire avec l'érosion superficielle et souterraine.

Ces formes peuvent être classées comme suite :

I.3.1.1. Le paysage collinaire

Le cadre Tellien montagneux au Nord de la région d'étude et la Chebkat des Sellaoua au Sud se sont combinés pour former cette zone. Ils forment de longs glacis réguliers qui sont généralement traversés par des roches dures avec divers degrés de fissuration.

I.3.1.2. Les cuvettes

C'est le prolongement de la cuvette de Tamlouka qui est une cuvette Graben avec une base de Maestrichien et constituée de calcaire métamorphisée par recristallisation lors de la tectonique qui a affecté la région à différentes phase et à différentes profondeurs.

I.3.2.3. Les karsts

Les calcaires de la région sont très fissurés à cause de l'intensité de la tectonique. Ces fissures ayant subi une altération chimico-mécanique donnant naissance à plusieurs formes karstiques.

I.3.2. Description des unités topographiques

La pente du terrain joue un rôle important dans le potentiel de ruissellement du terrain. L'ensemble du relief de la commune est divisé en trois unités topographiques distinctes : la chaîne tellienne au Nord, la chebkat des Sellaoua au Sud et la plaine entre les deux.

- La chaîne tellienne est représentée par des formations d'âge Crétacé dont le relief est très accentué avec de grandes pentes surtout au Nord-Est ;
- La plaine est le prolongement de la plaine dite de Tamlouka où les pentes sont généralement faibles. Elle est en quelque sorte la résultante de l'encadrement montagneux du Nord et du Sud ;
- La chebkat des Sellaoua est caractérisée par un remarquable développement de formation marno-gréseuse et marno-calcaire avec des pentes relativement importantes.

I.3.3. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est caractérisé comme un ensemble de cours d'eau naturels permanents ou temporaires, qui s'écoulent à travers des sous-bassins versants qui font partie du vaste bassin versant de la Seybous.

On y trouve trois sous bassin versant :

Le sous bassin versant de Oued Medjez El-B'gare

Est un affluent du bassin de l'Oued Cheref appartenant au grand bassin de la Seybouse. L'oued Medjez El-B'gare, qui commence au niveau du bordj de Bou Rougaâ, forme l'épine dorsale du réseau hydrographique. Il provient du châabet Oum Krekeche avec d'autres sources qui dérivent au bord de la couche imperméable.

L'Oued Medjez El-B'gare : Les émergences qui lui donnent naissance sont situées au pied de Djebel El Oncle. Nous avons ainsi du Nord vers le Sud:

- Ain Ben Djarbouâ (sources permanente)
- Ain Ben Chetteh (sources permanente)
- Ain Ben Arare (Source à la base des volumes d'eau annuel les plus conséquents)
- Ain Boutheldja.

L'Oued Medjez El-B'gare s'est creusé profondément dans les couches marneuses friables au fil du temps, creusant un lit assez sinueux avec des méandres qui se correspondent presque toujours. Aussi pendant les périodes sèches, des sorties avec des débits relativement élevés au fond des vallées maintiennent l'oued en mouvement.

Le sous bassin versant d'Oued Bou Lefraï

Est un bassin hydrologique commun entre les territoires communaux d'Ain Makhoulouf, de Sellaoua Announa et d'Oued Zenati, où une partie de l'Oued BouLefraï, qui prend sa source

dans les contreforts EST du Djebel El Oncle et se débouche à l'Oued Cheref, draine la partie Nord-Est de la zone d'étude.

Le sous bassin versant d'Oued M'gaisba

Prend sa source au pied du Djebel Djahfa à l'extrême Ouest de la plaine de Tamlouka, et draine au niveau de sa partie engloutit une partie de la zone d'étude avant de se déboucher à l'Oued Cheref

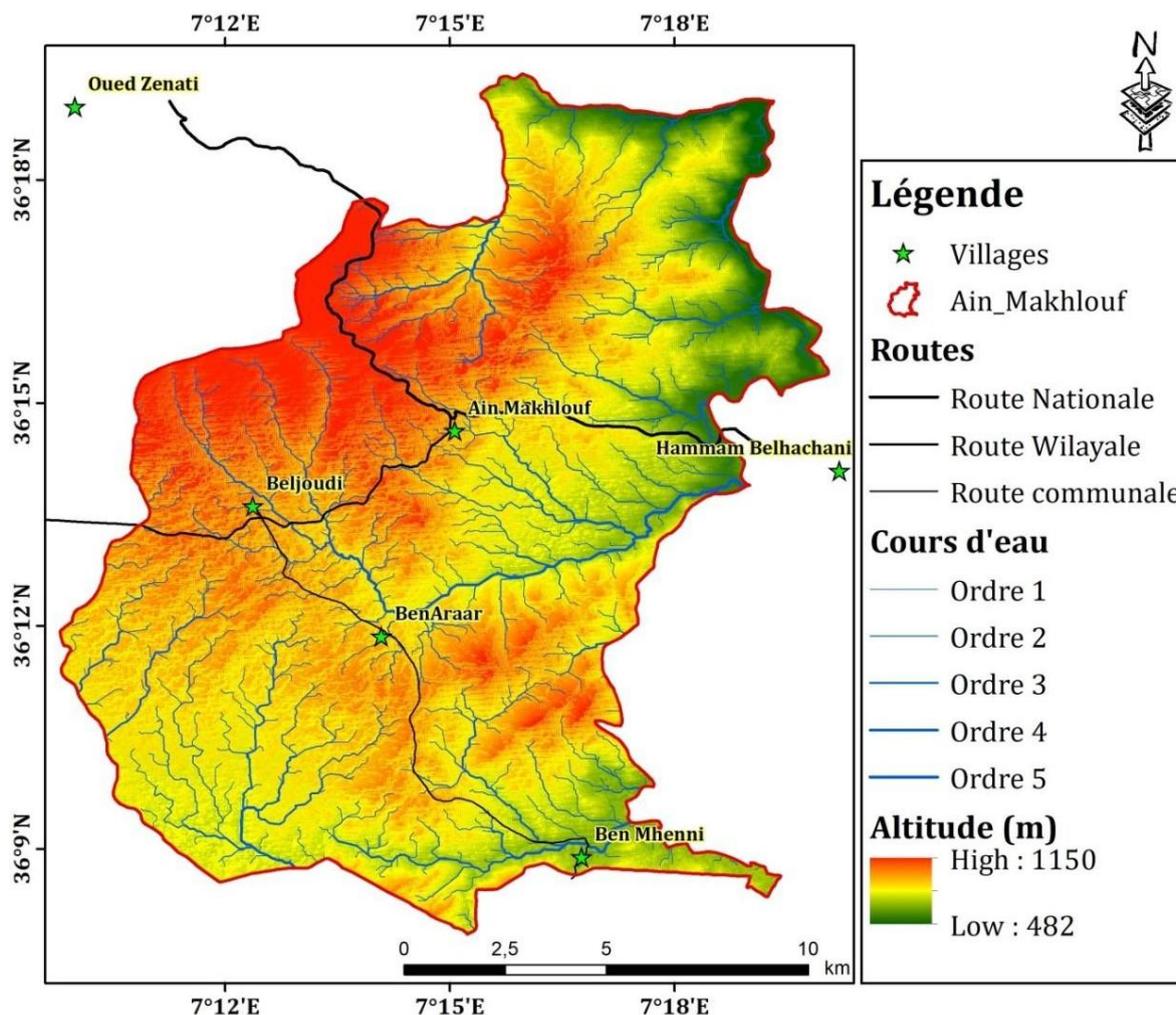


Fig.I.3 Carte du réseau hydrographique des sous bassins

I.1. Contexte socio-économique

La commune d'Ain Makhoulouf compte désormais 18 000 habitants, dont 12 000 dans le chef-lieu de la commune, soit 66,6% de la population totale. Cette situation est causée par un manque de soutien économique viable, qui a entraîné des troubles de la population municipale et le besoin d'espaces agglomérés locaux et régionaux.

a. L'agriculture

La commune d'Ain Makhoulouf a une agriculture intensive, qui est très importante pour l'économie de la région; elle est représentée par les céréales, l'arboriculture, la culture de pomme de terre, l'élevage de volailles et de bétail, et l'apiculture, entre autres.

b. L'industrie

Hormis quelques installations locales actuellement en construction (laiterie, usine de carrelage, etc.).

I.1. Conclusion

La zone d'étude, qui fait partie des hautes plaines constantinoises, est une dépression allongée de 197 km², s'étendant du Sud-Ouest à l'Est au cœur d'une vaste région à forte activité agricole, à travers laquelle s'écoule un réseau hydrographique plus ou moins important constitué de trois principaux Oueds avec de nombreuses options d'exploitation pour divers usages de l'eau.

CHAPITRE II :
Cadre géologique et structural

II.1. Introduction

La géologie peut fournir des informations lithologiques, stratigraphiques et structuraux détaillés et utiles sur le site d'étude, permettant la reconstruction de l'histoire paléogéographique, la compréhension de divers aspects structuraux, l'identification et l'analyse de tous les faciès lithologiques.

Ce chapitre s'organise autour du rétablissement de la zone d'étude dans son sens géographique, suivi d'une revue et d'un examen des formations et structures géologiques au niveau local.

II.2. Géologie régionale

Le Nord-est Algérien fait partie du domaine plissé alpin. Ce dernier est généralement subdivisé en plusieurs domaines structuraux et paléogéographiques bien distincts. Du Nord vers le Sud, on distingue (fig. II.3)

II.2.1. Le domaine interne

Du Paléozoïque au Tertiaire, il se compose du socle cristallophyllien (socle kabyle) et de sa couverture sédimentaire, également connue sous le nom de la dorsale ou la chaîne calcaire kabyle.

II.2.1.1. Le socle kabyle

Les formations cristallophylliennes présentent le caractère dominant dans ce domaine. La base kabyle est constituée des ensembles suivants, selon Durand Delga (1969), Bouillin (1977) et Raoult (1974) :

- Un ensemble cristallin profond au faciès de granulite.
- Un ensemble gneissique de quartzites, amphibolites, marbres et proxénètes intercalés.
- Un complexe de phylladite avec une zone sous-jacente à base de biotite et une zone au-dessus du chlorite ayant subi un métamorphisme à basse pression.

II.2.1.2. La Dorsale Kabyle (ou la chaîne calcaire)

C'est le bord sud de la couverture sédimentaire du socle kabyle. Du Permo-Trias au Lutétien, Les unités qui composent cette chaîne appartiennent à trois domaines paléogéographiques, selon (Raoult (1974), Vila (1980) :

a. La Dorsale interne

Du Permo-Trias à l'Oligocène, où une séquence complète existe.

b. La Dorsale médiane

Représentée par des dépôts constants à dominante marneuse et à microfaune pélagique du Turonien ou Lutétien, montrant une lacune du Crétacé moyen.

c. La Dorsale externe

Elle est caractérisée par des terrains du Jurassique et du Crétacé supérieur et par un Eocène détritique et lacuneux.

II.2.2. Le domaine des flysch Crétacés-Paléogènes

Ce sont des terres allochtones du Crétacé à l'Éocène (RAOULT, 1972). Il existe deux types de flysch dans ce domaine :

II.2.2.1. Le flysch mauritanien

Ce flysch représente une séquence d'images allant de Malm à Priabonian. De bas en haut, il se compose :

- de calcaires tectoniques-néocomiens, qui cèdent la place à une masse massive de pélite et de grès (flysch de GERROUCH) dans l'Albo-Aptien.
- Microbreches silicifiées du Cénomaniens et du Turonien inférieur avec un ciment sparitique et de quartz détritique.
- Du Turonien au Lutétien supérieur, une collection diversifiée de marnes, de calcaires microbrechiques et sableux, de conglomérats à l'extrémité et de grès micacés

II.2.2.2. Le flysch massylien

Raoult a inventé le terme de flysch massylien pour décrire les formations détritiques de schisto-quartz en 1969.

Les termes lithologiques suivants sont inclus dans ce flysch :

- Argiles et grès quartzitiques albo-aptiens ;
- Phtanites et conglomérats argileux du Cénomaniens inférieur à marno-calcaires, Argiles marneux et schistes sénoniennes avec des lits de conglomérats et de grès calcaire.

II.2.3. Le domaine tellien

Les formations du domaine tellien sont divisées en trois groupes qui s'étendent du Nord au Sud (VILA, 1980).

II.2.3.1. La série ultra tellienne

Ces séquences, selon Durand Delga (1969), forment un ensemble particulièrement homogène qui comprend un Crétacé marneux avec Ammonites et Rotaliporas et un Éocène avec des marnes et calcaires sombres et des silex noirs.

II.2.3.2. Les séries Telliennes sensu stricto

Ils forment une couverture importante qui s'étend des chaînes côtières des Babors aux premières pentes des montagnes Hodna. Du Nord au Sud, ces séries telliennes peuvent être divisées en six classes :

- a. Les séries de type Gouraya-Arkalon ;
- b. Les séries de type Barbacha ;
- c. Les séries de type Drâa-el-âarba ;
- d. Les séries de type Beni-Abdellah ;
- e. Les séries Bibaniques ;
- f. Les séries de Djemila.

II.2.3.3. Les série pénitelliennes et leur couverture Eocène à Nummulites

Les formations pénitelliennes s'étendent sur 150 kilomètres d'Est en Ouest et sur 40 kilomètres du Nord au Sud, selon (Vila, 1977).

Elles apparaissent de deux façons différentes :

Au Nord : en fenêtre sous les nappes Telliennes, comme au Djebel Hellel, Djebel Bou-cheref et Ouakissen, Massif d'Ahmed Rachedi et au Djebel El-Akhal.

Au Sud et à l'Est : en klippe sur les massifs néritiques constantinois, casdu Djebel Grouz, Djebel Khenag et Djebel Chataba.

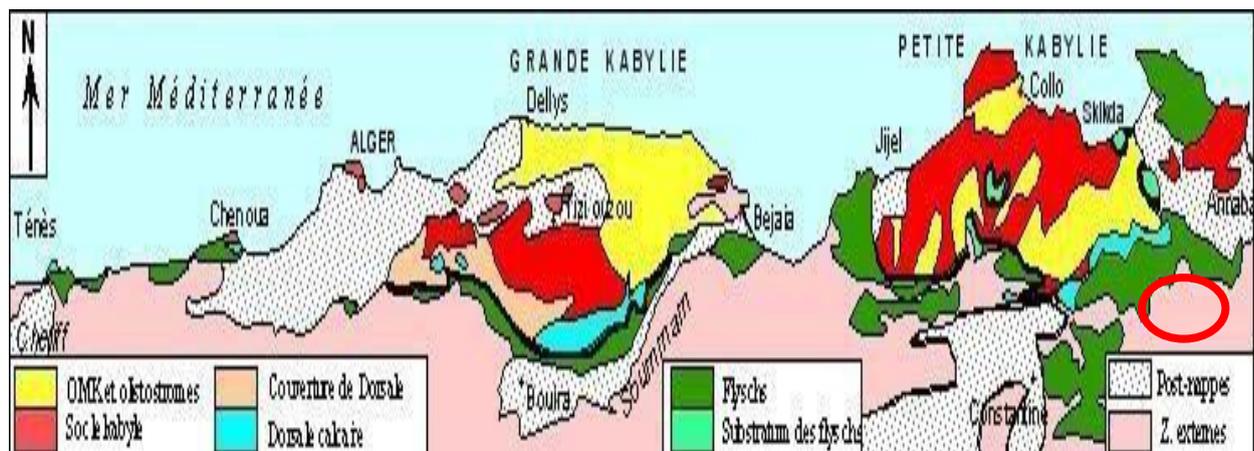


Fig.II.4. Carte structurale schématique de la chaîne des Maghrébides montrant la disposition des zones internes et externes; d'après Durand Delga et Fontboté (1980).

II.3 Géologie locale

La commune d'Ain Makhoul est caractérisée par des roches méso-cénozoïques, qui sont pour la plupart des cas couvertes par des dépôts Mio-Plio-Quaternaires comprenant diverses formations géologiques. Elle est bordée au Sud et à l'Est par l'unité des Sellaoua, qui est en grande partie composée de diverses formations d'âge Secondaire, et au Nord par la nappe numidienne.

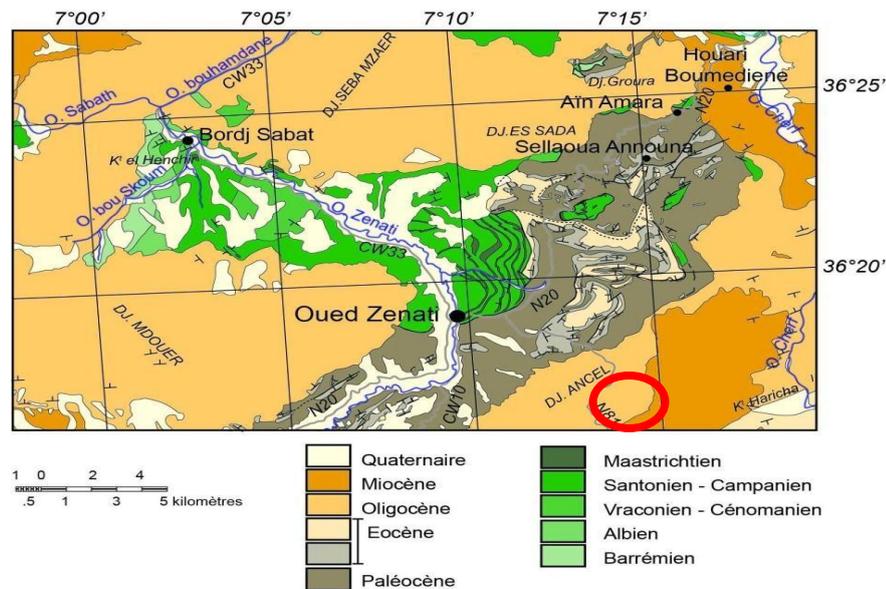


Fig. II.5. Carte géologique de la zone d'étude (De Mme Ruault Djerrab)

II.3.1. Stratigraphie et lithologie

II.3.1.1. Les formations du Crétacé

a. Aptien

Cette formation se trouve au Nord de Djebel El Hofra, sur la rive de l'Oued M'djez El B'gare. L'Aptien est constitué de petits bancs de marnes calcaires alternants avec des marnes noires ou grises. Le grès vert et le grès très fin avec des boules et des traces de courant se retrouvent en quantités très irrégulières sur les affleurements Sud.

b. Albien- Vraconien

Cette formation se trouve au Nord de Djebel El Hofra. La séquence Clayey-Marly fait référence à l'Albien. Le Vraconien est une formation marneuse et marno-calcaire difficile à distinguer du Cénomaniens.

c. Cénomaniens

Il y a des Ammonites dans les marnes et des Rotalipores dans les biomicrites. C'est une formation de marne écaillée avec une fracture bicolore rouillée ou bleu foncé et des patines grises. C'est au Nord de Djebel el Hofra et au Sud de la ville d'Ain Makhlouf.

d. Sénonien inférieur

Marnes avec intercalation de mines de calcaire marneux, avec traces d'algues et pépites de verre. Seule la zone de Ben Araâr possède cette formation.

e. Sénonien supérieur

Une grande partie de la ville d'Ain Makhoulf est occupée par le sénonien supérieur. Il se trouve à l'intersection des CW 123 et RN 81 entre Djebel El Ouibi et Djebel Draa El Abiod (Ben Mhenni) et Djebel El Hofra au Nord de Ben Araâr et à l'Est d'Ain Makhoulf.

Il se compose d'une séquence de marnes grises ou gris-bleu et d'une fine barre de calcaire d'inocéram, parfois tendre et crayeuse, accompagnée d'une intercalation marneuse et d'une barre de calcaire maestichien constitué de calcaire blanc crayeux ou jaunâtre.

II.3.1.2 .la nappe tellienne (âge Paléocène)

Yprésien à Lutétien inférieur ; forme une large série du côté de la CW 123, du calcaire marneux blanc avec une fracture bitumineuse noire (et souvent huileuse et suintante) avec des débris de phosphate et des lits de silex noirs.

II. 3.1.3. Le Néogène

Au niveau de cette unité stratigraphique à l'extrême Sud-est, les formations patrons sont les seules représentées. Il est composé de couches rouges continentales avec une matrice d'argile ou de marne, au-dessus desquelles se trouvent parfois du sable et du pudding.

II.3.1.4. Le Mio- Plio – Quaternaire

Cette unité stratigraphique s'étend du centre de la ville d'Ain Makhoulf au Sud-ouest et au Nord-est. C'est l'unité la plus visible du territoire communal. On y trouve tous des calcaires lacustres, des argiles sableuses et des marnes sableuses rouges.

II.4. La tectonique

En ce qui concerne le style structural de la région, il faut noter l'existence de deux grandes unités :

- l'unité de la nappe néritique constantinoise au Nord et l'unité de la chebkat des Sellaoua au Sud.
- La nappe néritique constantinoise est charriée sur son soubassement et montre des structures dirigées vers le Sud.
- Le noyau de la nappe est représenté par le jurassique. Cette nappe a été déformée après s'immiscer en place par les dénivellations et elle est en plus affectée par les failles.
- L'unité de la chebkat des Sellaoua au Sud présente des affleurements de marne, de calcaire et d'argile sableuse dont la disposition leur confère une forme écaillée d'où leur dénomination "écailles de la chebkat des Sellaoua". Ces écailles sont dirigées vers le Sud.

Au niveau de la zone Sud-est, il existe une très grande diversité tectonique allant des terrains Aptiens jusqu'au Sénonien supérieur. Au niveau des terrains très anciens de la série, il existe des formations d'âge Eocène et Miocène de disposition irrégulière, soit très développé, transgressive

et discordante. La zone Sud-ouest est totalement recouverte par les accumulations du Mio -Plio-Quaternaire et les formations géologiques sont masquées.

II.5. Aspect géomorphologique

L'orographie de la région d'étude est définie par une ligne générale de reliefs montagneux et vallonnés qui vont de l'extrémité orientale de la chaîne de montagnes de Constantine aux contreforts occidentaux de la chaîne de la Medjerda. De profondes vallées traversent ces deux contreforts, où coulent les affluents droit et gauche de la Seybouse.

Les rivières sont toutes de nature torrentielle. Djebel El Oncel (1141m) qui présente les points les plus élevés de la région d'Ain Makhoulf. Les altitudes dans la partie sud sont moins importantes que la partie Nord.

La région d'Ain Makhoulf fait partie du cycle de l'érosion et présente toutes les caractéristiques morphologiques d'une région où l'eau a été le principal modérateur. La plaine creusée par les différents cours d'eau présente généralement des pentes douces, les pentes exposées au Sud étant les plus douces.

L'Oued Medjez El B'gare principale cour d'eau dans la région a un fond plat avec une légère inclinaison longitudinale. Il est couronné de terrasses qui s'élèvent à des hauteurs variables. A l'exception des affleurements calcaires, qui donnent lieu à des pentes de plus en plus abruptes en raison de leur plus grande résistance à l'érosion, les reliefs qui surplombent immédiatement la plaine sont tous des pentes moyennes aux sommets arrondis.

II.6. Les grands ensembles morpho-dynamiques

D'après une étude faite par la société grenobloise des études d'applications hydrauliques notre commune comporte les zones suivantes :

II.6.1. une zone sensible aux mouvements de masse

Elle couvre la périphérie Nord de la ville d'Ain Makhoulf, en particulier les affleurements sablo-argileux. Des coulées de boue ou des glissements de terrain se produisent dans les montagnes, où les pentes sont abruptes et la couverture végétale est clairsemée. Dans cette région, les pertes de sol sont de l'ordre de 1840 tonnes /km²/an.

II.6.2. une zone sensible aux ravinements

Il est situé dans l'angle Sud-est du territoire municipal, où prédominent les sols marno-calcaires et une forme de pentes faibles. En conséquence, le processus d'érosion est relativement lent, avec seulement des ravinements sous forme d'encoches linéaires ou de mauvaises terres. Les pertes de terres sont moins graves que dans la partie Nord du territoire, avec seulement 315 tonnes/km²/an.

II.6.3. une zone affectée par l'érosion diffuse

La partie Sud-ouest, qui prolonge la plaine de Tamlouka , est la plus fréquemment affectée par une érosion diffuse. Cela est dû à un drain bouché et les pertes de sol ne sont que de l'ordre de 100 tonnes/km²/an.

II.7. Conclusion

La zone d'étude fait partie de la chaîne des maghrébines dans le domaine extérieur de l'Algérie orientale. Le sol et le sous-sol sont constitués d'une variété de terrains. Leurs âges couvrent les périodes secondaires, tertiaires et quaternaires. L'état structurel actuel de la région d'Ain Makhlof est défini par la présence de deux grandes unités : l'unité de la nappe néritique constantinoise au Nord et l'unité de la chebkat des Sellaoua au Sud. Les formations carbonatées (calcaires, calcaires dolomitiques) avec quelques marnes, parfois des groupes marneux argileux, sont les formations dominantes de la zone.

Le remplissage Mio-Plio-Quaternaire s'étend du Sud-ouest au Nord-est entre la nappe numidienne au Nord et la Chebka des Sellaouas au Sud, couvrant tout le bassin sous une forme allongée.

L'aspect morphologique peut être redéfini par trois ensembles géomorphologiques ; une zone sensible aux mouvements de masse, une zone sensible aux ravinements et une zone affectée par l'érosion diffuse.

CHAPITRE III :

Etude Hydroclimatologique

III.1. Introduction

Les caractéristiques climatiques influencent les variations des n réserves des eaux souterraines, de ce fait il est impératif de connaître leurs évolutions dans le temps et dans l'espace , Aujourd'hui de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète vis-à-vis des changements des caractéristiques climatiques. Le continent Africain reste le plus exposé aux soubresauts du climat ,car toute étude hydrogéologique passe principalement par un traitement détaillé des mesures hydroclimatiques permettant d'établir le bilan hydrique et par conséquent de comprendre les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux de surface et souterraines , et donc les précipitations , la température et l'évapotranspiration sont les principales caractéristiques climatiques étudiées dans cette section.

III.2. Les données disponibles

La zone de recherche compte actuellement quelques stations météorologiques dont nous avons emprunté des données. Afin de mener nos recherches, nous avons sélectionné la station d'Ain Makhlouf qui présente la station la plus représentatif des sous - bassin versant étudiés, telles que, ses coordonnées sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Tab III.1. Coordonnées de la station météorologique d'Ain Makhlouf et période d'observation

Station	Coordonnées			Paramètres Mesurés	Période d'observation (35 ans)
	Latitude	Longitude	Altitude (m)		
Ain Makhlouf	36° 14' N	7° 17' E	664 m	Précipitations température évaporation	1986-2020

III.3 .Analyse des paramètres climatiques

III.3 .1 .Les précipitations

Les précipitations sont tout type d'eau qui tombe du ciel, qu'elle soit liquide ou solide. Cela comprend la pluie, la neige, la grêle et d'autres formes de précipitations.

Les précipitations sont un élément critique qui affecte le débit saisonnier et a un impact direct sur le régime des cours d'eau et l'approvisionnement des aquifères.

III.1. 1.1. Précipitations moyennes mensuelles (PMM)

Les précipitations moyennes mensuelles nous donnent un aperçu des fluctuations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en calculant la moyenne arithmétique des hauteurs de précipitations du mois en question pour un nombre quelconque d'années.

Le tableau (Annexe1) présente les précipitations moyennes mensuelles sur les périodes .

Pour une comparaison graphique de la variation des précipitations moyennes mensuelles, nous avons établi l'histogramme relatif à cette station :

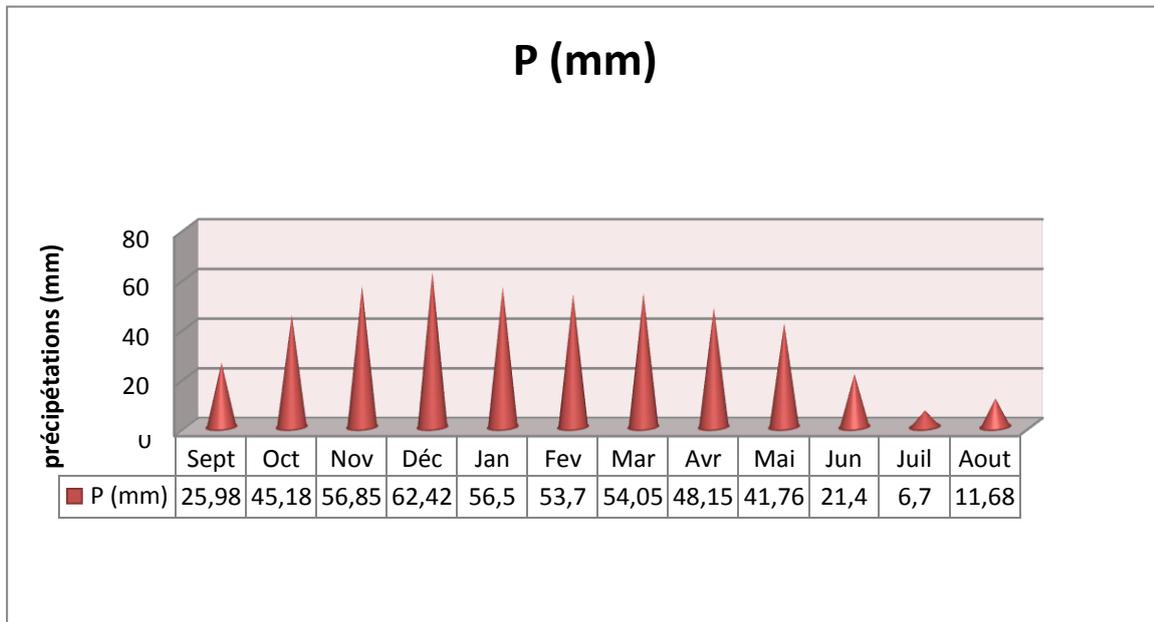


Fig.III.6. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

L'histogramme de précipitations, révèle l'irrégularité des pluies le long de l'année.

Les mois les plus pluvieux sont : Décembre (62.42mm), et Novembre (56.85mm), alors que le mois le moins pluvieux est Juillet (6.7 mm) (Fig.III.5)

III.3.1.2. Variation interannuelle des précipitations

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations nous montre que l'année la plus humide est : 1997-1998 avec 1163 mm et l'année la plus sèche est : 1995-1996 avec 112.3mm

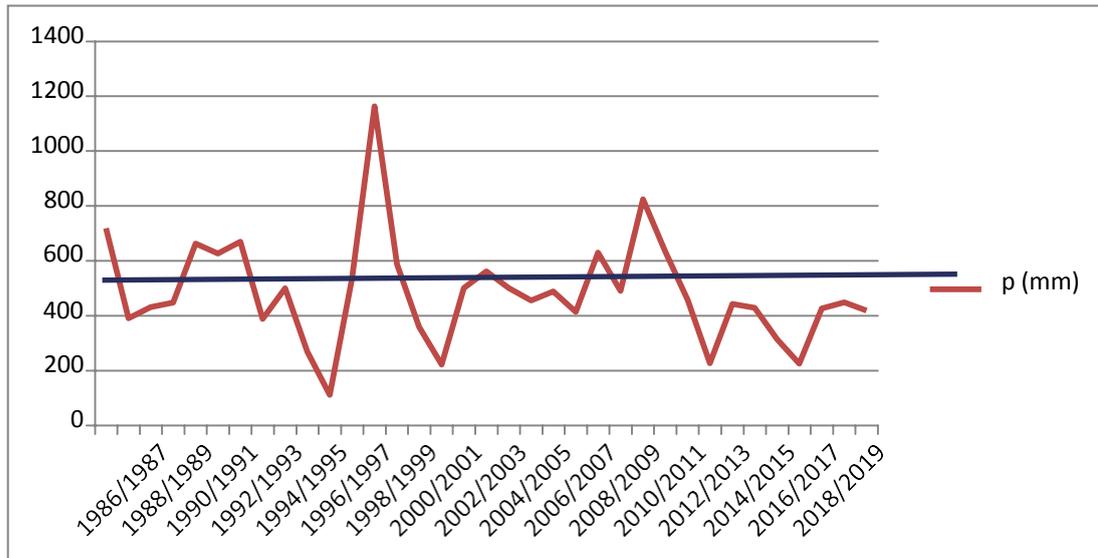


Fig.III.7. Représentation des précipitations interannuelles. Station d’Ain Makhoulouf (1986-2020)

III.3.1.3 Répartition saisonnière des précipitations

La subdivision des pluies de l’année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles (Automne : (Sep, Oct, Nov), Hiver : (Déc, JanFév), Printemps (Mar, Avr, Mai), Été : (Juin Juill, Aou).

Tab.III.2 Précipitations moyennes saisonnières de la station d’Ain Makhoulouf (1986-2020)

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Été		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	128.01			172.62			143.96			39.78		
P (%)	26.42			35.63			29.72			8.21		

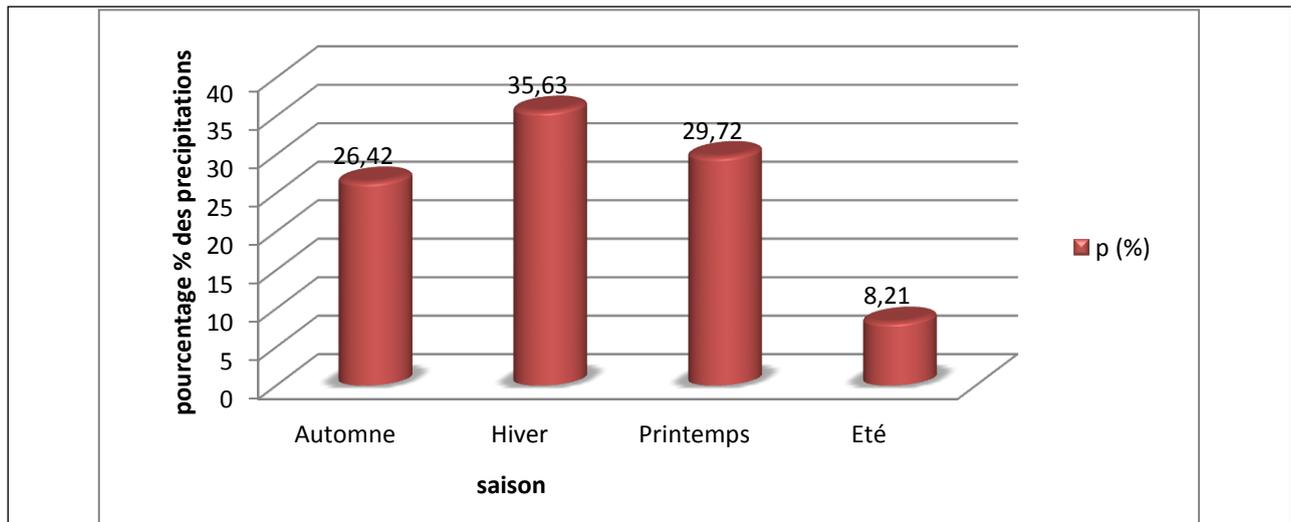


Fig.III.8 Précipitations moyennes saisonnières en %.

Nous remarquons que les saisons du Printemps et d'Hiver sont les plus humides, avec des précipitations totalisant 271,58 mm, soit 65,35 pour cent des précipitations annuelles. La saison estivale est la plus sèche, avec une pluviométrie minimale de 39,78 mm (8,21 %).

III.3.1.4 Coefficient pluviométrique interannuel (H)

Le coefficient pluviométrique permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire. L'année est d'autant plus excédentaire que $H > 1$. Si $H < 1$, l'année correspondante est déficitaire.

Le terme H est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne P pour une période de n années :

$$H = P / P \text{ moy}$$

Avec :

H : coefficient pluviométrique interannuel.

P : pluviométrie d'une année en mm.

P moy : pluviométrie moyenne en mm.

Le tableau (Annexe3) montre les variations de H au cours des années d'observation D'après les résultats obtenus, il y a une alternance de périodes, souvent, triennales excédentaires(AE) et déficitaires (AD).

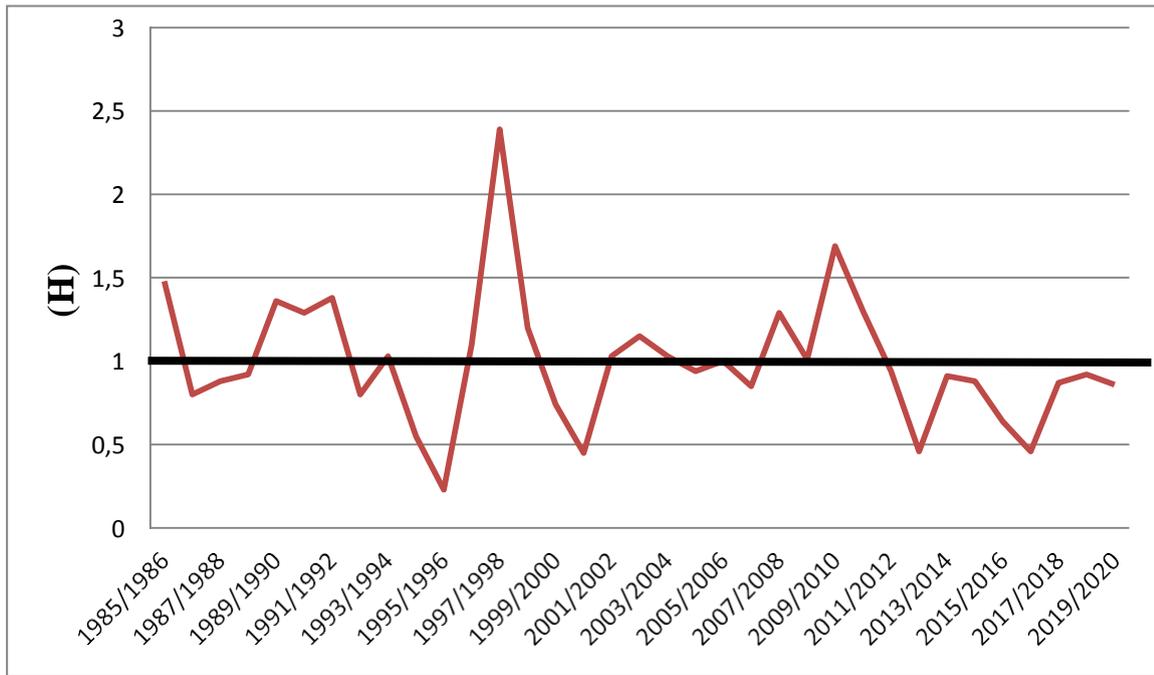


Fig. III.9 Coefficients pluviométriques interannuel (H).

III.3.2. La température

La température est un facteur écologique de première importance. Elle constitue avec les précipitations, l'élément du climat le plus couramment révélé. Elle influe beaucoup sur les conditions générales de développement et de croissance des êtres vivants et constitue un paramètre essentiel pour le calcul du bilan hydrique.

III.3.2.1. Températures moyennes mensuelles

Les températures mensuelles recueillies à la station météorologique d'Ain Makhoulf sur une période de 34 ans (1986 - 2020) sont récapitulées dans le Tableau (Annexe 2) leur répartition est illustrée par la Figure. III.9.

Les températures moyennes mensuelles les plus élevées sont observées pendant la période allant du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre, avec des températures de l'ordre de 20.05 à 27.87 C°, tandis que les températures les plus basses (9.86 à 11.84 C°) sont observées pendant la période hivernale (Décembre à Mars) avec un minimum enregistré pendant le mois de Février de l'ordre de 9.86 C°.

A l'échelle annuelle, la moyenne interannuelle des températures est de 17.80 C°.

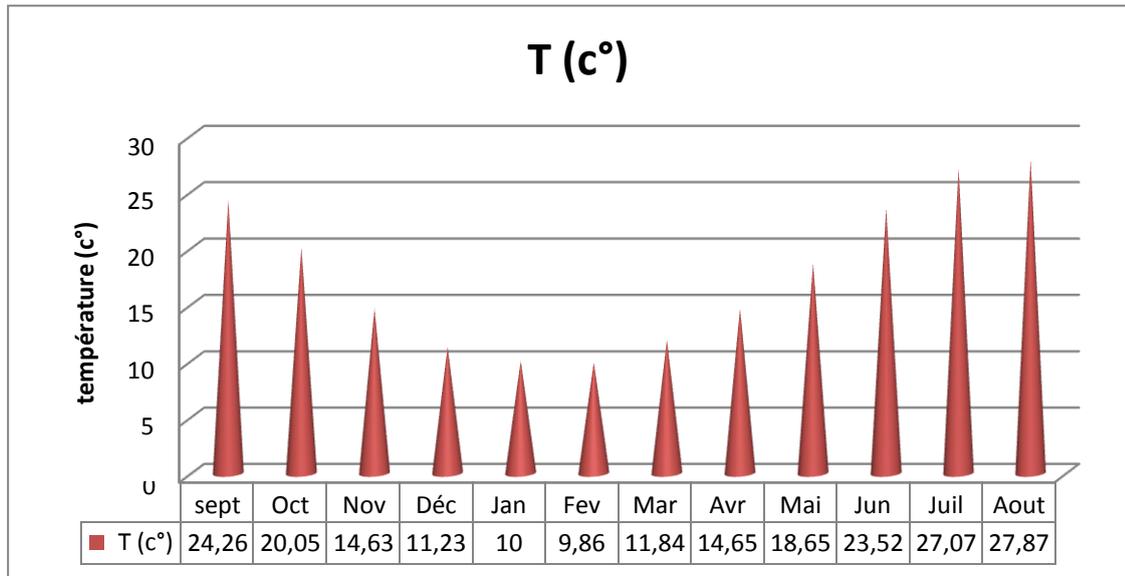


Fig .III.10 Variation de la température moyenne mensuelle (1986-2020) pour la station d'Ain Makhlouf.

III.3.3. Relation températures-précipitations

III.3.3.1. Diagramme Ombro-thermique

Selon la définition de H. Gaussen, F. Bagnol et Henry (1957), un mois sec où la somme totale de précipitation est égale ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle du même mois $P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ (}^\circ\text{C)}$, cette méthode simplifiée permet de déterminer la période humide ainsi que la période sèche. L'établissement du diagramme ombro-thermique à partir des données de Températures et de précipitations de la station d'Ain Makhlouf peut nous conduire à distinguer deux périodes (Fig.III.10)

- La première froide et humide : s'étale sur 8 mois, d'Octobre jusqu'au Mai.
- La seconde chaude et sèche : s'étale sur 4 mois, depuis fin Mai jusqu'à fin Septembre.

La détermination de cette période est d'une grande importance pour la connaissance de la période déficitaire en eau.

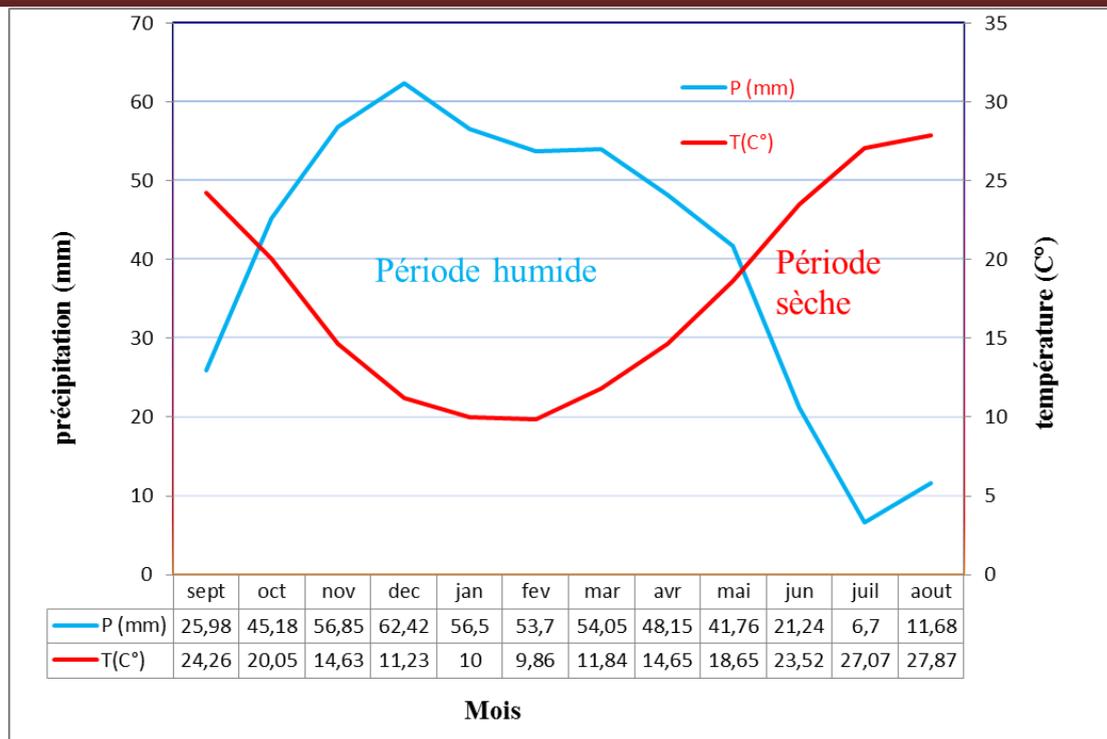


Fig.III. 11. Diagramme Ombrothermique de la station d'Ain Makhoulf (1986-2020)

III.3.3.2. Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte)

La méthode d'Euverte fait appel à deux paramètres essentiels qui sont la température et la précipitation établies mensuellement où le rapport (P/T) permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol.

Le rapport permet également de définir quatre types de régimes :

- (P/T) < 1, le régime est très sec ;
- 1 < (P/T) < 2, le régime est sec ;
- 2 < (P/T) < 3, le régime est sub- humide ;
- (P/T) > 3, le régime est humide.

Avec : P : moyenne mensuelle des précipitations en mm

T : moyenne mensuelle des températures en C°

Les résultats obtenus du rapport (P/T) synthétisés dans le tableau (Annexe 4), montrent que la période humide commence du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, la période sub -humide correspond aux mois d'Octobre et Mai, alors que la période sèche correspond au mois de Septembre, le régime très sec présenté par les trois mois Juin, Juillet et Août.

III.3.2.1. Détermination des indices climatiques

Le calcul des indices climatiques donne un aperçu sur les caractéristiques du climat de la région. Nous calculons en premier l'indice d'E De Martonne, qui va nous renseigner sur les caractéristiques régionales du climat.

a. Calcul de l'indice d'aridité

Défini par la formule et la classification suivantes :

- **L'indice climatique d'E De Martonne (1923)**

La formule climatique d'E De Martonne est appelée indice d'aridité, il est en fonction de la Température et de précipitation

$$A = \frac{P}{T+10}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

T : température moyenne annuelle en °C.

A : indice d'aridité

Selon De Martonne :

-si $A < 5$ le climat hyperaride.

-si $5 < A < 7.5$ le climat est désertique.

-si $7.5 < A < 10$ le climat est steppique.

-si $10 < A < 20$ le climat est semi-aride.

-si $20 < A < 30$ le climat est tempéré.

-si $A > 30$ l'écoulement est abondant (climat humide).

Donc pour notre station d'Ain Makhoul :

P = 484.37 (mm) et T = 17.80 (C°) donc : $A = 17.42$

D'après les résultats obtenus on peut dire que le climat est semi-aride.

- **L'indice d'aridité mensuel d'E De Martonne (1923)**

L'indice mensuel (i), donnée par la formule : $I = \frac{12P}{T+10}$

Avec :

P : moyenne mensuelle des précipitations en mm

T : moyenne mensuelle des températures en C°

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, les résultats sont donnés dans le tableau (Annexe 5)

Les mois de Juillet et Aout présentent un climat hyperaride, le mois de Juin un climat désertique les mois de Septembre, Octobre et Mai ont un climat semi-aride. On note que le mois d'Avril à un climat tempéré, alors que le climat humide marque le reste des mois de l'année.

III.3.2.2. Le bilan hydrique

Il est très important de quantifier les précipitations et l'évapotranspiration sur un bassin versant, ça nous aide à reproduire son bilan hydrique, et aussi d'estimer les réserves de sol et de déterminer les aires d'alimentation. Ces informations sont très utiles pour les futurs projets à impacts socio-économiques.

L'équation du bilan hydrique est définie comme suite : $P = ETR + R + I$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm),

R : ruissellement en (mm),

I : infiltration moyenne en (mm),

ETR : évapotranspiration réelle en (mm)

a. Evapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration joue un rôle très important dans les études hydrologiques, car c'est un paramètre qui s'introduit dans l'étude du bilan hydrologique et par conséquent dans l'estimation des réserves souterraines.

Toute perte sous forme de vapeur c'est l'évapotranspiration aboutissant de deux phénomènes, l'un physique c'est l'évaporation, et l'autre biologique c'est la transpiration.

L'évapotranspiration joue un rôle primordial dans le cycle de l'eau, elle est liée à plusieurs paramètres physiques comme la température (T°), l'air, l'eau et la vitesse du vent.

b. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée pendant une période bien définie, en considérant les apports d'eau suffisants.

Plusieurs formules ont été proposées par différents auteurs (Turc 1961, Thornthwaite, 1948), pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle ETP, nous n'avons pas pu utiliser toutes ces formules par manque de données nécessaires à leurs applications, on a choisi seulement la formule de Thornthwaite.

Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'ETP, où le pouvoir évaporant pour chaque mois est déterminé à partir de la relation suivante :

$$ETP = 16 * (10T / I)^a$$

Avec :

ETP : désigne l'évapotranspiration potentielle (mm) ;

T : la température moyenne mensuelle ($^\circ\text{C}$) ;

I : désigne l'indice thermique annuel (la somme des indices thermiques mensuels i).

i : désigne l'indice thermique mensuel, $i = (T/5)^{1.514}$

a : est un exposant climatique, $a = 0.016 I + 0.5$

Les valeurs de l'ETP calculées (ETP_c) pour chaque mois corrigé au moyen d'un coefficient K

qui tient compte du nombre de jours : $ETP_c = 16(10T/I)^a \cdot K$

Donc : $I=86.11$ $a=1.87$

Les résultats sont résumés dans le tableau 8

Tab.III.3 Les valeurs de l'ETP calculées (ETP_c) pour chaque mois corrigé au moyen d'un Les valeurs de l'ETP calculées (ETP_c) pour chaque mois corrigé au moyen d'un coefficient K

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Annuel
P (mm)	25,98	45,18	56,85	62,42	56,5	53,7	54,05	48,15	41,76	21,4	6,7	11,68	484,37
T(C°)	24,26	20,05	14,63	11,23	10	9,86	11,84	14,65	18,65	23,52	27,07	27,87	17,8
i	10,92	8,18	5,08	3,4	2,85	2,79	3,68	5,09	7,33	10,42	12,89	13,48	86,11
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	
ETP (mm)	114,32	75,38	37,07	21,29	18,41	17,52	29,89	47,54	82,13	127,79	168,94	166,89	907,17

c. Evapotranspiration réelle (ETR)

Appelée aussi déficit d'écoulement (De), elle correspond à la quantité d'eau évaporée ou transpirée selon les influences climatiques réelles et la disponibilité des réserves d'eau (*surfacelibre-sol-végétation*), l'ETR s'écarte plus ou moins de l'ETP selon la nature des surfaces évaporantes. (BOUAICHA .F 2018).

Le déficit d'écoulement moyen annuel (De), est par définition, la différence entre les précipitations et le ruissellement $De = P - Q$

Où :

P : c'est la hauteur moyenne annuelle des précipitations tombées sur le bassin versant.

Q : c'est la hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau ruisselée.

L'évaluation de ce paramètre est effectuée par des formules empiriques :

La formule de Turc :

Elle permet d'évaluer directement l'évapotranspiration réelle annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{0.9 + \sqrt{P^2/L^2}}$$

Avec : $L=300 + 25T + 0.05T^3$

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

L : paramètre arbitraire lié à la température.

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (C°).

Les résultats sont consignés dans le tableau .III.9 :

Tab.III.4. ETR selon Turc à la station d'Ain Makhoulf (1986-2020)

Station	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm/an)
Ain Makhoulf	484.37	17.80	1026.98	356.15

- Formule de Thornthwaite :

Pour l'établissement du bilan hydrique, on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne calculée par la méthode de C.W. Thornthwaite.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivant :

- la satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.

- le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant trois cas :

1er cas : $P > ETP$ \Rightarrow $ETR=ETP$ on a alors un excédent.

2eme cas : $P < ETP$ \Rightarrow $ETR= P+RFU$.

3ème cas : $P < ETP$ et $RFU = 0$ \Rightarrow $ETR = P$: Il y aura donc un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

-L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des méthodes précédentes pour aboutir une approche de l'ETR. Ce qui par la suite fera ressortir à notre région d'étude.

-La formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée.

Contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

-L'ETR est surestimé pour tous les mois de l'année, par ailleurs, Thornthwaite présente des résultats assez convaincants (donnent des valeurs très proches de l'ETR).

d. Etablissement du bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite

- Le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite pour la station d'Ain Makhoulf a montré que l'ETP atteint son maximum au mois juillet (168.94 mm) et son minimum au mois de Février (17.52 mm).
- La constitution de la RFU débute au mois de novembre et s'étale jusqu'au mois de Mai.
- Le bilan hydrique pour une période de 34 ans dans la zone d'étude est déficitaire.

- Les valeurs obtenues de l'évapotranspiration potentielle et réelle, le déficit agricole et l'excédent sont représentés dans le tableau.III.5.

Tab.III. 5. Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (1999)													
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Annuel
P (mm)	25,98	45,18	56,85	62,42	56,5	53,7	54,05	48,15	41,76	21,4	6,7	11,68	484,37
T(C°)	24,26	20,05	14,63	11,23	10	9,86	11,84	14,65	18,65	23,52	27,07	27,87	17,8
I	10,92	8,18	5,08	3,4	2,85	2,79	3,68	5,09	7,33	10,42	12,89	13,48	86,11
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	
ETP (mm)	114,32	75,38	37,07	21,29	18,41	17,52	29,89	47,54	82,13	127,79	168,94	166,89	907,17
ETR (mm)	25,98	45,18	37,07	21,29	18,41	17,52	29,89	47,54	82,13	81,03	6,7	11,68	424,42
RFU100 mm	0	0	19,78	60,91	99	100	100	100	59,63	0	0	0	
Da	88,34	30,2	0	0	0	0	0	0	0	46,76	162,24	155,21	482,75
Ex	0	0	0	0	0	35,18	24,16	0,61	0	0	0	0	59,95

Avec :

- T : température mensuelle en (C°).
- P : précipitation mensuelle en (mm).
- I : indice thermique.
- K : coefficient de latitude.
- ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).
- ETR : évapotranspiration réelle en (mm).
- RFU : réserve facilement utilisable en (mm), (RFU=100mm) pour le calcul du bilan.
- Da : déficit agricole (mm).
- Ex : excédent en (mm).

➤ **Formules de vérification :**

$$P = \sum ETR + \sum EX \implies P = 424,42 + 59,95 = 484,37mm.$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \implies ETP = 424,42 + 482,75 = 907,17mm.$$

$$DA = \sum ETP - \sum ETR \implies DA = 907,17 - 424,42 = 482,75mm.$$

$$EXC = \sum P - \sum ETR \implies EXC = 484,37 - 424,42 = 59,95 mm$$

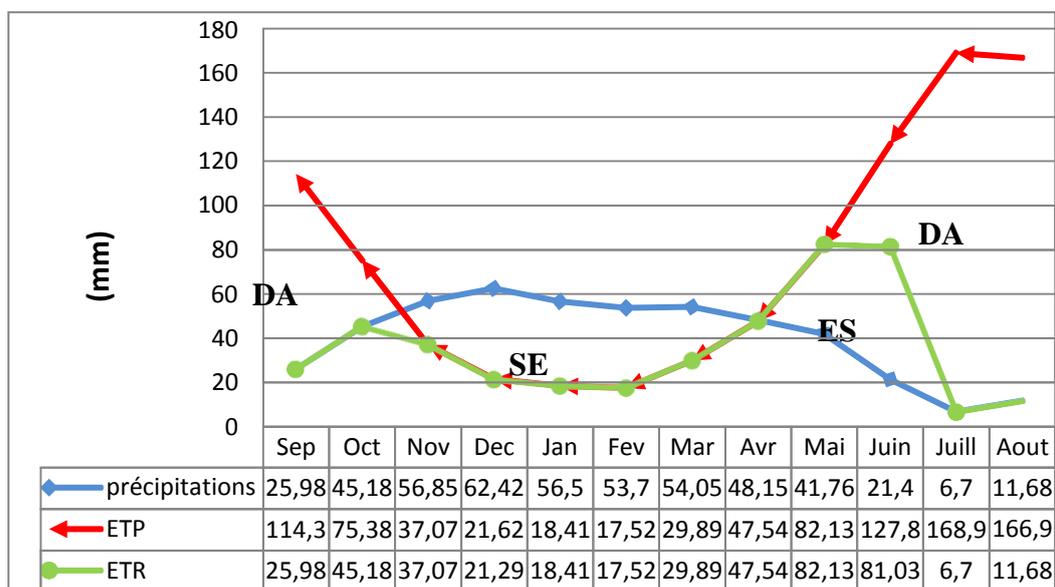
Nous constatons que les résultats issus des bilans sont vérifiés

e. Interprétation du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique a pour but de connaître les différents paramètres (ETP, RFU, DA, EXC), qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologique.

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement. Dès que la RFU diminue, il y a un épuisement du stock. Quand la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA).

D'après le bilan hydrique calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que le RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois du Novembre pour atteindre son maximum (100mm) au mois de Janvier à Avril, période dans laquelle il ya un surplus d'eau se manifestant par un écoulement. Elle diminue à partir du mois d'Avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Mai, où on observe l'apparition du déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre.



DA : Déficit Agricole, SE : Surplus d'Eau, ES : Epuisement du stock

Fig.III.12. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

III.3.2.3 Ruissellement

Le ruissellement est calculé selon la formule de **Tixeront-Berkaloff**, ce paramètre est considéré comme très important du point de vue hydrologique, et qui exige que les précipitations, soient supérieures à 600 mm, ce qui n'est pas le cas pour nos données mais une valeur de 484.37mm de précipitation nous permette comme même de tenter cette approche avec tous les réserves nécessaires:

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

R : le ruissellement superficiel calculé en mm.

P : la précipitation moyenne annuelle en mm (484.37 mm).

ETP : désigne l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm) soit (907.19 mm).

Le ruissellement selon l'équation Tixeront-Berkaloff : $R = (46.02\text{mm})$.

III.3.2.4. Infiltration

L'infiltration est le passage d'eau à travers la surface du sol en mouvement descendant de la zone non saturée jusqu'à la zone saturée (G. Castany et J. Margat, 1977).

On peut estimer ce paramètre suivant la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \quad \Longleftrightarrow \quad I = P - R - ET$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle (424.42mm).

P : Précipitation Annuelle (484.37 mm).

R : Ruissellement Annuel (46.02mm).

I : l'infiltration (13.93 mm).

III.2. Conclusion

L'étude hydroclimatologique a permis la compréhension des processus d'alimentation et de la restitution des eaux souterraines de la région d'étude.

Les données climatiques attribuent à la région un climat semi-aride à influence méditerranéenne caractérisé par deux saisons distinctes: l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre 484.37 mm et avec des températures annuelles moyennes de l'ordre de 17.80°C.

L'interprétation du bilan hydrique selon la formule de C.W Thorthwaite, donne une évapotranspiration réelle très élevée de l'ordre de 424.42 mm/an présentant un pourcentage de (87.62%) des précipitations totales.

Le déficit agricole pour satisfaire les besoins en eaux d'irrigation des cultures est estimé à 482.75mm à la station d'Ain Makhlouf.

La période de recharge s'effectue au mois de Novembre et commence à s'épuiser au mois de Mai.

Le Ruissellement Annuel (46.02mm) et l'infiltration (13.93 mm) sont à l'origine de la recharge du système aquifère.

CHAPITRE IV :
Cadre Hydrogéologique

IV.1 Introduction

L'importance des eaux de sources se manifeste dans leur quantités et leur qualités, l'évaluation de leurs différents débits passe obligatoirement par une étude hydrogéologique, permettant ainsi de comprendre le fonctionnement hydrogéologique des différents systèmes aquifère ainsi que la détermination des différents circuits à l'origine des différentes émergences. Dans la région d'Ain Makhoulf les eaux de sources comptent parmi les principales ressources hydriques disponibles, dont leur valorisation à travers ce chapitre demeure indispensable en suivant les démarches suivantes :

- La réalisation d'un inventaire général des sources.
- L'estimation de leurs débits.
- L'établissement d'une carte piézométrique avec son interprétation.
- Et enfin la supposition d'une approche logique expliquant le cadre hydrogéologique et le fonctionnement hydrodynamique des eaux souterraines

IV.2 Ressources hydrique

En exceptant l'ensemble des sources qui émergent dans la région, les ressources hydriques dans la région d'Ain Makhoulf sont assez limité, étant donnée le manque de grande vallées, et l'absence des barrages, ainsi que la rareté des puits et forages, Ces ressources souterraines et surfaciques bien que peu nombreuses peuvent être résumées comme suit :

IV.2.1 Les eaux de surface

Elles proviennent soit des eaux souterraines, dont l'émergence sert de source, soit du ruissellement. Ces eaux se rassemblent en ruisseaux, qui ont un taux de circulation élevé. Ils peuvent être stockés dans des réserves naturelles (lacs) ou artificielles (réservoirs de barrage), où il existe une large gamme de qualité en fonction de la profondeur. En ce qui concerne notre zone de recherche, qui est la commune d'Ain Makhoulf Sur la base des informations acquises auprès DHW dans le wilayat de Guelma, l'approvisionnement en eau de surface provient principalement :

- Oued Mdjez Lebgar : Qui reçoit les écoulements de ses principaux affluents issus des versants Nord et Sud de sa vallée est estimé à $6.3 \text{ Hm}^3/\text{an}$
- Oued Bou Lefraï : prend son origine au Nord- Est de la commune, son apport est estimé à $7.4 \text{ Hm}^3/\text{an}$.
- Oued El Maleh (Mgaisba) : qui prend naissance au niveau la plaine de Tamlouka au Sud de la commune d'Ain Makhoulf avec un apport de $8.2 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Il reçoit une partie de ses

écoulements de ses affluents issus des versants Nord appartenant à la commune d'Ain Makhlouf.

- En matière de sites de retenue des eaux le territoire communal ne dispose que d'une retenue collinaire à 6 km à l'ouest de l'agglomération chef-lieu.

IV.2.2 Les eaux souterraines

L'eau souterraine est un réservoir naturel à long terme pour le cycle de l'eau, comparé aux réservoirs naturels que sont l'atmosphère ou l'eau de surface.

Sur la base de la carte géologique, des données obtenues sur le terrain (mesures et observations in situ), et celles rendues accessibles aux services techniques et sanitaires de la commune de Guelma et d'Ain Makhlouf. Nous tenterons d'identifier les ressources souterraines en eau de la région de recherche, y compris les horizons aquifères existants et leurs propriétés hydrodynamiques.

IV.2.2.1 Inventaire des points d'eau

Au sein de ces aquifères, quelques forages sont situés autour de la région, et une vingtaine de puits sont disséminés parmi les mechtats, fournissant de l'eau potable à la population. Dans les régions rurales, une quarantaine de sources surgissent, qui sont dispersées par des mechtats et fournissent de l'eau potable.

Les forages sont 04 forages, qui ont été creusés par plusieurs firmes et exploités avec un débit totale d'environ 40 l / s tableau (Annexe 6).

Les forages sont principalement utilisés pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable.

IV.2.2.2 Les Puits

Nous avons mené une étude de terrain à partir des informations obtenues auprès des services hydrauliques et avec l'aide des riverains, ce qui nous a permis de visiter et d'examiner une vingt de puits, que nous avons synthétisés avec leurs données dans le tableau (Annexe 7)

Les puits de la région d'étude capturent la nappe quaternaire libre dans la plupart des cas et la nappe karstique dans d'autres cas, avec un niveau piézométrique approchant et dépassant occasionnellement la surface du sol pendant les périodes de crues, qui se présente au sol comme des régions marécageuses.

IV.2.2.3. Types de sources

Une source se qualifie comme l'endroit où l'eau souterraine sort de la surface de la terre en quantité suffisante pour former un ruisseau (La Moreaux et Tanner, 2001; Springer et al.2008).

Les résurgences d'eau souterraine alimentent d'importants réseaux d'eaux de surface comme des ruisseaux et des rivières.

Les sources naturelles peuvent couler directement soit dans des lacs ou des océans. Des structures géologiques et des caractéristiques topographiques peuvent apporter l'eau à la surface, et donner naissance à des cours d'eau.

Les résurgences peuvent alors former des dépressions tout au long des contacts lithologiques où une roche perméable recouvre une roche de plus faible perméabilité, où il y a des joints, des fractures ou des failles, ou dans des régions de calcaire (Fetter, 2001).

La résurgence de grande quantité d'eau souterraine requière la combinaison de plusieurs éléments comme une aire de recharge importante et un haut taux de recharge (Brian, 1919; Manga, 2001).

Plusieurs classifications des sources ont été proposées dans la littérature, les caractéristiques les plus couramment utilisées sont: le débit et sa régularité, le type de source gravitaire ou profonde dite artésienne, la structure géologique et géomorphologique contrôlant l'émergence, la qualité de l'eau et la température (Kresic, 2010; Jang, 2010), et une classification en fonction du type d'eau basée sur les ions majeurs (Minissale et al. 1997; Mariner et al., 2003; Afsin et al., 2006).

L'une des classifications les plus utilisées est :

a. Classification de Springer et Stevens (2009)

Springer et Stevens (2009) ont proposé la mise en place d'une structure organisationnelle d'inventaire des données et d'une base de données bien structurée regroupant les différentes catégories rencontrées dans d'autres classifications comme celle d'Alfaro et Wallace (1994) et de Meinzer (1923). Ils ont ajouté d'autres catégories ne figurant pas dans aucune classification jusqu'à présent comme les micros habitats et les écosystèmes. Cette classification présente plusieurs catégories basées sur des considérations géomorphologique, les caractéristiques d'écoulement, la qualité de l'eau et la géochimie, les habitats, et les variations climatiques et biologiques incluant les micros habitats ainsi que les aspects de gestion de l'eau et du territoire.

IV.2.2.4 Inventaire des différentes sources

La connaissance des sources à travers (à vocation agricole et climat continental à semi-aride) s'avère un outil de grande importance dans la gestion et la préservation des ressources en eau.

Dans la commune d'Ain Makhoul un ensemble de sources comptent des possibilités aquifères assez conséquentes qu'il importe de connaître afin de les exploiter avec le maximum de profit.

Nous avons pu découvrir et lister 46 sources tableau (Annexe 8) avec des débits allant de quelques litres à des dizaines de litres par seconde.

L'approche capacitive a été utilisée pour déterminer le débit dans cette enquête. Cette approche implique de chronométrer le temps moyen (3 à 5 essais).

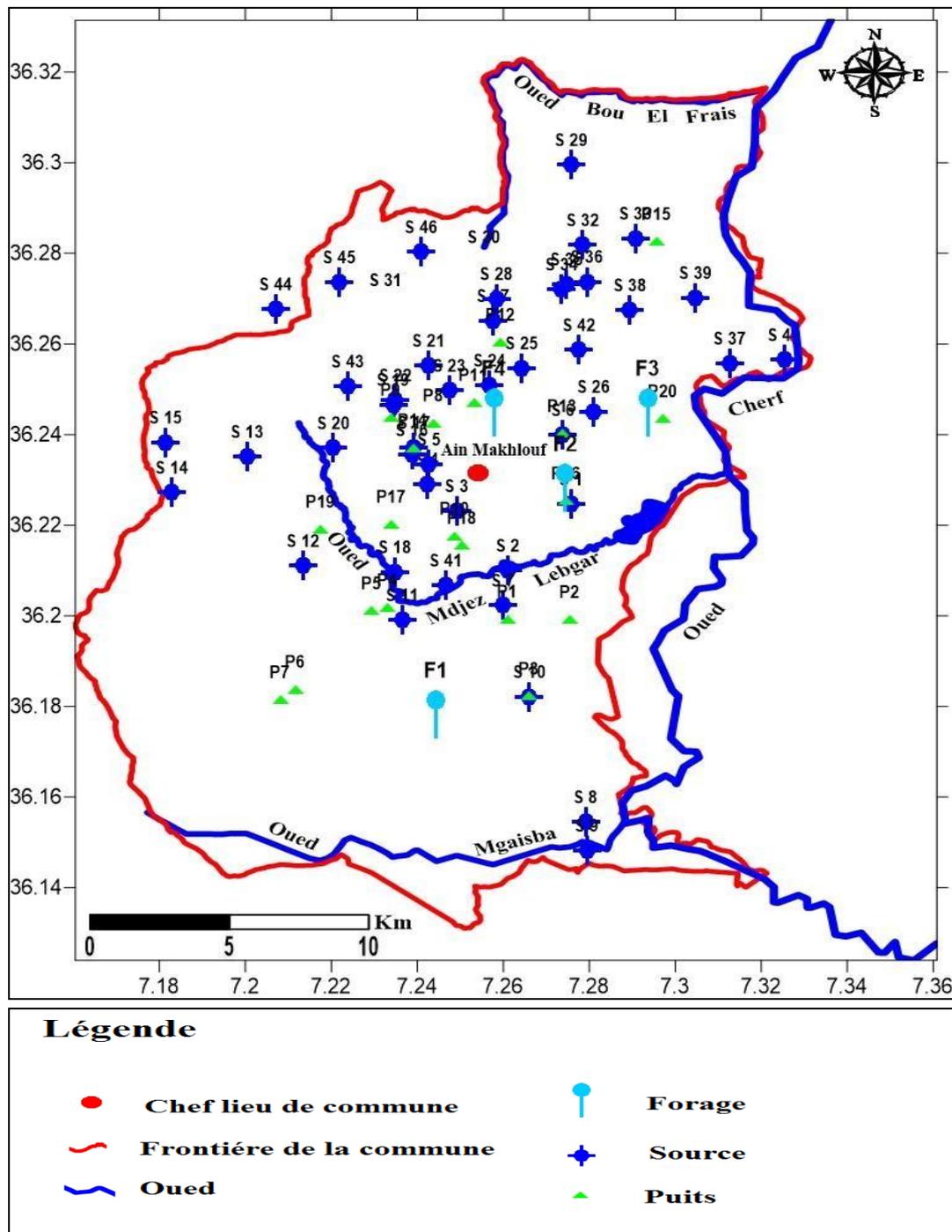


Fig. IV.13 Carte d'inventaire des points d'eau dans la région d'Ain Makhlouf

Sur la carte, on a matérialisé l'ensemble des puits, des forages et des sources ayant fait l'objet de collecte de données, de visite et de suivi méthodiques (mesures et observations).

IV.3. Aspect hydrogéologique

L'étude hydrogéologique contribue à la définition de la géométrie et de la structure de la nappe dans le but de bien comprendre les processus de circulation des eaux souterraines et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau), sans oublier la détermination des paramètres hydrodynamiques (Gradient hydraulique, Transmissivité, perméabilité, ... etc.).

La description des différentes formations géologiques fournie par l'outil géologique a été confrontée aux renseignements fournis par l'analyse de la carte hydrogéologique ci-jointe. L'exploitation de ces informations a permis de conclure que ; Les eaux exploitées dans la région sont des eaux qui proviennent des sous-sols à différentes profondeurs et à différentes formations; elles sont exploitées par des forages, sources et puits.

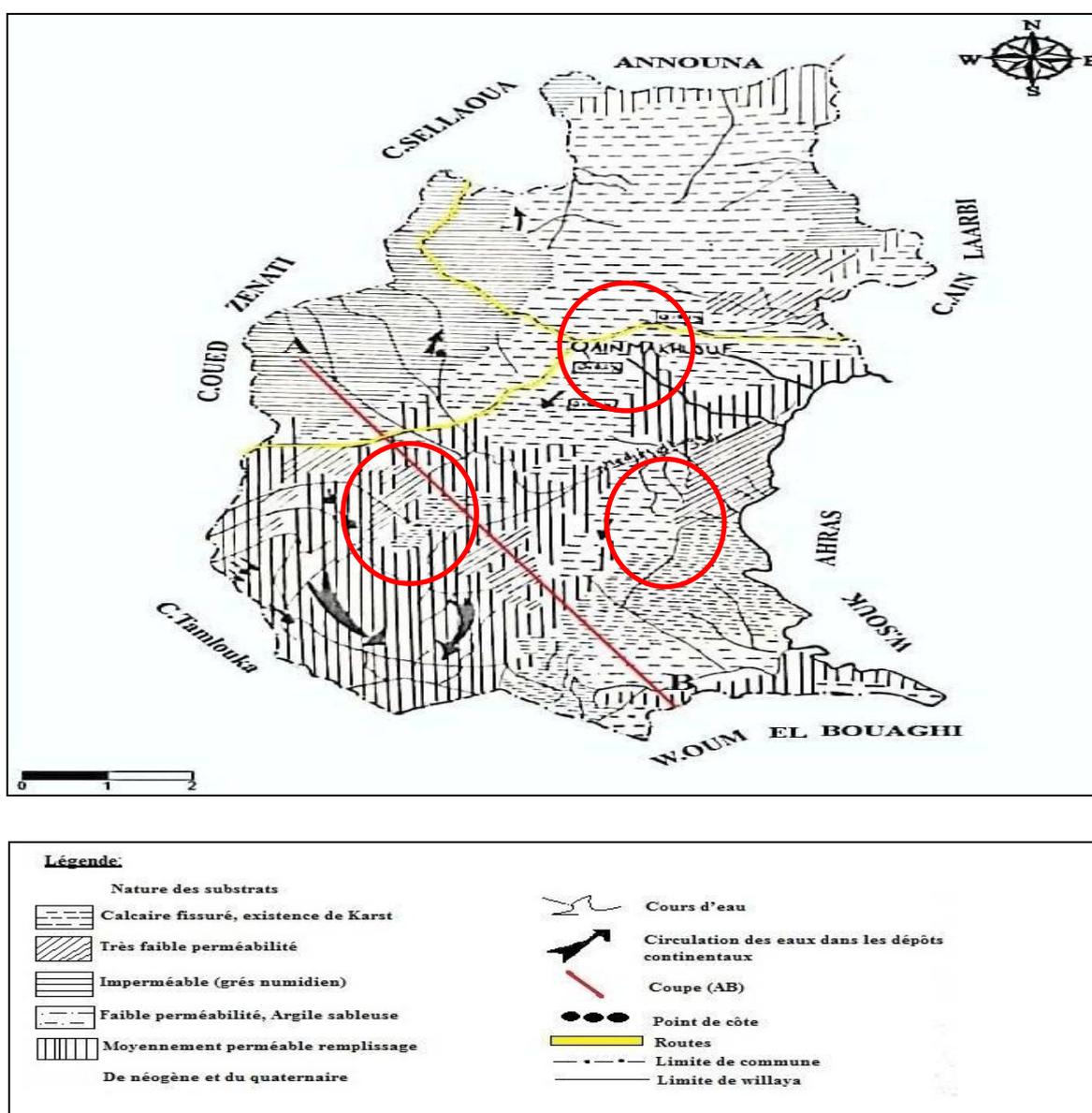


Fig .IV.14 Carte hydrogéologiques schématique de la région d'Ain Makhoulouf (Bouzidi et Guendouze, 1995, Modifié).

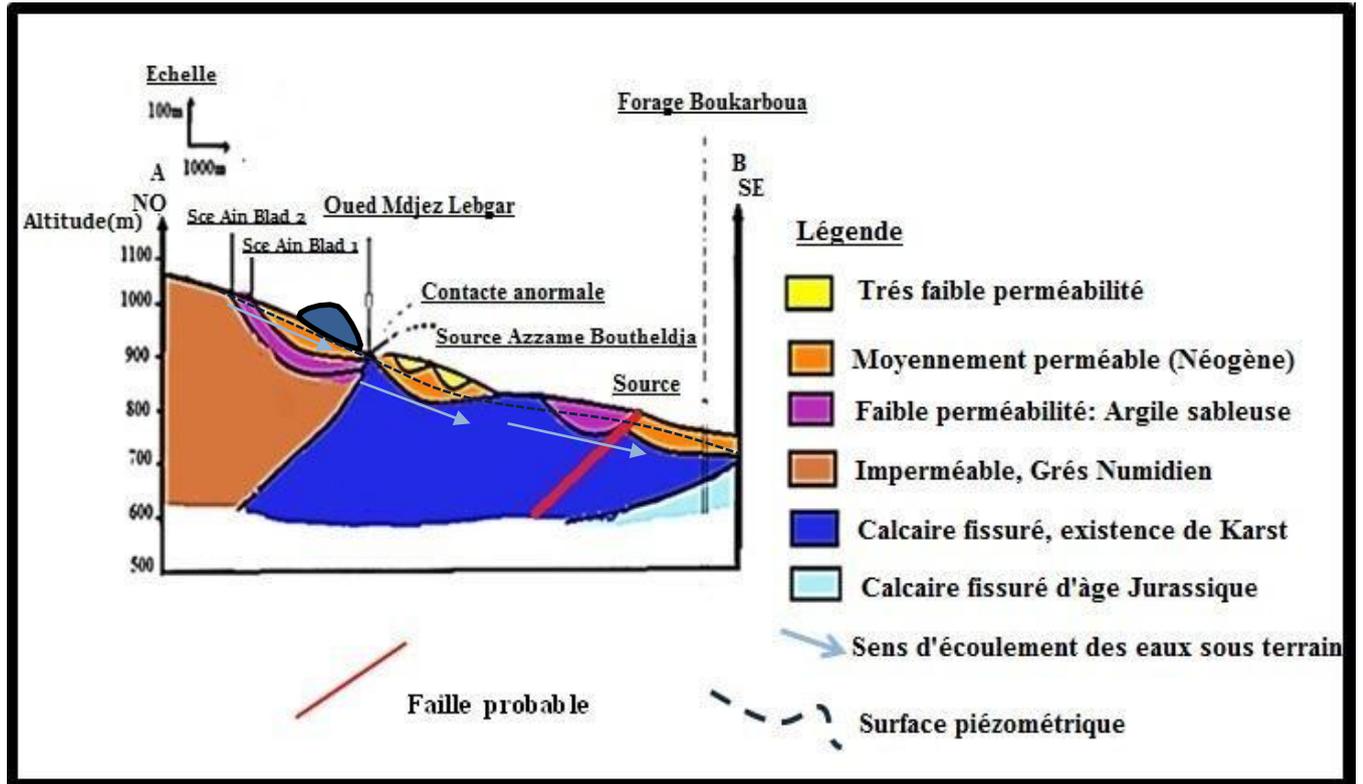


Fig.IV.15 Coupe hydrogéologique schématique dans la région d'Ain Makhlouf.

La coupe hydrogéologique (AB) (Fig.IV.15) est établie en se basant sur l'étude géologique, et les observations faites sur le terrain.

Il s'agit d'une coupe longitudinale de direction Nord-Ouest Sud-Est qui nous donne de précieuses informations sur la structure complexe de la plaine. En effet, cette dernière est le siège d'une succession de horst (môle de Harriate) et de graben (effondrements de la plaine et les tracés des cours d'eau).

Dans sa structure, le môle de Harriate s'identifie à un anticlinal perché par les formations calcaires Maestrichtiens ; alors que plusieurs effondrements représentent des zones de subsidence, ayant l'allure des synclinales comblés par les formations Mio-Plio-Quaternaires.

Localement, les faibles épaisseurs des formations imperméables entre les niveaux aquifères expliquent la présence d'une liaison hydraulique entre eux.

IV.3.1. Identification des nappes

IV.3.1.1. Aquifère à nappe libre dans les dépôts moi-plio- quaternaires

D'après les logs stratigraphiques des forages, la nappe possède une faible puissance hétérogène constituée d'argiles sableuses à galets et graviers, de sable argileux et débris calcaires ; ce qui lui donne une faible possibilité aquifère, cette nappe est exploitée par les puits domestiques avec un faible débit.

IV.3.1.2. Aquifère à nappe karstique

a. Dans les formations maestrichtiennes –sénonien supérieur

Des calcaires fissurés et karstiques composent la structure. C'est la nappe phréatique la plus importante de la région; sa force varie en fonction du degré de karstification ou des changements d'épaisseur dans différentes régions.

En raison des failles qui croisent la zone d'effondrement, la nappe phréatique est irrégulière. Ces failles produisent des sources à haute température, indiquant qu'elles ont une origine profonde.

b. Dans les formations des calcaires Jurassiques

Il s'agit d'une nappe relativement profonde, localisée à l'extrême Sud – Est, de la région d'étude, et qui présente le prolongement orientale des formations de Djebel Djahfa sous les dépôts Mio-plio- quaternaire de la plaine de Tamlouka, (Djorfi et Djidel 1993)

IV.3.2. Alimentation des nappes

Les différents aquifères existants dans la région ont un raccordement hydraulique. En se drainant, la nappe phréatique peut alimenter la nappe karstique, et vice versa.

Un système de failles affectant les formations calcaires fissurées fournit cet approvisionnement. L'infiltration directe des eaux météoriques et des eaux des affluents de diverses rivières, en particulier alimente la nappe phréatique libre dans les dépôts mio-plio- quaternaires.

L'alimentation de la nappe des calcaires du Jurassique se fait par l'infiltration directe des pluies par l'intermédiaire des failles et les fissures des collines d'Ain Arko, aussi par les calcaires qui affleurent au piémont de Djebel Djahfa et qui sont d'âge jurassique (Djorfi et Djidel 1993).

IV.3.3. Etablissement de la carte piézométrique

Les données utilisées pour l'établissement de cette carte ont été collectées au niveau des différents services hydrauliques (subdivision d'hydraulique, service technique et le service d'hygiène) de la commune d'Ain Makhlouf, ainsi qu'à partir des différentes campagnes de mesures réalisées par nous-mêmes, sur terrain pendant la période des hautes eaux (Mai 2020)

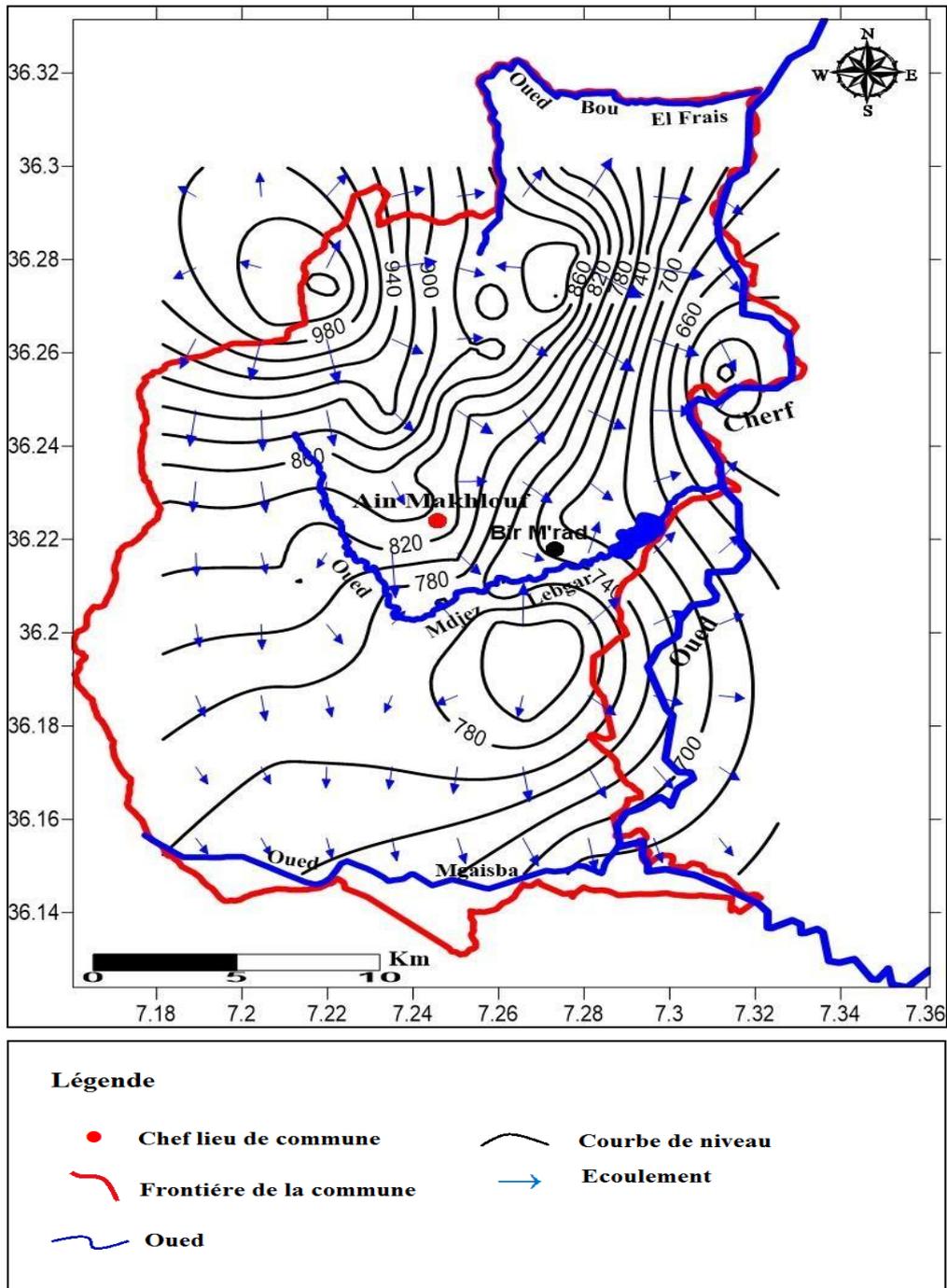


Fig.IV.16. Carte piézométrique de la région d'Ain Makhoul (Layadi M , Hireche H) (2020/2021)

IV.3.4. Interprétation de la carte piézométrique

L'analyse de la carte piézométrique montre que l'écoulement souterrain général s'effectue du Nord-ouest au Sud-ouest, au Sud-est et à l'Est de la plaine, se conformant ainsi à la topographie avec changements locaux de direction.

En raison de la nature lithologique alluviale de la plaine, l'espacement des courbes piézométriques augmente progressivement du Nord au Sud, entraînant un écoulement lent, une perméabilité accrue et une diminution du gradient hydraulique de 0,006 (0,6%). De plus, la convergence des lignes de courant (augmentation du débit) au niveau du Mechta BirMraden, fait le meilleur emplacement pour les installations de captage d'eau.

Cette carte nous a permis encore de voir les anomalies; qui se présentent par des dépressions ou des renflements de la surface piézométrique.

Une zone d'approvisionnement importante se produit dans l'extrême Nord-ouest de la carte sous la forme d'une anomalie locale caractérisée par des courbes iso pièzes concentriques, impliquant la présence d'une nouvelle réapparition des eaux d'origine profonde liée à d'éventuelles calamités tectoniques ou à une élévation du substratum. Du fait de l'existence d'une zone de perte au Nord-est, l'aspect dépressionnaire de la surface piézométrique suit celui de la surface topographique ou un abaissement du substratum, où les courbes piézométriques sont:

- Très serrées, traduisant ainsi une très forte valeur du gradient hydraulique 0.045 (4.5%) due probablement à un écoulement rapide favorisé par la pente forte ou à une perméabilité faible des formations à dominance argileuse.
- A orientation amont de leur concavité ; à l'origine d'une divergence des lignes de courant et par conséquent une diminution de débit.

Ces deux caractéristiques sont suffisantes pour classer cette zone comme très défavorable pour l'implantation des captages d'eau.

A l'Ouest l'allure perpendiculaire des courbes iso pièzes par rapport à la frontière Ouest de la zone d'étude s'explique par la nature étanche de cette dernière formée essentiellement de grès numidien et d'argile.

Les échanges hydrauliques entre la nappe et l'Oued Mdjez Lebgar sont importantes pendant cette période des hautes eaux, indiquées par une orientation avale de la concavité des courbes piézométriques et une convergence des lignes de courant vers l'Oued.

Le drainage de la nappe par l'Oued El Maleh au niveau de sa rive Nord est fréquent en période de crue. En outre, l'Oued Cherf aux frontières Est du secteur étudié, draine la nappe par sa rive Ouest suivant deux formes ; La première par des lignes de courant divergentes (au Sud) et la deuxième par des lignes de courant convergentes (au Nord).

Les eaux de la nappe s'écoulent vers le cours d'eau et sortent au niveau des sources situées dans son lit. La surface piézométrique de la nappe se situe à une cote supérieure à celle du cours d'eau.

Les courbes concentriques dans la partie Sud - Est de la carte avec un écoulement divergent confirme l'hypothèse de l'existence d'une faille à ce niveau.

IV.4. Le contexte hydrogéologique des principales sources

Nous avons choisi de classer un groupe de sources comme important, sur la base des nombreuses données acquises auparavant, liées au flux et à son changement saisonnier, et qui sont fournies dans le tableau suivant :

Tab .IV.6 Inventaire des principales sources de la région d'Ain Makhlouf.

N° de la Source	Nom de la Source	Coordonnées Est (Longitude) (Degré minute seconde)	Coordonnées Nord (Latitude) (Degré minute seconde)	Altitude en (m)	Débit hautes eaux (Mai 2021)	Aménagement	Usage
S 1	Ain Bir M'rad	7° 16 32,94	36° 13 29,05	715	3	Oui	AEP
S 5	Ain Essagni	7° 14 33,78	36°14 00,81	828	4	Oui	AEP
S 6	BirLaâmour	7° 16 26,09	36 14 24,21	766	3	Non	AEP+ irr
S 10	Ain Ben Aziez	7° 15 58,00	36° 10 56,00	805	3	Oui	AEP
S 11	Ain Ben Arâare	7° 14 1153	36° 11 56,97	777	3	Oui	AEP
S 18	Ain Bouthaldja	7° 14 05,22	36°12 35,11	779	4	Non	AEP+ irr
S 19	Ain El Haouche	7° 14 03,80	36°14 48,13	921	3	Oui	AEP
S 25	Ain Settour	7° 15 51,60	36°15 17,30	845	4	Oui	AEP
S 29	Ain Ben Talha	7° 16 32,99	36°17 58,71	794	3	Oui	AEP
S 31	Ain B'ladMeziène	7° 13 57,64	36°16 07,47	936	3	Oui	AEP
S 41	Ain Errabiâ	7° 14 48,16	36°12 24,60	756	3	Oui	AEP

AEP : Alimentation en eau potable, **Irr** : Irrigation, **dl** : décilitre

Pour déterminer les conditions hydrogéologiques des différentes émergences, nous avons pu accepter certaines théories concernant l'écoulement des sources principales basées sur la carte piézométrique, les données géostructurales, les circonstances topographiques et l'observation de terrain, telles que:

- Les sources S1, S6 et S 11; Ain Bir M'rad, Ain BirLaâmour et Ain Ben Arâare: proviennent d'une nappe phréatique libre. Les plus petites valeurs des courbes de niveau dans la zone de recherche (715, 766 et 777 m, respectivement) indiquent une intersection de la surface topographique avec la surface piézométrique, présentant ainsi des sources de dépression.

La convergence des lignes de courant des eaux souterraines entraîne leur régime pérenne avec un débit relativement fort.

-La source S5; Ain Essagni : c'est une source pérenne située au bord d'un cours d'eau qui présente le siège d'un changement latéral de faciès géologique; des calcaires aux argiles. Ce contact entre une formation perméable et une autre formation imperméable permet de la classer.

-la source S10; Ben Aziez: source pérenne. Avec un débit raisonnablement important, il émerge entre deux formations distinctes à faible perméabilité, nous incitant à déterminer l'origine.

- Les sources S18 et S41; Ain Bouthaldja et Ain Errabiâ : leur débit important et leur pérennité peuvent être expliqués par leur situation au lit majeur de l'Oued Mdjez Lebgar à écoulement permanent, l'intensité des échanges cours d'eau – nappe, et l'alimentation de cette dernière par l'Oued, ; ainsi que par l'intersection de la surface piézométrique de la nappe libre avec la surface du sol sans incidence d'une limite imperméable de l'aquifère.

- La source S19 et S 31 ; Ain El Haouche et Ain B'ladMeziène : avec un régime pérenne, elles s'émergent au niveau du contact entre les grès numidiens du Djebel El Ancel et les formations du sable argileux d'âge moi-plio-quatenaire.

- les sources S 25 et S 29 ; Ain Settour et Ain Ben Talha : leur situation au niveau d'une topographie dépressionnaire.

IV.5 Conclusion

La région d'Ain Makhoulf se situe au niveau d'une zone de broyage entre le sillon de Sellaoua au Sud et la nappe numidienne au Nord, en forme d'une cuvette allongée, cette situation attribue à la région une diversité hydrogéologique à savoir :

- le système karstique au Sud, formé de calcaires d'âge jurassique, Maestrichtien et sénonien supérieur.

- Formation alluvionnaires fortement perméables au centre.

- Formation alluvionnaires de faible perméabilité au Nord.

L'ensemble est affecté par des contacts anormaux et des failles

La carte piézométrique des hautes eaux montre un écoulement général du Nord vers le Sud obéissant à la topographie excepté les quelques anomalies d'ordre local, les zones favorables à l'implantation de captage d'eau se manifestent au Sud par un espacement des iso pièzes et une convergence des lignes de courant. En hautes eaux les Oueds drainent la nappe. La diversité des sources (dépressionnaires, diaclasiennes, de débordement et de déversement) est liée aux conditions de leurs émergences.

Chapitre V

Etude Hydrochimique

V.1. Introduction

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de son usage suivant sa qualité. La valorisation des eaux de sources de la région d'Ain Makhoulf passe nécessairement par cette étape, pour pouvoir les qualifier comme des eaux potables ou les orienter pour d'autres fins ; tel que l'agriculture, l'industrie... etc. En raison de la détermination et l'estimation des différents paramètres physico-chimiques de ces eaux une campagne hydrochimique a été menée par des mesures in situ et des prélèvements sur terrain, et par des analyses chimiques au laboratoire.

La représentation graphique des résultats par Diagramme et cartographie était à la base d'une interprétation permettant la détermination des différents faciès chimiques ainsi que le suivi de la variation spatiale des différents paramètres physico-chimiques et l'aptitude de ces eaux aux différentes utilisations.

V.2 Organigramme de travail

Les différentes étapes de notre travail sont indiquées dans la Figure 18

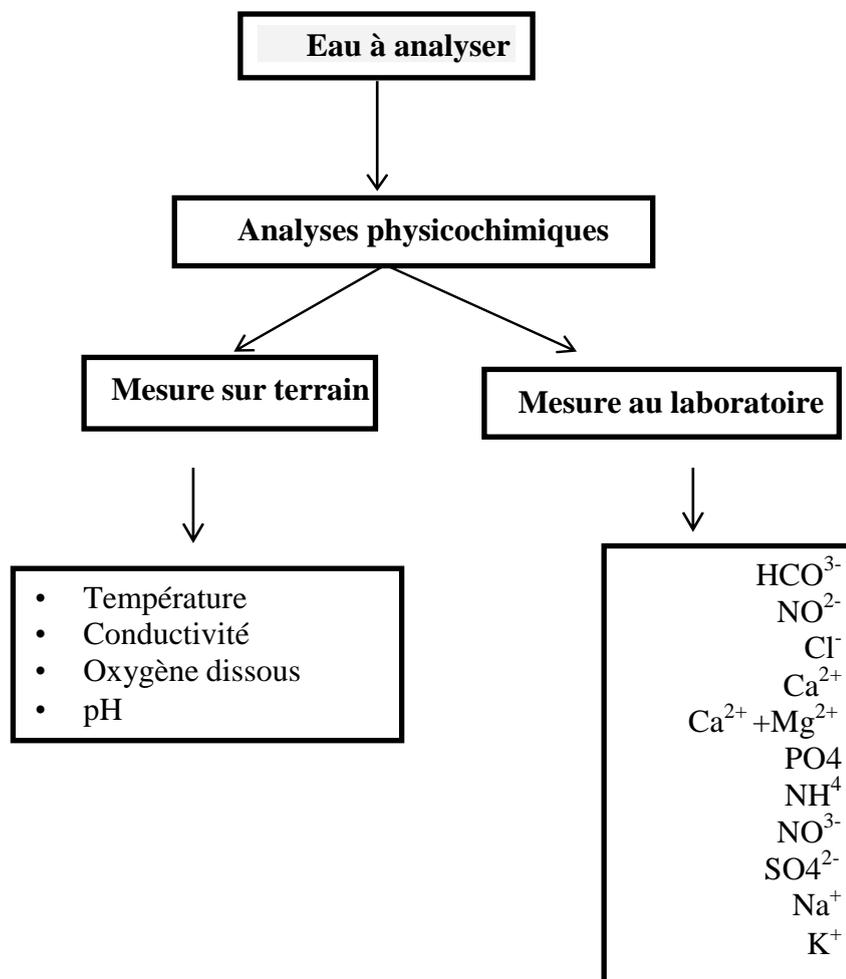


Fig.V.17. Organigramme représentant le plan de travail

V.3 Matériel et méthodes

V.3.1 Echantillonnage et points de prélèvement :

Pour pouvoir suivre la variation spatiale de la qualité des eaux des différentes sources, un croquis géographique des sources a été désigné basé en premier lieu sur l'importance hydrogéologique des sources et en deuxième lieu sur leurs représentativités dans la répartition spatiale. L'échantillonnage a concerné 18 sources dont leurs désignations et leurs coordonnées sont récapitulées dans le tableau (Annexe 9)

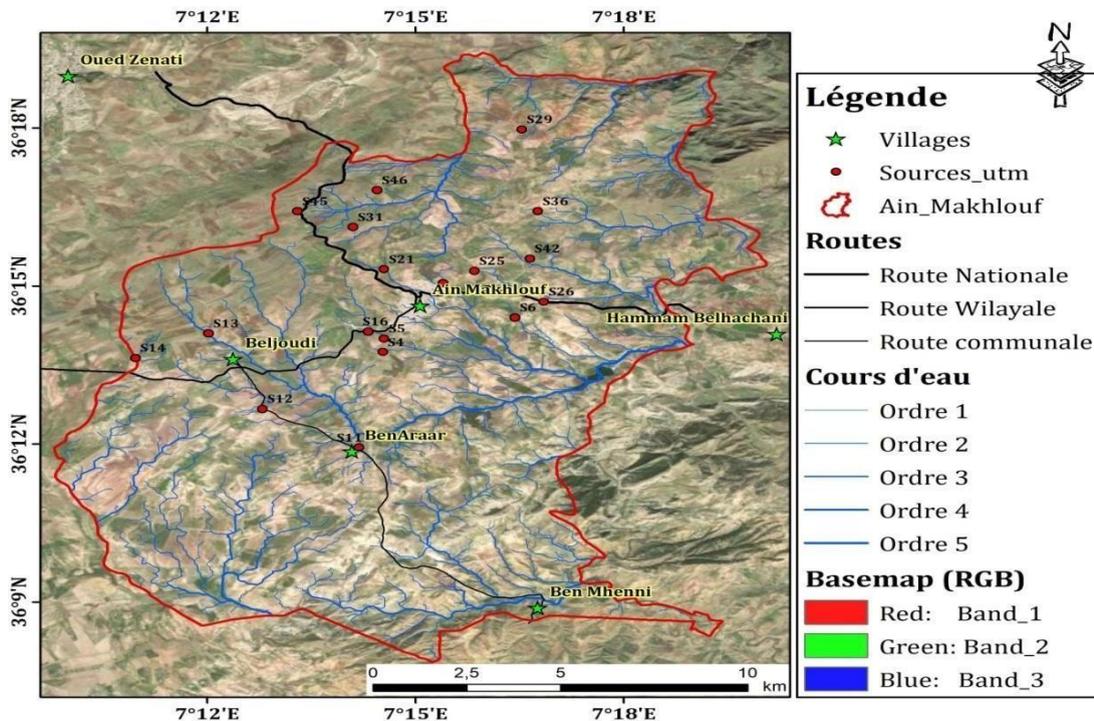


Fig.V.18. Carte d'inventaires des sources concernées par l'échantillonnage

V.3.2 Mode d'échantillonnage

Le prélèvement des échantillons d'eau a été effectué selon la méthode conventionnelle de prélèvement dans les sources. Nous remplissons les bouteilles jusqu'au débordement puis les fermé sous l'eau à la main, pour éviter toute réaction de l'eau avec l'air. Les échantillons ont été libellés et numérotés selon le site de prélèvement.

V.4 Mesures in situ (Analyses préliminaires)

Pour la détermination des paramètres physique sur terrain (pH, CE, O₂, T°), nous utilisons un appareil multiparamétrique, de marque Combo de la maison Hanna, ce dernier est un appareil de mesure digital de poche. La température, la conductivité électrique, le pH et l'oxygène dissous ont tous été mesurés in situ pour chacune des sources. En effet, ces paramètres sont extrêmement sensibles aux conditions environnementales et sont susceptibles de varier dans des quantités significatives s'ils ne sont pas mesurés in situ.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont interprétés selon les normes algériennes et celles de l'organisation mondiale de la santé (OMS). Ils sont exprimés sous formes de diagrammes et de cartes de distribution spatiales pour les différents paramètres mesurés ou analysés.

V.4.1 Paramètres physiques

V.4.1 La conductivité électrique

C'est l'aptitude d'une eau à permettre le passage du courant électrique. La conductivité, inverse de la résistivité, est directement liée à la teneur en minéraux dissous ionisés. Elle augmente avec la température (Mayet, 1994).

La conductivité est mesurée in situ avec un conductimètre de type "Ecoscan CON5". L'électrode à conductivité est rincée avec l'eau distillée et plongée dans un récipient contenant de l'eau à analyser. Après stabilisation de l'appareil les valeurs sont notées en fonction de la température et exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tab.V.7 Conductivité électrique des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

Source	S4	S5	S6	S11	S12	S13	S14	S16	S21	S24	S25	S26	S29	S31	S36	S42	S45	S46
CU $\mu\text{S}/\text{cm}$	680	890	549	1055	724	960	721	863	1024	917	731	728	717	992	853	1095	400	640

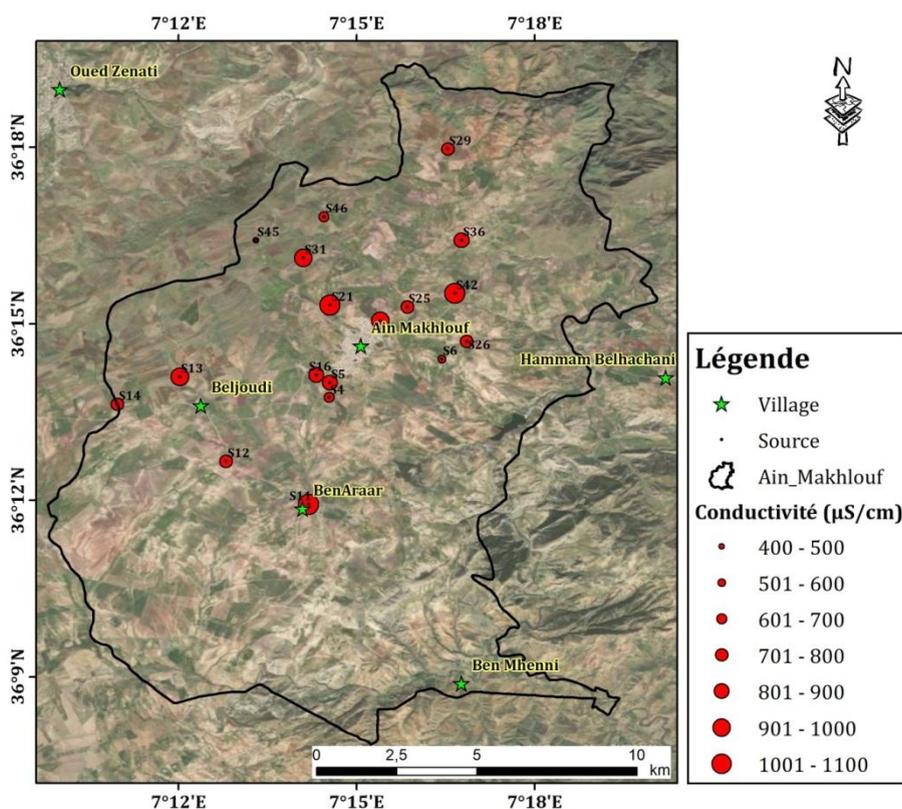


Fig V.19. Carte de conductivité électrique des eaux de sources de la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

La carte d'isoconductivité électrique montre une multitude de variations de cette dernière suivant le sens général de l'écoulement des eaux souterraines qui est du Nord vers le Sud et le Sud-Est de telle sorte que la carte présente des valeurs faibles à l'amont du terrain d'étude de l'ordre d'environ 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$ puis la conductivité augmente remarquablement au centre et au Sud avec des valeurs atteignant les 1024 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ceci confirme que les zones d'alimentation au Nord participent à la dilution des eaux souterraines, qui se chargent progressivement d'éléments chimiques au fur et à mesure qu'elles se dirigent vers le Sud d'une part, et d'autre part l'allure topographique plate (stagnante) permet une longue période de contact eau-roche favorisant ainsi cette augmentation. Le paramètre climatique n'est pas écarté par évaporation au niveau de cette zone stagnante et par conséquent l'augmentation des concentrations, une anomalie qui se présente au Sud-Est de la zone d'étude.

La majorité des valeurs de la conductivité électrique de l'ensemble des sources restent dans les normes de potabilité de l'OMS.

V.4.1.2 La température

La température de l'eau est un facteur de confort pour les utilisateurs. Il permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité). De plus elle met en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indices sur l'origine de l'eau. La température est mesurée directement et simultanément avec la conductivité. La valeur est lue sur l'afficheur du conductimètre. Elle est exprimée en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Elle oscille entre 12 $^{\circ}\text{C}$ et 15,6 $^{\circ}\text{C}$, à l'abri de toute influence hydrothermale

Tab. V.8 Températures ($^{\circ}\text{C}$) de quelques sources dans la commune d'Ain Makhoulf (Mai 2021)

Source	S4	S5	S6	S11	S12	S13	S14	S16	S21	S24	S25	S26	S29	S31	S36	S42	S45	S46
T $^{\circ}\text{C}$	14.8	12	15.6	13	12.48	13.4	13.21	13.8	13.5	12	12.5	12.1	13	14.4	12	13	14.16	14.49

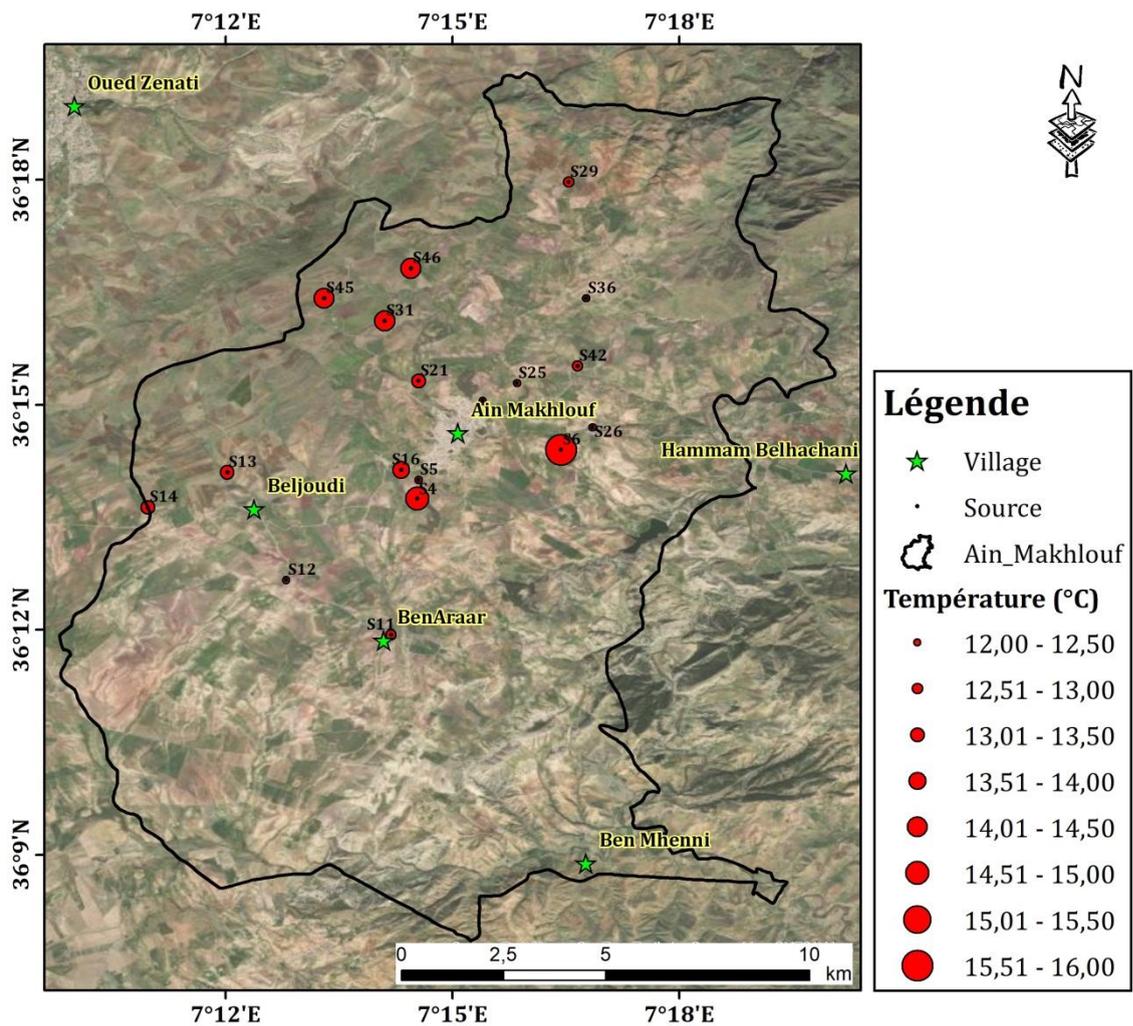


Fig.V.20. Carte de température des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

V.4.1.3 L'oxygène dissous

Il s'agit de la quantité d'oxygène libre dans l'eau sous forme d'oxygène dissous. L'oxygène dissous est un facteur écologique essentiel indispensable pour la respiration des organismes vivants aérobies. La teneur en oxygène dissous a été directement déterminée à l'aide d'un oxymètre portable de type " YSI 5MA". La valeur de l'oxygène dissous est affichée après immersion de l'électrode dans le flacon contenant l'échantillon. Elle est exprimée en mg/l

Tab.V.9. L'oxygène dissous des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

Source	S4	S5	S6	S11	S12	S13	S14	S16	S21	S24	S25	S26	S29	S31	S36	S42	S45	S46
L'oxygène dissous(mg/l)	9.76	7.04	9.9	8.75	6.11	3.66	9.17	7.38	10.25	7.9	8.5	8.9	9.99	5.44	7.17	4.9	4.7	7.2

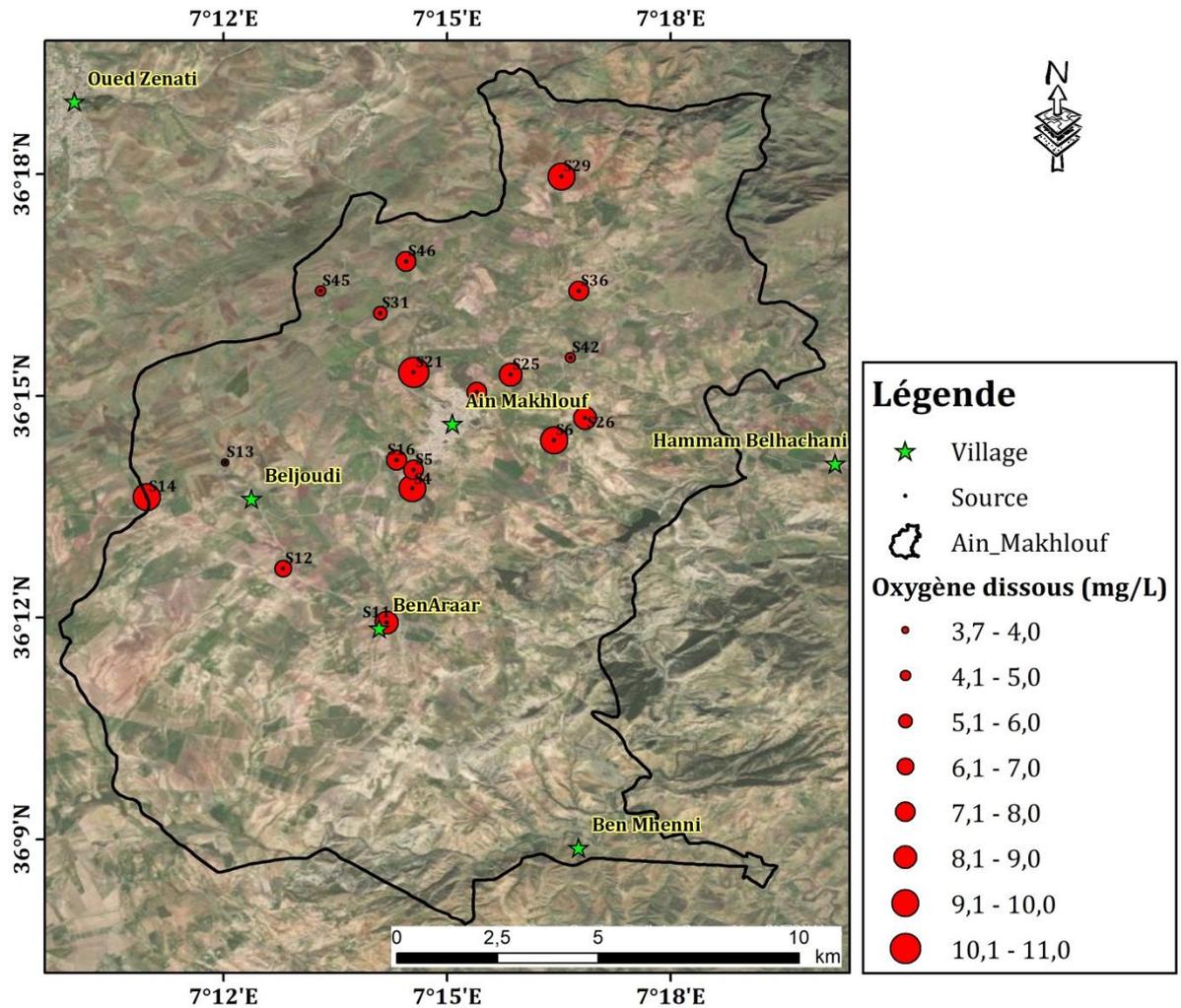


Fig V. 21. Carte de Oxygène dissout des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

Les valeurs obtenues oscillent entre 3.66 et 10.25 mg/l. Ces valeurs limitées sont due à l'influence du gradient géothermique sur la température de l'eau notamment à l'amont, ainsi qu'à la petite surface de contact eau-air sachant que la solubilité de l'oxygène dans l'eau varie en fonction de la température de l'eau, de la pression atmosphérique et de l'altitude. Ainsi, l'eau froide peut contenir une concentration plus élevée d'oxygène dissout que l'eau chaude

V.4.1.4 Le potentiel d'hydrogène pH

Le potentiel hydrogène mesure la concentration d'ions H^+ dans l'eau; il représente ainsi l'équilibre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 représentant un pH neutre. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et est affecté par divers facteurs, dans l'eau de source. La mesure de pH est effectuée à l'aide d'un pH mètre de paillasse étalonné à la température ambiante grâce à l'eau distillée. La mesure du pH se fait en plongeant la sonde dans l'eau. Les résultats sont affichés sur l'écran.

Tab V.10. PH des eaux souterraines de la plaine d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

Source	S4	S5	S6	S11	S12	S13	S14	S16	S21	S24	S25	S26	S29	S31	S36	S42	S45	S46
PH	7.05	7.7	7.11	6.91	7.8	7.35	7.01	7.07	6.66	7.55	7.04	7.34	6.64	7.5	7.13	7.41	7.14	7.07

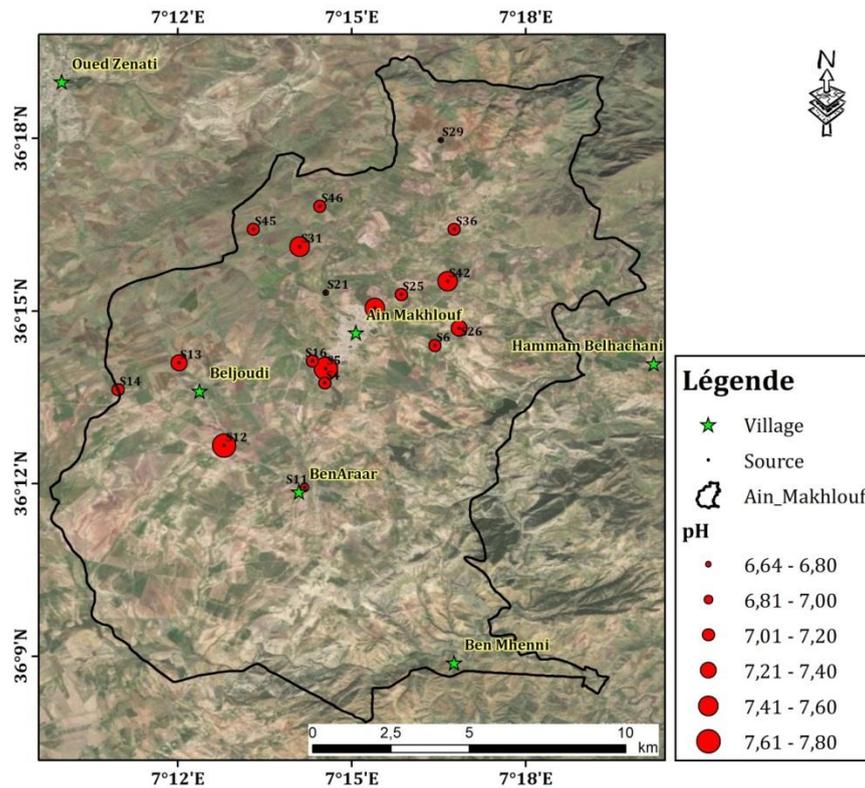


Fig.V.22. Carte de pH des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021).

L'observation de la carte montre que les valeurs de pH mesurées aux différents points sont centrées autour de 7. Lorsque le pH d'une solution est peu sensible aux acides et aux bases, on dit qu'il s'agit d'une solution tampon (de pH) ; qui renferment des couples acido-basiques susceptibles d'amortir les fluctuations du pH.

Des valeurs entre 6.64-7.8, attribue aux eaux un caractère proche de la neutralité. Il est à noter que les valeurs minimales sont enregistrées au niveau des sources S29: Ain Ben Talha (6.64), S21 : Ain Err'mel (6.66), les fortes valeurs sont observées dans d'autres sources avec une valeur maximale de 7.8 Ain Echetatha (S12), qui se localise juste à l'Ouest du chef-lieu de la commune, Cette gamme de variation du pH mesuré aux différents points d'eau (entre 6,64 et 7,8) rend ces eaux acceptables pour l'alimentation en eau potable conformément aux normes de l'OMS.

Ces résultats permettent de conclure que les quantités en ions OH⁻ sont relativement supérieures aux ions H⁺ en hautes eaux, suite à la mise en solution des éléments évaporitiques présents dans les formations aquifères (marnes, lentilles argileuses et travertins) d'où l'augmentation du pH dans la partie Sud-Ouest du secteur.

V.4.2 Paramètres chimiques et leurs origines (Mesure au laboratoire)

Les éléments chimiques (majeurs, cycle d'azote...), analysés au niveau du Laboratoire de Génie Géologie (LGG) de l'université de Jijel. En référant les méthodes d'analyse des Éléments chimique aux celles décrites par Rodier, à l'instar; Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻; Ca²⁺+Mg²⁺, Na⁺, K⁺.

V.4.1 Les Cations

a. Dosage de calcium (Ca²⁺)

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature (Djouadi, 2015), leur présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄, 2H₂O) (Hidaoui, 2015). Il est considéré comme un composant majeur de la dureté de l'eau.

Mode opératoire : prendre 25 ml d'eau à analyser, ajouter 1 ml de la solution NaOH à 2 N, ajouter une pincée de l'indicateur de Murexide et titrer avec la solution UDTA 0.01 mol/l jusqu'au virage (violé).

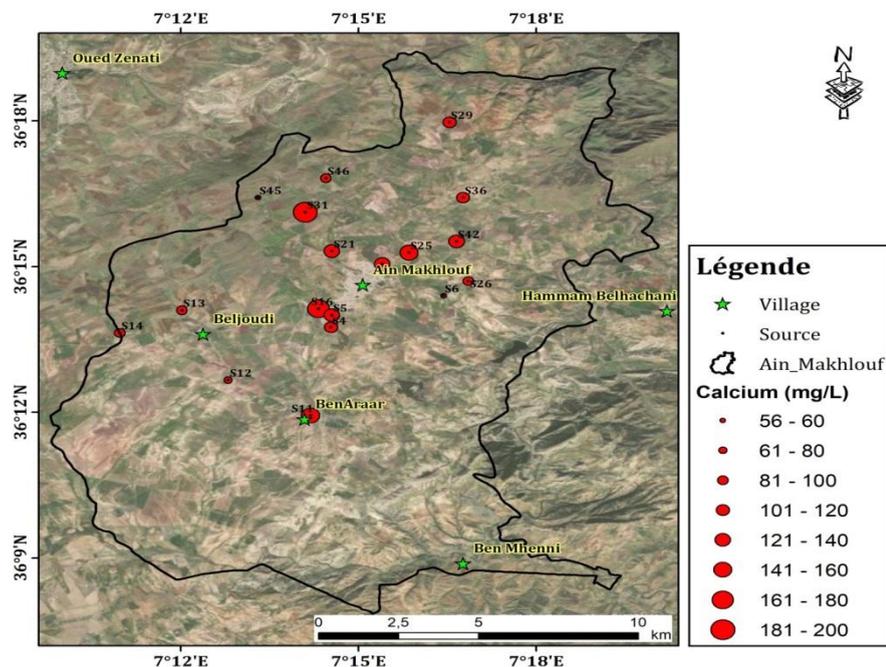


Fig .V.23. Carte de teneur en Calcium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhoulouf (Mai 2021)

Alors que le maximum est de 190.75 mg/l au niveau du S31. La répartition du calcium est tributaire de la lithologie, les teneurs les plus élevées sont observées au centre et au Nord - ouest de la zone d'étude.

b. Magnésium (Mg^{+2})

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens (magnésite et dolomite). La variation des concentrations du magnésium est presque similaire à celle du calcium (Gaagai, 2009). La dureté manganésienne de l'eau représente ordinairement le tiers de la dureté totale .

Mode opératoire : prendre 25 ml d'eau à analyser, ajouter 2 ml de la solution tampon ph 10, ajouter 2 gouttes de l'indicateur de noir eriochrome (NET), et titrer avec la solution EDTA 0.01 mol/l jusqu'au virage (bleu).

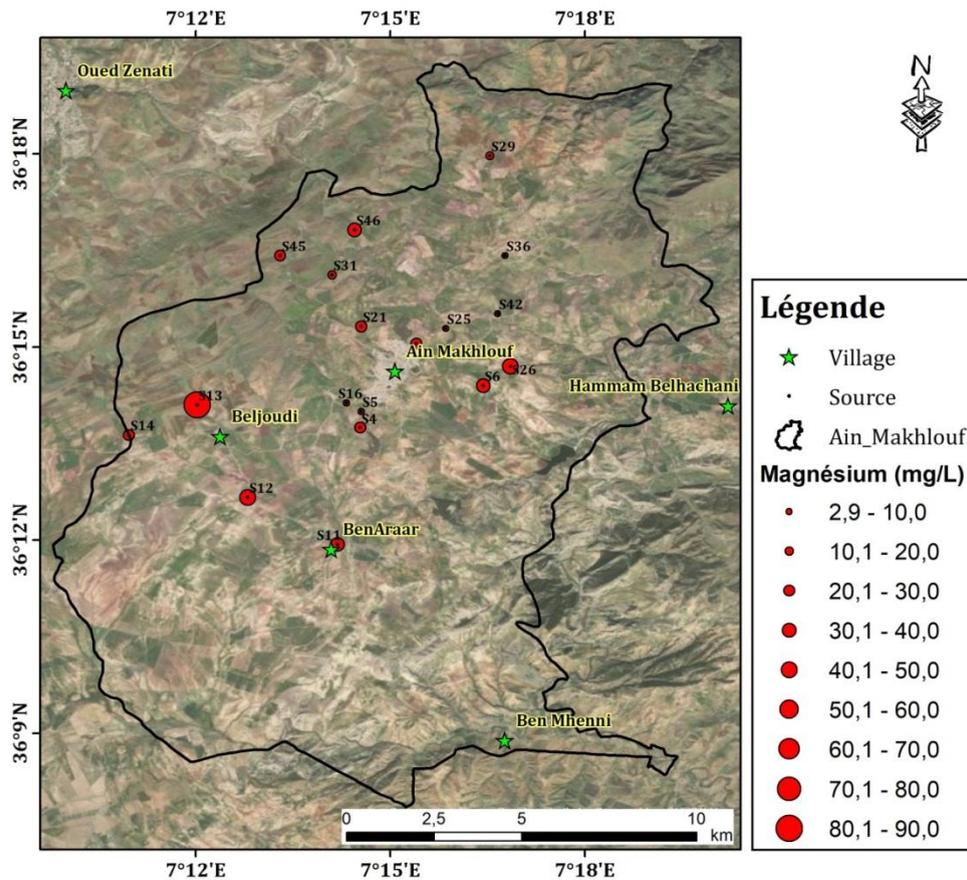


Fig . V. 24. Carte de Magnésium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021)

Les valeurs en Mg^{2+} varient entre 2.88 et 56.64 mg/l. Il en résulte principalement de la dissolution des formations dolomitiques. Il peut également provenir de la dissolution de $MgSO_4$ (sulfate Magnésien) dans les terrains gypsifères.

On remarque que les valeurs relativement élevées apparaissent dans les secteurs Nord-ouest et sont dues au lessivage des formations néritiques du Djebel ElOncel.

c. Sodium (Na^+)

Le sodium est un élément dont les concentrations dans l'eau varient d'une région à l'autre. L'origine du sodium dans les eaux est liée principalement au lessivage des dépôts évaporitiques et ceci par des phénomènes d'évaporation et les échanges de base (Djouadi, 2015). Les eaux très riches en sodium deviennent saumâtres, prennent un goût désagréable et ne peuvent pas être consommées (Sari, 2014).

Les concentrations des deux éléments (Na^+ et K^+) ont été mesurées au niveau de laboratoire du département de la chimie. A l'aide d'un spectrophotomètre à flamme après les processus de filtration.

Les valeurs de Sodium (Na^+) obtenues sont ainsi représentées

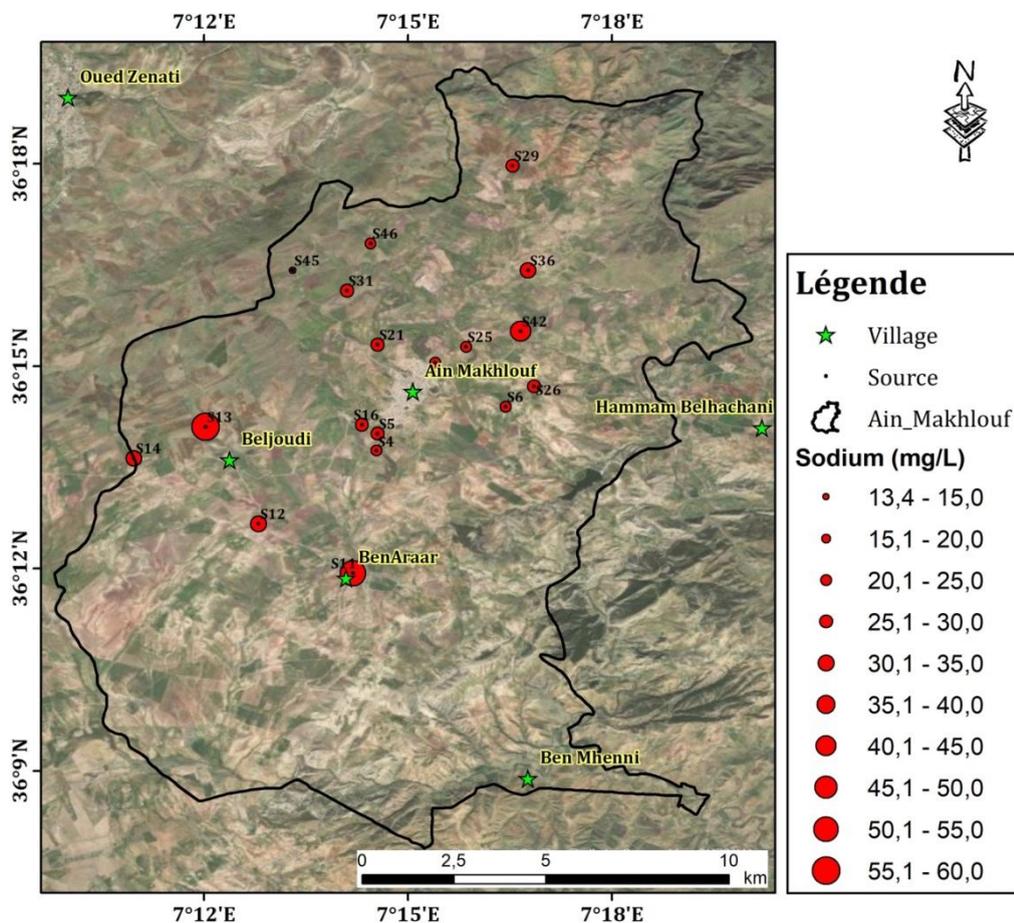


Fig .V.25. Carte de Sodium des eaux de quelques sources dans la commune d'AinMakhoulouf (Mai 2021).

Les concentrations plus élevées caractérisant remarquablement la partie Sud-ouest de la zone d'étude ,sont due principalement à la dissolution des calcaires dolomitiques d'âge Jurassiques affleurant à Djebel Djahfa à l'extrémité Ouest de la plaine de Tamlouka qui possède un aspect stagnant et se prolonge jusqu'à la partie occidentale de notre terrain d'étude , avec le climats franchement semi-aride localement ,favorisant ainsi une évaporation intense pendant la période estivale, et rendant les eaux saumâtres.

d. Potassium (K^+)

Le potassium (K^+) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombéné dans les sols, sur les argiles notamment. Les sources principales de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques(NPK) (Zahi, 2014). La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques (Boukhrissa, 2015).

Les résultats sont représentés dans la carte suivante :

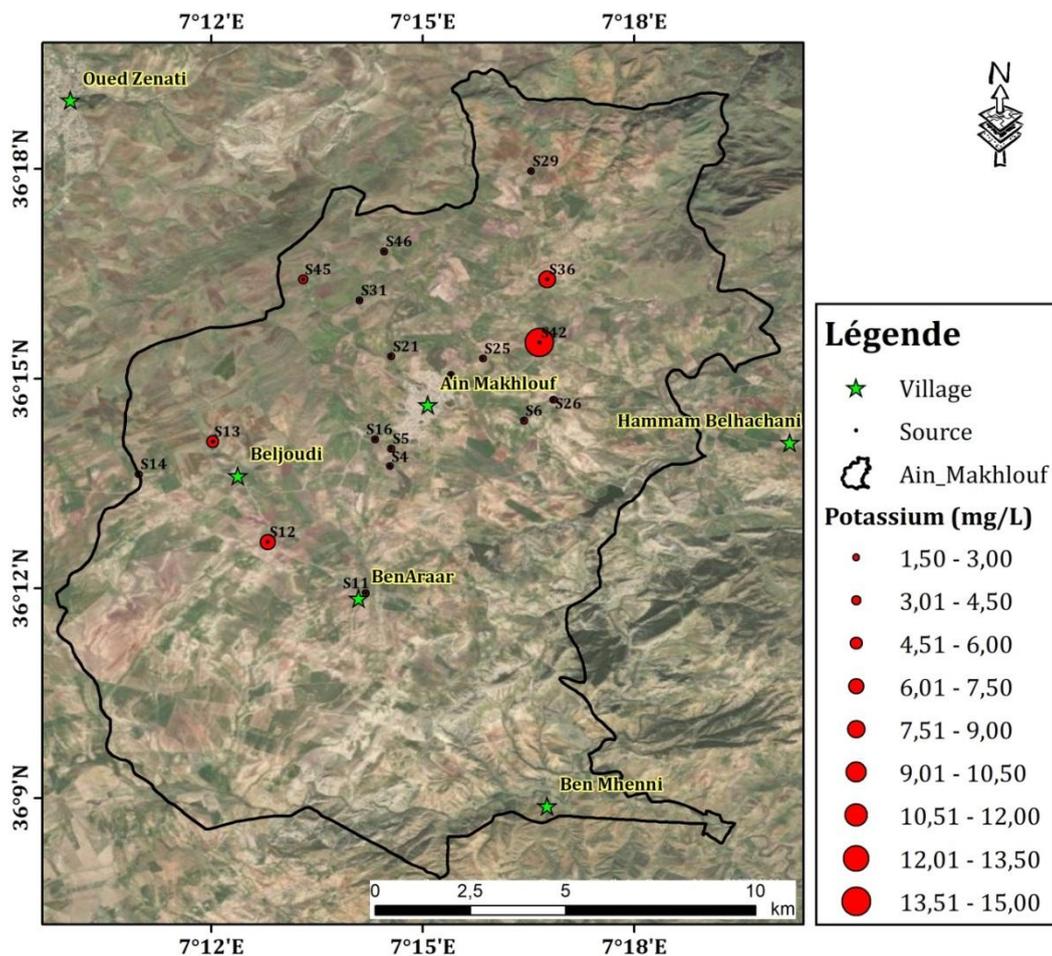


Fig .V.26. Carte de Potassium des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhoulouf (Mai 2021).

Les faibles teneurs de potassium dans la majorité du terrain d'étude sont due à l'absence de roches cristallines au niveau de la plaine d'une part et à la dominance des argiles qui adsorbent et recombinent le Potassium dans le sol d'autre part.

V.4.2.2 Les Anions

a. Dosage de Chlorures (Cl^-)

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses (Zahi, 2014).

Mode opératoire : ajouter 0.2 ml de la solution d'indicateur de chromate de potassium (K_2CrO_4) à 100 g/l (jaunâtre), titrer avec solution nitrate (AgNO_3) à 0.01 N jusqu'à coloration rougeâtre.

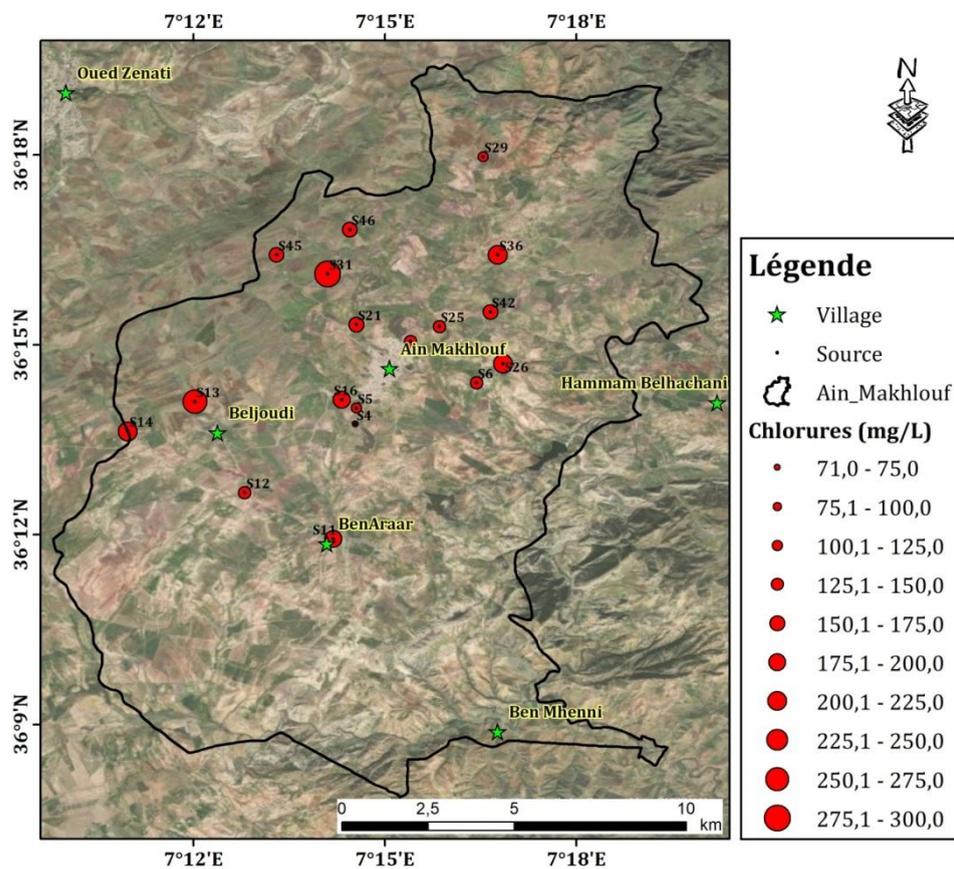


Fig .V. 27. Carte de Chlorure des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf

La carte de la variation spatiale des chlorures montre que ces derniers dominent la partie Nord-Ouest de la commune d'Ain Makhlouf et proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains salifères de Djebel El Oncel constitué essentiellement de formations argilo-marno- gréseuses et des formations évaporitiques et gypseuses très abondantes à l'amont du bassin versant de la région d'étude.

V Sulfates (SO_4^{2-})

Les origines des sulfates dans les eaux sont variées, Elles sont liées à l'eau de pluie et à la mise en solution des roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypseuses.

Mode opératoire : prendre 20 ml d'eau à analyser, ajouter 1 ml de la solution stabilisante, agiter énergiquement pendant 1 mn, ajouter 0.4 ml de la solution de chlorure de baryum à 0.01 N, agiter énergiquement pendant 1 mn, passer au spectrophotomètre à $\lambda = 420 \text{ nm}$.

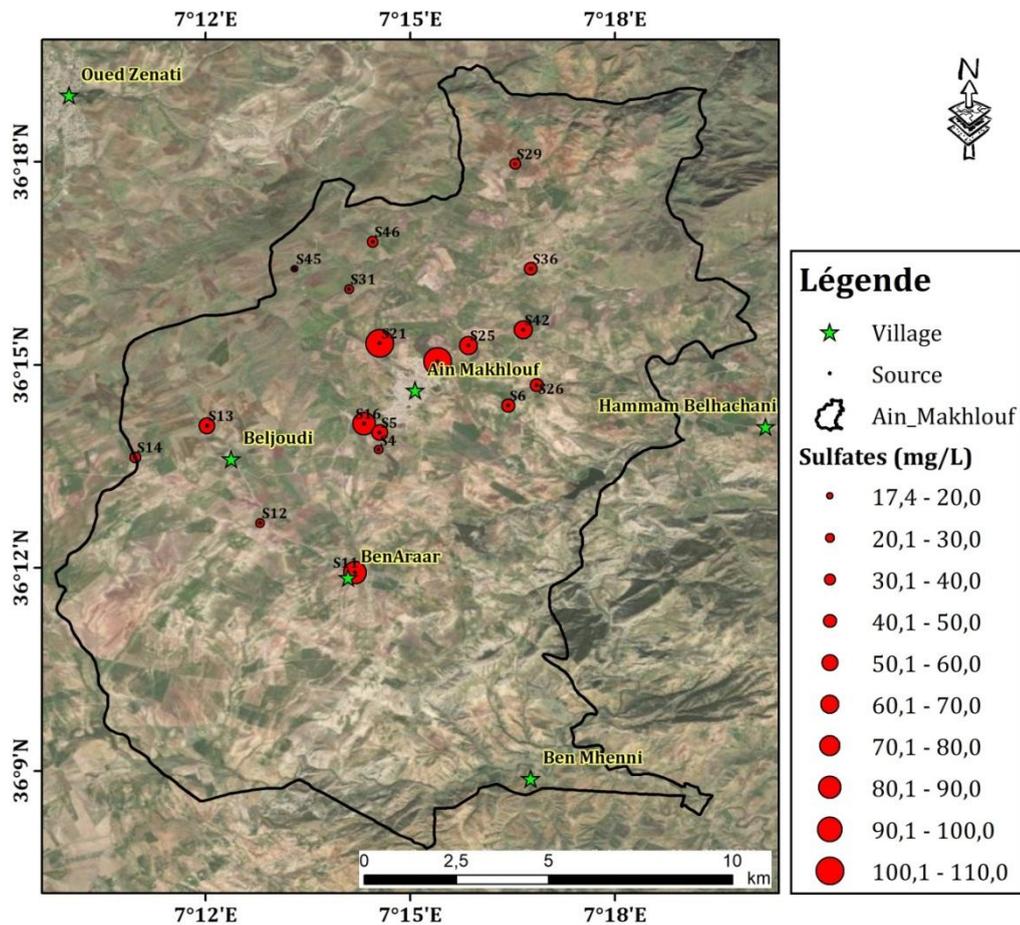


Fig .V. 28. Carte de Sulfates des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhlouf (Mai 2021).

La variation spatiale des sulfates caractérisée par des valeurs importantes au centre de la plaine est liée aux facteurs lithologiques par lessivage des formations alluvionnaires sédimentaires qui

constituent le remplissage mio -plio quaternaire de la plaine, ou encore aux facteurs climatiques par des pluies chimiquement chargées.

V Dosage de Bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique. Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et gypsifères Mode opératoire : ajouter 20 ml d'eau à analyser, ajouter 2 gouttes de rouge méthyle, acide sulfurique.

Les résultats de l'analyse sont représentés dans la carte suivant :

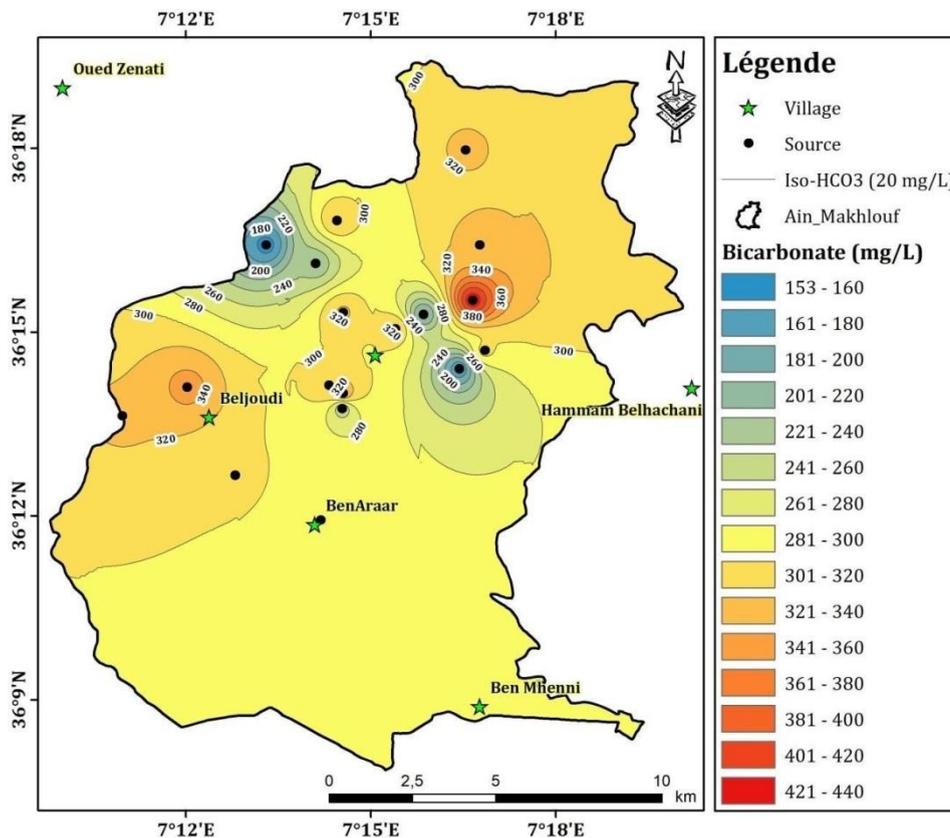


Fig.V.29. Carte de Bicarbonates des eaux de quelques sources dans la commune d'Ain Makhoulf (Mai 2021)

La représentation graphique montre que la partie Nord-ouest de la carte indique des valeurs de Bicarbonate variant de 152.2 mg/l à 244 mg/l, les valeurs les plus élevées apparaissent au centre de la plaine, au Nord-est et au Sud-ouest avec des valeurs qui varient de 305mg/l à 433.1 mg/l (Ain Ben Mihoub)

On suppose que les sources qui représentent des teneurs élevées en bicarbonates ; prennent leur origine, en profondeur, à partir des formations calcaires du crétacé et du Jurassique, ou encore par évaporation favorisée par le caractère stagnant de la plaine notamment aux alentours du chef-lieu de la commune d'Ain Makhoulf.

V.4.2.3 Les éléments indicateurs

a. Les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux de surface est liée au contact direct avec les eaux des rejets urbains (Djemai, 2013).

Mode opératoire : prendre 5 ml de l'échantillon à analyser , ajouter 2 gouttes de la solution Na OH à 30% , ajouter 0.5 ml de la solution de salicylate de sodium 0.5% (préparer cette solution chaque jour au moment de l'emploi) , évaporer à sec ou à l'étuve $75^\circ - 88^\circ \text{C}$ (ne surchauffer très longtemps) , laisser refroidir , reprendre le résidu avec 1 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) et laisser reposer 10 mn , ajouter 7.5 ml d'eau distillée , ajouter 7.5 ml de solution de sodium et de potassium, effectuer la lecture à une longueur d'onde de 415 nm .

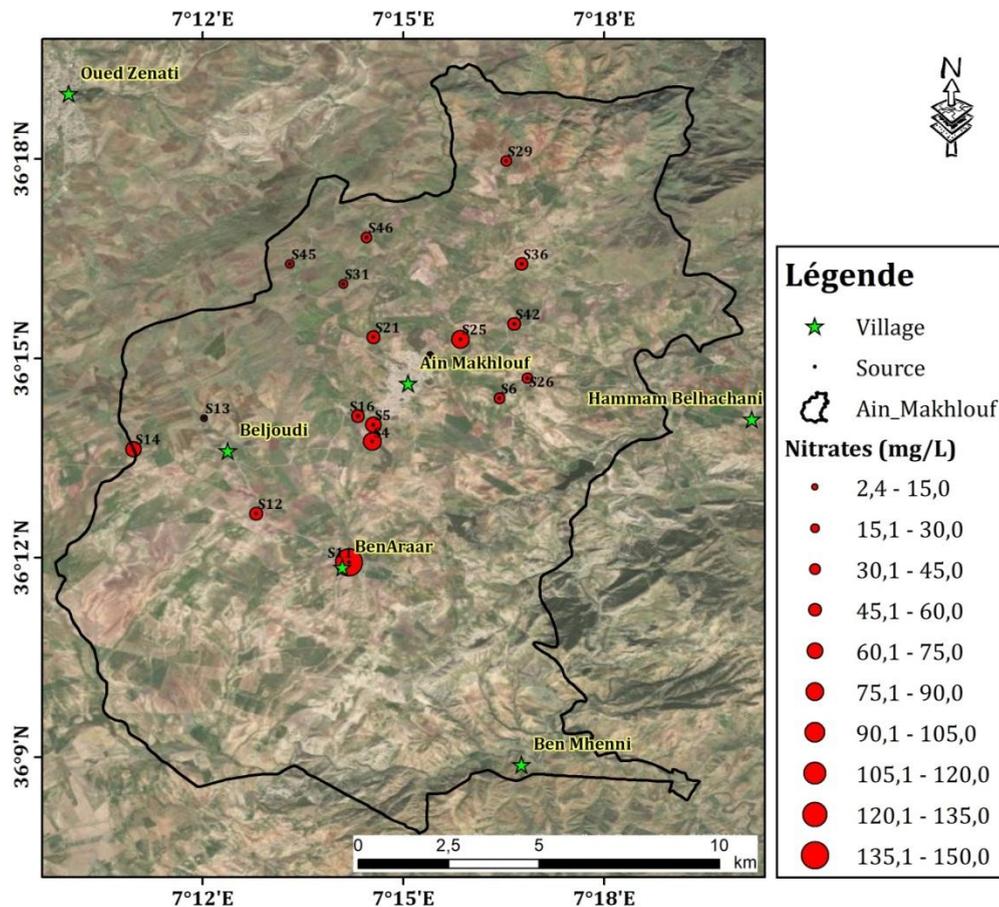


Fig.V.30 Carte de Nitrates des eaux de quelques sources dans la commune d'AinMakhlof (Mai 2021)

Les résultats obtenus montrent des valeurs remarquables, notamment au niveau de la plaine où l'activité agricole est intense et qui peut être à l'origine de cette augmentation, qui reste et temporairement raisonnable par rapport aux normes de l'OMS, mais l'alarme de l'alerte doit être déclenché pour une utilisation rationnelle des fertilisants .

comme indice de contamination fécale entraînant une prolifération des germes, goût et coloration (Sari, 2014)

Mode opératoire : ajouter 20 ml d'eau à analyser, ajouter 0.5 ml de la solution acide ascorbique de 100 g/l, ajouter 1 ml du réactif mélange (solution molybdate acide) compléter le volume à 25 ml par l'eau distillée (ajouter 3.5 ml), attendre 10 à 30 mn pour le développement de la couleur bleue, effectuer la lecture à longueur d'onde de 880 nm.

V.5 Les formules ioniques et faciès chimique

La formule ionique est obtenue en classant de gauche à droite par ordre décroissant les quantités en pourcentage de réaction (pourcentage), des anions puis des cations, et la précision des résultats de chimie ont été déterminée en utilisant la balance ionique pour 18 points d'eau.

Ain Makhoulouf caractérisé par un cocktail des faciès chimiques (Annexe 10) les eaux étudiées ont été classées en 03 faciès chimique : Chloruré calcique (02 sources) et Bicarbonaté calcique (15 sources) et une autre classe : Bicarbonaté magnésien.

V.6 Représentation graphique des analyses chimiques

Pour bien visualiser les résultats des tests chimiques effectués sur les eaux souterraines des sources de la région d'Ain Makhoulouf, la représentation Piper et Schoeller-Berkaloff s'est avérée utile.

V.6.1 Diagramme de piper

Le diagramme est bien adapté pour l'étude comparative d'un nombre important d'échantillons.

En plus le diagramme met en évidence l'évolution spatiale des faciès chimiques.

Les anions et les cations sont représentés deux diagrammes ternaires distincts, Les deux sont projetés dans un losange. Le losange est une matrice de passage du graphique des anions et des cations.

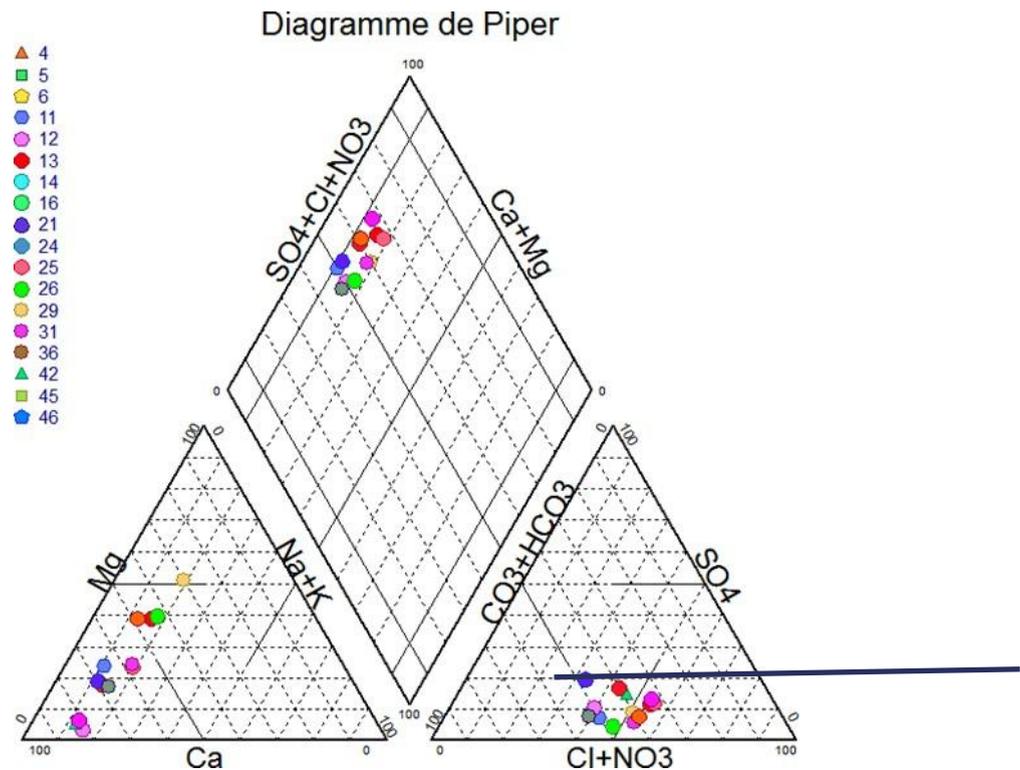


Fig V. 32. Diagramme de piper appliqué aux eaux souterraines de la plaine d'Ain Makhlouf.

La représentation des concentrations des points d'eau sur le diagramme de Piper, nous a permis de définir deux familles de faciès chimique Fig V.33 : Chloruré calcique – magnésien et Bicarbonaté calcique.

V.6.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller-Berkaloff évalue l'évolution de l'eau du système aquifère et la relation entre les types de roches réservoir et la composition de l'eau. La représentation des analyses sur ce diagramme, dans lequel, on reporte directement les résultats des analyses en mg/l fig.V.34, montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe.

En termes de pourcentage, les eaux bicarbonatées calciques, Chloruré calcique et Bicarbonaté magnésien sont prédominantes (tableau V.11).

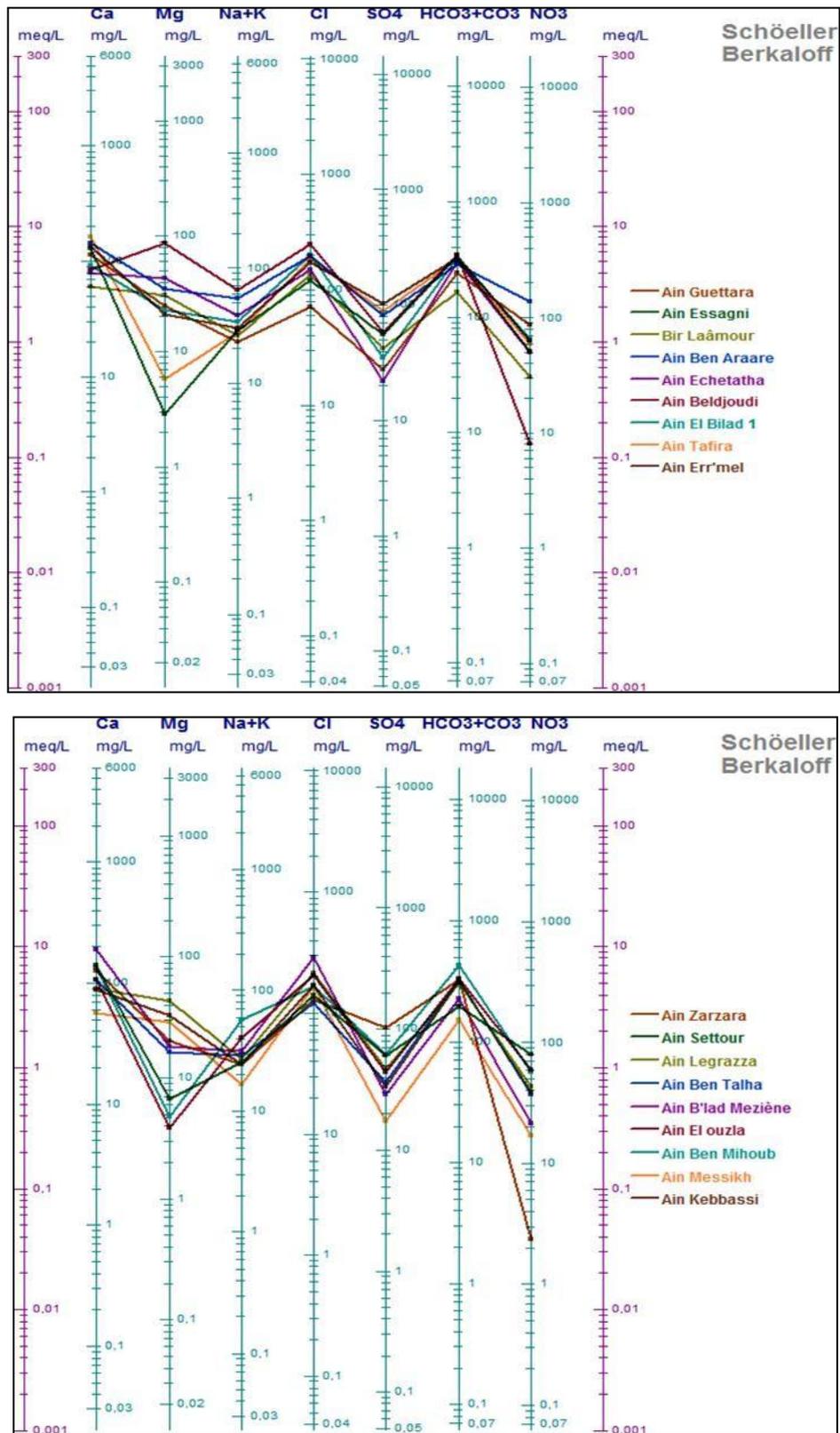


Fig .V.33. Représentation graphique des facies chimiques des eaux de sources de la commune d'Ain Makhlouf sur le diagramme Schoeller-Berkaloff (Mai 2021).

Tab V.11 . Facies chimiques des eaux selon le diagramme de schoeller-berkallof

Facès chimique	Les échantillons	Pourcentage %
Chloruré calcique	S31, S45	11.11%
Bicarbonaté magnésien	S13	5.56%
Bicarbonaté calcique	S4,S5 ,S6,S11,S12,S14,S16,S21,S24,S25,S26,S29,S36,S42,S46	83.33%

V.7. Qualité des eaux et Normes

-La qualité naturelle des eaux peut être altérée d'une part par l'activité humaine et d'autre part par les conditions naturelles (climatiques, géologiques et topographiques). La détérioration de la qualité de l'eau est appréciée par la mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cas d'une détérioration jugée importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine, elle pourra être utilisée à d'autres fins (irrigation, industrie, etc...) ou devra subir un traitement approprié pour retrouver sa potabilité (Zahi, 2014).

-Afin de traiter qualitativement les résultats de l'analyse effectuée, chaque paramètre de l'étude précédente a été classé selon l

V.7.1 Conductivité

on note que la majorité des sources représentent une eau de bonne qualité mais les sources S11 , S21 , S42 présentent des valeurs relativement élevées .

V.2. Bicarbonate HCO₃

05 sources présentent des eaux de bonne qualité ou la teneur en bicarbonate est inférieur à 50mg/l, et (13) sources correspondant à la qualité mauvaise où les teneurs des bicarbonates dépasse 50mg.

V.7.3. Chlorure Cl

Selon les teneurs en chlorures ; 13 sources présentent une bonne qualité et 05 sources dépassent la normes de l'OMS (200 mg/l).

V.7.4. Magnésium Mg

montre que les eaux des sources selon la teneur en Calcium sont de bonne qualité sauf la source S13 où la teneur en Magnésium dépasse 50 mg/l donc il est de mauvaise qualité.

V.7.5 PH

Selon le tableau ci-dessus la teneur en pH ne dépasse pas 9 mg/l donc sont de bonne qualité.

V.7.5 Calcium Ca

Le tableau : montre que 07 sources présentent une bonne qualité avec une teneur en Calcium inférieure à 100 mg/l et 11 sources présentent des teneur supérieur 100 mg/l.

V.7.7. Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)

La qualité de l'eau est caractérisée par sa dureté ou son titre Hydrotimétrique (TH), Elle est directement liée à la nature du terrain traversé. Mesuré par rapport à son contenu Carbonate de calcium et carbonate de magnésium. Ils proviennent de calcaire ou de dolomite.

La présence de CO₂ favorise cette dissolution. Le titre temporel est déterminé par La formule suivante: $TH = (r Ca^{+2} + r Mg^{+2}) * 5 (°F)$

Avec : r Ca : quantité en réaction du calcium exprimée en méq/l.

r Mg : quantité en réaction du magnésium exprimée en méq/l

Tab V.12. Classification des eaux de sources d'Ain Makhlouf selon la dureté (TH en °F).

TH en °F	0 – 7	7 – 22	22 - 32	32 - 54	>54
Classe des eaux	Douce	Modérément Douce	Assezdouce	Dure	Très dure
N°d'échantillos	0	0	0	15	3
Pourcentage %	0	0	0	83%	17%

Le tableau V.18 montre que la majorité des valeurs correspondent à des eaux dures à très dure (TH>32°F),

V.8 Aptitude des eaux de sources à l'irrigation

Une grande quantité de sels minéraux contenus dans l'eau aura des effets néfastes sur le sol et le sous-sol. Ils détruisent le développement des plantes et jouent un rôle dans le processus de perméabilité, en provoquant des réactions métaboliques, ils provoquent également des changements dans la structure du sol (en termes de perméabilité et d'aération), il affecte directement le développement des plantes. Parmi ces sels, on peut citer le cas du bicarbonate et calcium, Une teneur élevée affectera la structure physique du sol et le développement du sol. Usine (Ariyat, 2016). Afin d'estimer l'impact de cette eau sur le sol et sur certaines cultures dans la pratique, dans ce domaine, nous essaierons d'évaluer s'ils sont aptes à l'irrigation. Pour ça, Nous utilisons la méthode SAR (Richard Chart) pour distinguer la salinité des eaux.

Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols.

Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relatives à la salinité de l'eau et l'indice d'adsorption du sodium (SAR) aussi appelé « pouvoir alcalisant », qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées). Le SAR est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau :

$$\text{SAR} = \frac{NA}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}}$$

où tous les éléments sont exprimés en méq/l.

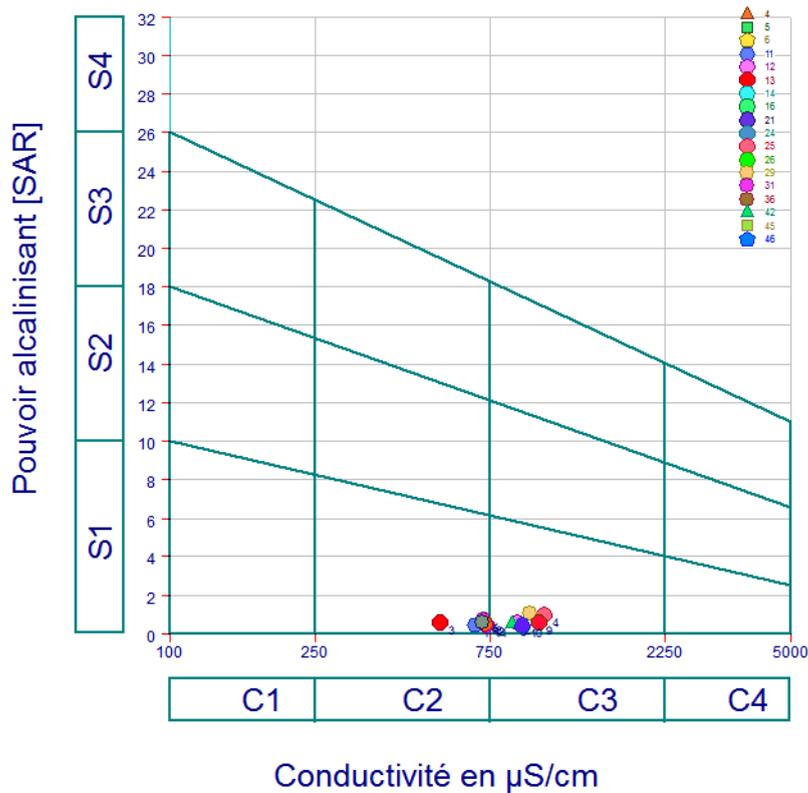


Fig.V.34 Diagramme de Richards des eaux de source dans la commune d'Ain Makhoulf

Pour notre campagne (Mai 2021) et selon le diagramme de richards (figure .V.30) on constate que les eaux des sources de la commune d'Ain Makhoulf présentent une qualité : mauvaise à admissible, chaque classe présente ses propres caractéristiques :

- **Mauvaise : (C2S1) :** Eau ne convenant pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certains conditions.
- **Admissible (C3S1):** Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés.

V.9 Conclusion

Sur la base de notre étude hydrochimique des eaux de source d'eau dans la région d'Ain Makhoulouf, nous soulignons quelques résultats :

- La température de l'eau des sources dans la région d'Ain Makhoulouf oscille entre 12 °C et 15,6°C, à l'abri de toute influence hydrothermale.
- L'augmentation de la valeur de la minéralisation et l'augmentation de la valeur de la conductivité dans le sens de l'écoulement sont dues à une combinaison de plusieurs facteurs lithologie (lessivage des strates), relief (la nature stagnante de la plaine), climat (pluie et évaporation), hydrogéologie (capacité de drainage) Et artificielle (utilisation d'engrais en agriculture).
- La valeur du pH est généralement acceptable.
- Pour les sources les formules ionique ont montrées 03 faciès chimique distincte : Chloruré calcique (02 sources) et Bicarbonaté calcique (15 sources) et un autre classe : Bicarbonaté magnésien
- Des fortes concentrations en Calcium et en Bicarbonate dépassant les normes de potabilités dans quelque sources : Ain Ben Mihoub, Ain B'lad Meziane.

Selon ces paramètres, l'eau de source dans la zone d'Ain Makhoulouf est dans la norme d'eau potable à l'exception des sources d'eau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les eaux souterraines jouent un rôle fondamental dans la stabilité des populations dans la région d'Ain Makhoulouf wilaya de (Guelma). Elles sont exploitées par des puits, des sources et des forages ; drainées par différentes techniques traditionnelles et modernes utilisées pour extraire les eaux des nappes pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

Elles font donc l'objet de notre étude qui porte essentiellement sur le côté quantitative et qualitative des eaux souterraines et le besoin en ses eaux en surface.

La région d'Ain Makhoulouf se situe au niveau d'une zone de broyage entre le sillon de Sellaoua au Sud et la nappe numidienne au Nord, en forme d'une cuvette allongée, cette situation attribue à la région une diversité hydrogéologique à savoir :

- le système karstique au Sud, formé de calcaires d'âge jurassique, Maestrichtien et sénonien supérieur.
- Formation alluvionnaires fortement perméables au centre.
- L'ensemble est affecté par des contacts anormaux et des failles.

L'étude piézométrique des hautes eaux montre un écoulement général du Nord vers le Sud obéissant à la topographie excepté les quelques anomalies d'ordre locale, les zones favorables à l'implantation de captage d'eau se manifestent par leur débit important et leur grande perméabilité.

Les données climatiques attribuent à la région un climat méditerranéen à influence continentale, caractérisé par deux saisons distinctes: l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude.

Elle reçoit une précipitation moyenne de 484.37 mm dont 46.02 mm sont ruisselés et 13.93 mm infiltrés. Le bilan hydrique établi selon la méthode de Thornthwaite, fait ressortir une évapotranspiration réelle de 424,42 mm engendrant un déficit agricole de 482,75 mm.

La région d'Ain Makhoulouf présente une composition hydrogéologique variée du fait de la présence de plusieurs horizons, matérialisés par trois horizons aquifères communiquant entre eux soit directement par des couches perméables, soit par l'intermédiaire de failles affectant les formations calcaires.

La qualité d'une eau souterraine ou de surface est souvent déterminée par un ensemble de paramètres physico-chimiques.

Ces derniers appliqués aux eaux de sources de la région d'Ain Makhoulouf (wilaya de Guelma) ont montré une hétérogénéité plus ou moins importante qui se résume comme suit:

- Le degré de minéralisation de ces eaux est influencé par la nature lithologique et géologique de la région. L'activité humaine influence peu ces milieux loin de toute industrialisation.
- La comparaison des teneurs enregistrées dans les eaux étudiées et celles fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé nous montre que la majorité de ces éléments présentent des taux ne dépassant généralement pas les limites dictées pour les eaux destinées à la consommation. Exceptant les quelques excès de minéralisation liés aux divers facteurs ; lithologiques (lessivage des formations), géomorphologiques (caractère stagnant de la plaine), climatologiques (pluviométrie et évapotranspiration), hydrogéologiques (capacité de drainage) et anthropiques (utilisation des fertilisants dans l'agriculture).

Recommandations

En perspectives il serait important:

- D'élargir les études physico-chimiques pour mettre en évidence la pollution d'origine agricole et ceci par la recherche des produits utilisés dans l'agriculture comme les pesticides.
- Cartographier les sites sensibles à la pollution; pour être utiliser d'avantage par la municipalité ainsi les décideurs au niveau de l'environnement et la santé publique.
- Installer des stations d'épuration.
- Faire des analyses périodiques des eaux souterraines qui peuvent être contaminées des pesticides et l'implantation des piézomètres pour le calcul du coefficient d'emmagasinement, qui peut nous renseigner sur la fonction capacitive du réservoir, pour mieux gérer cette ressource.
- Réaliser des prélèvements plus systématiques et représentatifs pour suivre la qualité des eaux souterraines
- Une étude géophysique dans la zone peut en lever des ambiguïtés litho structuraux.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Afsin. M et al .** (2006). Hydrogeochemical properties of CO₂-rich thermal-mineral waters in Kayseri (Central Anatolia), Turkey: *Environmental Geology* 50(1): 24-36.
- Aliat H. (2016).** Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région de Taibet (SE Algérie). *Mémoire de master, Univ. Ouargla, 74p.*
- Benmarce K. (2007).** Caractéristiques Physico-chimiques Et Isotopiques des eaux souterraines Dans La région De Guelma (NE algérien). Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 126 p.
- Bouaicha F.(2018).** Le géo thermalisme de la region de Guelma. Thèse de doctorat. université des frères mantouri, Constantine 1,191 p .
- Bouillin J.-P . (1977)** .géologie Alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Thèse Doctorat, science naturelle. Paris (France). *Mem.Soc.Géol.fr.* 509p.
- Boukhrissa M.L.(2015).** Collecte des rejets et système d'épuration des eaux usées de lacommune d'Oum Toub willaya de Skikda. *Mémoire du master, Univ. Bejaia, 91p.*
- Boukrouh F.(1999)** .étude géologique des dépôts évaporitiques du bassin de Guelma .Département de science de la terre .Mémoire .université Mentouri de Constantine .125 p .
- Bouzidi. F et Guendooze. B (1995).** Perspectives de développement de la commune d'Ain Makhoulf mémoire d'ingénieur d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba. 125 p.
- Brian, K. (1919).** Classification of Springs : *The Journal of Geology* 27(7)(oct-nov1919): 522-561.
- Chibani S.(2009).**Contribution à l'étude de la qualité physico chimique et microbiologique des eaux de surface et souterraine de la région de Ain Makhoulf (Wilaya de Guelma). Département biologie. Diplôme de Magister, UNIVERSITE 08 Mai 1945 , GUELMA,146 p.
- Djemai I. (2013).** Comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface du barrage de Foug el Gueiss (Est-Algérie). *Mémoire de magister, Univ. Batna, 105p.*
- Djorfi et Djidel ,1993** .Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Tamloka. Mim d'ingénieur d'état. Univ.Annaba.160 p.
- DjouadiA .(2015).** Etude hydrochimique des eaux de la région de Gourara (Timimoune) Algérie. *Mémoire de master, Univ. Khemis Miliana, 82p.*

- Durand Delga (1969)** : mise au point sur la structure du Nord Est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol., Algérie, nouv. Série, n°39.
- Durand-Delga M. Fontboté J.M. (1980)** : Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. Mém. Bur. Rech. Géol. Manière T.2, N° 115, Paris
- Fetter, C. W. (2001)**. Applied Hydrogeology: Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Gaagai A. (2009)**. Etude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de Babar
- Guergueb(2008)** .Richesse floristiques et faunistiques de la région de Ain Makhlouf. Journée mondiale de la biodiversité, Département de biologie, Université de 8 Mai-1945 Guelma.
- Hadef S et Hizir F .(2018)** .La qualité des eaux superficielles du sous bassin versant de Guenitra, wilaya de Skikda, N-E Algérien, mémoire de Master, Université Mohammed SeddikBenyahia (Jijel),83 p .
- Hidaoui A. (2015)**. Etude du système traditionnel d'irrigation au Sahara, exemple des Foggaras de la région d'Adrar (Touat). *Mémoire de master, Univ .Tlemcen, 132p.*
- Jang, C. S. (2010)**. Applying scores of multivariate statistical analyses to characterize Relationships between hydrochemical properties and geological origins of springs in Taiwan:
Journal ofGeochemical Exploration 105: 11-18.
- Kresic, N. (2010)**. Types and Cassifications of Spring dans N. Kresic et Z. Stevanovic (eds.), Groundwater Hydrology of Springs Elsevier Burlington, p. 31-86.
- La Moreaux, Pet J. Tanner (2001)**.Springs and Bottled Waters of the World: Ancient History, Source, Occurence, Quality and Use: Berlin, Springer-Verlag.
- Layadi M ,Hireche H. (2020)**. L'apport des conditions hydroclimatologiques dans l'étude du contexte hydrogéologique des sources d'eau de la région d'Ain Makhlouf,(Wilaya de Guelma).Département géologie Mémoire de fin d'études,Université Mohammed Seddik Ben yahia ,Jijel,105 p .
- Manga, M. (2001)**. Using springs to study groundwater flow and active geology processes: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 29: 201-228.
- Mariner, R et al. (2003)**. Excess nitrogen in selected thermal and mineral springs of the Cascade Range in northern California, Oregon, and Washington: sedimentary or volcanic in origin: Journal of Volcanology and Geothermal Research 121(1-2): 99-114.

- Meinzer O. E. (1923).** The occurrence of Grounwater in the United States. US Geological Survey Water-Supply no. 489.
- Minissale, A. et al.(1997).** Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Arniata silicic complex and surrounding areas (central Italy): Journal ofVolcanology and Geothermal Research 79(3-4): 223-251..
- Raoult(1972): J. F. (1972) .** précisions sur le flysch massylien : série stratigraphique, variation de faciès, nature du matériel remanié (Nord Constantinois, Algérie). Bulletin du Musée d'Histoire Naturelle d'Afrique du Nord. T63.
- Raoult (1974) : J. F. (1974) .**géologie du centre de la chaîne nummidique (nord du constantinois, Algérie). Thèse sciences, Paris (France), Mém. Soc Géol. Fr. nouv. Série, n°121.
- Sabrina C .(2012).** Hydrogéochimie Des Sources Associées Aux Eskers De L'abitibi, Québec, Département Des Génies Civil. Université De Montréal.127 P .
- Sari H., 2014.** Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de la source « Attar » (Tlemcen). *Mémoire de master, Univ. Tlemcen, 92p.*
- Springer, A et al. (2008).** A comprehensive Springs Classification System: Integrating Geomorphic, 89 Hydrogeochemical, and Ecological Criteria, dans L. E. Stevens et V. J. Meretsky (eds.) Aridland Springs in North America Ecology and Conservation: Tucson, p. 49-75.
- Springer, A. E. et L. E. Stevens (2009).** Spheres of discharge of springs: Hydrogeology Journal, 17(1): 83-93.
- Vila (1980) :** la chaine alpine Algérie Orientale des confins ALGERO - TUNISIENS– thèse , université Pierre et Marie-Curie Paris 665 p.
- Zahi F.(2014).** Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (Nord-Est Algérien), approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. *Thèse de doctorat, Univ. Annaba, 193p.*

Annexe

Annexe 1 : Précipitations moyenne mensuelle de la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août
P (mm)	25.98	45.18	56.85	62.42	56.5	53.7	54.05	48.15	41.76	21.4	6.7	11.68

Annexe 2 : Températures moyenne mensuelle de la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août
T (C°)	24.26	20.05	14.63	11.23	10	9.86	11.84	14.65	18.65	23.52	27.07	27.87

Annexe 3 : Précipitations annuelles en (mm) et Coefficients pluviométriques interannuel dans la station d'Ain Makhlouf (1986-2020)

Année hydrologique	Pluie annuelle (mm)	H station Ain Makhlouf	Observation
1985/1986	719.5	1.48	AE
1986/1987	391.5	0.80	AD
1987/1988	431.5	0.88	AD
1988/1989	447.8	0.92	AD
1989/1990	663.7	1.36	AE
1990/1991	627	1.29	AE
1991/1992	670.7	1.38	AE
1992/1993	389	0.80	AD
1993/1994	500.4	1.03	AE
1994/1995	270.1	0.55	AD
1995/1996	112.3	0.23	AD
1996/1997	534.8	1.10	AE
1997/1998	1163	2.39	AE
1998/1999	587.3	1.20	AE
1999/2000	359.9	0.74	AD
2000/2001	222.5	0.45	AD
2001/2002	502	1.03	AE
2002/2003	562	1.15	AE
2003/2004	502.1	1.03	AE
2004/2005	456.8	0.94	AD
2005/2006	488.9	1.00	AE
2006/2007	414.5	0.85	AD
2007/2008	631.1	1.29	AE
2008/2009	490.8	1.01	AE
2009/2010	824.6	1.69	AE
2010/2011	635.4	1.30	AE

2011/2012	458.05	0.94	AD
2012/2013	227	0.46	AD
2013/2014	444	0.91	AD
2014/2015	429.5	0.88	AD
2015/2016	314	0.64	AD
2016/2017	226.5	0.46	AD
2017/2018	427	0.87	AD
2018/2019	449	0.92	AD
2019/2020	418.5	0.86	AD

Annexe 4. : Variation des valeurs de rapport (P/T).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août
P moy (mm)	25.98	45.18	56.85	62.42	56.5	53.7	54.05	48.15	41.76	21.4	6.7	11.68
T moy (C°)	24.26	20.05	14.63	11.23	10	9.86	11.84	14.65	18.65	23.52	27.07	27.87
P/T	1.07	2.25	3.88	5.55	5.65	5.44	4.56	3.28	2.23	0.90	0.24	0.41

Annexe 5 : Indice mensuel d'aridité (I)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aou
P(mm)	25.98	45.18	56.85	62.42	56.5	53.7	54.05	48.15	41.76	21.4	6.7	11.68
T(C°)	24.26	20.05	14.63	11.23	10	9.86	11.84	14.65	18.65	23.52	27.07	27.87
I	9.09	18.04	27.69	35.28	33.9	32.44	29.69	23.44	17.49	7.66	2.16	3.70

Annexe 6 : Inventaire des forages dans la région d'Ain Makhlouf

N° des forages	Nom du propriétaire	X (DMS) Est	Y (DMS) Nord	Z (m)	PS (m)	NS (m)
F1	Boukarboua	7° 14' 39,81''	36° 10' 41,85''	804	15.60	788.4
F2	Haidoussi	7° 16' 28,14''	36° 13' 34,73''	719	18.10	740.60
F3	Guendouz	7° 17' 37,04''	36° 14' 33,55''	711	20.00	700.9
F4	Maarouf	7° 15' 28,13''	36° 14' 38,06''	799	23.10	775.9

PS : profondeur de la surface de l'eau , NS : niveau statique ,DMS : degré , minute , seconde

Annexe 7 : Inventaire des puits dans la région d'Ain Makhlouf

N° des puits	Nom du propriétaire	X (DMS) Est	Y (DMS) Nord	Z (m)	PS (m)	NS (m)
P1	Djarboua El Oulmi	7° 15' 39,72''	36° 11' 57 ,47''	816	05.60	810.4
P2	Bouberdaa El Oulmi	7° 16' 31,92''	36° 11' 57,17''	826	08.10	817.9
P3	Harouelfaïcel	7° 15' 57,78''	36° 10' 56,21''	804	01.00	803
P4	Saad EllahEchabbi	7° 13' 59,30''	36° 12' 06,55''	782	06.10	775.9

P5	Bouragba Kamel	7° 13' 45,93''	36° 12' 03,97''	789	08,70	780.3
P6	Kara Abd El Hamid	7° 12' 42,07''	36° 11' 01,69''	781	06.50	774.5
P7	Batta Messaoud	7° 12' 29,34''	36° 10' 53,49''	768	02.30	765.7
P8	Ferrague Nouredine	7° 14' 37,73''	36° 14' 33,20''	872	08.60	763.4
P9	BouhalaAbdEllah	7° 14' 02,08''	36° 14' 37,81''	909	01.50	899.5
P10	ChoufaSoulaimene	7° 14' 55,69''	36° 13' 03,39''	809	03.00	806
P11	Zarzara	7° 15' 11,40''	36° 14' 49,54''	822	2.50	819.5
P12	Tounssi	7° 15' 34,04''	36° 15' 37,39''	894	5.00	889
P13	Laamour	7° 16' 25,70''	36° 14' 24,79''	766	0.50	765.5
P14	DjaadourBelkhir	7° 14' 20,54''	36° 14' 13,49''	854	02.20	851.8
P15	Khabbati Moussa	7° 17' 44,69''	36° 16' 57,37''	733	03.00	730
P16	M'rad zouhir	7° 16' 28,97''	36° 13' 31,28''	720	00.50	719.5
P17	TalhaouiAllaoua	7° 14' 02,56''	36° 13' 12,90''	835	02.50	832.5
P18	Beskri M ^{ed} Larbi	7° 15' 01,87''	36° 12' 55,91''	804	04.20	799.8
P19	Ben chettahAbdElbaki	7° 13' 03,46''	36° 13' 08,8''	808	01.00	807
P20	TadjineLaabidi	7° 17' 49,84''	36° 14' 36,58''	681	06.40	674.6

PS (m) : Profondeur de la surface piézométrique. **NS (m)** : Niveau piézométrique.

Annexe 8 : Inventaire des différentes sources de la région d'Ain Makhlouf

Origine de l'émergence (nappe)	N° de la Source	Nom de la Source	Coordonnées Est (Longitude) (Degré minute seconde)	Coordonnées Nord (Latitude) (Degré minute seconde)	Altitude en (m)	Débit hautes eaux (Mai 2021) dl/s	Aménagement	Usage
Karstique	S 1	Ain Bir M'rad	7° 16' 32,94	36° 13' 29,05	715	3	Oui	AEP
	S 2	Ain Hadda	7° 15' 39,80	36° 12' 36,36	737	2	Non	AEP+ irr
	S 3	Ain Messaoud	7° 14' 57,10	36° 13' 23,69	825	1.5	Non	AEP+ irr
	S 4	Ain Guettara	7° 14' 32,15	36° 13' 45,00	851	2	Non	AEP
	S 5	Ain Essagni	7° 14' 33,78	36° 14' 00,81	828	4	Oui	AEP
	S 6	BirLaamour	7° 16' 26,09	36° 14' 24,21	766	3	Non	AEP+ irr
Un	S 7	Ain El Guitounia	7° 15' 35,95	36° 12' 08,56	802	2	Oui	AEP

	S 8	Ain Ben M'hani 1	7° 16 45,00	36° 09 16,52	688	2.5	Oui	AEP
	S 9	Ain Ben M'hani 2	7° 16 46,12	36° 08 53,92	673	2	Non	AEP+ irr
	S 10	Ain Ben Aziez	7° 15 58,00	36° 10 56,00	805	3	Oui	AEP
	S 11	Ain Ben Arâare	7° 14 1153	36° 11 56,97	777	3	Oui	AEP
	S 12	Ain chettah	7° 12 48,49	36° 12 40,14	821	2	Oui	AEP
	S 13	Ain Beldjoudi	7° 12 01,61	36° 14 06,90	861	1.5	Non	AEP+ irr
	S 14	Ain El Bilad 1	7° 10 58,68	36°13 38,34	838	1.5	Oui	AEP
	S 15	Ain El Bilad 2	7° 10 53,46	36°14 18,31	866	1.3	Oui	AEP
	S 16	Ain Tafira	7° 14 19,48	36°14 08,24	850	1.2	Oui	AEP
	S 17	Ain Erriche	7° 14 21,43	36°14 14,17	854	2	Non	AEP+ irr
	S 18	Ain Bouthaldja	7° 14 05,22	36°12 35,11	779	4	Non	AEP+ irr
	S 19	Ain El Haouche	7° 14 03,80	36°14 48,13	921	3	Oui	AEP
	S 20	Ain Lahmaza	7° 13 13,86	36°14 13,69	854	1.5	Non	AEP+ irr
	S 21	Ain Err'mel	7° 14 33,55	36°15 19,29	901	2.5	Non	/
	S 22	Ain Echikh	7° 14 05,76	36°14 51,75	924	2.8	Oui	AEP
	S 23	Ain Elkabaili	7° 14 50,95	36°14 59,33	851	2	Non	AEP
	S 24	Ain Zarzara	7° 15 24,63	36°15 03,44	841	2	Oui	AEP
	S 25	Ain Settour	7° 15 51,60	36°15 17,30	845	4	Oui	AEP
	S 26	Ain Legrazza	7° 16 51,74	36°14 42,65	744	2.5	Oui	AEP
	S 27	Ain Bordj Gra 1	7° 15 27,73	36°15 54,88	871	1.3	Non	/
	S 28	Ain Bordj Gra 2	7° 15 30,31	36°16 12,32	843	1.5	Non	/
	S 29	Ain Ben Talha	7° 16 32,99	36°17 58,71	794	3	Oui	AEP
	S 30	Ain El Baida	7° 15 19,90	36°16 41,60	794	2.5	Non	/
	S 31	Ain B'ladMeziène	7° 13 57,64	36°16 07,47	936	3	Oui	AEP
	S 32	Ain Ben Rabeh	7° 16 42,64	36°16 55,06	884	2	Oui	AEP+ irr
	S 33	Ain Onceli	7° 17 26,75	36°17 00,23	787	2.3	Non	AEP+ irr
	S 34	Ain Kerdoussi 1	7° 16 25,07	36°16 19,75	901	0.9	Oui	AEP
	S 35	Ain Kerdoussi 2	7° 16 29,21	36°16 23,82	892	1.8	Non	/
	S 36	Ain El ôuzla	7° 16 46,02	36°16 25,77	841	2	Oui	AEP
	S 37	Ain Essafra	7° 18 45,66	36°15 21,06	593	0.8	Non	/
	S 38	Ain Kadri	7° 17 22,10	36°16 03,28	749	1.2	Non	/
	S 39	Ain H'moummou	7° 18 17,01	36°16 13,14	664	2	Non	AEP
	S 40	Ain Adjoul	7° 19 31,22	36°15 23,80	636	0.6	Non	/
	S 41	Ain Errabiâ	7° 14 48,16	36°12 24,60	756	3	Oui	AEP
	S 42	Ain Ben Mihoub	7° 16 39,54	36°15 31,60	795	1.5	Non	AEP+ irr
Piémont de Djebel El Oncel	S 43	Ain âgeb	7° 13 25,87	36°15 02,73	900	1.5	Non	/
	S 44	Ain El Baâli	7° 12 25,61	36°16 03,94	1008	0.8	Non	AEP
	S 45	Ain Messikh	7° 13 18,73	36°16 25,47	1025	0.5	Oui	AEP
	S 46	Ain Kebbassi	7° 14 27,47	36°16 49,49	906	1.5	Oui	AEP

Annexe 9 : Coordonnées des points de prélèvement et leurs désignations

N° de la source	Nom de la source	Coordonnées décimales	
		X (Est)	Y (Nord)
4	Ain Guettara	7,242222	36,2291667
5	Ain Essagni	7,2425	36,233333
6	Bir Laâmour	7,2738888	36,24
11	Ain Ben Araare	7,236388	36,9888
12	Ain Echethatha	7,21333	36,2111
13	Ain Beldjoudi	7,200277	36,235
14	Ain El Bilad 1	7,182777	36,227222
16	Ain Tafira	7,238611	36,2355556
21	Ain Err'mel	7,2425	36,2552778
24	Ain Zarzara	7,2566	36,2508333
25	Ain Settour	7,264166	36,2547222
26	Ain Legrazza	7,280833	36,245
29	Ain Ben Talha	7,27555	36,299444
31	Ain B'lad Meziène	7,235	36,2686111
36	Ain El ouzla	7,279444	36,2736111
42	Ain Ben Mihoub	7,2775	36,2586111
45	Ain Messikh	7,221666	36,2736111
46	Ain Kebbassi	7,2408333	36,2802778

Annexe 10. Formules ioniques et faciès chimiques. (Mai 2021) Les eaux examinées de la région

Nom de la source	Formules chimiques	Faciès chimiques
Ain Guettara	$\text{rHco}_3 > \text{rNo}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté calcique
Ain Essgni	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Laâmour	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté calcique
Ain Ben Araa	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Echethath	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté calcique
Ain Beldjouc	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rMg} > \text{rCa} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté magnésien
Ain Bilad 1	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Tafira	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Errimel	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Zarzara	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Settour	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Legrazza	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté calcique
Ain Ben Tallh	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Bilad Me	$\text{rCl} > \text{rHco}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Chloruré calcique
Ain El ouzla	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Ben Mihoub	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{r(Na+K)} > \text{rMg}$	Bicarbonaté calcique
Ain Messikh	$\text{rCl} > \text{rHco}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rNo}_3 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Chloruré calcique
Ain Kebbassi	$\text{rHco}_3 > \text{rCl} > \text{rNo}_3 > \text{rSo}_4 > \text{rCa} > \text{rMg} > \text{r(Na+K)}$	Bicarbonaté calcique

Annexe 11. Norme OMS de potabilité d'eau

Paramètre		Norme
Potentiel d'hydrogène	Ph	6.5-9
Calcium	Ca ²⁺ (mg/l)	100
Magnésium	Mg ²⁺ (mg/l)	50
Sodium	Na ⁺ (mg/l)	150
Potassium	K ⁺ (mg/l)	12
Dureté	TH (°F)	> 30
Chlorure	Cl ⁻ (mg/l)	200
Sulfates	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250
Bicarbonates	HCO ³⁻ (mg/l)	250
Conductivité	(µs/cm)	<180 et >1000