

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



Réf.....

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de:
Doctorat en Sciences Agronomiques

Thème

**Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation
dans la région de M'Sila, diagnostics et perspectives.**

Présenté par: TIR Chafia
Soutenu publiquement le : 10/10/2024

Devant le jury composé de :

Mr. GUIMEUR Kamel.	MCA	Université de Biskra	Président.
Mr. BOUZIANE Mohamed Tewfik.	Professeur	Université de Biskra	Directeur de thèse
Mr. ZEDAM Abdelghani	Professeur	Université de M'Sila	Examineur.
Mr CHAFAA Smail	Professeur	Université de Batna 2	Examineur.

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, mes remerciements vont au Dieu Tout Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et la chance d'accomplir le présent travail. Que je remercie à tout instant et sous n'importe quelles circonstances.

Qu'il me soit aussi permis de remercier:

***Mr GUIMEUR Kamel**, Professeur au département d'Agronomie de l'université de Biskra, en me faisant profiter de sa large expérience pour présider le jugement de mon travail;

***Mr BOUZIANE Mohamed Tewfik**, mon respectueux directeur de thèse, Professeur au département de Génie civil et hydraulique de l'université de Biskra pour tous ces aides, conseils et encouragements qui m'ont poussé de mener cette tâche jusqu'à son terme;

***Mr ZEDAM Abdeghani**, Professeur et enseignant chercheur au département des Sciences Agronomiques de l'université de M'Sila, d'avoir accepté de m'honorer de juger mon travail, qu'il accepte aussi un remerciement tout particulier pour ces précieux (ses) remarques et conseils qui m'ont grandement aidés tout au long de la réalisation de ce travail, sans oublier le soutien morale.

***Mr CHAFAA Smail**, Professeur à l'université Batna 2, de m'avoir honorer en me donnant de son temps précieux pour juger mon travail.

***Mr Mimeche Fateh**, Professeur et enseignant chercheur au département des Sciences Agronomiques à l'université de M'Sila, collègue et frère. Qui était toujours présents aux moments les plus difficiles et opportins, pour ces encouragements, ces aides et conseils scientifiques généreux, facteur principal d'accomplissement de la présente recherche.

***Mr AMROUNE Abdeouaheb**, maitre de conférences A au département des Sciences Agronomiques de M'Sila pour ces aides et conseils lors de la réalisation de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à toutes personnes qui ont participé de près ou de loint à l'élaboration de cette thèse en particulier:

*L'équipe des laboratoires de chimie et d'agronomie de l'université de M'Sila, en particulier Aouina H, Alouani R, Hadj Aroussi Y, Hichem, Samia, Chahra, Amina, Merzaka et wassila.....

*Mes chers (es) collègues et amis (es) sans exceptions. De m'avoir entouré d'un environnement fraternel actif et agréable.

Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un qu'il me pardonne et qu'il soit remercié.

Dédicace

Je dédie cet humble travail à:

***Mes parents** que le mot chers n'exprime même pas une partie par million de ce que je ressens envers eux. Ecole supérieurs de toutes les écoles, source éternelle incomparable et irremplaçable de force, de respect, de tendresse et de vrai amour. Veuillez accepter le présent travail comme simple preuve de gratitude et de reconnaissance.

*Mes frères: **Mohcine** et **Mohame Amine Tadj El Dine**, que par leur présence à mes côtés, le sentiment de force, confort et sécurité est accompli.

*Ma sœur: **Mounira**, l'élément vital de notre famille.

*Mes sœurs et leurs époux: **Meriem et Adel, Naima et Nabil, Amina et Abdelouahab, Ahlem et Abdekader**. Votre présence me pousse toujours en avant.

*Les roses et papillons de ma vie: **Abrare, Mohamed Ali, Ritadj, Roua, Lojayne, Mohamed Diaelddine, Mohamed Abdeldjalil, Mohamed Abdelrafie, Yasmine et Malek**.

*A la mémoire de notre ange **Chahde**, qui est et restera toujours dans nos mémoires et pensées....

***Samia, Amel, Amira, Soussou** et leurs familles.

*Mes oncles: **Smail, Farouk, Abdel Rahmane** et leurs familles

*Mes collègues, amis (es) en particulier **Sihem B, Hayet M, Fatiha M** et étudiants sans exception....

Merci d'être présents dans ma vie

Résumé

Cette thèse porte sur la contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation dans la région de M'Sila, diagnostics et perspective.

Les résultats trouvés indiquent que les eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila présentent:

***Des températures acceptables pour l'ensemble des forages, des valeurs de pH indiquant des eaux légèrement alcalins à alcalins et qui ne présentent pas de problème sérieux pour le développement des cultures, des valeurs de CE qui indiquent l'admissibilité de 75% de nos eaux.**

***Pour l'ambiance chimique :**

Les anions sont classés des plus aux moins abondants comme suit : Sulfates, Chlorures, Bicarbonates, Nitrates et enfin Nitrites.

Les cations, sont classés par ordre décroissant comme suit: Magnésium, Calcium, Sodium et enfin Potassium.

***Pour l'approche hydrochimique:**

Le diagramme de Richards a fait ressortir trois classes, indiquant une mauvaise qualité pour la majorité de nos eaux analysées, le diagramme de Piper a montré la présence de deux types de faciès chimiques: Chloruré et Sulfaté Calcique et Magnésien ainsi qu'Hyper Chloruré Calcique et Hyper Sulfaté Calcique.

***Les principaux indicateurs de qualité calculés indiquent que :**

Pour le risque de sodium, on trouve une qualité excellente pour la totalité des eaux des forages analysées sauf celle de forage F10, la quasi-totalité des eaux des 16 forages sont classés comme excellente et peuvent être utilisés en irrigation (de point de vue SAR), 62.5% des eaux de la région de M'Sila sont jugées comme impropres à l'irrigation par rapport aux risques du Magnésium, Kelly ratio, indique que l'ensemble des eaux des 16 forages sont recommandées à l'irrigation.

Comme remèdes aux problèmes trouvés on propose les suggestions suivantes:

***Face au manque de précipitations, les agriculteurs doivent choisir les cultures qui s'adaptent mieux aux conditions de la région;**

***Pour le problème de salinité qui peut engendrer des sols détériorés et aura des effets graves sur les cultures, on doit: Augmenter la fraction (quantité) des eaux d'irrigation par l'ajout de ce qu'on appelle dose de lessivage (lixiviation), éviter d'irriguer par gravité et d'utiliser l'irrigation localisée, essayer de remplacer le Na par le Ca par des apports d'amendement chimiques.... Installer des réseaux de drainage à proximité des parcelles cultivées;**

***Pour le manque de conscience des agriculteurs qui conduit à l'aggravation des problèmes de perte des terres arables ainsi que la sur-exploitation des ressources hydriques on doit accentuer la vulgarisation avec des sorties de terrains des spécialistes agronomes comme pédologues, hydrologues et phytotechniciens.....**

Mots clés: M'Sila, qualité, eaux d'irrigation.

الملخص

تهدف هذه الاطروحة الى دراسته جودة مياه الري بمنطقة المسيلة تشخيصا ومنظورا.

تشير النتائج إلى أن المياه الجوفية المخصصة للري بمنطقة المسيلة تحتوي على:
*درجات حرارة مقبولة لجميع عمليات الحفر، قيم الرقم الهيدروجيني التي تشير إلى قلوية طفيفة للمياه القلوية التي لا تمثل مشكلة خطيرة لنمو المحاصيل، قيم EC التي تشير إلى جواز استعمال 75% من مياهنا بهدف السقي
*للجو الكيميائي:

يتم ترتيب الأيونات من الأكثر إلى الأقل وفرة على النحو التالي: الكبريتات والكلوريدات والبيكربونات والنترات وأخيرا النتريت.
وتصنف الكاتيونات ترتيبا تنازليا على النحو التالي: المغنيسيوم، الكالسيوم، الصوديوم، وأخيرا البوتاسيوم.
* تبين الطريقة الهيدروكيميائية ما يلي:

كشفت مخطط ريتشاردز عن ثلاث فئات، مما يشير إلى سوء نوعية غالبية المياه التي قمنا بتحليلها، وأظهر مخطط بايبر وجود نوعين من السحنات الكيميائية: كلوريد وكبريتات الكالسيوم والمغنيسيوم وكذلك كلوريد الكالسيوم المفرط والكالسيوم المفرط الكبريت.
*أظهرت مؤشرات الجوده الرئيسية المحسوبة مايلي:

بالنسبة لمخاطر الصوديوم، نجد جودة ممتازة لجميع المياه من الآبار التي تم تحليلها باستثناء البئر F10، تقريبا كل المياه مصنفة على أنها ممتازة ويمكن استخدامها في الري (من وجهة نظر 62.5% SAR) من المياه بمنطقة المسيلة تعتبر غير صالحة للري مقارنة بمخاطر الماغنيسيوم، وتشير نسبة كيلي إلى أن جميع مياه الآبار الستة عشر موصى بها للري.

كعلاج للمشاكل التي تم العثور عليها نقدم الاقتراحات التالية:

*في مواجهة قلة هطول الأمطار، يجب على المزارعين اختيار المحاصيل التي تتكيف بشكل أفضل مع ظروف المنطقة؛
* بالنسبة لمشكلة الملوحة التي يمكن أن تسبب تدهور التربة ولها آثار خطيرة على المحاصيل، يجب: زيادة نسبة (كمية) مياه الري بإضافة ما يسمى بجرعة الترشيح (الترشيح)؛ تجنب استخدام الري الموضعي. محاولة استبدال Na بـ Ca باستخدام التعديلات الكيميائية.... تركيب شبكات الصرف بالقرب من الأراضي المزروعة؛
*بالنسبة لنقص وعي المزارعين الذي يؤدي إلى تفاقم مشاكل فقدان الأراضي الصالحة للزراعة وكذلك الإفراط في استغلال الموارد المائية، يجب علينا تعزيز الترويج من خلال الرحلات الميدانية التي يقوم بها متخصصون في الهندسة الزراعية مثل علماء التربة وعلماء الهيدرولوجيا وفنيي النباتات.

الكلمات المفتاحية : المسيلة، الجودة، مياه الري.

Summary

This thesis focuses on the contribution to the study of the quality of irrigation water in the M'Sila region, diagnostics and perspectives.

The results found indicate that the groundwater intended for irrigation in the M'Sila area presents:
*Acceptable temperatures for all drilling, pH values indicating slightly alkaline to alkaline waters which do not present a serious problem for the development of crops, EC values which indicate the admissibility of 75% of our waters as well as subatran waters.

*For the chemical atmosphere:

Anions are ranked from most to least abundant as follows: Sulfates, Chlorides, Bicarbonates, Nitrates and finally Nitrites.

The cations are classified in descending order as follows: Magnesium, Calcium, Sodium and finally Potassium.

*The hydrochemical approach shows that:

The Richards diagram revealed three classes, indicating poor quality for the majority of our analyzed waters, the Piper diagram showed the presence of two types of chemical facies: Chloride and Sulfate Calcium and Magnesian as well as Hyper Chloride Calcium and Hyper sulfated Calcium.

*The main quality indicators calculated indicate that:

For the sodium risk, we find excellent quality for all of the water from the boreholes analyzed except that of borehole F10, almost all of the water from the 16 boreholes is classified as excellent and can be used in irrigation (from a SAR point of view).), 62.5% of the waters in the M'Sila region are considered unsuitable for irrigation in relation to the risks of Magnesium, Kelly ratio, indicates that all of the waters from the 16 boreholes are recommended for irrigation.

As a remedy to the problems found we offer the following suggestions:

*Faced with the lack of precipitation, farmers must choose crops that best adapt to the conditions of the region;

*For the problem of salinity which can cause deteriorated soils and will have serious effects on crops, we must: Increase the fraction (quantity) of irrigation water by adding what is called leaching dose (leaching);

Avoid irrigating by gravity and using localized irrigation;

Try to replace Na with Ca using chemical amendments....

Install drainage networks near cultivated plots;

*For the lack of awareness of farmers which leads to the worsening of the problems of loss of arable land as well as the over-exploitation of water resources, we must accentuate popularization with field trips by agronomist specialists such as pedologists, hydrologists and phytotechnicians...

Key words: M'Sila, quality, irrigation water

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
المخلص	IV
Summary	V
Table des matières	VI
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIII
Liste des abréviations	XV
	Page
Introduction générale	01
Chapitre 1: Etat de lieu sur les ressources en eau, l'eau d'irrigation et sa qualité physico-chimique	05
1-Sources de l'eau utilisée par l'homme	05
1-1-Eaux de surface	06
1-2-Eaux souterraines	06
2-Les ressources en en dans le monde et en Algérie	06
2-1- Les ressources en eau dans le monde	06
2-2-Les ressources en eau en Algérie	08
3-L'irrigation et son importance	12
3-1-Définition de l'irrigation	12
3-2-L'irrigation dans le monde	12
3-3-L'irrigation en Algérie	13
3-4-Importance et avantages de l'irrigation	14
3-5-Inconvénients de l'irrigation	14
3-6-Propriétés des eaux d'irrigation	15
3-6-1-Paramètres de caractérisation physico-chimique des eaux d'irrigation	15
3-6-1-1-Température	15
3-6-1-2-Conductivité électrique	16
3-6-1-3-Totale des sels dissous (TDS)	17
3-6-1-4-Potentiel d'hydrogène	17
3-6-1-5-Matières en suspension	18
3-6-1-6-Dureté totale	18
3-6-1-7-Résidus sec	19
3-6-1-8-Alcalinité (TA- TAC)	20
3-6-1-9-Nitrates	20
3-6-1-10-Nitrites	20
3-6-1-11-Chlorure	21
3-6-1-12-Carbonates (CO_3^{2-})	21
3-6-1-13-Bicarbonates (HCO_3^-)	21
3-6-1-14- Sulfates (SO_4^{2-})	21
3-6-1-15-Calcium	22
3-6-1-16-Magnésium	22
3-6-1-17-Potassium	23
3-6-1-18- Sodium	23
3-7-Les problèmes liés à la qualité des eaux d'irrigation	23
3-7-1-Risques liés à la composition ionique des eaux d'irrigation	24

3-7-1-1-Risques liés au sodium	24
3-7-1-2-Risques liés aux bicarbonates	24
3-7-1-3-Risques liés aux chlorures	24
3-7-1-4-Risque liés au bore	24
3-7-2-Risque de colmatage des réseaux d'irrigation	25
3-8-Classification des eaux d'irrigation	25
3-8-1-Classification basée sur la conductivité électrique (CE)	25
3-8-2-Classification basée sur l'alcalinité	26
3-8-3-Classification de DURAND pour l'Afrique du Nord	27
3-8-4-Evaluation de la qualité des eaux selon FAO	27
Chapitre 2: Méthodologie de travail	
1- Milieu physique	29
1-1- Situation et limites	29
1-1-1- Les limites administratives	30
1-1-2-Les limites géographiques	30
1-2-Coordonnées géographiques	30
1-3- Géologie de la région d'étude	31
1-3-1- Les formations du Primaire	31
1-3-2- Les formations du Secondaire	31
1-3-2-1-Le Trias	31
1-3-2-2-Le Jurassique	32
1-3-2-3-Le Crétacé	32
1-3-3-Le Tertiaire	32
1-3-4-Le Quaternaire	33
1-4-Géomorphologie et altitude de la région d'étude	34
1-4-1-Géomorphologie de la région d'étude	34
1-4-1-1-La plaine	34
1-4-1-2-Le glacis	35
1-4-1-3-Les montagnes	35
1-4-1-4-Chott El Hodna	35
1-4-2- Altitude de la zone d'étude	35
1-5-Pédologie de la zone d'étude	36
1-5-1- Sols minéraux bruts	37
1-5-2- Sols peu évolués	37
1-5-3- Sols calci-magnésiques	37
1-5-4- Sols halomorphes	37
1-5-5- Sols hydromorphes	37
1-5-6- Sols isohumiques	37
1-6-Hydrologie et ressources hydriques de la zone d'étude	38
1-7-Climat de la région d'étude	40
1-7-1-Origine des données	40
1-7-2-La pluviométrie	42

1-7-2-1-Les précipitations mensuelles et annuelles	42
a) Les précipitations mensuelles	42
b) Variation interannuelle des précipitations	43
1-7-2-2-Le régime saisonnier	44
1-7-3-Les températures	45
1-7-3-1-Températures moyennes mensuelles	45
1-7-3-2-Températures extrêmes	46
1-7-4-Vents	47
I-7-5-Humidité relative	48
1-7-6-Evapotranspiration potentielle (E.T.P.)	48
1-7-7-Evapotranspiration réel (E T R)	50
1-7-8- La synthèse climatique	50
1-7-8-1-La saison sèche	50
a) Diagramme ombrothermique	50
b) Indice pluviométrique de MORAL	51
1-7-8-2-Climagramme d'EMBERGER	52
2- Milieu biotique	54
3-Méthodes d'échantillonnage et d'analyse statistique des résultats	56
3-1-Choix des sites des prélèvements et échantillonnage	56
3-2-Méthodes des analyses physico-chimiques sur terrain et au laboratoire	59
3-2-1-Analyse sur terrain	59
3-2-1-1-La température	59
3-2-1-2-Le Ph	60
3-2-1-3-La conductivité électrique (CE)	60
3-2-2-Analyses au laboratoire	60
3-2-2-1-Le pH	60
3-2-2-2-La conductivité électrique	60
3-2-2-3-Totale des sels dissous (TDS)	60
3-2-2-4-Résidus secs (RS)	61
3-2-2-5-Dureté total (titre hydrométrique: TH en F°)	61
3-2-2-6-Alcalinité (TA- TAC)	61
a) Titre alcalimétrique simple (TA)	62
b) Titre alcalimétrique complet (TAC)	62
3-2-2-7-Dosage des ions	62
a) Carbonates et bicarbonates	62
b) Chlorures	62
c) Sulfates	62
d) Nitrates et nitrites	63
e) Calcium	64

f) Magnésium	64
g) Sodium	64
h) Potassium	65
3-3-Représentation des résultats trouvés de point de vue hydro-chimique	65
3-3-1-Diagramme de Piper	65
3-3-2-Diagramme de Scoller et Berkallof	66
3-3-3-Diagramme de Richards (Riverside).	66
3-4-Indices de qualité des eaux d'irrigation analysées et analyses statistiques	66
3-4-1- Indices de qualité des eaux d'irrigation analysées (IQE)	67
3-4-1-1-Risque du sodium ou pourcentage du sodium (%Na)	67
3-4-1-2-SAR	67
3-4-1-3-Danger du Magnesium MH (dit aussi taux d'adsorption du magnésium)	69
3-4-1-4-KR (Kelly ratio)	69
3-4-1-5-Indice de perméabilité (PI)	69
3-5-Analyses statistiques des résultats trouvées	69
Chapitre 3: Résultats et interprétations	
1-Caractérisation physico chimique générale des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila.	71
1-1-Température	71
1-2-pH des eaux analysées	72
1-3-Conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	74
1-4-TDS des eaux analysées	76
1-5-Résidus secs (RS) en mg/l	76
1-6-Dureté totale (TH$^{\circ}\text{F}$)	77
1-7-TA et TAC (en$^{\circ}\text{F}$)	77
1-8-Anions et cations des eaux souterraines de la zone d'étude	77
1-8-1-Anions	78
1-8-1-1- Sulfates	79
1-8-1-2- Chlorures	80
1-8-1-3- Carbonates et bicarbonates	82
1-8-1-4- Nitrates	83
1-8-1-5- Nitrites	84
1-8-2- Cations	84
1-8-2-1-Magnésium	86
1-8-2-2-Calcium	87
1-8-2-3-Sodium	88
1-8-2-4-Potasium	90
2-Caractérisation et classification hydro-chimique de nos eaux analysées	91
2-1- Diagramme de Richards (Riverside)	91
2-2- Diagramme de Scoller et Berkallof	93
2-3- Diagramme de Piper	96
3-Détermination des principaux indicateurs (indices) de qualité pour les eaux de la zone d'étude	98
3-1-Risque de Sodium (dit aussi pourcentage de sodium, danger du sodium)	98
3-2-SAR	100
3-3-Danger du magnésium (MH, dit aussi taux d'adsorption du Magnésium)	100

3-4-Kelly ration (KR)	101
3-5-Indice de perméabilité (PI)	101
3-6-IQE (WQI)	102
4-Matrice de corrélation de Person	103
5-Adéquation (éventuelles effets) de la qualité de nos eaux analysées sur le sol et les cultures	103
5-1-Sur le sol	104
5-2-Sur les cultures	107
Conclusion générale	109
Liste des références bibliographiques	
Annexes	
Production scientifique en relation avec la thèse	

Liste des figures

	Page
Figure 1 Les bassins versants en Algérie	09
Figure 2 Les cinq bassins hydrographiques de l'Algérie	10
Figure 3 Situation géographique de la zone d'étude (M'Sila)	29
Figure 4 Situation de la zone d'étude par rapport aux communes de la wilaya de M'Sila	31
Figure 5 La géologie du Hodna au 1/500.000, 1952 adaptée	34
Figure 6 Le relief dans la wilaya de M'Sila	36
Figure 7 Carte pédologique du Hodna au 1/800 000è par T. G. Bouyadgiev	38
Figure 8 Carte pluviothermique du Hodna au 1/1.000.000è	42
Figure 9 Fluctuation des précipitations mensuelles moyennes de la région de M'Sila (Période: 1984-2018)	43
Figure 10 Fluctuation des précipitations interannuelles de la région de M'Sila pour la période 1984-2018	44
Figure 11 Distribution du cumul des précipitations mensuelles moyennes par saison dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018)	45
Figure 12 Variation des moyennes mensuelles des températures de la région de M'Sila (Période: 1984-2018)	46
Figure 13 Variation des moyennes des températures (minimales, maximales et moyennes mensuelles) dans la station météorologique de M'Sila (Période: 1984-2018)	47
Figure 14 Diagramme Ombrothermique de la région de M'Sila	51
Figure 15 Localisation géographique de la zone d'étude ainsi que les forages concernés par l'analyse	58
Figure 16 Valeurs des températures enregistrées des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.	72
Figure 17 Valeurs des pH des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.	73
Figure 18 Variation des valeurs de CE des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.	75
Figure 19 Valeurs de TDS (en mg/l) pour l'ensemble des échantillons des forages analysés.	76
Figure 20 Répartition des anions en pourcentages par rapport à la totalité des anions des eaux analysées.	79
Figure 21 Les sulfates dans les eaux des forages de la zone d'étude.	80
Figure 22 Valeurs des chlorures enregistrées pour l'ensemble des forages analysés.	81
Figure 23 Valeurs de Bicarbonates (en mg/l) enregistrées pour l'ensemble des échantillons des forages analysés.	83
Figure 24 Valeurs des nitrates et nitrites des eaux des forages de la zone d'étude.	84
Figure 25 Répartition des anions en pourcentages par rapport à la totalité des anions des eaux analysées.	86
Figure 26 Concentration du Mg ⁺⁺ dans les eaux des 16 puits étudiés.	87

Figure 27	Concentration du Ca ⁺⁺ dans les eaux des échantillons étudiés	87
Figure 28	Valeurs de sodium enregistrées pour nos échantillons analysés.	89
Figure 29	Valeurs de potassium enregistrées pour nos échantillons analysés.	90
Figure 30	Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone d'étude sur le diagramme de Richards (Riverside).	92
Figure 31	Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone d'étude (de F1 à F8) sur le diagramme de Scholler et Berkallof	94
Figure 32	Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone d'étude (de F9 à F16) sur le diagramme de Scholler et Berkallof	95
Figure 33	Représentation des résultats des anions et des cations de nos échantillons d'eau analysées sur le diagramme de Piper	97

Liste des tableaux

		Page
Tableau 1	Potentialités en superficies totales, agricoles et irriguées	13
Tableau 2	Classification des eaux en fonction de la teneur en sel (g/l) et de la conductivité électrique (micro mhos /cm)	16
Tableau 3	Tolérance à la salinité de quelque plantes cultivées	17
Tableau 4	Classification de l'eau en fonction du TDS	17
Tableau 5	Estimation de la qualité de l'eau selon le Ph	18
Tableau 6	Qualité des eaux d'irrigation suivant la dureté	19
Tableau 7	Classification des eaux en fonction des résidus secs	20
Tableau 8	Valeurs des carbonates et bicarbonates en fonction des valeurs du TA et TAC dans l'eau	21
Tableau 9	Répartition spatiale des débits exploitables des eaux souterraines du bassin du Hodna	39
Tableau 10	Précipitations moyennes mensuelles et cumul annuel (mm) de la région de M'Sila	42
Tableau 11	Variations interannuelles des précipitations de la région de M'Sila pour la période 1984-2018	43
Tableau 12	Précipitations mensuelles moyennes par saison dans région de M'Sila (Période : 1984-2018)	44
Tableau 13	Températures moyennes ventilées par mois dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018)	45
Tableau 14	Variation des vitesses moyennes mensuelles du vent dans la région de M'Sila : période 1984-2018	47
Tableau 15	Variation de l'humidité relative moyennedans la région de M'Sila: période 1984 – 2018	48
Tableau 16	Moyennes mensuelles (etp) et annuelle (ETP) de la région de M'Sila: période 1984- 2018	49
Tableau 17	Evapotranspiration réelle annuelle de la région de M'Sila : période 1984 – 2018	50
Tableau 18	Indice pluviométrique de MORAL de la région de M'Sila	51
Tableau 19	Valeur du quotient pluviométrique et emplacement dans l'étage bioclimatique de région de M'Sila	52
Tableau 20	Informations détaillées sur les forages à caractériser	58
Tableau 21	Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE	68
Tableau 22	Interprétation des valeurs du pourcentage du sodium après calculs	68
Tableau 23	Classification de l'adiquation de l'eau d'irrigation en fonction de PI	70
Tableau 24	Relation entre la CE d'une eau et son degré de minéralisation	75
Tableau 25	Valeurs de dureté totale (TH) des eaux des 16 forages de la zone d'étude	77
Tableau 26	Valeurs des anions des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans	78

	la zone de M'Sila	
Tableau 27	Répartition des anions en pourcentage par rapport à leur totalité	78
Tableau 28	Valeurs des cations des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila	85
Tableau 29	Répartition des cations en pourcentage par rapport à leur totalité	85
Tableau 30	Résultats des indicateurs de qualité de nos eaux des forages destinées à l'irrigation	98
Tableau 31	Normes d'interprétation des valeurs du pourcentage du sodium (%).	99
Tableau 32	Représentation de la qualité des eaux des 16 forages en fonction de l'indice (IQE)	102
Tableau 33	La corrélation entre les principaux indicateurs (indices) de qualité pour les eaux de la zone d'étude	102

Liste des abréviations

PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
Tab	: Tableau
Fig	: Figure
BRGM	: Bureau de Recherche en Géologie et Minerie
ONU	: Organisation des Nations Unies
OCDE	: Organisation de coopération et de Développement Economique
MENA	: Middle East and North Africa
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le développement
ANRH	: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CT	: Complexe Terminal
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
SAU	: Superficie Agricole Utile
ST	: Superficie Totale
S.irrig	: Superficie. irriguée
S.drain	: Superficie. drainée
Mha	: Millions d'Hectares
CIID	: Commission Internationale de l'Irrigation et Drainage
GPI	: Grands périmètres irrigués
PMH	: Petite et moyenne hydraulique
F N S	: Fondation nationale de la santé
WHO	: Organisation mondiale de la santé
CE	: Conductivité électrique
pH	: Potentiel Hydrogène
Hceflc	: Haut commissariat aux eaux et forêts
g/l	: Gramme par litre
mhos/cm	: mhos par centimètre
Mmhos/cm	: Millimhos par centimètre
µmhos/cm	: Micromhos/cm
C	: Classe (exemple C1, classe 1)
Ds/m	: Dicsiemens par mètre
TDS	: Total des Sels Dissous
MES	: Matières en suspension
C R E P A	: Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assinissement
TH	: Dureté de l'eau
THT	: Dureté totale de l'eau
TCa	: Dureté calcique (titre calcique)
°F	: Degré français
Ca⁺⁺	: Calcium
Mg⁺⁺	: Magnésium
RS	: Résidus Sec
TA	: Titre Alcalinomètrique
TAC	: Titre Alcalinomètrique Complet
CO₃²⁻	: Carbonate
OH⁻	: Hydroxyde
N	: Normalité de la solution
V	: Volume
CaCO₃	: Carbonate de calcium (calcite ou dit aussi calcaire)

Mg	: Milligramme
HCO₃⁻	: Bicarbonate
H₂SO₄	: Acide sulfurique
H₃O⁺	: Hydronium
HNO₂	: Acide nitreux
NaCl	: Chlorure de Sodium
KCl	: Chlorure de Potassium
CaCl₂	: Chlorure de Calcium
BaCl₂	: Chlorure de Baryum
mg/l	: Milligramme /litre
SO₄²⁻	: Sulfates
CaSO₄, 2H₂O	: Gypse
Ba⁺⁺	: Baryum
BaSO₄	: Sulfate de Baryum
Ppm	: Partie par million
Pe	: Prise d'essai
g/kg	: Gramme par kilogramme
%	: Pour cent
SAR	: Sodium Adsorption Ratio
Na⁺	: Sodium
meq/L	: Milliéquivalent par litre
RSC	: carbonate de sodium résiduel
CO₂	: Dioxyde de carbone
Cl⁻	: Chlorure
mS/cm	: millésimons /centimètre
S	: Classe de sodicité
EDTA	: Ethylène Diamine Tétra Acétique.
DSA	: Direction des Services Agricoles
HCDS	: Haut Commissariat au Développement de la steppe
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
SMM	: Station Météorologique de M'Sila
°C	: Degrés Celcius
M	: Températures minimales
M	: Températures maximales
Mm	: Millimètre
(M+m)/2	: Température moyenne
P	: Précipitation
APHE	: Régime saisonnier (Automne, Printemps, Hiver, Eté)
m/s	: Mètre par seconde (vitesse du vent)
E.T.P	: Evapotranspiration potentielle
E.T.R	: Evapotranspiration réelle
Etp	: Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en mm
C	: Facteur de correction
I	: Indice thermique mensuel
L	: Pouvoir évaporant calculé
IA	: Indice pluviométrique de MORAL

Q₂	: Quotient pluviométrique d'Emberger
MI	: Millilitrer
IQE	: Indice de qualité des eaux d'irrigation
%Na	: pourcentage du sodium (%Na)
MH	: Danger du Magnésium (taux d'adsorption du magnésium)
KR	: Kelly ratio
PI	: Indice de perméabilité
Ha	: Hectare
C	: Classe de salinité (en fonction de la conductivité électrique)
S	: Classe de sodocité ou d'alcalinité (en fonction du SAR)

Introduction générale

Introduction générale

Les récentes recherches de la FAO estiment que la population mondiale devrait atteindre environ 9.1 milliard d'habitants d'ici 2050, ce qui va accroître de manière significative la demande mondiale déjà importante en alimentation. Dans les prochaines décennies, la production alimentaire mondiale devrait augmenter de 70%, voir atteindre 100% dans les pays en voie de développement (FAO, 2014; David et *al.*, 2023; FAO, 2024).

Pour les pays en voies de développement qui ne produisent qu'une faible à très faible partie des denrées alimentaires de grandes consommations, l'approvisionnement de leurs populations en aliments de base ainsi que leur sécurité alimentaire est loin d'être garantie voir même impossible à réaliser. Cette situation reste préoccupante et ne cesse d'augmenter et de s'aggraver.

Lorsque l'eau se fait rare, qu'elle est polluée ou difficile d'accès, la sécurité alimentaire s'en trouve menacé en premier (Loyer, 1989; UNESCO, 2024).

C'est le cas des pays de MENA (Middle East and North Africa, que notre pays fait partie), qu'en outre de ce grand défi (sécurité alimentaire) s'ajoute d'autres tels que la croissance démographique et le changement climatique.

L'actualité est marquée de plus en plus par la question de l'accès à l'eau à travers le monde entier ainsi que les méthodes de leur approvisionnement (Khamidov et *al.*, 2023; Virgine et Arnaud, 2023).

Les recherches et les statistiques ont prouvé que la répartition temporelle et spatiale des disponibilités (ressources) hydriques naturelles est très hétérogène et apparaît suffisante de point de vue quantité. Ainsi, les grandes étendues d'eau dans l'hémisphère Nord et les vastes régions arides et semi-arides existantes à travers le monde témoignent encore une fois qu'elle (eau) est inégalement répartie (Guy, 1996; Remini, 2005; Zella et Smadhi, 2006; Bouziani, 2006).

En Algérie et depuis l'indépendance, la question de la sécurité alimentaire est au cœur des préoccupations des pouvoirs publics, l'autosuffisance alimentaire est un des objectifs importants par lequel on cherche à réduire la dépendance vis-a-vis des importations

alimentaires. Dans les faits, cela s'est traduit par la multiplication des réformes agraires, un arsenal de lois et des efforts d'investissement de l'Etat (Agharmiou et Hammoutene, 2022).

Omari et *al.*, (2012), expliquaient qu'en Algérie et en 1970, la production agricole assurait 93% des besoins nationaux et qu'elle n'en assure que 30% seulement une dizaine d'années plus tard.

Selon les statistiques, notre pays figure parmi les plus importants clients et importateurs des produits agricoles au monde; avec près du quart des importations totales (produits agricoles) et que le déficit commercial algérien est particulièrement marqué pour certains produits stratégiques tels que les céréales, le lait et les produits laitiers (Agharmiou et Hammoutene, 2022).

Alors, il paraît clairement que la souveraineté alimentaire est sans doute conditionnée par le développement de l'agriculture. Et que celle dernière elle-même est soumise à d'autres conditions et contraintes tels que les conditions climatiques et la problématique des ressources en eau ainsi que leurs qualités.

L'eau paraît comme une ressource déterminante d'une manière décisive à la sécurité alimentaire, un élément de base pour l'accroissement des productions végétales et animales, clé de tout développement économique.

De ce fait, l'Algérie affiche une volonté de mieux exploiter son potentiel agricole pour réduire la dépendance et la facture alimentaire du pays tout en s'adaptant aux contraintes hydro-climatiques (Mozas et Ghosn, 2013).

Dans les zones à grande pénurie d'eau, le développement urbain, écologique et agricole est conditionné par la disponibilité des ressources en eau ainsi que leurs qualités (Xiao et *al.*, 2019; Gendre et *al.*, 2021).

Plusieurs recherches ont confirmé que l'Algérie est à l'instar des 17 pays africains touchés par le stress hydrique (Nichane et Khelil, 2014).

Ce stress hydrique résulte principalement du changement climatique, la gestion inadéquate des ressources en eau et la pression démographique.

Dans ces conditions de déficit hydrique, le recours à l'irrigation paraît nécessaire pour tout développement agricole s'il n'est pas obligatoire.

De nos jours et y compris dans les pays humides, le recours à l'irrigation comme facteur avéré d'intensification de la production agricole et d'accroissement des besoins alimentaires est devenu de plus en plus nécessaire (Zella et Smadhi, 2006).

Les eaux utilisées à l'irrigation sont de différentes natures; elles peuvent être superficielles (barrages..) comme elles peuvent être souterraines. Celle dernière est la plus utilisée.

L'adéquation des eaux souterraines à des fins d'irrigation est basée sur l'évaluation des aspects (propriétés) physiques, chimiques et géochimiques de ces eaux. Et le changement de ces aspects ou qualités ou propriétés est en relation étroite avec la compositions chimiques, la température, la dissolution des minéraux, l'interaction roche-eau, l'interaction sol-eau, l'interaction temporelle et les facteurs anthropiques (Ravi et *al.*, 2020).

Normalement, l'utilisation d'une eau pour l'irrigation implique deux grands aspects; quantitatifs (à fin de subvenir au besoins des plantes et des cultures) et qualitatifs (car une eaux de qualité médiocre va agir négativement sur le végétal ainsi que le sol), le problème c'est que l'aspect qualitative est généralement ignoré (Karakuş et Yıldız, 2020).

La zone d'étude se trouve dans la région du Hodna, marquée par une dépression largement ouverte de 8500 km² entourée de montagnes où se situe au centre le lac salé "Chott El Hodna" ("lac salé" en langue locale) de 1100 km² de large (Amroune et *al.*, 2020).

Dans la région de M'Sila; toutes eaux que se soit d'irrigation, de l'approvisionnement en eau potable et utilisation industrielle est une partie importante qui proviennent de retenues d'eau souterraines.

Et c'est dans cette optique que s'inscrit notre présent travail, qui présente des objectifs de caractérisation des propriétés (physiques et chimiques) des eaux (souterraines) des forages, tout en présentant et en se référant à quelques indices hydriques à fin de déterminer la pertinence de la qualité de nos eaux pour son utilisation en irrigation.

Les indices hydriques sont les outils les plus efficaces pour transmettre des informations sur la qualité de l'eau aux communautés d'usagers, aux responsables de la gestion, aux autorités décisionnelles et au public (Salcedo-Sánchez et *al.*, 2016).

Afin d'atteindre les objectifs précités, notre thèse est structurée comme suit:

Chapitre 1, qui présente l'avis de la littérature sur la qualité des eaux surtout celles souterraines utilisées à des fins agricoles c'est-à-dire pour l'irrigation des cultures.

Chapitre 2, qui s'intéresse à la détermination de la méthodologie de travail. Commencant par la présentation de la zone d'étude ainsi que les composantes de son milieu physique (géologie, hydrogéologie, pédologie et climat), passant aux méthodes d'échantillonnage et des analyses sur terrain et au laboratoire, arrivant à la fin aux méthodes d'analyses statistiques des résultats trouvés.

Chapitre 3, qui exhibe et discute les principaux résultats trouvés.

Enfin une conclusion générale qui rappelle les résultats les plus importants tout en proposant des solutions ou des recommandations pour mieux gérer les eaux souterraines utilisées en irrigation des cultures dans la zone étudiée.

Chapitre 1 :

*Etat de lieu sur les ressources en eau, l'eau
d'irrigation et sa qualité physico-chimique.*

L'eau est la vie elle-même, plutôt qu'être seulement nécessaire à survivre. Celle dernière s'est avérée primordiale pour tous les écosystèmes et au développement de la vie végétale, animale et humaine.

Avec le temps, l'homme s'est assuré qu'il doit maîtriser cette ressource noble et rare pour en garantir son confort et sécurité.

Il a reconnu aussi que cette ressource qu'on lui connaît plus de substitut (passant de l'agriculture à l'écologie en arrivant à l'industrie) est présente à tous les niveaux de la société humaine (Andre et Christophe, 2004; Sakaa, 2013).

Une attention internationale et d'une façon croissante s'est penchée sur les questions liées à l'eau ces dernières années, prouvant qu'une seule chose vaut universellement; l'existence humaine dépend de l'eau.

Quelle que soit son origine, la connaissance de la qualité de l'eau et son influence sur le rendement des cultures est indispensable car elle présente un intérêt fondamental en agriculture.

C'est ainsi qu'on a jugé utile de présenter brièvement au premier chapitre de la présente étude (recherche), un état de lieu sur les ressources en eau, l'eau d'irrigation ainsi sa qualité physico-chimique.

1-Sources de l'eau utilisée par l'homme

L'homme et pour subvenir à ces besoins multiples d'eau, il utilise pas mal de sources dont celle de pluie figure en premier. Cependant, l'eau pluviale en tombant sur le sol se partage en proportions variables et en diverses fractions; elle se transforme en vapeur par évaporation du sol et/ou transpirations des végétaux, contribue à l'alimentation des ruisseaux et rivières et pénètre dans le sol par infiltration en alimentant les nappes profondes avec une faible fraction (20% à 40%) (Gomella et Guerree, 1974).

En se basant sur cette répartition l'appellation va être, soit eaux de surface ou eaux souterrain:

1-1-Eaux de surfaces

L'appellation 'eau de surface' s'est basée sur le fait que cette eau circule ou se stocke à la surface des continents. Elles proviennent soit des eaux de ruissellement ou des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source (fleuves, rivières, barrages, marés, marigots). Menée d'une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement avec une vitesse appréciable de circulation. Et en fonction de la nature des terrains traversés durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants, les eaux de surface acquièrent certaine composition chimique. Dans la plupart des cas, ces eaux sont le siège d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur (Gomella et Guerree, 1974; Dégremont, 2005).

1-2-Eaux souterraines

Ce sont les eaux qui résultent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol par gravité dans les pores et les fissures des roches ou par dissolution, en humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à la rencontre d'une couche imperméable, à ce moment là elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité du sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère (Gomella et Guerree, 1974; Dégremont, 2005).

2-Les ressources en en dans le monde et en Algérie

2-1-Les ressources en eau dans le monde

L'eau, une partie de l'héritage et du patrimoine de l'humanité, ressource de plus en plus rare, un bien économique et social noble dont son accès est un droit pour chaque individu. Donc mal répartie; cette source vitale peut être source de conflits dans de nombreuses régions limitrophes du monde (Kettab et *al*, 2008).

Qualifiée du nom de planète bleu, suite à sa disponibilité en eau de natures (d'origine) divers (mers intérieures, océans et certaines nappes souterraines qui représente à peu près 97,2 % du volume), notre planète est avant tout celle de l'eau salée et ces réserves en eau disponibles à la surface du globe sont de l'ordre de 1390 millions Km³ (Gilli et *al*, 2004).

Confirmant les travaux de Gilli et *al* (2004), Kettab et *al*, (2008) estiment que le volume d'eau terrestre sous ces trois formes (solide, liquide et gazeuse) est de l'ordre de 1384120000 Km³ dont 2,6% d'eau douce, soit 36020000 Km³.

Dans ces 2,6% des eaux douces de la totalité, seul 0,26% est directement exploitable. De ce fait, on estime théoriquement qu'il y a de l'eau douce suffisante pour alimenter quelques 20 milliards et plus d'habitants. Malheureusement, elle n'est pas répartie de façon égale, comme en témoignent les vastes régions arides et semi-arides existantes (Kettab et *al*, 2008).

L'eau est l'une des ressources la plus abondante sur terre, mais il faut signaler également que seulement moins de 1% de cette ressource sont utilisables de façon fiable pour les besoins humains (PNUE, 1991).

Par ces études, BRGM (2011) donne des résultats qui sont proches et qui confirment ceux déjà évoqués par Gilli et *al* (2004) et Kettab et *al* (2008). Pour eux, l'ensemble des eaux douces représente 2,8% du volume global, et dans ce faible pourcentage les glaces et les neiges permanentes représentent 2,1% alors que l'eau douce disponible 0,7%.

Les résultats des recherches de Talbi et Souak, (2016), montrent toujours qu'à travers la planète, cette ressource est inégalement répartie, on trouve par ordre croissant de répartition:

*L'Afrique du Nord et le moyen orient et avec seulement 1% des ruissellements mondiaux sont les moins bien servis.

*L'ex Union Soviétique et l'Afrique subsaharienne bénéficient de 10% chacun.

*Les pays de l'OCDE (20%).

*L'Asie bénéficie de 25% des ressources (Chine, Inde, Indonésie).

*L'Amérique du Sud est la plus riche (plus bénéficiaire) avec 1/3 des ruissellements (Brésil, Colombie, Pérou).

On estime qu'en 2025 et en se basant sur les prévisions de croissance démographique, les populations se partageront 70% des ressources accessibles et pourraient même utiliser plus de 90% de toutes les ressources en eau douce disponibles d'ici 2030 (Talbi et Souak, 2016).

2-2-Les ressources en eau en Algérie

La question de l'eau est d'une importance primordiale pour l'Algérie, pays où l'eau est très rare avec des ressources limitées d'ailleurs comme pour tout pays situé aux confins de la zone aride voire même à l'intérieure (Dekhil, 1991).

L'Algérie est au cœur d'une des régions du monde les plus déficitaires en eau appelées MENA (Middle East and North Africa). Elle se situe, à l'instar des 17 pays Africains touchés par le stress hydrique (Mouhouche et Guemraoui, 2004; PNUD, 2009; Nichane et Khelil, 2014).

C'est un pays du Nord du bassin Méditerranéen qui souffre de la pénurie de l'eau. Les écoulements en eau y sont caractérisés par une violence et une rapidité des crues avec une irrégularité saisonnière et interannuelle importantes (Kettab et *al*, 2008).

Elle fait partie de la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m³, elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998, elle dépassera légèrement le seuil de 400 m³ et ne sera que 430 m³ en 2020 (PNUD, 2009).

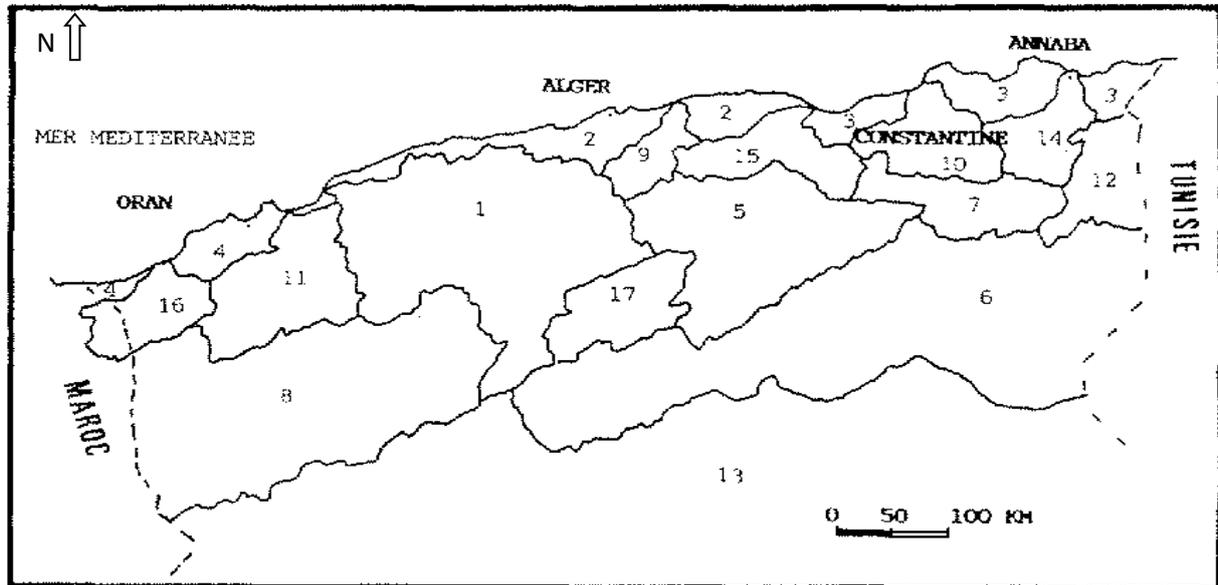
Selon les travaux de Benblidia et Thivet, 2010; Benmihoub et Bedrani, (2011), et à cause d'une très forte croissance de la demande en eau, l'Algérie atteindra la limite maximale de son potentiel hydrique avant 2050 donc elle est face à un grand défi d'approvisionnement en eau dans une situation où cette demande a quadruplé depuis 1970.

En Algérie, la notion de bassin versant rentre de plus en plus dans le langage courant des ingénieurs et des décideurs, car il s'agit tout simplement d'un pays à dominance semi-aride où l'eau est au cœur des préoccupations de la société et des pouvoirs publics (Oulhaci, 2016).

Il est à noter que le bassin est défini comme une entité topographique et hydrographique dans laquelle se produisent des entités d'eau (essentiellement sous forme de précipitations et partiellement des apports souterraines issus d'autres bassins) et où l'écoulement (transport de matériaux mobilisés par l'érosion) qui s'effectue selon un système de pentes et de drains

naturels en direction de l'exutoire ou l'embouchure du cours d'eau collecteur (Mebarki, 1982).

Kadi (1997), dans son étude sur la gestion de l'eau en Algérie donna une carte (**Fig. 1**) sur laquelle il précisa que l'Algérie se dispose de 17 bassins versants.



- | | | | |
|---|------------------------------|----|--------------|
| 1 | Chelif | 10 | Kebir Rhumel |
| 2 | Côtiens Algerois | 11 | Macta |
| 3 | Côtiens Constantinois | 12 | Medjerdah |
| 4 | Côtiens Oranais | 13 | Sahara |
| 5 | Chott Hodna | 14 | Seybouse |
| 6 | Chott Melrhir | 15 | Soummam |
| 7 | Hauts Plateaux Constantinois | 16 | Tafna |
| 8 | Hauts Plateaux Oranais | 17 | Zahrez |
| 9 | Isser | | |

Figure 1: Les bassins versants en Algérie (les chiffres représentent les bassins et leurs noms géographiques) (Kadi, 1997).

D'après PNUD (2009), l'Algérie est divisée en cinq bassins hydrographiques (regroupant 17 bassins versants). Mais les appellations se différencient de celles proposées par (Kadi, 1997). Ces 17 bassins sont présentés par Mozas et Ghosn, (2013) à la **figure 2**.



Figure 2: Les cinq bassins hydrographiques de l'Algérie (Mozas et Ghosn, 2013).

Les ressources en eau ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux de surface ou souterraines) (PNUD, 2009).

Ces ressources sont principalement:

- Des barrages (59 barrages répartie sur 5 bassins hydrographiques);
- De l'exploitation des eaux souterraines;
- Du dessalement de l'eau de mer (pratiqué dans 23 stations);
- Du recyclage des eaux usées épurées.

Tandis que l'ANRH, (2016), dans ces études confirme que c'est vrai que le pays est subdivisé en cinq bassins hydrographiques d'une superficie totale de 2.243.230 Km² mais ces bassins regroupent 19 bassins versants (pas 17 déjà mentionnées par PNUD, (2009). Et que les ressources en eau de surface renouvelables totales sont estimées à 13,2 Km³/an dans l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par sa superficie, ne renferme que 0,6 Km³.

On estime que, pour apport pluviométrique annuel total de 65.10^9 m^3 , le cycle de l'eau de l'ensemble des régions telliennes (zone comprise entre le versant Nord de l'Atlas Saharien et l'Atlas Tellien) se décompose ainsi en: un ruissellement de 15.10^9 m^3 (23,1%), une infiltration de 3.10^9 m^3 (4,6%) et une évaporation de 17.10^9 m^3 (72,3%) (Arrus, 1985).

Bien que les cours d'eau ne drainent que 7% de la surface du territoire (sans compter le Sahara et les hauts plateaux), ils représentent 92% du total des écoulements en Algérie. Et plus que 60% de la population vit dans cette partie septentrionale; siège de presque la quasi-totalité des activités agricoles et industrielles. Il se trouve aussi que près de $1,7 \text{ Km}^3/\text{an}$ sont des ressources renouvelables contenues dans les nappes du Nord du pays. Celles dernières sont essentiellement alimentées par des précipitations irrégulières dans l'espace et dans le temps (ANRH, 2016).

Aussi, les institutions des ressources hydriques et d'autres chercheurs confirment que le bilan des réserves exploitables était de l'ordre de $1256.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ en 1995, un volume de $0,849.10^9 \text{ m}^3$ a été soutiré et qu'il était prévu d'accroître ce volume de 38% en 2010, soit 1180.10^9 m^3 (Benabdelli et al, 1995; Amroune, 2018).

Quand au Sud du pays, on trouve une estimation d'alimentation de $9,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2000, contre des sorties de l'ordre de $34,4 \text{ m}^3/\text{s}$ qui provient de la nappe du Continental Intercalaire (eau souterraine fossile très peu alimentée vu les conditions climatiques actuelles) et celle du Complexe Terminal (CT) qui couvre elle-même trois aquifères à importance variable avec une alimentation du CT est évaluée à $18,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2000, par contre ses sorties est de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (UNESCO, 2003).

D'après l'ANRH (2016), les statistiques ont montré aussi que les ressources en eau (souterraine et de surface) prélevées en 2000 sont estimées à $6074 \text{ millions m}^3$. Ceux dernier sont répartis en volume et en pourcentage comme suit:

*3938 millions de m^3 sont destinées pour l'irrigation (65 %).

*1335 millions de m^3 pour les usages domestiques (22 %) avec un volume rejeté de 600 millions de m^3 (eau usée domestique).

*801 millions de m^3 pour l'industrie (13 %) avec un volume rejeté de 20 millions de m^3 (eau usée industrielle) (ANRH, 2016).

3-L'irrigation et son importance

3-1-Définition de l'irrigation

L'irrigation est une opération d'apport artificiel d'eau à des cultures pour en augmenter la production. Une pluviométrie insuffisante ou une baisse de nappe en particulier dans les zones arides et semi arides aura comme résultat un déficit d'eau qui ne peut être résolue que par l'irrigation qui permettra un développement normal des cultures (EL-Aslouj *et al*, 2007).

Phocades, (2008), montra que pour certaines productions agricoles, on ajoute obligatoirement une fraction d'eau complémentaire à celle fournie par les précipitations naturelles; c'est ce qu'on appelle irrigation.

L'irrigation est considérablement développée au cours du 20^{ém} siècle, non seulement dans les pays arides et semi- arides, mais aussi dans les régions plus humides (Rieul et Ruelle, 2003).

3-2-L'irrigation dans le monde

D'après Zella et Smadhi (2006), il y a près de 4000 ans que Hammourabi (sixième roi et fondateur de la première dynastie de Babylone) déclarait que le développement et la continuité d'un peuple dépend de l'irrigation.

Selon les mêmes auteurs, l'assurance des surplus des productions agricoles qui renforcent la sécurité, la prospérité ainsi que la longévité socio-économique d'un peuple est très clairement corrélée avec la pratique de l'irrigation et sa maîtrise. Alors que la décadence et la désertification seront les résultats d'une irrigation mal maîtrisée.

La consommation d'eau agricole est très variable d'un pays à l'autre. Elle n'intéresse que 273 millions d'hectares dans le monde éparpillées très irrégulièrement sur tous les continents.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les pays qui irriguent le plus ne sont pas ceux des climats arides et semi-arides. Dans ces régions, en effet, il ne peut y avoir des cultures sans irrigation (Milos, 1971).

Comme il ne peut y avoir d'irrigation sans eau, les surfaces cultivées demeurent réduite en superficies; limitées par la faiblesse des ressources en eau, et là où elles sont disponibles. C'est le cas de nombreux pays comme l'Egypte où l'agriculture s'est développée sur les bords du Nil et aussi certains pays de l'Amérique latine tels que le Mexique.

Mais, à l'invers et dans les pays qui reçoivent des eaux de pluie suffisantes, la superficie des terres cultivées peut être vraiment importante surtout si le relief le permet. Bien que l'irrigation n'y soit pas indispensable, elle est néanmoins utilisée à fin d'avoir des cultures améliorées, diversifiées avec des récoltes de rendements de plus en plus élevés. Dans ce cas, même si

l'irrigation n'est pas systématique, elle peut être donc concéquente et c'est le cas de la Chine, l'Inde et Pakistan (Milos, 1971).

A l'échelle mondiale, les superficies cultivables sont estimées à 4,2 milliards d'hectares et 17% des 1,5 milliards de superficies cultivées (surface agricole utile SAU) donc l'équivalent de 264 millions d'hectares sont irriguées. Le détail par continents est illustré par (Tab. 1) (FAO, 2004).

Tableau 1: Potentialités en superficies totales, agricoles et irriguées.

Continents	Superficie Totale (Mha)	SAU (Mha)	% SAU/ ST	S. irriguée (Mha)	% S.irrig/ SAU	SAU S.drain (Mha)
Amérique	3 798,6	370,5	09,75	40,75	10,99	64,56
Asie	3 001,9	527,3	17,56	183,51	34,80	54,72
Europe	2 172,7	290,9	13,40	23,46	8,06	46,06
Afrique	2 199,4	172,6	07,84	11,93	6,91	3,88
Océanie	801,1	53,9	06,72	02,66	4,93	2,17
Monde	13425,4	1497,4	11,15	271,68	18,14	190
Algérie	238,2	8,2	03,44	0,56	6,83	

Source: (FAO, 2004).

Les chiffres mentionnés au tableau confirment les travaux de la CIID (Commission Internationale de l'irrigation et drainage), montrant que les deux continents les plus bénéficiaires du reseau hydrographique mondial sont l'Asie et l'Amérique; l'Asie et malgré qu'il englobe assez de terres drainées est plus irrigué que l'Amérique qui n'est irriguée qu'à 11%.

3-3-L'irrigation en Algérie

Durant ces dernières décennies, les études de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) ont montrées que le potentiel des terres irrigables atteint environ 850000 ha, soit 11% des terres arables (7.5 million d'ha) (Loucif, 2003).

L'agriculture irriguée occupe environ 11% des surfaces cultivées. Les superficies irriguées se subdivisent en grands périmètres irrigués (GPI) et en petite et moyenne hydraulique (PMH). Les GPI ont une superficie équipée de 215 000 ha environ dont 150 000 ha sont estimés irrigables à partir des eaux de surface régularisées par des grands barrages. La superficie irriguée en PMH était évaluée en 2007 à près de 907 000 ha et est constituée de périmètres de taille très variable dont l'alimentation en eau provient à 78% des eaux souterraines (forages, puits et sources) (PNUD, 2009).

3-4-Importance et avantages de l'irrigation

Tant qu'on ne saura pas faire pleuvoir ou et quand on veut, l'irrigation restera la seule solution pour la régularisation et l'augmentation des rendements dans bien des régions du monde. Car ce n'est plus uniquement un apport d'eau, c'est l'ensemble des actions de développement intégré des milieux agricoles et rurales, dans un but d'augmentation de la production ainsi que l'amélioration du niveau de vie de l'agriculteur tout en préservant le milieu notamment des terres agricoles (Plauchu, 2004).

L'irrigation a contribué à la révolution verte qui a eu pour conséquence un accroissement spectaculaire de la production agricole, et qui a permis d'éviter des famines catastrophiques, suite à une augmentation très importante de la population mondiale et particulièrement dans les pays du tiers monde (Benzaria, 2008).

L'irrigation bien maîtrisée est un rempart utilisé de longue date pour endiguer la sous alimentation et renforcer la sécurité alimentaire des sociétés et on cite comme preuve ou exemple le boom de la production agricole mondiale entre 1950 et 1970 qui doivent beaucoup à l'irrigation (FAO, 1975).

Dans son étude Dekhil, (1991) expliqua que l'irrigation est pratiquement obligatoire en deçà de l'isohyète 400 mm, c'ad, au Sud de l'Atlas Tellien et qu'elle est souhaitable pendant la saison sèche dans les régions mieux arrosées. Elle est indispensable à l'intensification et la diversification des systèmes de culture.

3-5-Inconvénients de l'irrigation

L'irrigation constitue le domaine majeur du volet quantitatif de l'eau en agriculture. Cependant, l'usage de cette ressource (eau) peut générer une dégradation du milieu naturel lorsque ce dernier subit des étiages déjà naturellement sévères (Colas-Belcour et *al*, 2015).

Quoi qu'il soit, pour irriguer les champs, il faut beaucoup de l'eau que l'on doit parfois chercher très loin. Au niveau mondial, le prélèvement et l'approvisionnement en eaux d'irrigation représente aujourd'hui environ 70% des prélèvements totaux, ce qui est énorme (Plauchu, 2004; Benzaria, 2008).

Mal conduite, elle peut être néfaste et avoir des conséquences dramatiques sur les sols surtout dans les régions au climat sec et chaud ou l'on irrigue toute l'année. En effet, si l'eau d'irrigation n'est pas drainée, elle stagne dans les champs, et s'évapore lentement, laissant en dépôt les sels dissous qu'elle contient. Cet excès de sels stérilise progressivement les terres qui doivent être abandonnées (Plauchu, 2004).

3-6-Propriétés des eaux d'irrigation

Quelle que soit l'origine de l'eau, il faut l'analyser afin de pouvoir apprécier sa qualité d'un point de vue utilitaire.

Pour l'arrosage, il faut aussi signaler qu'il est nécessaire de répéter cette analyse dans le temps et ceci est justifié par le fait que la composition de l'eau dépend des conditions climatiques. Donc, l'apport d'une quantité ou dose appropriée d'eau est loin d'être la seule pré-occupation, il faut également prendre en considération son origine que se soit du sol d'une part ou des sources, des nappes souterraines, des étangs, des lacs, des retenues collinaires ou rivières d'autre part (l'ANS, 1992).

D'après l'ANS (1992) toujours, la qualité d'une eau peut être jugée par rapport à 3 types de paramètres:

- ❖ Les paramètres organoleptiques (il s'agit principalement de la saveur, l'odeur, la couleur et la transparence de l'eau).
- ❖ Les paramètres microbiologiques (avec des analyses microbiologiques qui révèlent la contamination de l'eau par des microorganismes tels que les bactéries, les virus et les parasites).
- ❖ Les paramètres physico-chimiques (qui sont les plus importants à déterminer et analyser lorsqu'il s'agit de la qualité des eaux d'irrigation...).

3-6-1-Paramètres de caractérisation physico-chimique des eaux d'irrigation

D'après Olier et Poirée (1981), les qualités physiques et chimiques de l'eau sont à considérer en irrigation, toutes les eaux n'étant pas favorables aux plantes.

3-6-1-1-Température

La température de l'eau est un facteur qui entraîne d'importantes répercussions écologiques (Leynaud, 1968).

C'est un paramètre à mesurer in-situ (sur terrain). Et son influence n'est plus à démontrer que se soit pour les propriétés physiques (densité, viscosité et solubilité des gaz dans l'eau), chimique (dissociation et solubilisation des sels et gaz, certaines réactions chimiques et biochimiques...) et biologiques (croissance et développement des organismes vivants dans l'eau et particulièrement les microorganismes) (WHO, 1987, 1996; Zeghaba, 2018).

3-6-1-2-Conductivité électrique

Plusieurs chercheurs que parmi les-quels on cite Haddad et Ghoualem., (2014); Acharya et *al.*, (2018), ont montrer que l'importance primordiale de cette mesure (CE) réside dans le fait qu'elle nous donne une estimation de la minéralisation totale de notre eau .

Les facteurs qui ont une influence sur la CE sont le pH, la température, le degré d'ionisation des ions composant la solution, concentration, mobilité ainsi que leurs valences (Nouayti et *al.*, 2015).

Cette mesure nous informe sur la minéralisation de notre eau et indique sa concentration ionique et nous aide à apprécier la contenance en sels dissous. Elle dépend de la température, de la concentration et types d'ions présent (Hceflc, 2006).

Elle s'exprime en micro siemens par centimètre (Gaujour, 1995).

Dans son étude Lallemand, (1980), classa dans un tableau (**Tab. 2**) les eaux en fonction de leur salinité (en g/l et en micro mhos/cm) et dégagea 4 classes (eau faiblement saline, de salinité moyenne, de salinité forte et enfin des eaux à très forte salinité).

Il expliqua aussi que les eaux faiblement salines peuvent être utilisées pour irriguer la plupart des cultures sur pratiquement tous les sols. Quand la salinité croît, l'eau devient moins appropriée pour les plantes sensible au sel et pour l'utilisation sur le sol peu perméable. et enfin, les eaux à forte salinité ne peuvent être utilisées que pour les plantes très tolérantes au sel, avec des techniques d'aménagement particulier sur le sol perméable bien drainé (Lallemand, 1980).

Tableau 2: Classification des eaux en fonction de la teneur en sel (g/l) et de la conductivité électrique (micro mhos /cm)

Teneur en sel (g/l)	Conductivité électrique (micro ou mhos/cm)	Classes de salinité
<0.2	< 250	C1 Eau faiblement salin
0.2-0.5	250-750	C2 Salinité moyenne
0.5-1.5	750-225	C3 Salinité forte
1.5-3	> 225	C4 Très forte salinité

Source: (Lallemand, 1980).

Les plantes ne résistent plus à la salinité de la même manière, chaque espèce ou famille a un seuil de salinité à ne pas dépasser pour son développement naturelle. Un des exemples de classification des plantes en fonction de leur tolérance en sels, celui proposé par la (FAO, 2003) (**Tab.3**).

Tableau 3: Tolérance à la salinité de quelque plantes cultivées

	Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (dS/m)					
	<2	2-3	3-4	4-5	5-7	>7
Tolérance à la salinité de quelques plantes cultivées	Citrus, Pomme, Pêche, Fraise, Raisins, Pomme De terre, Carottes, Poivrons, Oignons, Haricot, Maïs	Figues, Olives, Brocoli, Tomate, Concombre, Cantaloup, Pastèques, Epinards, Luzerne	Sorgho, Arachide, Riz, Betteraves, Fétuque	Soja, trèfle, Artichauts	Carthame, blé, Betterave sucrière, Rye Gras, Orge des rats, Chiendent pied De poule, Sudax (sorgho Hybride)	Coton, orge, Agropyrum

Source: (FAO, 2003)

3-6-1-3- Totale des sels dissous (TDS)

Shib (2014), explique que la concentration (totale) des substances organiques ou inorganiques (cations et anions) dans l'eau décrit ce qu'on appelle total des sels dissous (TDS). Sa répartition ou classification est montrée clairement au **tableau n°4**.

Tableau 4: Classification de l'eau en fonction du TDS

TDS de l'eau analysée (mg/l ou ppm)	Classification
0-1000	Eau douce
1000-10000	Eau saumâtre
10000-3000	Eau salée
+30000	Eau hypersaline

3-6-1-4-Potentiel d'hydrogène

Le pH est une des caractéristiques fondamentales de l'eau. Sa valeur nous informe sur le caractère incrustant ou agressif de l'eau (en particulier induit par les carbonates) et pour l'éventuel établissement de l'état équilibré de la dissolution particulièrement.

Ainsi, la solubilité et la concentration des métaux au sein d'une eau sont contrôlées par la mesure du pH (Gendronneau, 2006).

Son influence sur la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation n'est plus à démontrer. Pour l'eau d'irrigation, il devrait se situer entre 5,5 et 6,5 et à ces valeurs la solubilité de la plupart des micro-éléments est optimale (Couture, 2006).

Abdelhamid (2016), résuma les gammes d'acidité d'une eau en fonction de son pH (**Tab.5**):

Tableau 5: Estimation de la qualité de l'eau selon le pH

pH	Qualité de l'eau
pH < 5	Acidité forte
pH = 7	Neutralité (eau pure)
7 < pH < 8	Neutralité rapprochée (eau de surface)
pH > 8	Alcalinité, évaporation intense

Source: (Abdelhamid, 2016).

3-6-1-5-Matières en suspension

Les matières en suspension (MES), constituent l'ensemble des particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée. Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux usées ou les eaux pluviales (très riches en MES), d'êtres vivants planctoniques (notamment les algues). Elles correspondent à la concentration en éléments non dissous. Sa présence dans l'eau favorise la réduction de la luminosité et abaisse la production biologique avec chute de l'oxygène dissous (C R E P A, 2007).

3-6-1-6-Dureté totale

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations des cations alcalino-terreux (sels de calcium et de magnésium). Elle s'exprime en quantité équivalente de carbonate de calcium (Cardot et Gilles, 2013; Mahamat et al, 2015).

Qureshimatva et al., (2015), confirment aussi que la dureté totale ou appelée parfois titre hydrométrique d'une eau est un paramètre relié à la somme des concentrations des cations métalliques excepté celle des métaux alcalin (Na^+ , K^+) et aussi H^+ , cependant elle est le plus souvent causées par Ca^{++} et Mg^{++} .

Selon Cardot et Gilles (2013), il existe plusieurs types de la dureté de l'eau:

***Dureté totale ou titre hydrotimétrique totale THT**; c'est la somme des concentrations en ions Ca^{++} et Mg^{++} ;

***Dureté magnésienne (titre magnésienne)**, correspondant à la teneur en ions Mg^{++} ;

***Dureté calcique ou titre calcique (T Ca)** correspondant à la concentration en ions Ca^{++} ;

***Dureté permanente**, également appelée dureté de non-carbonates. Elle est due à la présence des sulfates, chlorures et nitrates de calcium et de magnésium, elle résiste également à l'action des savons, mais ne produit pas de d'incrustations car ses sels sont très solubles dans l'eau. Ne se décompose pas sous l'action de la chaleur.

La qualité chimique des eaux d'irrigation selon le titre hydrotimétrique (**TH**) est résumée dans le tableau qui suit (**Tab. 6**):

Tableau 6: Qualité des eaux d'irrigation suivant la dureté

Degré français °F	Dureté de l'eau
0 à 5	Très douce
5 à 12	Eau de faible dureté
12 à 25	Moyennement dure
25 et plus	Très dur

Source: (Mayet, 1994)

D'après Couture (2006), la dureté d'une eau est en relation étroite avec sa quantité ou richesse en Ca^{++} et Mg^{++} , qui se libèrent suite au processus d'altération de la roche mère et habituellement dans les eaux souterraines, sa richesse en Ca^{++} est plus importante que celle du Mg^{++} .

De point de vue agronomique, une eau plus ou moins dure a un effet bénéfique sur le sol et ses propriétés physiques; en particulier sa structure et stabilité structurale en raison de la présence du Ca^{++} .

Pour certains chercheurs, la dureté est un indicateur d'une éventuelle formation du calcaire car dans certaines conditions le Ca^{++} précipite en présence des carbonates.

3-6-1-7-Résidu sec

Le résidu sec correspond à la teneur de matières dissoutes et en suspension (matières solides) d'une eau, elle est considérée comme indice représentatif de la minéralisation de cette eau (Potelon et Zysman., 1989; Rodier et al, 2009).

La détermination du résidu sec permet aussi d'en déduire le degré de salinité des eaux comme présenté dans le tableau (**Tab. 7**) suivant:

Tableau 7: Classification des eaux en fonction des résidus sec

Teneur en résidu sec	Qualité de l'eau
<1.5	Bonne
1.5-3	Moyenne
3-5	Ne convient pas pour certaines cultures
>5	Saumâtre

Source: (Ben Amor, 1992)

3-6-1-8-Alcalinité (TA- TAC)

Rodier et *al* (2009), expliquent que l'alcalinité est l'inverse de l'acidité; pour l'eau elle correspond à la présence de bases et des sels d'acides faibles. Et dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus souvent de la présence d'hydrogencarbonates, de carbonates et des hydroxydes.

On distingue comme pour la mesure de l'acidité, deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

Le TA correspond à la somme des concentrations des ions carbonates (CO_3^{2-}) et des ions hydroxydes (OH^-).

Le titre alcalimétrique complet (TAC): correspond à la somme:

$$\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + 2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}_3\text{O}^+]$$

L'unité utilisée est le degré français ($1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg/L de CaCO}_3 = 0,2 \text{ milliéquivalent/l}$).

3-6-1-9-Nitrates

Parmi les différentes formes de l'azote, les nitrates appelés aussi azote nitrique sont les plus présents dans les eaux naturelles. C'est la composante principale de l'azote inorganique (Rodier et *al*, 2009)

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote, et représentent la forme d'azote au degré d'oxydation le plus élevé dans l'eau. Toutefois, la teneur en nitrates dans l'eau des puits est aussi liée à l'apport des engrais ainsi que la pollution (Heriarivony et *al*, 2015).

3-6-1-10-Nitrites

Pour Rodier et *al*, (2009), les nitrites sont les sels de l'acide nitreux. L'acide nitreux est un acide instable de formule HNO_2 ; la formule de l'ion nitrite est NO_2^- . Sa teneur est assez variable d'une eau à l'autre (selon son origine).

3-6-1-11-Chlorure

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables (Pettyjhon, 1971; Nouayti et *al.*, 2015).

A partir d'une valeur de 250mg/l, les chlorures donnent à l'eau une saveur désagréable en particulier lors de sa richesse en Na Cl (Rodier et *al.*, 2005)

3-6-1-12-Carbonates (CO₃²⁻)

On ne trouve les carbonates que dans les eaux (solutions) qui présentent des pH supérieurs à 8.3. On peut également déduire ses valeurs en fonction des valeurs du TA et TAC (**Tab. 8**).

3-6-1-13-Bicarbonates (HCO₃⁻)

Selon Abdelhamid, (2016), les bicarbonates proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂) selon l'équation suivante:



D'après Rodier et *al.*, (2009), la déduction des valeurs approximatives des carbonates et bicarbonates d'une eau s'opère aussi à partir des valeurs de TA et TAC trouvées (**Tab. 8**):

Tableau 8: Valeurs des carbonates et bicarbonates en fonction des valeurs du TA et TAC dans l'eau.

Espèce carbonatées	Valeurs respectives du TA et TAC		
	Si TA= 0	Si TA< TAC/2	Si TA= 2 TAC
Carbonates (CO ₃ ²⁻)	0	2TA	TAC
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	TAC	TAC-2TA	0

Source: (Rodier et *al.*, 2009)

3-6-1-14-Sulfates (SO₄²⁻)

Issu naturellement de la décomposition et dégradation de certains minéraux (en particulier le gypse contenu dans les marnes genschériennes et au lessivage des dépôts évaporitiques), et résulte de la combinaison du soufre à l'oxygène pour donner l'ion sulfate (Kemmer., 1984; Derwiche et *al.*, 2010; Nouayti et *al.*, 2015).

Il se forme aussi suivant la réaction chimique suivante:



Gouaidia, (2008), explique aussi que la teneur de sulfate excessif peut provoquer une précipitation de sulfate de calcium (gypse).

Les recherches ont montré que dans les eaux naturelles on trouve les sulfates avec des concentrations très variables (d'une zone à l'autre). Ces valeurs passent de 30 à 50mg/l et peuvent atteindre et même dépasser 300mg/l dans les zones contenant le gypse et/ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé (Rodier et *al.*, 2009).

Il est à noter que la plupart des plantes sont tolérantes au sulfates et d'ordre général son dosage ou sa détermination a beaucoup plus l'objectif de prévenir sa carence (48 ppm de sulfates) que de se protéger de sa toxicité (Couture, 2004).

Dans certains cas, il s'avère plus facile d'identifier la richesse d'une eau en sulfure d'hydrogène (par dégagement d'odeur qui ressemble à celle de l'œuf pourri) que de faire des analyses.

3-6-1-15-Calcium

Selon Abdelhamid (2016), plusieurs chercheurs ont prouvé que le calcium est un élément principal de la dureté de l'eau, c'est un métal alcalino terreux extrêmement répandu dans la nature et particulièrement dans les roches calcaires lié au carbonates (dans les roches sédimentaires; calcite, dolomie et aragonite). Comme il peut faire partir aussi de quelques minéraux évaporitiques; à savoir le gypse et l'anhydrite et dans certains minéraux argileux qu'on cite la montmorillonite.

Bouchelaghem et *al.*, (2014), confirment aussi que le calcium est un élément qui varie comme le Magnésium et leur concentration dans l'eau dépend principalement du substrat géologique traversé.

3-6-1-16-Magnésium

Le magnésium est comme les autres éléments précités, est indispensables à toute vie. Se libère naturellement de la dissolution des roches magnésites basaltes et argiles. Sa dureté représente ordinairement le tiers de la dureté totale de l'eau (Kemmer, 1984).

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées et traversées, que se soit des calcaires dolomitiques, dolomies du Jurassique ou même du Trias moyen. Les valeurs les plus faibles sont relevées dans la plupart des eaux des massifs anciens (Rodier et *al.*, 2009).

Il résulte de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates (Nouayti et *al.*, 2015).

3-6-1-17-Potassium

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium. Le potassium se rencontre sous forme de chlorures doubles dans de nombreux minerais tels que la corrollite et la sylvinite. On le trouve également dans les cendres des végétaux sous forme de carbonate. Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. En agriculture, il est utilisé comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium, ou encore de nitrate de potassium (Nouayti et *al.*, 2015)

C'est un métal alcalin tellement lié au sodium, qu'il est rarement analysé seul lors des analyses effectuées à l'eau. La différence entre les deux éléments est que le potassium est beaucoup moins répandu dans la nature (Kemmer, 1984).

3-6-1-18-Sodium

Cet élément est très abondant (environ 26g/kg de la croûte terrestre soit 2,8%), ne se rencontre pas naturellement à l'état natif mais toujours associé à d'autres éléments chimiques (Chlorures, Sulfates....). Le principal minéral contenant le sodium est le sel gemme (Chlorures de sodium). Des teneurs anormalement élevées peuvent provenir de la percolation ou du lessivage des terrains salés ainsi que de l'effet de la salinité marine (Abdelhamid, 2016).

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (SAR). Celui dernière décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation. Le SAR est calculé comme suit:

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2]^{1/2};$$

(Le sodium, le calcium, et le magnésium sont exprimé en meq/l) (Couture, 2006).

3-7-Les problèmes liés à la qualité des eaux d'irrigation

Ils existent plusieurs paramètres physiques et chimiques de l'eau qui sont considérés comme limitants pour l'irrigation. D'après les directives de l'FAO, (1976 et 1985), on les classe par ordre d'importance dégressif comme suit : les chlorures et la CE, le SAR, puis le pH. Mais ils existent d'autres, qu'on cite:

3-7-1-Risques liés à la composition ionique des eaux d'irrigation

3-7-1-1-Risques liés au sodium

La toxicité due au sodium n'est pas aussi facilement identifiable que celle relative au chlore, mais certains cas ont permis de mettre en évidence très clairement des concentrations excessives de sodium dans l'eau (Na^+ ou SAR élevé).

Les symptômes caractéristiques sont la brûlure foliaire, et la nécrose des tissus situés sur le bord des feuilles. Une teneur en sodium dans le tissu foliaire supérieure à 0.25-0.50 % (sur la base du poids sec) est souvent en arboriculture d'une toxicité par le sodium (Abdelhamid, 2016).

3-7-1-2-Risques liés aux bicarbonates

La présence de bicarbonates (HCO_3^-) dans les eaux d'irrigation à un taux élevé peut entraîner la précipitation du calcium et du magnésium dans le sol en augmentant le SAR et on introduit le terme "carbonate de sodium résiduel" (Na HCO_3) $\text{RSC} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$ en meq/l. On estime qu'une eau contenant plus de 2.5 meq/l de RSC ne convient pas à l'irrigation, de 1.5 à 2.5 meq/l, elle sera considérée comme marginale, et avec moins de 1,5 meq/l l'eau est probablement sécuritaire (Nancy, 1997; Abdelhamid, 2016).

Il est à noter aussi que l'effet indésirable de la richesse des eaux en bicarbonates est beaucoup plus remarquable lorsqu'il s'agit de l'irrigation par aspersion.

3-7-1-3-Risques liés aux chlorures

La toxicité la plus courante provient du chlorure présent dans l'eau d'irrigation. Le chlore n'est pas absorbé ni retenu par les sols, il se déplace donc facilement avec l'eau du sol, il n'est pas prélevé par la plante, circule avec le courant de la transpiration et s'accumule dans les feuilles. Des symptômes de toxicité apparaissent comme la brûlure des feuilles ou dessèchement des tissus foliaires, lorsque la concentration dans les feuilles excède le niveau des tolérances en cultures (Nancy, 1997).

3-7-1-4-Risque liés au bore

Parmi les oligo-éléments, le bore est particulièrement intéressant pour la classification des eaux d'irrigation, il provient des lessives et des rejets industriels à des concentrations très faibles, le bore est indispensable à la croissance des végétaux mais lorsque sa concentration excède 1mg/l, il peut être toxique pour les plantes les plus sensibles de plus le bore a tendance à s'accumuler dans le sol en formant des complexes chimiques qui sont difficiles à lessiver (Nancy, 1997).

3-7-2-Risque de colmatage des réseaux d'irrigation

Le colmatage d'un réseau d'irrigation est le bouchage provoqué par précipitation des sels minéraux qui n'apparaît pas brutalement mais suit à une succession des campagnes d'irrigation. Ces précipitations sont dans la plupart du temps dus aux carbonates de calcium.

D'après Chossat, (2005), la mise à l'air libre des eaux riches en gaz carbonique et en calcium provoque au niveau des sorties des distributeurs le dégazage du CO_2 et le dépôt localisé de CaCO_2 (c'est le même phénomène qui se produit dans les sources dites pétifiantes). On trouve également des précipités de fer sous forme ferrique (de couleur brune rouge) et plus rarement des précipités de sulfates.

3-8-Classification des eaux d'irrigation

Toutes les eaux naturelles utilisées pour l'irrigation contiennent des sels minéraux en solution, provenant des roches ou des matières solides à travers lesquelles elles sont filtrées. Les matières dissoutes les plus communes sont les chlorures, les sulfates, les bicarbonates de (Ca^{++} et Mg^{++}) et de Na^+ . La concentration de ces éléments détermine l'aptitude de ces eaux à irrigation.

Plusieurs caractéristiques chimiques conditionnent le choix de la qualité des eaux d'irrigation, mais les plus importants à prendre en considération sont: la teneur totale en sels, la composition ionique et la présence d'oligoéléments.

Comme on a déjà expliqué, les principaux sels responsables de la salinité d'eau sont ceux de Ca^{++} , Cl^- , Mg^{++} , SO_4^{--} et HCO_3^- . Avec concentrations élevées les plantes et les cultures sont sujettes aux problèmes de brûlures.

Le risque de salinité peut être apprécié en se basant sur la teneur totale en sels, exprimée en mg/l ou d'après la conductivité électrique (CE) en millisiemens /centimètre (mS/cm). Il existe à cet égard plusieurs classifications.

Parmi ces classifications on distingue celle basée sur la salinité de l'eau représentée par la conductivité électrique, et sur le degré d'alcalinité du sol exprimée par le SAR (sodium absorption ratio) (Durand, 1970).

3-8-1-Classification basée sur la conductivité électrique (CE)

CE $25^\circ\text{C} < 250 \mu\text{mhos/cm}$; eaux non salines.

$250 < \text{CE } 25^\circ\text{C} < 570 \mu\text{mhos/cm}$; eaux à salinité moyenne.

$570 < \text{CE } 25^\circ\text{C} < 2250 \mu\text{mhos/cm}$; eaux à forte salinité.

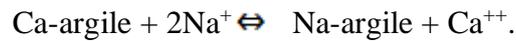
$2250 < \text{CE } 25^\circ\text{C} < 5000 \mu\text{mhos/cm}$; eaux à très forte salinité.

$5000 < \text{CE } 25^\circ\text{C} < 20000 \mu\text{mhos/cm}$ eaux à salinité excessive

En tenant compte de la tolérance du palmier dattier et de la concentration que subit l'eau d'irrigation dans le sable en climat aride, une limite de 20000 $\mu\text{mhos/cm}$ a été retenue. Donc les eaux à conductivité électrique (à 25°C) dépassant 20000 $\mu\text{mhos/cm}$ sont considérées comme inutilisables pour l'irrigation. Mais il est à mentionner aussi que la qualité d'une eau destinée à l'irrigation ne peut être établie qu'en prenant en considération le type de sol à irriguer ainsi que la culture à pratiquer ou à installer (Durand, 1970).

3-8-2-Classification basée sur l'alcalinité

Il peut y avoir un échange d'ions adsorbés sur les particules argileuses dans les conditions où l'eau utilisée en irrigation présente un rapport sodium/calcium élevé:



Dans le cas où on irrigue avec une eau riche en sodium, celui dernier va agir sur la perméabilité du sol en la diminuant après avoir colmaté ces pores. Cela est dû au fait que les ions sodium sont plus hydratés que ceux de calcium.

Ce risque peut être apprécié par ce qu'on appelle, le coefficient d'absorption du sodium (CAS et en anglais c'est le SAR sodium absorption ratio) qui est défini par:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}}$$

Sachant que les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre (meq/l) (Rieu et *a.l.*, 1992).

Les risques de salinisation et d'alcalinisation ne sont pas indépendants, ce dernier est d'autant plus grand que la salinité est importante.

A partir **du SAR**, on distingue l'existence de trois zones, représentée par les équations suivantes:

Courbe supérieure SAR = 43.75 – 8.87 log C.

Courbe moyenne SAR = 31.31 - 8.87 log C.

Courbe inférieure SAR = 18.87 – 8.87 log C.

Avec une conductivité indiquée en $\mu\text{mhos/cm}$ à 25°C (Boulaine, 1972).

Les quatre classes d'eaux d'irrigations ainsi déterminées sont:

S1: eaux faiblement sodiques, utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols.

S2: eaux moyennement sodiques, présentent un danger d'alcalinisation du sol appréciable dans les sols à texture fine surtout dans les conditions de faible lessivage à moins que le sol contienne du gypse. Cette eau est utilisable dans les sols à texture grossière ou les sols organiques très perméables.

S3: eau fortement sodiques, peuvent provoquer l'apparition de teneurs en Na^+ échangeable dangereuses dans la plupart des sels et exigent un aménagement spécial du sol (bon drainage, fort lessivage, addition de matière organiques, des amendements chimiques peuvent être nécessaires).

S4: eaux très fortement sodiques, généralement inutilisables pour l'irrigation, sauf si leur salinité est faible ou moyenne, ou si la solution de calcium du sol ou l'addition de Ca^{++} soluble peut les rendre utilisable.

3-8-3-Classification de DURAND pour l'Afrique du Nord

Durand, (1984), a proposé une classification pour l'Afrique du Nord; basée sur la limite supérieure tolérée de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation exprimée en mmhos/cm pour trois groupes de la végétation et cinq groupes de sol, en supposant que les conditions d'irrigation et de drainage sont bonnes.

On retourne encore une fois à l'idée qu'on doit prendre en considération plusieurs facteurs ou paramètres à fin d'y arriver à une vraie classification de la qualité des eaux destinées à l'irrigation; il s'agit en plus de la teneur en sels de notre eau, du type de sol et des cultures.

Il existe une autre classification; c'est celle proposée par Salinitylaboratory des Etats-Unis.

3-8-4-Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation selon la FAO

Les directives pour l'évaluation de la qualité d'une eau d'irrigation mettent l'accent sur l'influence à long terme de la qualité de ces eaux sur la production des cultures, les conditions du sol et les techniques culturales. Normalement, on n'a jamais constaté de problèmes de sol ou de culture pour les valeurs qu'on juge qu'elles ne présentent aucune restriction pour l'irrigation.

Quand on trouve un degré de restriction dans l'intervalle léger à modéré; et si on veut y arriver à de bons rendements, on accorde une attention à la sélection des cultures ainsi que les techniques culturales alternatives.

Si on trouve une valeur égale ou supérieure au niveau de restriction sévère, on doit forcément s'attendre à une multitude des problèmes qui vont toucher le sol et les cultures (même avec utilisation des techniques appropriées à la réduction des effets néfastes de la salinité de l'eau). Dans ce cas, un niveau de compétences est essentiel pour seulement une réalisation d'une production acceptable.

Il est aussi recommandé de conduire une série d'études pour la détermination des aspects économiques et des techniques culturales avant de commencer à utiliser une eau surtout dans des grands projets. Ces directives sont considérées comme la première étape de détection de toutes restrictions liées à une eau d'irrigation tout en trouvant des méthodes et solutions à

chacun des paramètres exerçant un effet néfaste sur le sol et la culture elle-même (Elgabalym, 1970).

Finallement, on peut dire que l'irrigation est pratiquée depuis l'antiquité pour stimuler voire doper la production agricole notamment dans les zones aride et semi-arides. Elle a dans ce sens une valeur inestimable, puisque elle crée la vie et la richesse. L'irrigation permet la culture des terres incultes, que l'extrême sécheresse a voué à la stérilité de nos jours, l'accroissement des besoins alimentaires renforce le recours à l'irrigation, reconnue comme un facteur avéré d'intensification de la production agricole, de plus en plus nécessaire, y compris dans les pays humides. En suivant ce long itinéraire, on se rend compte qu'elle est passée de la sécurité alimentaire et de la valeur ajoutée. C'est pourquoi, les frais d'installations et d'équipement d'une part et les frais d'autres parts doivent intervenir pour une large mesure dans le choix de la technique d'irrigation.

Lors du choix de la qualité des eaux d'irrigation, il est indispensable voir même primordiale de prêter une attention particulière aux propriétés physico-chimiques du sol puisqu'il constitue un des facteurs déterminants de l'aptitude de ces eaux d'irrigation. Il s'agit de la détermination et de la connaissance de la texture (qui donne une idée générale sur la perméabilité, la capacité d'échange cationique et d'autres propriétés de base d'un sol), l'état ionique du complexe adsorbant et enfin la possibilité du drainage.

Chapitre 2 :

Méthodologie de travail

La présentation du milieu naturel de la zone d'étude intéressera deux parties distinctes; le milieu physique et le milieu biotique.

1-Milieu physique

1-1-Situation et limites

Notre présente étude est menée dans la wilaya de M'Sila qui est située dans le Centre-Est du Nord d'Algérie dont le chef lieu de cette wilaya est éloignée de 248Km au Sud-Est de la capitale Alger. Elle fait partie des hautes plaines steppiques. La ville de M'Sila est surnommée la capitale du Hodna et occupe une position de carrefour des échanges entre le Nord et le Sud du pays.

Le travail est entrepris au Nord de Chott El Hodna (Fig.3) et plus exactement dans la plaine du Hodna au Nord du Chott et au niveau des piémonts Sud des Monts du Hodna dont la nomination est le "Djerr" (Hadjab, 1988).

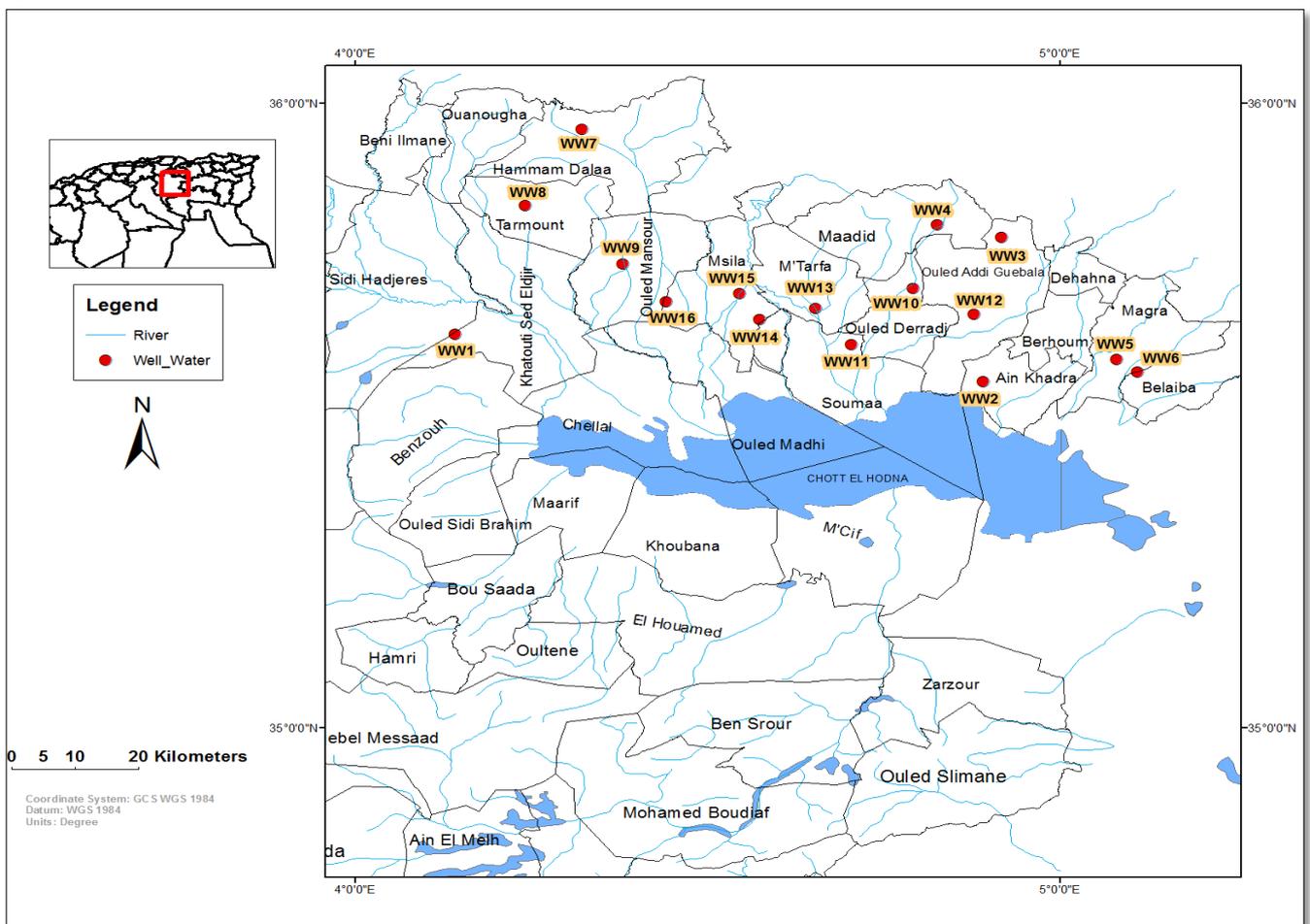


Figure 3: Situation géographique de la zone d'étude (M'Sila) (original).

La prospection du terrain nous a mené à des points d'eau (**forages**) d'eau (objets de notre étude) destinés à l'irrigation des terres agricoles dans les communes suivantes (selon leur situation dans la zone d'étude d'Ouest en Est): Khatouti Sed El Djir, Tarmount, Hammam Dalaa, Ouled Mansour, M'Sila, M'Tarfa, Maadid, Ouled Derradj, Souamaa, Ouled Addi Guebala, Ain Khadra et Magra.

1-1-1-Les limites administratives

La zone d'étude présente les limites suivantes

- Au Nord les wilayas de Bordj Bou Arréridj et Sétif.
- Au Sud les communes de Benzouh, Chellal, Ouled Madhi, M'Cif et la wilaya de Batna.
- A l'Est les communes de Dehahna, Berhoum, Bélaïba et les wilayas de Sétif et Batna.
- A l'Ouest les communes d'Ouanougha, Sidi Hadjres et Benzouh.

1-1-2-Les limites géographiques

- Au Nord la chaîne des Bibans et les monts du Hodna d'altitude comprise entre plus de 1200 mètres et au delà de 1800 mètres.
- Au Sud Chott El Hodna qui occupe le centre de la plaine du Hodna.
- A l'Est le prolongement du Djerr.
- A l'Ouest la zone steppique occidentale.

1-2-Coordonnées géographiques

La zone d'étude au Nord-Ouest de la wilaya de M'Sila (**Fig. 4**) et présente les coordonnées géographiques suivantes:

- Altitude : 432,00 à 1036,00 mètres.
- Latitude : 35,554750° N à 35,958278° N.

- Longitude : 4,141667° E à 5,110000° E.

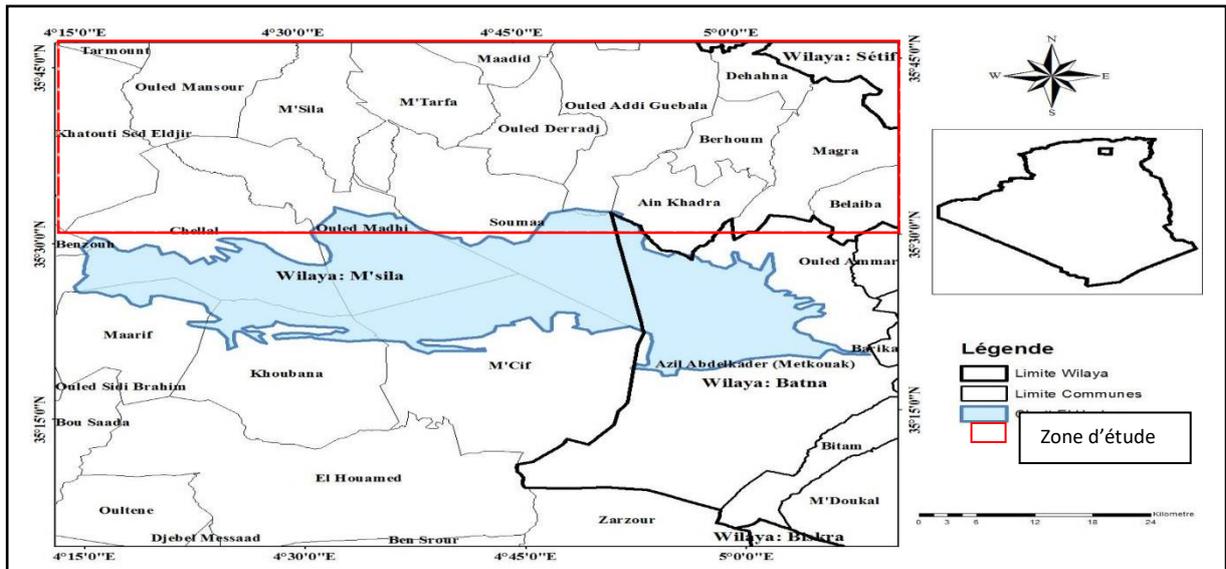


Figure 4: Situation de la zone d'étude par rapport aux communes de la wilaya de M'Sila (Source: HCDS 2010 modifiée)

1-3-Géologie de la région d'étude

Les recherches géologiques sur la zone du Hodna dont notre zone d'étude fait partie (Despois, 1953; Kieken 1962, 1970; Guiraud 1970,1973; Le Houerou et *al*, 1975; Julian et Nicod, 1977) indiquent qu'elle est très complexe.

L'Atlas Saharien et l'Atlas tellien, après leur choc frontal au niveau des Aurès, ont engendré une cuvette au début du Miocène. Cette cuvette a été remplis par des cours d'eau à la fin du Miocène et même pendant le Quaternaire. Les séries des formations géologiques de la zone du Hodna sont plus ou moins complètes (à l'exception au domaine atlasique du Miocène inférieur absent, du Miocène supérieur et une partie du Pliocène basal à la chaîne tellienne (Amroune, 2018).

On résume ces formations géologiques comme suit:

I-3-1-Les formations du Primaire

Dans la région d'étude, on ne trouve plus de formations paléozoïques.

1-3-2-Les formations du Secondaire

1-3-2-1-Le Trias

Formation géologique composée principalement des argiles gypsifères avec un niveau bariolé mince. Sous les alluvions et au niveau des failles sont empruntées du crétaé inférieur des

blocs des dolomies. Elle comprend successivement de haut en bas des formations calcairo-dolomiques, évaporitiques et gréseuses (Guiraud, 1970).

1-3-2-2-Le Jurassique

Formé essentiellement de calcaire et de dolomie, couvrant des vastes surfaces de la région du Hodna et sont développés principalement au Nord de M'Sila.

Toujours selon les recherches de Guiraud (1970), on trouve les Lias (Jurassique inférieur, formé d'une quinzaine de mètres des calcaires dolomitiques saccharoïdes surmontés de 40 mètres des calcaires sub-lithographiques), Dogger (Jurassique moyen, succession de marne et de calcaire à silex et aussi des bancs de calcaire à silex, surmonté de 30 à 25 mètres des calcaires gris bleutés siliceux et enfin on trouve la formation des dalles de calcaire à filaments ainsi que des calcaires bleutés) et aussi Malm (Jurassique supérieur, avec 350 à 550 mètres des calcaires gris bleutés ainsi que des calcaires marneux en alternance avec les marnes grises).

1-3-2-3-Le Crétacé

Cette formation géologique est subdivisée selon les géologues et en particulier par Guiraud (1970) en deux types: Crétacé inférieur et Crétacé supérieur;

Le Crétacé inférieur qui présente des calcaires sub-lithographiques beiges surmontés par des Berriasien (marnes grises en alternance avec des calcaires), des Aptiens et Barrémiens (calcaires dolomités avec des grés), des Hauteriviens (grés friables et des claires gréseux avec aussi des dolomies).

Alors que le Crétacé supérieur est représenté par le Cénomaniens (constitué d'une centaine de mètres et parfois plus des calcaires dolomités), le Turonien qui est une formation calcaire plus ou moins dolomitée qui repose généralement sur des dolomies noirs ou grises avec une base calcaire-dolomitique et enfin le Sénonien appelé aussi Maestrichtien (des calcaires à des niveaux dolomitiques séparés par des calcaires marneux et des marnes).

1-3-3-Le Tertiaire

Sur le plan méridional des monts du Hodna, on trouve des affleurements plus ou moins parallèles, qui plongent vers le centre de la plaine de M'Sila (Plaine du Hodna).

Constitué d'Eocène (qui commence par une quinzaine de mètres des calcaires à petits lits

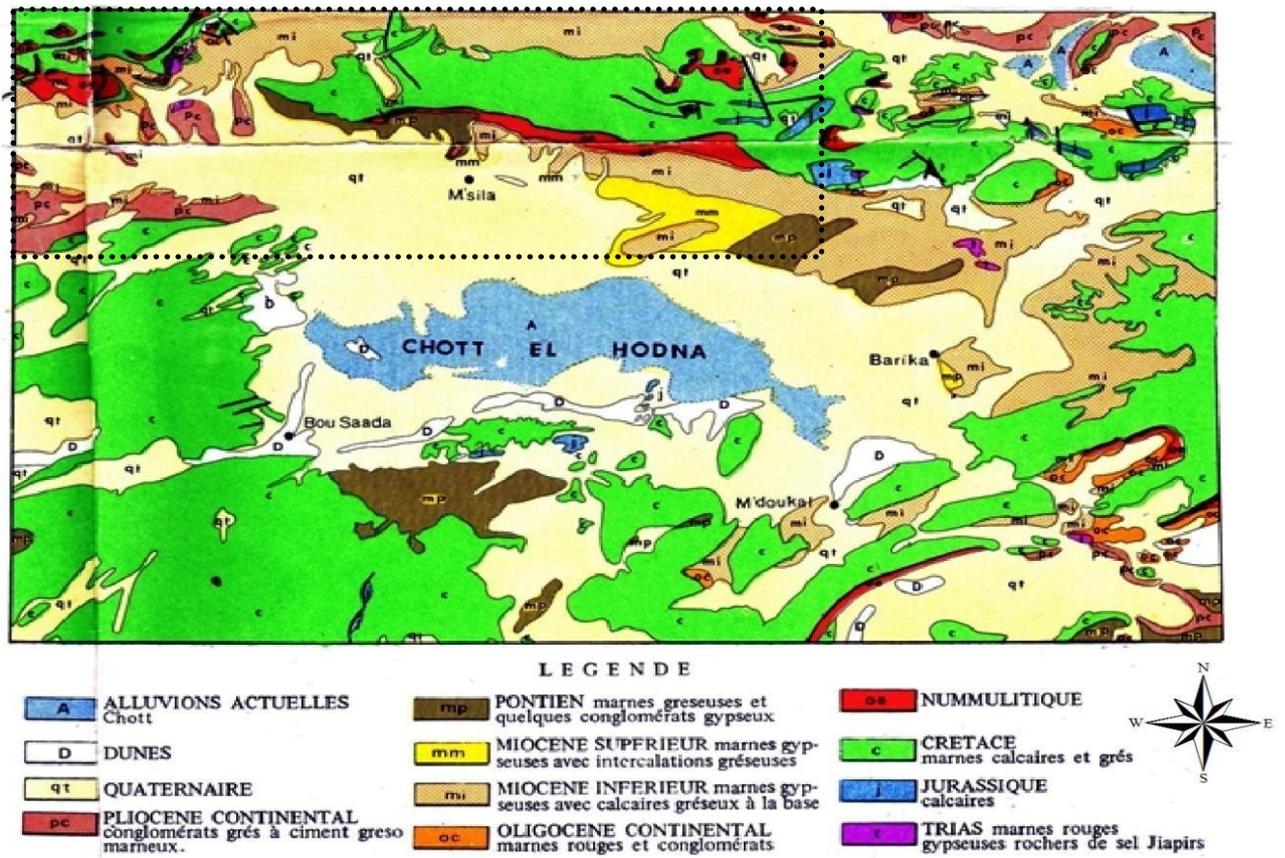
de silex, puis une vingtaine de mètres des calcaires argileux et des marnes indurés arrivant à la fin à une soixantaine de mètres des calcaires noirs), des Oligocènes autochtones (série décimétrique grés-argileuse), des Oligocènes allochtones (des marnes brunes calcaires), Miocène (formé des marnes grises à lame de grés fossilifère et de conglomérats et de des marnes rouges gréseuses, une alternance de grés et de marnes grossiers au dessus du conglomérat avec une épaisseur d'une dizaine de mètres, enfin des séries de grés et de marnes en lentilles ou en bans et bancs gréseux et marnes avec des grés surmontés des niveaux conglomératiques et sans oublier les formations des conglomérats et grés. Le Pliocène inférieur (qui est une barre grés-conglomératique de quelques dizaines de mètres) et le Pliocène supérieur (qui débute sur un substratum ne présentant aucune trace de ravinements et au niveau de la plaine de M'Sila) est représenté par des niveaux irréguliers de conglomérats alternant avec des grés et des marnes sableux.

1-3-4-Le Quaternaire

Il est d'origine continental et ses formations sont souvent protégées par des croûtes calcaro-gypseuses. Il est formé de Quaternaire ancien caractérisé par un ciment rosâtre très résistant liant des conglomérats et des sables du Pliocène supérieur, le Quaternaire moyen représenté par des glacis de piémont constitué d'une alternance des couches irrégulières de cailloutis de colluvion et de blocailles avec une importance du calcaire qui augmente de bas en haut et enfin le Quaternaire récent qui constitue essentiellement la plaine du Hodna avec un recouvrement d'épaisseur réduite en amont de Chott El Hodna et un maximum d'épaisseur au Sud (Amroune, 2018).

Comme résumé et en se basant sur la carte géologique représentée dans la (**Fig. 5**), on trouve que plus précisément dans des formations Miocènes (supérieurs et inférieur), Crétacé et Pontien avec comme constituants communs :

Calcaire, marne, marne gypseux et grés.



Zone d'étude : [dashed box]

Figure 5: La géologie du Hodna au 1/500.000, 1952 adaptée (Le Houerou et al., 1975).

1-4-Géomorphologie et altitude de la région d'étude

1-4-1-Géomorphologie de la zone d'étude

Du point de vue géomorphologique, la zone du Hodna est connue par quatre formations : La plaine, le glacis (piedmont), les montagnes et Chott El Hodna.

1-4-1-1-La plaine

C'est l'unité structurale la plus dominante. Elle couvre presque 2/3 de la superficie totale et s'étale du Nord jusqu'à la Sebkhha du Chott, avec une altitude comprise entre 400 et 500 mètres. Limitée par les glacis au Nord « Le Djerr » et à l'Est et la courbe de niveau 400 mètres a marqué son passage (plaine) au Chott d'où une pente de 0.55% (Despois, 1953; Sari et Capolini, 1975).

1-4-1-2-Le glacis (piedmont)

C'est un ensemble des collines de formes variées. Elle représente une zone de transition entre la plaine et la montagne. Elle prolifère d'Ouest en Est aux pieds de montagnes du versant Nord entre les côtes 500 mètres et 700 mètres.

1-4-1-3-Les montagnes

C'est un ensemble des montagnes, constituant une barrière orientée Est Ouest entre le Nord et le Sud, avec des altitudes comprises entre plus de 1200 et moins de 2000 mètres, que parmi lesquelles on cite Djebel Maadid (1865 mètres), Djebel Bou-Taleb (1890 mètres). Pour les monts autour de Hammam Dalaa, relativement moins élevés, on cite à titre d'exemple Djebel Chedoug 1240 mètres (Bounab, 2020).

1-4-1-4-Chott El Hodna

C'est l'un d'un ensemble de Chotts qui se sont développés là où convergent les eaux issues des Atlas Saharien au Sud et Tellien au Nord (Sari et Capolini, 1975; Hadjab, 1998).

Zedam (2015) rapporte que : « Chott El Hodna sépare la plaine du Hodna proprement dite de la région saharienne, c'est une dépression présentant deux zones distinctes: une zone centrale ou sebkha et une zone périphérique ou chott ». Chott El Hodna est un lac salé athalassique, c'est à dire sans connexion actuelle avec la mer (Hammer, 1986 in Binet et Aymonin, 1987). Et riche en Ca^{++} et Mg^{++} (Kerambrun, 1985; L'Haridon, 2017).

Chott El Hodna présente une forme elliptique (large dépression), qui s'étend sur 77 km de long avec une largeur de 19 km, alimentée par plus de 22 principaux cours d'eau avec parfois quelques sources d'eau douce. Son altitude moyenne avoisine les 400 mètres et le point bas est d'environ 392 mètres (Sari et Capolini, 1975). Il s'assèche en été et se ré-inonde en hiver. En été, par l'évaporation intense, sa surface se couvre de sel et présente des efflorescences pulvérulentes salines (Géhuét *al*, 1993). Ces propriétés lui attribuent une halomorphie décelable et une hydromorphie provisoire affectant les deux milieux présents: Chott et Sebkha (Kaabèche et *al*, 1995).

1-4-2-Altitude de la zone d'étude

En se basant sur les informations évoquées plus haut, déjà présentées dans l'explication de la géomorphologie du Hodna dont notre zone d'étude fait partie, on remarque que les altitudes dans la wilaya de M'Sila sont comprises entre plus de 350 mètres et moins de 2000 mètres (Fig. 6).

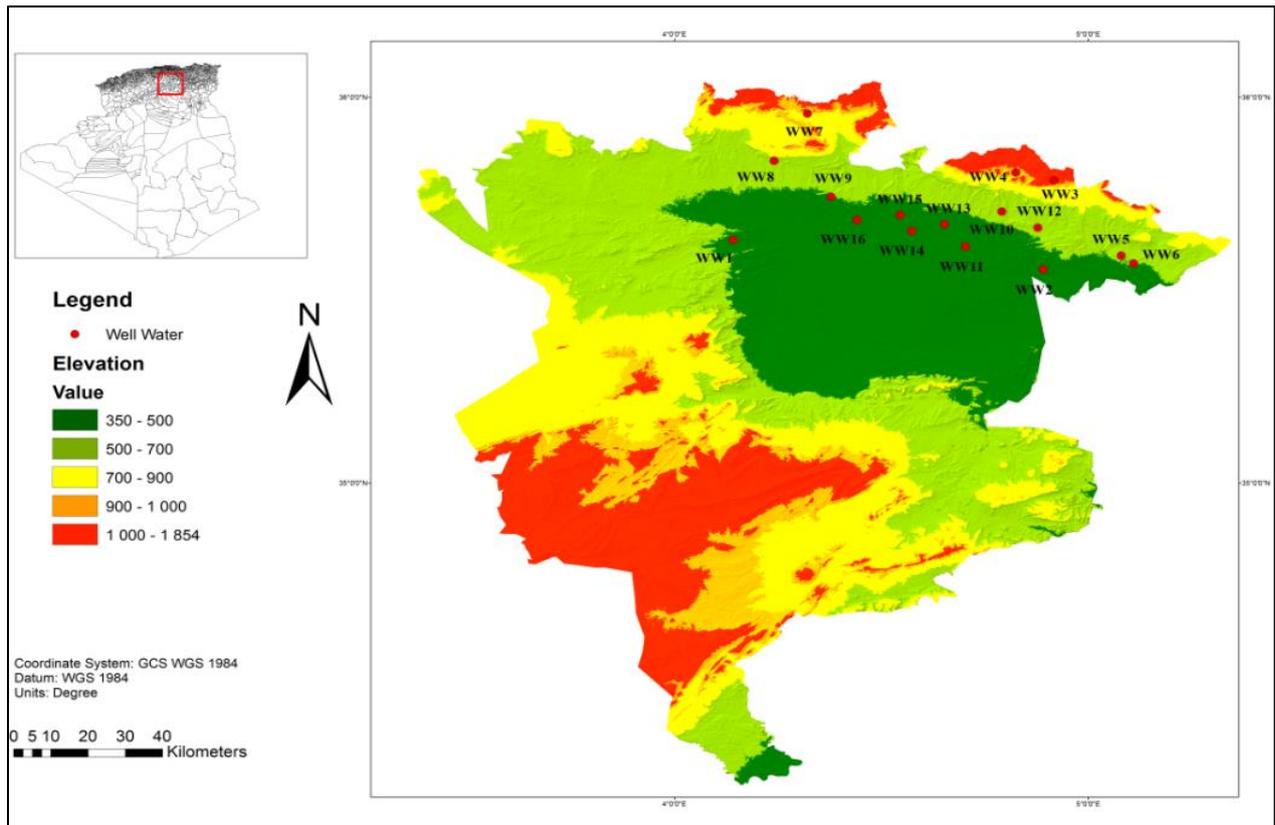


Figure 6: Le relief dans la wilaya de M'Sila (Tir et *al*, 2022).

1-5-Pédologie de la zone d'étude

Le sol est l'un des constituants environnementaux le plus fragile et le plus important pour tout écosystème vivant et qui affecte toutes les sortes de vie : humaine, animale et végétale (Ramade, 2003).

Sa destruction est souvent irréversible et entraîne des effets et des conséquences très graves à court et à long terme (Halitim, 1988).

Les recherches sur la nature pédologique des sols de la région du Hodna sont peu nombreuses (Dekkiche, 1974; Booyadgiev, 1975; Belouam 1976 ; Daoud et Dogar, 1985)

Dans notre cas et pour décrire et déterminer les principaux sols existants dans la zone d'étude on s'est référé à l'étude pédologique de la FAO, (1973) et à la carte élaborée par Booyadgiev citée par Le Houerou et *al*. (1975). C'est ainsi qu'on a pu faire ressortir les principales formations pédologiques suivantes (**Fig. 7**).

1-5-1-Sols minéraux bruts

Il s'agit de l'ensemble des sols qui sont au début de leurs évolutions, avec dégradation physique superficielle et avec une très faible altération chimique. Ils sont entièrement à presque entièrement dépourvus de matière organique. Leurs profils sont des types (A) C, (A) R ou R (C.P.C.S, 1967).

1-5-2-Sols peu évolués

Ils se caractérisent par une altération physique plus poussée et d'un profil pédologique de type A C, dépourvue de l'horizon B d'altération. Ils contiennent plus que des traces de matières organiques dans les 20 premiers centimètres et/ou plus de 1 à 1.5% de matière organique sur plus de 2 à 3 centimètres. Le matériau est fragmenté alors que la matière minérale n'a pas subi d'altération sensible et les sels minéraux peuvent avoir des redistributions et des migrations (C.P.C.S, 1967).

1-5-3-Solscalci-magnésiques

Ce type de sol est déterminé par une présence d'ions alcalino-terreux dans la partie inférieure (si elle existe), le profil de ce type des sols est A R ou A C ou (B) R ou (B) C (C.P.C.S, 1967).

1-5-4-Sols halomorphes

Ils englobent ceux qui révèlent la présence d'une forte teneur en sels de sodium et/ou sodium échangeable (sodiques) et une conductivité électrique élevée (C.P.C.S, 1967).

On distingue pour ce type de sols, ceux halomorphes moyennement à très fortement salins et ceux halomorphes excessivement salins.

1-5-5-Sols hydromorphes

Ce type de sol est connu par son hydromorphie importante. Cet excès d'eau peu se traduire par un engorgement permanent d'une partie ou de la totalité du profil.

L'eau responsable de cette hydromorphie peut provenir de la surface en conditions de drainages imparfaits. Ces sols se caractérisent par l'horizon de réduction : 'Gley' ou pseudo-gley (C.P.C.S, 1967).

1-5-6-Sols isohumiques

C'est des sols à profil de type A (B) C, et parfois A B C (avec l'existence rare des profils de type AC). On peut rencontrer en profondeur un horizon de pseudo-gley ou un horizon à croute calcaire ou pseudo-gypseuse ou indurée. La matière organique est incorporée dans

tout le profil et est très évoluée dans les horizons superficiels (C.P.C.S, 1967).

Il est à noter aussi que l'étude menée par Abdesselam et Halitim (2014) sur la dégradation des sols au niveau du Hodna, a montré que les sols en surface sont peu calcaires et non gypseux. La morphogénèse hydrique et éolienne constitue le principal facteur qui influence les sols de cette zone face à la salinité et le gypse qui ne sont que des facteurs secondaires. Ils signalent aussi que les sols sous l'intensité de la mise en valeur en irrigué est la plus intense, sont soumis aux processus d'ensablement.

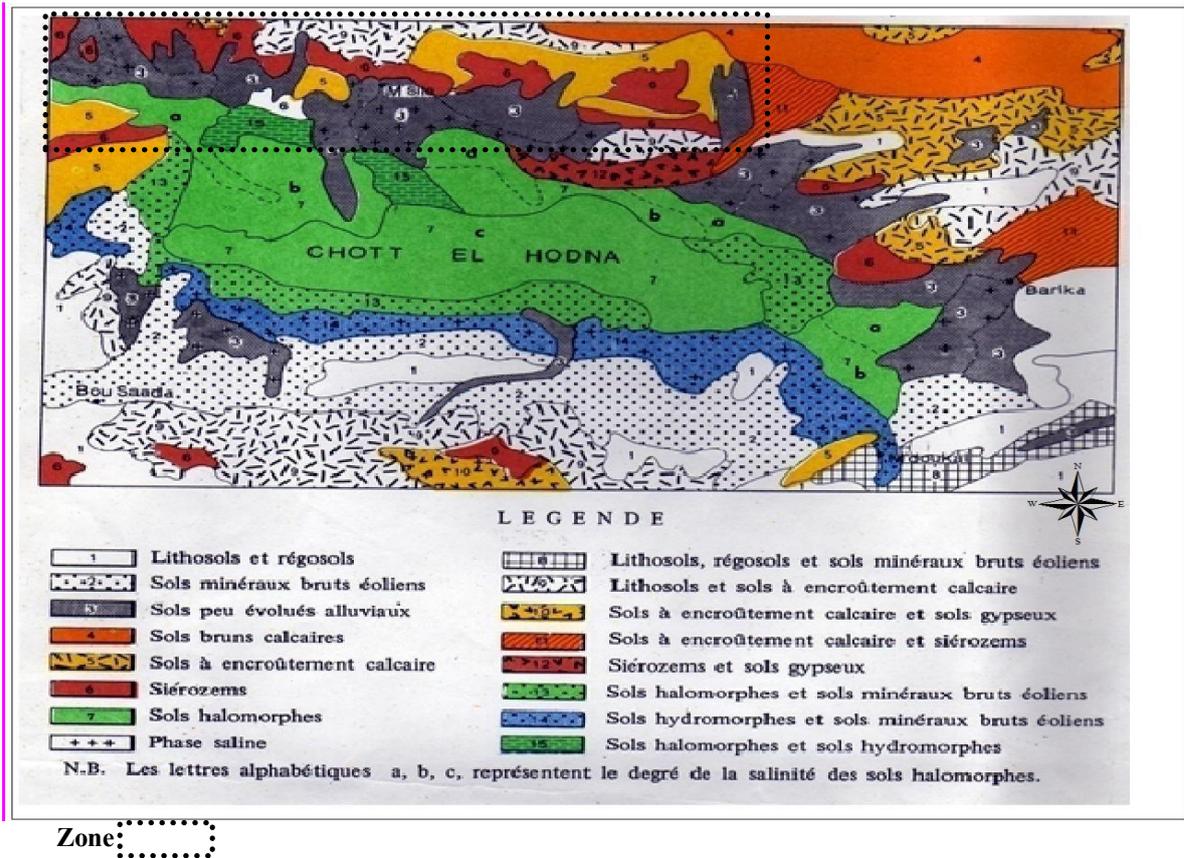


Figure 7: Carte pédologique du Hodna au 1/800 000^e par T. G. Booyadgiev (Le Houerou et *al*, 1975).

1-6-Hydrologie et ressources hydriques de la zone d'étude

Le Hodna représente une série des plaines positionnées au Nord et à l'Est d'une grande Sebkhia, présentant des eaux qui proviennent l'Atlas saharien au Sud et l'Atlas tellien au Nord (Mimoune, 1995). Hammer (1986 in Binet et Aymonin, 1987) cite que Chott El Hodna est un lac salé athalassique, c'est à dire sans connexion avec la mer.

Les accidents tectoniques et les reliefs atlassiques font du Hodna un bassin pratiquement fermé : C'est le grand bassin versant du Hodna (Mimoune, 1995; Hadjab, 1998 et Le Houerou, 2009). Son sous-sol renferme des réserves aquifères considérables et l'aquifère du sub-surface est bloqué sous le néogène continental au pied de l'Atlas Saharien sur une vaste étendue et remonte à la surface au Hodna (Kebiche, 1994) donc les aquifères du sous-sol sont repartis en plusieurs niveaux (FAO, 1973).

Le **tableau (9)**, met en évidence les potentialités en eaux du bassin du Hodna région par région.

Tableau 9: Répartition spatiale des débits exploitables des eaux souterraines du bassin du Hodna

Zone	Débit (m/s)
Zone de M'Sila-BirHanate	1300
Zone d'Ain Khadra - Djebel Djezzar	700
Zone de Barika	500
Zone d'Ain Diss-Bousaada	1000
Zone de Guelalia	500
Total	4000

Source: (Kebiche, 1994)

Le régime hydrologique du Hodna est lié au régime pluviométrique caractérisé par de fortes irrégularités. La majorité des cours d'eaux n'ont pas de débits permanents à l'exception d'Oued Lougmane, Oued El Ham, Oued K'sob, Oued Selmane, Oued Berhoum et Oued Soubellaqui sont alimentés par des sources et retenus par des "Ceds" traditionnels, conçus pour stockage de l'eau destinée à l'irrigation (FAO, 1973).

Il est à noter que sur les formations lithologiques des plaines et hautes plaines, le réseau laisse très bien ses traces par l'effet de l'érosion hydrique, car les pluies tombent souvent sous forme d'averses et les oueds charrient d'importantes quantités de particules solides. La période de sécheresse étant longue, ces Oueds restent longtemps à sec (FAO, 1991; Mimoune, 1995).

Les principales nappes aquifères du bassin du Hodna sont, la nappe phréatique qui se trouve à une profondeur supérieure à 40 m, le taux de salinité de l'eau est de (moins de 2 grammes de sels par litre d'eau au Nord) et la nappe captive profonde de 150 à 250 mètres. Elle est peu chargée en sels: 0,5 à 2 grammes de sels par litre d'eau (FAO, 1991; Mimoune, 1995).

En plus de ces deux nappes, on rencontre d'autres aquifères du Crétacé et du Jurassique moins bien connues que les premières et qui sont exploitées à partir de sources (FAO, 1991).

Il est à noter que les études de l'IFES, (2008), ont montré un passage des points d'eau de 4000 formés à 90% de puits à 3500 formés de forages.

Devant une telle situation, les agriculteurs n'ont plus de solution que de chercher l'eau de plus en plus en profondeur (ANRH, 2016).

1-7-Climat de la région d'étude

1-7-1-Origine des données

Dans notre aire d'étude il n'existe qu'une station météorologique opérationnelle relevant de l'Office National de Météorologie (ONM) en l'occurrence c'est la Station de M'Sila. Celle-ci dispose des données concernant la pluviométrie, les températures, le vent et l'humidité relative. Cette station se présente les caractéristiques suivantes :

- Période de disponibilité des données : de Janvier **1984** à Décembre.
- Coordonnées géographiques :
 - Latitude : 35° 39' N.
 - Longitude : 4° 29' E.
 - Altitude : 442 mètres.

Nous avons été encouragés à prendre en considération les données de l'ONM - Station de M'Sila en raison:

- Les données disponibles couvrent une période assez conséquente (de 1984 à 2018) pour la station météorologique de référence (Station de M'Sila) où l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) stipule que pour le calcul de normales climatiques il faut une période de 30 ans (Amiot et *al.*, 2021).
- La station est opérationnelle et c'est la plus proche de notre zone d'étude.
- Les données des autres sources sont relativement anciennes comme c'est le cas des données climatiques de Seltzer ou présentent certaines lacunes comme celle du site web: <http://fr.tutiempo.net/climat/>
- Il existe certaines données climatiques dont la source est douteuse pour la station de M'Sila et qui la laisse positionnée dans le climagramme d'Emberger dans l'étage bioclimatique aride à variante froide. Ce ci n'est pas vrai parce que cette station fût déjà positionnée dans l'étage bioclimatique aride à variante tempérée par Le Houerou et *al.* (1975);

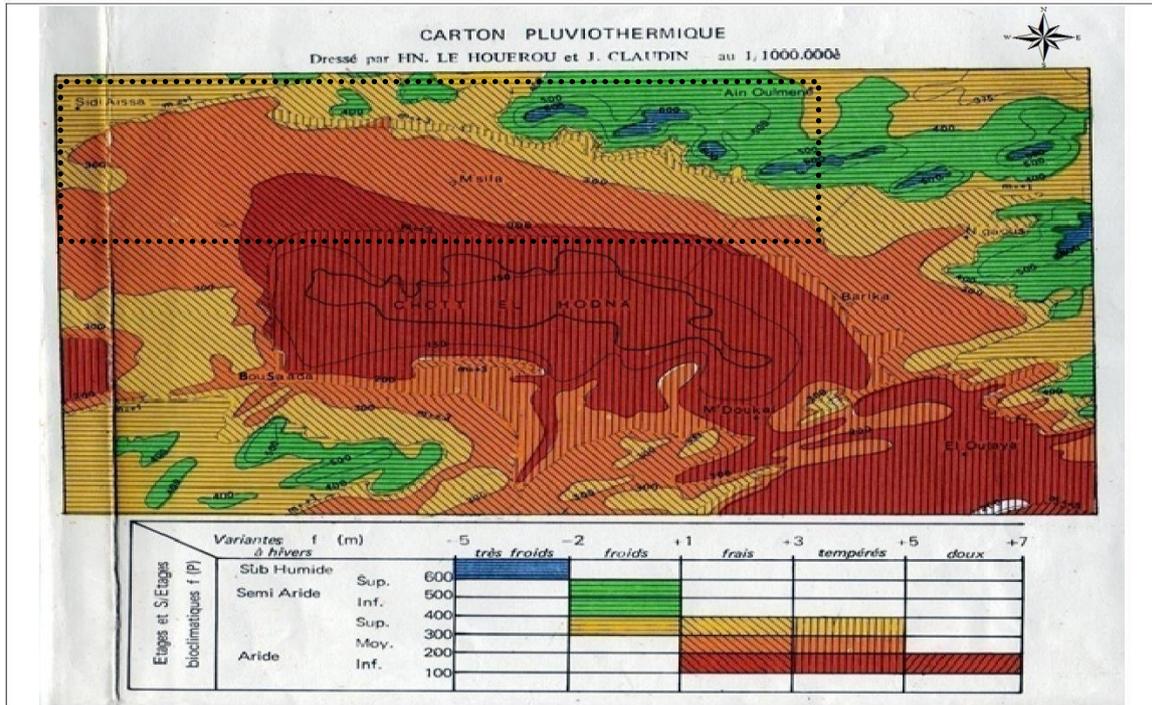
Kaabèche (1990); Bouabdallah (1992), Mimeche (2014), Zedam (2015), Ferahtia et *al.*, (2021) et Guechi (2022) d'un côté et de l'autre Gargaud et *al.* (2005) révèlent que le climat général du siècle passé est marqué par une tendance non pas à un refroidissement climatique mais plutôt à un réchauffement.

Pour caractériser notre zone d'étude du point de vue climatique, nous avons en notre possession les données des paramètres climatiques évoqués plus haut mais étant donné que notre zone d'étude relativement vaste, avec une altitude oscillant entre 432 et 1036 mètres et sa situation dans les hautes plaines steppiques, il y a lieu de procéder à des extrapolations en cas de besoin de manière à ce que la station météorologique de M'Sila soit la référence de sorte que:

- Pour les températures, Seltzer (1946) préconise que pour une élévation d'altitude de 100 m, les températures décroissent de 0,4°C pour les températures minimales (m), de 0,7°C pour les températures maximales (M) et de 0,55°C pour les températures moyennes, mais au cas où il y a une diminution d'altitude ces températures augmentent.

- Pour ce qui est des précipitations, Seltzer (1946) et Djebaili (1984) stipulent une augmentation de 20 mm de précipitations pour une élévation de 100 m d'altitude pour l'Atlas Tellien d'Oranie, les Hautes Plaines, l'Atlas Saharien et le Sahara. Mais en cas de zones plus basses il y aura diminution.

En effet en examinant la carte pluviothermique du Hodna (**Fig.8**) mise à notre disposition, la région de M'Sila se situe entre les isohyètes 500 mm au niveau des reliefs septentrionaux (Monts du Hodna) et 150 mm près de Chott El Hodna dans la partie méridionale d'où elle est plus proche pluviométriquement du Chott que des zones Nord.



Zone d'étude :.....:

Figure 8: Carte pluviothermique du Hodna au 1/1.000.000è (Le Houerou et al, 1975).

1-7-2-La pluviométrie

1-7-2-1-Les précipitations mensuelles et annuelles

a) Les précipitations mensuelles

La saison pluvieuse commence en Septembre et c'est le mois d'Octobre qui enregistre la plus grande pluviosité soit **27,49 mm**. Les pluies d'automne sont parfois torrentielles et considérables et plus ou moins catastrophiques (Le mois d'Octobre 2007 a enregistré pour lui seul 100 mm de pluie pour la zone de M'Sila sur un cumul annuel de 278 mm). Quant aux pluies d'hiver, elles sont moins abondantes que celles du printemps (**Tab. 10**).

Tableau 10 : Précipitations moyennes mensuelles et cumul annuel (mm) de la région d'étude

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Annuel
Précipitations	16,71	12,74	15,80	20,26	22,03	10,23	3,89	7,46	25,11	27,49	18,89	17,83	198,43

La saison estivale est la plus sèche où le mois de Juillet est le moins pluvieux avec seulement **3,89 mm**. Le cumul annuel des précipitations est de l'ordre de **198,43 mm**.

L'irrégularité des précipitations est illustrée par la distribution mensuelle des précipitations (Fig. 9).

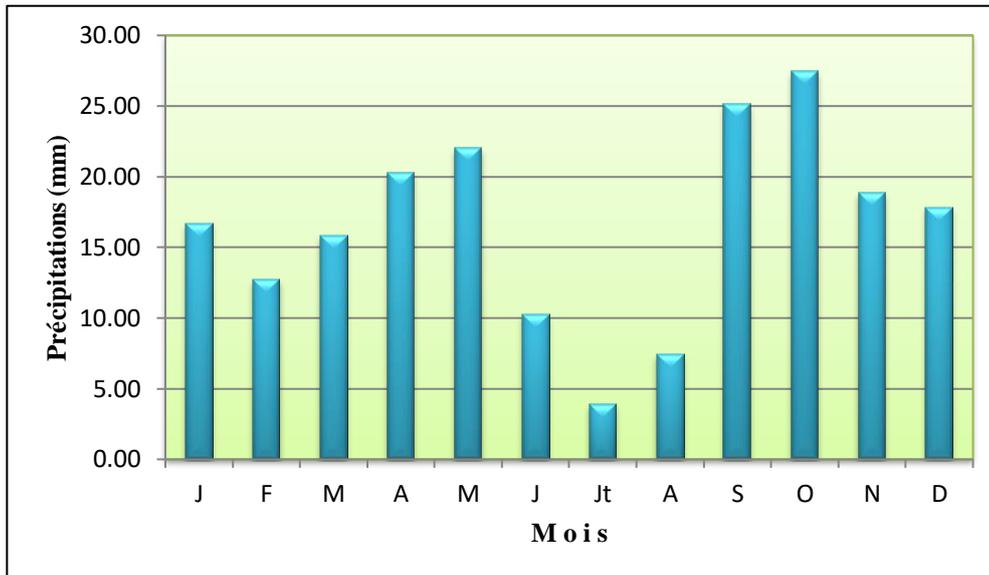


Figure 9: Fluctuation des précipitations mensuelles moyennes de la région de M'Sila (Période: 1984-2018)

b) Variation interannuelles des précipitations

Les précipitations annuelles dans notre zone d'étude pour la période : 1984-2018, fluctuent entre un cumul annuel de **105,00** mm pour l'année 2002 et **348,00** mm pour l'année 2003 (Tab. 11 et Fig. 10). On signale que la zone étudiée reçoit en moyenne pour la période citée cumul annuel de **198,43**mm.

Tableau 11: Variations interannuelles des précipitations de la région de M'Sila pour la période 1984-2018

Années	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Total (mm)	106	269	242	241	213	195	275	258	183
Années	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Total (mm)	139	177	138	238	317	213	282	146	157
Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Total (mm)	105	348	252	125	225	278	171	155	129
Années	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Moyenne
Total (mm)	175	160	146	125	223	166	172	201	198,43

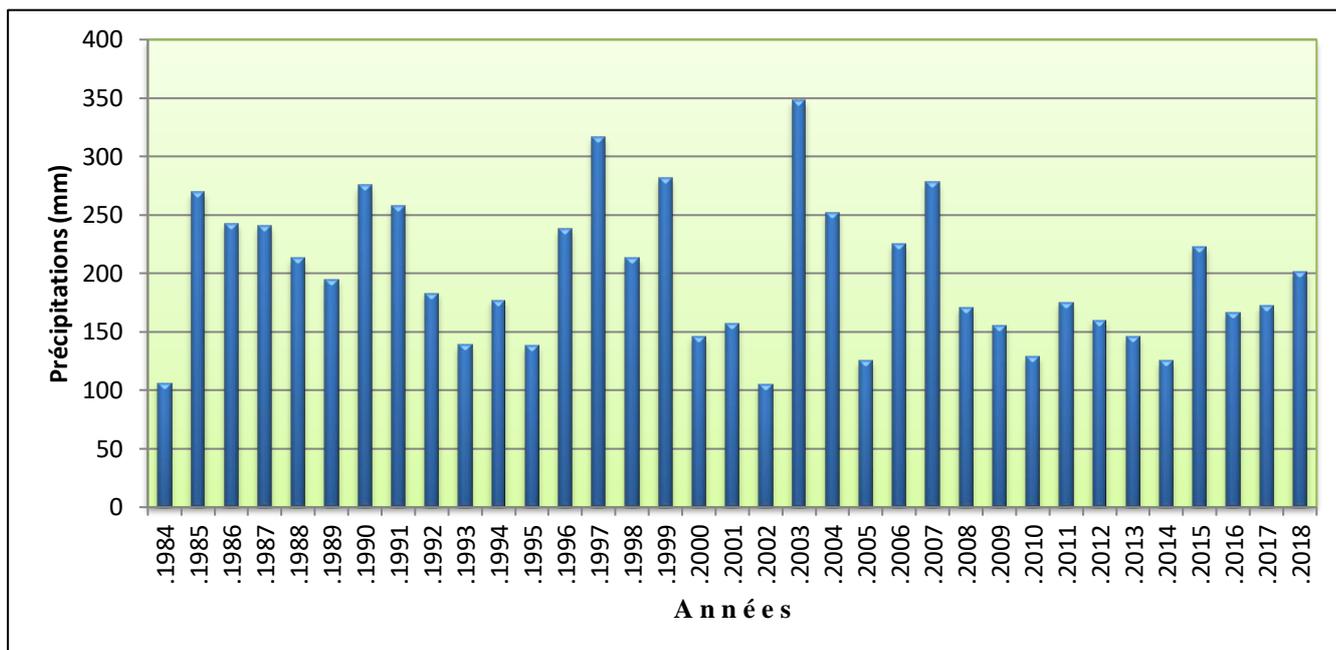


Figure 10 : Fluctuation des précipitations interannuelles de région de M'Sila pour la période **1984-2018**.

1-7-2-2-Le régime saisonnier

La détermination de la répartition saisonnière des pluies dans l'année donne le régime saisonnier (Nahal, 1981). Cette donnée permet la caractérisation du régime pluviométrique régional à coté de la pluviosité annuelle moyenne en notre possession.

Le principe consiste à sommer les précipitations des mois correspondants à chaque saison et à les classer par ordre décroissant en donnant à chaque saison son initiale alphabétique ce qui aboutit au régime saisonnier (Musset, 1935 in Meddour, 2010).

Le calcul et l'ordination des saisons sont illustrés dans le **tableau 12**.

Tableau 12: Précipitations mensuelles moyennes par saison dans la région de M'Sila (Période : **1984-2018**).

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Cumul annuel	Type de régime saisonnier
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A		
P (mm)	25,11	27,49	18,89	17,83	16,71	12,74	15,80	20,26	22,03	10,23	3,89	7,46		
	71,48 (36,02%)			47,28 (23,83%)			58,09 (29,27%)			21,58 (10,88%)			198,43 (100,00%)	APHE

Le régime saisonnier pour la zone de M'Sila est de type APHE (Tab.12 et Fig. 11).

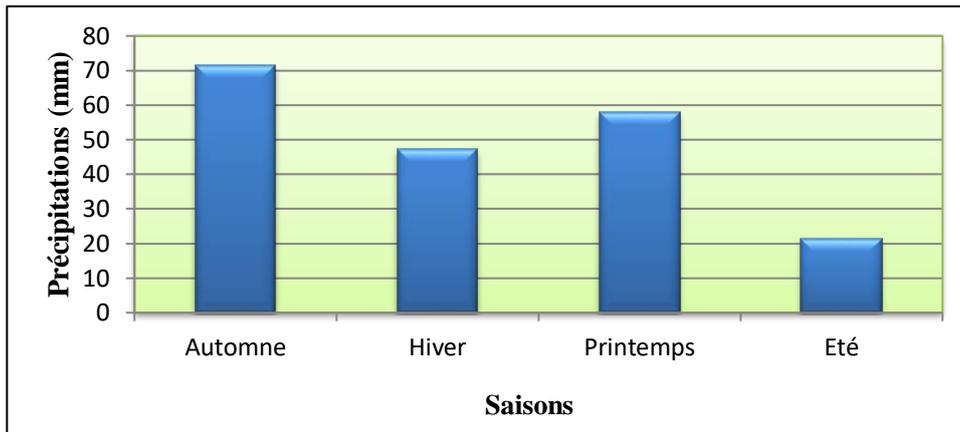


Figure 11 : Distribution du cumul des précipitations mensuelles moyennes par saison dans la zone de M'Sila (Période: 1984-2018)

La **figure 11** ci-dessus, illustre que pour la zone de M'Sila, la saison la plus pluvieuse est l'automne suivis respectivement par le printemps et l'hiver par contre la saison de l'été reste la moins arrosée donc la plus sèche.

1-7-3-Les températures

1-7-3-1-Températures moyennes mensuelles

L'examen des températures moyennes « $(M+m)/2$ (°C) » pour la région de M'Sila pour la période 1984-2018 (Tab 13) a décelé que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec $8,93^{\circ}\text{C}$ et le mois le plus chaud est le mois de Juillet $31,65^{\circ}\text{C}$ (Fig. 12).

Tableau 13 : Températures moyennes ventilées par mois dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenn e annuell e
m (°C)	3,01	3,53	6,60	9,85	14,7 8	20,3 0	23,8 5	23,5 4	18,8 0	13,7 5	7,68	3,97	12,47
M (°C)	14,8 5	17,0 2	20,9 6	24,7 7	29,2 8	35,3 7	39,4 5	38,5 5	33,0 6	26,9 7	19,6 2	15,0 2	26,24
(M+m)/ 2 (°C)	8,93	10,2 7	13,7 8	17,3 1	22,0 3	27,8 3	31,6 5	31,0 5	25,9 3	20,3 6	13,6 5	9,50	19,36

Avec :

- **m** : Températures minimales moyennes en degré Celsius.
- **M** : Températures maximales moyennes en degré Celsius.
- **(M+m)/2**: Moyenne des températures en degré Celsius.

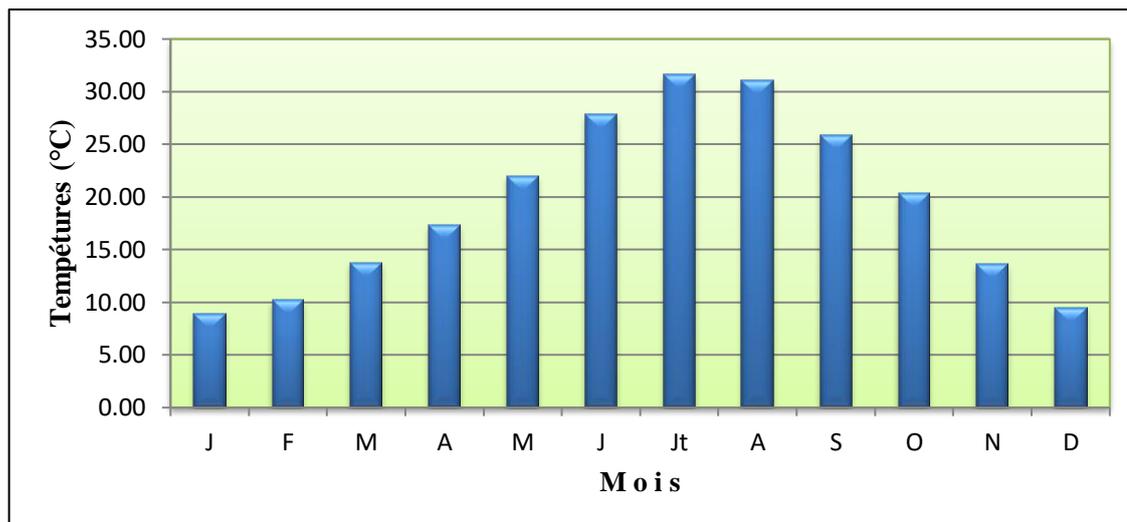


Figure 12: Variation des moyennes mensuelles des températures dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018)

L'examen de la **figure 12** montre que la moyenne mensuelles des températures est maximale pour la période estivale (mois de juin, juillet et août) et qu'elle est moins prononcée pour la période automnale (mois de septembre, octobre et novembre) et printanière (mois de mars, avril et mai) mais elle est plus basse pour l'hiver (mois de décembre, janvier et février) ce ci est une caractéristique de la situation géographique de la zone d'étude qui lui confère un climat continental (Duckson, 1987).

1-7-3-2-Températures extrêmes

L'examen des données du tableau **13** ci-dessus montrent que dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018), la température maximale moyenne la plus haute est enregistrée durant le mois de Juillet est de **39,45°C** et la température minimale moyenne est enregistrée durant le mois de Janvier avec **3,01°C**.

La zone d'étude qui fait partie de la région méditerranéenne est soumise à deux phases de repos végétatifs : été et hiver (Hétier et Lilin, 1989) et qui sont sous la dépendance directe de ces températures extrêmes (minimales et maximales) comme le montre la **figure 13** ci-dessous où Sauvage (1961 in Djebaili, 1984) annonce que la phase de repos végétatif hivernale est marquée par les mois où **m** est inférieur à + 3 °C.

La période de repos végétatif estivale, qui concorde avec les mois de juillet et d'août, présente des températures élevées, un déficit de vapeur d'eau et une irrigation déficitaire conduit à une diminution de la photosynthèse et delà à un repos végétatif estivale (Haouari, 2013).

Le **tableau 13** ne montre pas des valeurs inférieures à ce seuil mais les moyennes mensuelles

des températures minimales par année dans la région de M'Sila (Période: 1984-2018) en notre possession révèlent le contraire.

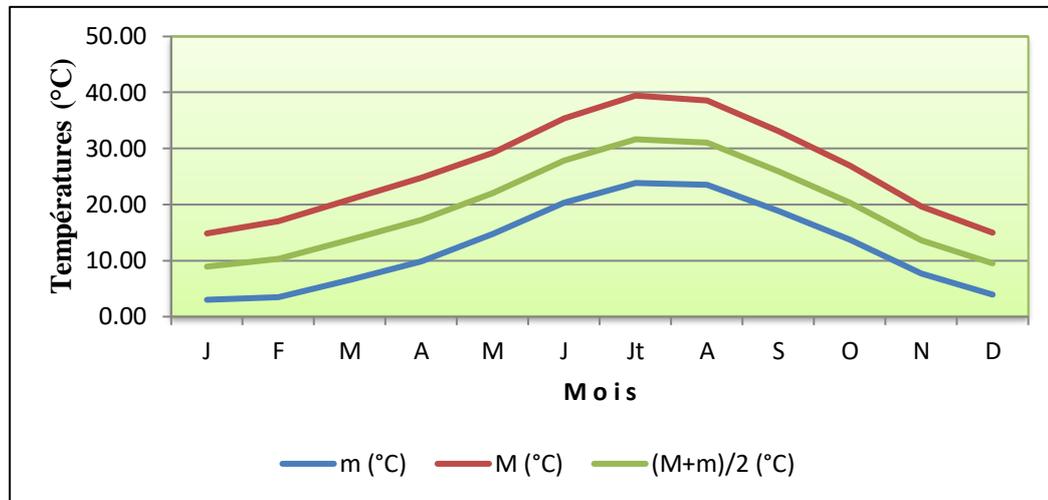


Figure 13: Variation des moyennes des températures (minimales, maximales et moyennes mensuelles) dans la région de M'Sila (Période: **1984-2018**)

1-7-4-Vents

Le vent est un élément climatique desséchant dans la région de M'Sila (Zedam, 2015). La région de M'Sila, pour la période : 1984- 2018, présente un maximum de vitesse moyenne du vent durant le mois d'Avril où la valeur de **4,99 m/s** est enregistrée (**Tab. 14**). La rareté des obstacles physiques naturels et le manque de brises vent dans la plaine du Hodna la laisse cette zone ventée (Hadjab, 1998). Pour ce qui est de la vitesse minimale du vent, elle est observée durant le mois d'Octobre avec **3,57 m/s**.

Tableau 14: Variation des vitesses moyennes mensuelles du vent dans la région de M'Sila : période **1984-2018**

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne nuelle
Vitesse (m/s)	3,81	4,32	4,63	4,99	4,75	4,56	4,18	3,89	3,80	3,57	3,64	3,77	4,16

L'analyse de ces résultats a abouti à une qualification de ces vitesses de vent où Sbai et *al.* (1994) annonce que les vitesses de vents faibles à modérées sont ≤ 5 m/s ce qui est le cas pour nos données et qui s'observent respectivement pour les mois d'Avril et d'Octobre (**Tab 14**).

1-7-5-Humidité relative

L'humidité relative correspond au rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression existantes (Ramade, 2003). L'humidité relative de la région de M'Sila pour la période 1984- 2018 est illustrée dans le **tableau 15**.

Tableau 15: Variation de l'humidité relative moyenne dans la région de M'Sila: période 1984 - 2018

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moy Ann u
Humidité (%)	71,61	64,41	58,43	52,83	47,03	39,31	33,41	36,80	49,46	57,35	67,17	73,01	54,25

A travers les données du **tableau 15**, on remarque que l'humidité relative varie entre 33, 41% au mois de Juillet et 73,01 % pour le mois de Décembre. En effet ce paramètre est très lié à la température comme le signalent Kouassi et al (2010) où pour notre cas elles sont corrélées négativement.

1-7-6-Evapotranspiration potentielle (E.T.P.)

L'évapotranspiration potentielle ou ETP est aussi une caractéristique du climat et qui se manifeste par une perte d'eau pour l'air de toutes surfaces évaporantes ou matières qui contiennent de l'eau sous l'effet du rayonnement, du vent et de la température (Halimi, 1980).

Ce paramètre climatique peut être calculé à partir de plusieurs formules mais l'utilisation de la méthode de **Thorntwaite** qui fait intervenir le seul paramètre climatique qu'est la température (Palayan, 2003) s'avère plus facile pour le calcul.

$$etp(mm) = c \times \left(16 \left(\frac{10t}{i}\right)^a\right)$$

Où:

$$ETP = \sum_1^{12} \text{etp de chaque mois}$$

Avec:

- **etp** : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en mm
- **ETP**: évapotranspiration potentielle annuelle en mm
- **c**: facteur de correction qui dépend de la latitude et du mois. Il est fourni pour le 35° de latitude Nord de notre région et les calculs y afférents en raison de la situation géographique

de la région de M'Sil après de ce parallèle.

- t ou $(M+m)/2$: la température moyenne en °C
- a : indice lié à la température, on le calcule par la formule a été simplifiée par Serra (1954 in Halimi, 1980):

$$a = 0,016 i + 0,5$$

- i : indice thermique mensuel obtenue par la formule:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Où: t est la température moyenne mensuel en °C

On note que i est calculé soit il est donné par THORNTWAITE sous forme de tables.

Les valeurs moyennes de l'évapotranspiration obtenues pour la région de M'Sila : période **1984 – 2018** sont portés dans le **tableau 16** ci-dessous.

Tableau 16 : Moyennes mensuelles (etp) et annuelle (ETP) de la région de M'Sila: période **1984- 2018**

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	ETP annuel le
t ou $(M+m)/2$	8,93	10,27	13,78	17,31	22,03	27,83	31,65	31,05	25,93	20,36	13,65	9,5	-
I	2,41	2,97	4,64	6,55	9,44	13,45	16,34	15,88	12,09	8,38	4,57	2,64	-
A	0,54	0,55	0,57	0,60	0,65	0,72	0,76	0,75	0,69	0,63	0,57	0,54	-
C	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85	-
etp (c) mm	97,46	94,60	115,51	126,34	150,50	169,03	187,97	174,68	138,10	117,34	96,37	94,88	1562,78

Avec :

- t ou $(M+m)/2$: température moyennemensuel °C
- i : indice thermiquemensuel
- **etp (c)**: évapotranspiration mensuelle corrigée (mm)
- c : facteur de correction
- **ETP annuelle**: évapotranspiration annuelle corrigée (mm)

On remarque que le mois de Juillet connaît l'évapotranspiration potentielle la plus élevée avec **189,97mm** par contre le mois de Décembre enregistre l'évapotranspiration potentielle la plus faible avec **94,88 mm**.

L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée (**1562,78 mm**) ce qui équivaut à près de huit fois la pluviosité enregistrée à région de M'Sila pour la période: **1984-2018**.

1-7-7-Evapotranspiration réel (E T R)

Halimi (1980), définit l'évapotranspiration réelle comme étant une évapotranspiration sans prise en considération de la disponibilité (abondance) de l'eau à la surface évaporante de même Oudin (2006) préconise de déterminer l'ETR directement à partir de variables atmosphériques, sans avoir recours à une estimation de l'état hydrique d'un bassin versant.

Pour ce faire nous avons eu recours à la méthode de TURC (**Tab. 17**):

$$ETR/P = [0.9 + (P^2/L^2)]^{0.5}$$

Avec :

- **P**: pluviométrie moyenne annuelle en mm
- **L**: pouvoir évaporant calculé par la formule $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ où T est la température moyenne annuelle en °C.
- **T**: température moyenne annuelle en °C.

Tableau 17 : Evapotranspiration réelle annuelle de la région de M'Sila : période **1984 - 2018**

Zone	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)	ETR/P
Station météorologique M'Sila	198, 43	19,34	1145,19	190, 41	0,96

D'après les calculs (**Tab. 17**), on constate qu'il y a un déficit hydrique annuel de 96% ce qui est extrêmement considérable et témoigne de l'aridité et de l'insuffisance des précipitations.

1-7-8-La synthèse climatique

Les paramètres retenus et considérés comme les plus importants sont les températures et les précipitations pour caractériser le climat proche de la station météorologique de M'Sila.

1-7-8-1-La saison sèche

a) Diagramme ombrothermique

Un mois est considéré comme sec lorsque le total des précipitations exprimées en millimètres d'eau est égal ou inférieur au double de la température moyenne T, du mois, exprimée en degrés Celsius (Le Houérou, 1995; Bagnoulset Gaussen, 1957 in Rebbas, 2014).

Pour illustrer ce qui a été annoncé en haut un graphique est établi et met en évidence la saison sèche et son importance dans l'année (Bagnoulset Gaussen, 1953 in Rebbas, 2014) en prenant en compte la pluviosité mensuelle et la température moyenne de chaque mois pour la région de M'Sila pour la période 1984 – 2018 (**Fig 14**).

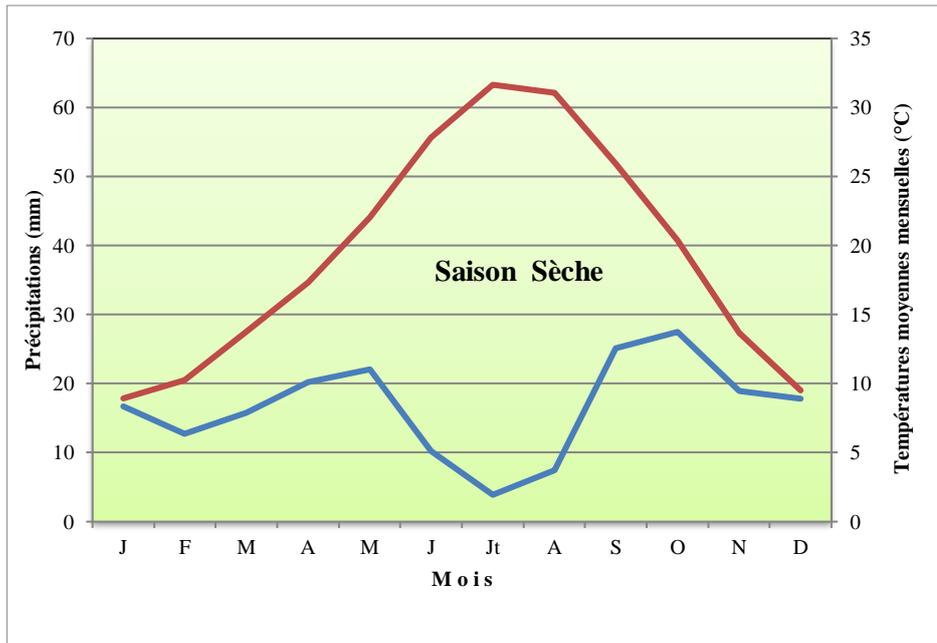


Figure 14 : Diagramme Ombrothermique de la région de M'Sila.

Dans notre zone d'étude il n'existe qu'une seule période et qui est sèche toute l'année (**Fig. 14**).

b) Indice pluviométrique de MORAL

L'indice climatique pluviométrique est annuel « $I(A)$ » Moral (1965 in Halimi, 1980). Pour son calcul on utilise la formule suivante:

$$I(A) = P / (T^2 - 10T + 200)$$

Il est établi pour faire situer une zone ou une région dans une limite qui sépare l'humidité et la sécheresse:

- Si $IA < 1$: la zone est sèche
- Si $IA > 1$: la zone est humide

Le résultat obtenu pour de la région de M'Sila est porté dans le **tableau 18**.

Tableau 18: Indice pluviométrique de MORAL de la région de M'Sila

Zone	P (mm)	T (°C)	I(A)	Qualification de la Zone
région de M'Sila	198,43	19,34	0,52	Sèche

Avec:

- **I(A)**: Indice pluviométrique annuel.
- **P**: Précipitation annuelle en mm.
- **T**: Température annuelle en °C.

Pour notre zone d'étude, le I(A) calculé est < à 1 d'où région de M'Sila est qualifiée de sèche.

1-7-8-2-Climagramme d'EMBERGER

Pour positionner région de M'Sila dans le climagramme d'Emberger il est impératif de calculer le quotient pluviométrique d'Emberger (Q_2) qui est un indice climatique qui tient en compte deux caractéristiques climatiques: les précipitations et les températures extrêmes (Emberger et Sauvage, 1961 in Djebaili, 1984) et qui traduit la xérite du Nord au Sud du climat méditerranéen.

Cet indice est calculé par la formule suivante (Kaabèche, 1996; Dajoz, 2006):

$$Q_2 = \frac{1000 P}{0,5(M + m)(M - m)}$$

Où:

- **P** : précipitations annuelles en mm,
- **M** : température moyenne mensuelle maximale du mois le plus chaud en K,
- **m**: température moyenne mensuelle minimale du mois le plus froid en K.

Pour transformer les degrés Celsius en Kelvins on utilise la formule donnée par De Parceveaux et Huber (2007):

$$T (K) = T (°C) + 273,15 \quad \text{où } T \text{ c'est la température}$$

Les calculs sont portés dans le tableau 19 ci-dessous.

Tableau 19 : Valeur du quotient pluviométrique et emplacement dans l'étage bioclimatique de la région de M'Sila.

Zone	P	M	M	Q_2	Etage bioclimatique
Région de M'Sila	198,43 mm	3,01 °C	39,45 °C	18,50	Aride à hiver tempéré
		276,16 K	312,60 K		

Ce quotient d'Emberger prends en considération deux paramètres: la pluviométrie moyenne annuelle (P mm) et les températures moyennes mensuelles extrêmes: la moyenne mensuelle minimale du mois le plus froid (m °C) et la moyenne mensuelle maximale du mois le plus chaud (M °C).

- Les températures sont exprimées en Kelvin et ce pour éliminer en cas de présence les températures négatives en degrés Celsius.
- La représentation graphique tient en compte de la température moyenne minimale du mois le plus froid ($m \text{ } ^\circ\text{C}$) à porter sur l'axe des abscisses et la valeur du quotient pluviométrique « Q_2 » calculé à porter sur celui des ordonnées ce qui correspondra à une situation dans un étage bioclimatique. Plus Q_2 est petit et plus le climat est sec.

Dans le climagramme d'EMBERGER, la région de M'Sila se positionne dans l'étage bioclimatique aride à hiver tempéré.

2- Milieu biotique

Le milieu biotique est dominé surtout par les plantes comparées à la faune où les formations floristiques sont la composante biotique la plus importante (Ozenda, 1982).

L'étude du bassin du Hodna et de ses alentours par Le Houerou et al, (1975) a montré que les monts du Hodna sont occupés par les formations forestières et préforestières à Cèdre, chêne vert et pin d'Alep dans l'extrême Est. Ces formations ont été désignées selon les auteurs sous diverses appellations : forêt claire, forêt clairsemée, maquis, garrigue, matorral (Kaabèche, 1990).

➤ La formation forestière

Elle s'illustre par l'occupation des Cèdres des plus hauts sommets de la zone. La partie montagneuse (Djerr) présente des matorrals à chêne vert et à Genévrier oxycèdre dans les lieux d'altitude élevée et des matorrals à Genévrier de Phénicie et à lentisque pour les lieux d'altitude relativement basse (Kaabèche, 1996).

➤ La formation préforestières

*Les formations steppiques

La steppe couvre près de 63% du territoire de la Wilaya de M'Sila (Guechi, 2022). Elle se rencontre sur des terrains relativement plats et dont l'altitude est plus basse comparée à la zone montagneuse:

-Steppe à alfa: *Stipa tenacissima* L. sur sol drainant. C'est une steppe à déterminisme climatique (Kaabèche, 1990 et 1995).

-Steppes à armoise «Chih»: *Artemisia herba alba* Asso. et steppe à sparte «Senagh»: *Lygeum spartum* Loefl. ex L. C'est des steppes à déterminisme climatique Elles sont rencontrées sur des sols mal drainants et lourds.

-Steppes psammophiles au sud de Chott El Hodna, à déterminisme édaphique (Kaabèche, 1995), Drin: *Aristida pungens* Desf. et le retam: *Retama raetam* (Forsk.) Webb et Berthel sur des sols meubles «sableux» (Kaabèche, 1995; Zedam et Fenni, 2015 et 2021).

-Steppes halophiles autour de Chott El Hodna, à déterminisme édaphique (Kaabèche, 1995), dominées par des espèces crassulescentes et tolérantes les milieux salés et hyper salés comme *Salicornia arabica* L., *Atriplexhalimus* L. et *Halocnemumstrobilaceum* (Pall.) M. Bieb. (Le Houerouet *al*, 1975; Kaabèche, 1990 et 1995; Zedam et Fenni, 2015 et 2021).

-Steppe saharienne localisée au sud dominée par des espèces sahariennes comme le remth: *Arthrophytumscoparium*(Pomel) Iljin. C'est une steppe à déterminisme climatique (Kaabèche, 1990 et 1995).

Du point de vue agronomique, les sols de la région sont utilisés de façon différente d'une zone à l'autre. Certains agriculteurs et pendant plusieurs décennies ont préféré l'arboriculture en particulier les abricotiers, d'autres installent des céréales tel que le blé et l'orge. Ce dernier en particulier dans les zones caractérisées par la salinité de ses sols, des cultures fourragères (surtout que la zone est steppique, réputée d'être pastorale).

Le temps actuel, la population a déjà entamé des cultures pérennes sur d'importants périmètres et qui se focalise sur l'oléiculture en raison de sa rusticité et des rendements certains qu'elle procure aux agriculteurs.

3-Méthode d'échantillonnage et d'analyse statistique

La présente étude est menée dans la partie Nord de Chott El Hodna (Nord de la wilaya de M'Sila). Celle dernière se trouve à 250 km Sud-est d'Alger la capitale.

D'un côté, et comme on a déjà montré clairement (dans la caractérisation climatique) qui confirme les travaux de Mimeche, (2014), Zedam, (2015), Amroune et *al*, (2016), Amroune, (2018); la région de M'Sila se caractérise par un climat aride avec des températures élevées en Eté et basses en Hiver et des précipitations moyennes annuelles inférieurs à 200 mm par an. Ce qui rend l'irrigation, la seule solution pour atteindre le rendement agricole recherché.

De l'autre côté, l'agriculture reste la principale occupation de la zone de M'Sila notamment pour la production des légumes et des céréales comme l'orge et le maïs avec d'autres cultures (Amroune et *al*, 2020).

D'après Abdesslem et *al*, (2013), la superficie des terres arables de cette zone est de 50000 ha dont 50% sont irrigués.

Donc on doit maîtriser cette irrigation quantitativement et déterminer la qualité physico-chimique de nos eaux; c'est l'objectif principal de la présente étude.

Dans ce chapitre; nous allons présenter le positionnement exacte des forages dont a analyser leurs eaux, méthode d'échantillonnage, de transport et conservation des échantillons, méthodes d'analyse (sur terrain et au laboratoire) et enfin les principales analyses statistiques effectuées pour faciliter l'interprétation des résultats trouvés ainsi que la détermination de la qualité de nos eau (par des indices de qualité).

Il est à noter que l'ensemble des analyses ont été effectuées au niveau des laboratoires de la faculté des sciences de l'Université de M'Sila en particulier ceux du département des sciences agronomiques et du département de chimie.

3-1-Choix des sites des prélèvements et échantillonnage

Au début de cette recherche, on a commencé avec l'idée de faire un maximum de prélèvements de différents forages à travers tout le territoire de la zone (wilaya) de M'Sila, avec le temps on s'est trouvé confrontés à des problèmes de différentes sortes; certains agriculteurs n'ont pas acceptés de nous donner accès à leurs forages, certains sites étaient loints ce qui a influencer le respect du temps pour certains analyses, certains prélèvements et après analyses n'étaient pas représentatifs. A la fin on s'est trouvés avec 16 échantillons (de

plus de 100 prélevés et analysés), ceux derniers se situent géographiquement (comme le montre la **figure 15** et le tableau. **20**) comme suit:

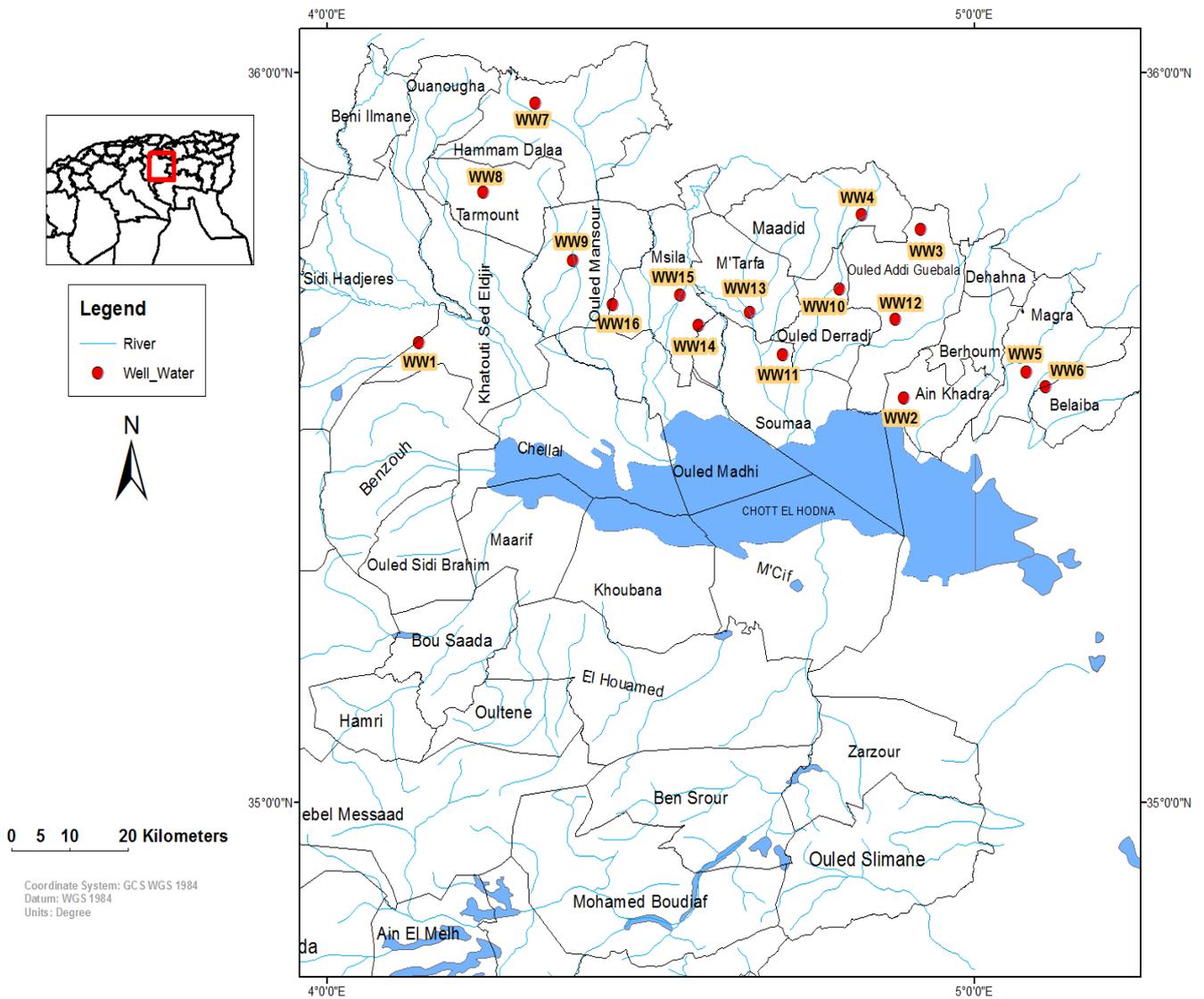


Figure 15: Localisation géographique de la zone d'étude ainsi que les forages concernés par l'analyse (original)

Tableau 20: Informations détaillées sur les forages à caractériser

Forages	Nom sur la carte	Noms des sites	Altitude (m)
F1	WW1	Kkhtouti Sed Eldjir (41 km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	740
F2	WW2	Ain Khadra (83 km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	756
F3	WW3	OuledAadiGhebala (33km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	762
F4	WW4	Maadid (35km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	920
F5	WW5	Magra (57km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	835
F6	WW6	Magra 57km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	795
F7	WW7	Hammam Dalaa (30 km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	892
F8	WW8	Tarmount (27km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	850
F9	WW9	Ouled Mansour (17 du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	662
F10	WW10	OuledDerradj (20km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	640
F11	WW11	Soumaa (30 km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	625
F12	WW12	OuledAadiGhebala (33km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	475
F13	WW13	M'Tarfa (7km du chef lieu de la wilaya de M'Sila)	495
F14	WW14	M'Sila	480
F15	WW15	M'Sila	479
F16	WW16	M'Sila	744

En ce qui concerne l'échantillonnage, et pour arriver à des résultats d'évaluation de la pertinence des eaux souterraine destinées à l'irrigation dans la région de M'Sila, on a respecté les normes proposées par Rodier et *al.*, (2009) et AFNOR., (1985).

Les échantillons ont été prélevés (Mars et avril successivement depuis 2016 à 2019)

Le prélèvement des échantillons d'eau est une opération très délicate qui nécessite un très grand soin à fin d'arriver à satisfaire au moins les conditions suivantes (Rodier et *al*, 2009):

*Homogénéité et représentativité des échantillons;

*Recueil, conservations et expédition dans des flacons stérilisées adéquats;

*Suffisance du volume recueillis de façon à permettre des analyses précises;

*Indications de l'ensemble des renseignements utiles sur les échantillons et étiquetage correcte de chacun des pour éviter toutes sortes d'erreurs.

Dans notre cas, nos eaux ont été prélevées à partir des forages avec des pompes. Pour chacun de ces forages, une purge et pendant plus de dix minutes à été effectuée à fin de se débarrasser des eaux stagnantes retenues dans les tuyaux et dans le cas des puits creusés à la main on a

correctement vérifié et confirmer leurs utilisation quotidienne (à fin d'assurer que nos eaux échantillonnées ne font pas en aucun cas partie des eaux stagnantes et périmées).

Chacun de nos échantillons, est prélevés dans un flacon en polyéthylène hautes densité pré-conditionnées de 250 ml (lavage à l'acide nitrique, puis rinçage plusieurs fois à l'eau distillée). Les flacons ont été rincés trois fois à l'eau à analyser avant d'être remplis d'eau à analyser.

Chaque flacon d'échantillonnage est clairement identifié et accompagné d'informations suffisantes. L'ensemble de nos flacons est transporté dans une glacière de température de moins (-) 4°et transporté et mis dans des réfrigérateurs de 4°au laboratoire jusqu'à leurs analyses.

3-2-Méthodes des analyses physico-chimiques sur terrain et au laboratoire

Pour une caractérisation et détermination des propriétés physico-chimiques d'une eau que se soit pour l'utilisation humaine, industrielle ou agricole on utilise des analyses in-situ (sur terrains) et d'autres au laboratoire. Dans notre cas on effectuer les analyses suivantes:

3-2-1-Analyse sur terrain

Nos échantillons ont subits les analyses des paramètres qui risquent de changer en fonction des conditions qui l'entourent, il s'agit de :

3-2-1-1-La température

La mesure de température est impérative car elle nous aide à collecter des informations relatives aux comportements physico-chimiques de l'eau à analyser.

Sa valeur est influencée par la température ambiante et l'horaire de sa mesure et sa détermination sur terrain permet en premier lieu d'ajuster certaines valeurs (en particulier celles de la conductivité électrique) ainsi que les vitesses des réactions chimiques.

Par ailleurs elle accroit les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur deux à trois pour une augmentation de température de 10°C (Zeghaba, 2018).

Dans notre cas on l'a effectué à l'aide d'un multi-paramètre portable de marque **WTW** mené de plusieurs sondes que parmi lesquelles on a celle du thermomètre à mercure. On lit directement la température qui est exprimée en degrés Celsius.

3-2-1-2-Le pH

Lors de la prise de l'échantillon, il paraît impératif de mesurer directement le pH de l'eau et ceci est illustré par le fait qu'une simple variation de la pression des gazes (CO_2 et O_2) modifie la valeur de pH.

La mesure du pH dans notre cas a été effectuée à l'aide toujours d'un multi-paramètre portable de type **WTW** (étalonné à l'aide de deux solutions; celles de pH 4 et pH 7).

3-2-1-3-La conductivité électrique (CE)

Mesurée à l'aide d'un conductimètre toujours combiné dans le multi-paramètre (de type **WTW**). Cette méthode consiste à mesurer la résistance électrique d'une solution (dans notre cas l'eau des forages) et c'est l'inverse de la résistivité électrique, les résultats sont lus directement sur un écran digital (il est à signaler que la valeur lue est le résultat d'un convertissement qui prends en considération et en premier lieu la température). Ces résultats peuvent être mentionnés en Siemens ou aussi en g/l.

Rodier et *al*, (2005), expliquent que la conductivité électrique d'une eau (ou d'une solution) détermine sa conductance entre deux électrodes métalliques de 1cm^2 de surface et séparés l'un de l'autre à 1cm.

3-2-2-Analyses au laboratoire

3-2-2-1-Le pH

Par méthode électro-métrique avec électrode combiné (déjà expliquée).

3-2-2-2-La conductivité électrique

De la même manière que celle élaborée sur terrain.

3-2-2-3-Totale des sels dissous (TDS)

Représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau que se soit organiques ou inorganiques (sous forme de cations ou anions) (Shib, 2014).

C'est un des indicateurs importants de la salinité d'une solution. C'est ainsi qu'on trouve une relation qui la relie avec la conductivité électrique et plus la teneur en matière dissoute totale est élevée, plus le taux de salinité de l'eau est fort.

$$\text{TDS (mg/l ou ppm)} = F * \text{CE. Sachant que :}$$

CE est la conductivité électrique de la solution (en dS/m) et F est un facteur qui avoisine 640

3-2-2-4-Résidus secs (RS)

Le résidu sec correspond à la teneur de matières dissoutes et en suspension d'une eau (Rodier et *al*, 2009).

La méthode de sa détermination consiste à évaporer (dessécher) dans un bécher (de poids **P**) une quantité connue de l'eau à analyser (**Pe**, dit aussi prise d'essai). Après séchage on pèse une autre fois le bécher et le résultat trouvé (**P'**) indique celui du poids de bécher plus l'eau séchée.

$$\text{RS (mg/l)} = ((P' - P) * 1000) / \text{Pe}$$

3-2-2-5-Dureté total (titre hydrométrique: TH en F°)

Appelée aussi titre hydrométrique, le plus souvent causée par le calcium et le magnésium dans une solution (Qureshimatva et *al*, 2015).

Sa détermination consiste à prendre un volume d'eau à analyser (soit 25ml), compléter avec e l'eau distillée jusqu'au volume de 50ml, ajouter 2ml d'une solution tampon (de pH compris entre 9.5 et 10 pour empêcher la précipitation du magnésium) et une pincé de noir eriochrome et enfin titrer avec l'EDTA (N/50) jusqu'à l'arrivée au virage bleu (noter le volume V) (Rodier et *al*, 2009, FNS., 2013).

L'expression des résultats est comme suit :

$$\text{TH (F°)} = V \text{ EDTA (ml)} * 4.$$

3-2-2-6-Alcalinité (TA- TAC)

Comme on a déjà expliqué au premier chapitre de la présente étude, l'alcalinité d'une eau se détermine par deux titres; titre alcalimétrique (dit aussi titre alcalimétrique simple, TA) et titre alcalimétrique complet (TAC). Les deux méthodes à utiliser sont titrimétriques (Rodier et *al*, 2009);

a) Titre alcalimétrique simple (TA) :

On ajoute quelques gouttes de phénolphthaléine comme indicateur coloré à 10ml de l'eau à analyser, après l'apparition de la coloration rose, on titre avec l'HCl (0.1N) jusqu'à la disparition de cette coloration (rose). Soit (V) le volume d'HCl utilisé lors de la titrations. Puis on calcule le TA en fonction des chiffres trouvés.

b) Titre alcalimétrique complet (TAC)

On ajoute 2 à 3 gouttes de l'indicateur coloré méthylorange à 20 ml de notre eau à analyser puis on titre avec l'acide sulfurique (H₂SO₄ avec une normalité de N/25) jusqu'à la coloration jaune ou jaune orangée. Le volume de titrasson est V' (ml). Le TAC est calculé à base des résultats trouvés.

3-2-2-7-Dosage des ions**a) Carbonates et bicarbonates**

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la mesure ou la détermination des carbonates et bicarbonates, celle la plus connue et la plus utilisée aussi est dite méthode titré-métrique ; un aliquote de l'eau est titré avec un acide (H₂SO₄ ou HCl) à faible concentration (0.1N) en présence phénolphthaléine (comme indicateur de carbonates) et du méthylorange (comme indicateur de bicarbonates).

b) Chlorures

C'est l'un des principaux anions inorganiques dans l'eau salée et douce, provient de la dissolution des sels naturels par lessivage ou comme résultats des activités humaines et sa présence avec de grandes concentrations nuit la croissance des végétaux (Moukhoukha et al, 2011; Nouayti et al, 2015).

Afin de les mesurer, nous avons utilisé la méthode volumétrique de MOHR. Par cette méthode, les chlorures sont totalement précipités par une solution à base d'argent et la fin de l'analyse est marquée par l'indicateur Chromates (K₂CrO₄) qui forme un précipité rouge (Ag₂CrO₄) avec l'argent en excès.

c) Sulfates

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfates de baryum par le chlorure de baryum selon la formule:



La méthode détaillée consiste à prendre 50ml de notre eau à analyser, l'ajouter 2ml d'acide chlorhydrique, chauffer jusqu'à l'ébullition de la solution tout en agitant régulièrement à fin d'éviter la précipitation. On ajoute quelques gouttes de chlorure de Baryum (BaCl_2 à 10%). On procède à la filtration, puis on répète la même étape précédant. Après filtration et précipitation complète, peser le papier filtre, transmettre le papier filtre à l'étuve, laissé refroidir et peser.

$$\text{SO}_4^{2-} = (\text{P2-P1}) * \text{M} (\text{SO}_4) / \text{M} (\text{Ba SO}_4)$$

En prenant en considération que :

P2-P1: représente le poids de sulfate et **M :** est la masse moléculaire.

d) Nitrates et nitrites

* Nitrates:

Les recherches ont montré qu'ils existent plusieurs méthodes de détermination des nitrates mais celle la plus utilisée et la plus fiable est dite de salicylate de sodium (0.5%).

Il s'agit de préparer une solution de Salicylate de sodium (0.5g dans 100ml de l'eau distillée) puis suivre les étapes suivantes (Rodier et *al*, 2009):

A 5 ml de l'eau à analyser, on ajoute 2 à 3 gouttes de NaOH (30%), 0.5ml de la solution de salicylate de sodium préparée, prendre. Evaporer très lentement (à sec à l'étuve (75 à 90°C) ou au bain marie) puis laisser refroidir, reprendre le résidu avec 1ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) et laisser reposer 10 minutes et ajouter 7.5 ml d'eau distillée avec 7.5 ml de tartrate double de sodium et de potassium (1000 ml d'eau distillée plus ajouter 400g de NaOH avec 60g de tartrate de sodium et de potassium. Enfin passer au spectrophotomètre au 415 nm et on aura le résultat en mg/l.

*Nitrites:

Dosées par la méthode proposée par Rodier et *al*, (2009), qui consiste à ajouter 1ml du réactif mixte (40 g de sulfanilamide + 100ml d'acide phosphorique + 2g de N-1-Naphtyl éthylène diamine + 1000 ml d'eau distillée), la présence des nitrites est indiquée par l'apparition de la coloration rose qui nécessite le passage de l'échantillon analysé au spectrophotomètre à 540 nm et enfin on effectue la lecture.

a) Calcium

La méthode de détermination de cet élément (Ca^{++}) dans nos échantillons d'eau est celle à base d'EDTA à pH compris entre 12 et 13 et avec présence du murexide. Donc l'EDTA va réagir au début avec les ions de Ca^{++} libres, puis avec ceux combinés avec l'indicateur qui vire d'une couleur rose à violet.

b) Magnésium

Il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau.

Donc on peut déduire la valeur du magnésium à partir des résultats trouvés du calcium et de la dureté totale TH. Par la formule suivante:

$$\text{Mg}^{++} \text{ (mg/l)} = (\text{V}_{\text{TH}} - \text{V}_{\text{Ca}^{++}}) * 12.5.$$

Notant que

V_{TH} : représente le volume d'EDTA nécessaire pour le dosage de la dureté.

$\text{V}_{\text{Ca}^{++}}$: est le volume d'EDTA utilisé lors du dosage du calcium.

12.5: est le résultat du calcul par la formule $((N_{\text{EDTA}} * M_{\text{Mg}^{++}} / 2) * 100) / \text{Pe}$.

Et Pe représente la prise d'essai.

c) Sodium

Avec de grandes concentrations, le Na^+ est l'un des éléments les plus indésirables que ce soit pour le sol et ces propriétés ainsi que pour les plantes.

Avant de doser le sodium dans une solution ou eau, on doit tout d'abord s'assurer de la conductivité électrique, puisqu'à des conductivités élevées on doit avant d'analyser le taux de sodium procéder à des dilutions.

La présence du sodium a plusieurs origines; naturelles, industrielle et même anthropique.

Le dosage du sodium dans nos eaux a été effectué par spectrophotométrie à flamme. Le principe de cette méthode est de décomposer les atomes du sodium durant leurs passages dans la flamme (après étalonnage qui va correspondre au Na^+).

d) Potassium

Pour le doser, on a utilisé la méthode à spectrophotomètre à flamme, avec le même principe déjà cité dans le dosage du sodium.

3-3- Représentation des résultats trouvés de point de vue hydro-chimique:

Il n'est plus à montrer que la gestion des ressources en eaux doit se base en premier lieu sa caractérisation générale (chimique et physico-chimique) puis hydro-chimique.

L'eau, lorsqu'elle circule dans les vides des formations géologiques va entraîner obligatoirement certains éléments qui eux mêmes vont influencer le faciès chimique de ces eaux souterraines (Domenico et Schwartz., 1990).

Boucenna., (2021), expliqua que la représentation graphique hydro-chimique des données acquit par les analyses physico-chimiques, constitue un outil très efficace pour l'interprétation ainsi que la comparaison des propriétés des eaux. Cette représentation graphique des résultats peut être effectuée par plusieurs méthodes, qu'on cite (les plus utilisées) ; diagramme en barres, diagramme circulaire, diagramme rigide, diagramme triangulaire et diagramme verticale.

Dans notre présente étude on a utilisé le **logiciel Diagramme laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon version 6.76.**

3-3-1-Diagramme de Piper:

Dans lequel, on utilise les valeurs trouvés (par analyses) des éléments majeurs à fin de représenter les faciès chimiques des eaux souterraines tout en permettant aussi de suivre l'évolution de la composition de cette eau. Il se compose de deux triangles (le premier à gauche, portants les cations (l'eau est calcique si le point est près du pôle Ca^{++} , magnésienne si le point est près du pôle Mg^{++} et enfin sodique potassique si le point est près du pôle $Na^+ + K^+$) et le deuxième à droite des anions (l'eau est chlorurée si le point est près du pôle Cl^- , sulfatée si le point est près du pôle SO_4^- et enfin bicarbonatée si le point est près du pôle HCO_3^-) et un losange de projection en haut ; il est à noter que les éléments sont exprimés en %, meq/l.

La classe de l'eau pour chaque échantillon est définie en fonction de la projection des points par rapport aux pôles du losange de projection.

3-3-2-Diagramme de Scoller et Berkallof

Un diagramme semi-logarithmique qui permet la représentation graphique des ions majeurs en méq/l, il permet aussi de connaître le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. Alors le type d'eau est défini par les deux pics maxima dont l'un correspond à un cation et l'autre à un anion.

3-3-3-Diagramme de Richards (Riverside).

C'est un diagramme qui combine entre les données de la CE (risque de salinité) et le SAR (risque sodisation) de chaque échantillon d'eau analysé. Il est découpé en quatre classes de salinité en axe des abscisses et quatre autres classes de d'alcalinité (sodisation) en axe des ordonnées.

3-4-Indices de qualité des eaux d'irrigation analysées et analyses statistiques

C'est une approche par laquelle, on déduit les problèmes relatifs à l'adéquation et la probabilité d'utilisation d'une eau pour l'irrigation des cultures, tout en se basant sur une utilisation de certains indices. Il s'agit d'une transformation des concentrations de certains paramètres en indices par le biais des formules mathématiques (Hébert, 1996).

3-4-1-Indices de qualité des eaux d'irrigation analysées (IQE)

D'après Sidhu et al, (2015), le principe de son établissement est basé sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec des normes spécifiques.

Dans le présent travail, on a utilisé le modèle **IWQI** développé par (Meireles et al, 2010), qui se diffère de la méthode utilisée par l'OMS.

La différence entre les deux réside dans le fait que ce modèle (**IWQI**) est plus complet et prend en compte un plus grand nombre de paramètres pour évaluer la qualité de l'eau. Ce modèle permet ainsi d'avoir une vision plus globale et précise de la qualité de l'eau et de mieux identifier les sources de pollution et les risques pour la santé humaine le développement des plantes aussi l'environnement.

En fin et en se basant sur le tableau ci-dessous, on arrive à classer la qualité de nos eaux (**tableau 21**) :

Tableau 21: Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE

Classes d'IQE	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
50-75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
75-100	Très mauvaise qualité	Irrigation dans certains cas précis
> 100	Qualité inadapté	Tritement approprié requis avant tout utilisation

3-4-1-1-Risque du sodium ou pourcentage du sodium (%Na)

La caractérisation de la qualité d'une eau destinée à l'irrigation doit prendre en considération obligatoirement le pourcentage du sodium dans cette eau. C'est un paramètre de base pour tout essai d'indication de la qualité d'une eau.

La concentration en pourcentage de Na^+ est un facteur permettant d'évaluer la pertinence d'une eau utilisée à des fins d'irrigation (Wilcox, 1948).

Ce risque est calculé comme suit :

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \times 100;$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l.

Le tableau (22), donne l'interprétation éventuelle des valeurs après calculs;

Tableau 22: Interprétation des valeurs du pourcentage du sodium après calculs;

% Na	Interprétation
< 20 %	Eau de qualité excellente
20–40 %	Eau de bon qualité
40–60 %	Eau de qualité admissible
60–80 %	Eau de qualité douteuse
> 80 %	Eau de qualité inadéquate

Source: Khodapanah et al., 2009

3-4-1-2-SAR

Le taux d'adsorption du sodium (SAR) proposé par les **Richards. (1954)**, et défini comme :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}/2}}$$

Le SAR indique le niveau auquel l'eau d'irrigation subit une réaction d'échange de cations dans le sol.

3-4-1-3-Danger du Magnesium MH (dit aussi taux d'adsorption du magnésium):

Dans les eaux souterraines, les alcalino terreux (Ca^{++} et Mg^{++}) sont en équilibre. C'est ainsi que **Szabolcs et Drab, (1964)** ont proposé de calculer les valeurs du taux d'adsorption du magnésium pour déterminer la qualité de ces eaux souterraines et leur éventuelle utilisation en irrigation. Sachant que:

$$\text{MH} = \frac{\text{Mg}}{\text{Ca} + \text{Mg}} \times 100;$$

Les ions sont en meq/l

Khodapanah et *al*, (2009), jugent qu'une eau à un taux d'adsorption du Magnésium supérieur à 50, n'est plus recommandée pour l'irrigation.

3-4-1-4-KR (Kelly ratio)

C'est un indice introduit par **Kelly en 1963**. Il détermine le risque d'alcalinité de l'eau d'irrigation, en calculant le rapport entre Na^+ et $(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$ par la formule qui suit :

$$\text{KR} = \frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$$

Sachant que les concentrations en ions sont exprimées en meq/l.

Une eau avec un $\text{KR} \leq 1$ a été recommandée pour l'irrigation, tandis que l'eau avec un $\text{KR} \geq 1$ n'est pas recommandée pour l'irrigation en raison des risques alcalins (Rawat et *al*, 2018).

3-4-1-5-Indice de perméabilité (PI)

C'est aussi un des indices à calculer pour déterminer l'adéquation de l'eau à des fins d'irrigation. Son importance réside dans le fait le passage des eaux et leurs mouvements dans le sol (surtout lorsqu'elles sont chargées en ions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^-) affecte la perméabilité de ces sols et la capacité de mouvement de l'eau (Doneen, 1964).

Ainsi Doneen, (1964) développa une équation (**PI**), qui prends en considération les concentrations des ions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^- (exprimés en meq/l) par la formule suivante :

$$\text{PI} = \frac{\text{Na} + \sqrt{\text{HCO}}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na}} \times 100$$

L'interprétation probable des résultats est résumée au tableau ci-dessous (**Tab. 23**):

Tableau 23: Classification de l'adéquation de l'eau d'irrigation en fonction de PI

PI	Classe	Interprétation
>75 %	I	Adapté
25–75 %	II	Bon
< 25 %	III	Inadapté

Source: (Doneen, 1964)

3-5-Analyses statistiques des résultats trouvées

Test de Shapiro-Wilka été effectué pour rechercher une variation possible, utilisé pour chaque paramètre et chaque puits. Le coefficient de corrélation de Pearson a été appliqué pour calculer la relation entre les divers paramètres physico-chimiques.

Les niveaux de signification des tests ont été considérés comme $P < 0,05$ et hautement significatifs comme $P < 0,01$. En outre, le biplot de l'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisé pour montrer les tendances ou les modèles de regroupement. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel statistique PAST (version 4.13).

Chapitre 3 :

Résultats et interprétations

La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux que ce soit de surface ou souterraines constitue un moyen de savoir en ce qui concerne leurs origines et parcours ainsi que leurs éventuelles utilisations tout en mettant l'accent sur leurs effets positifs ou négatifs sur la consommation humaine directe ainsi que leur utilisation dans le secteur agricole par ce qu'on appelle irrigation.....

Dans ce chapitre on procède à une représentation détaillée des résultats trouvés (sur les eaux analysées) des forages caractérisés ainsi que des essais de leurs interprétations (comparativement aux recherches ultérieures et normes de qualité utilisées dans ce secteur).

Il s'agit des résultats des analyses physico-chimiques, caractérisation hydro-chimique, détermination des principaux indicateurs de qualité et enfin analyse statistiques.

1-Caractérisation physico chimique générale des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila.

Les résultats analytiques de nos eaux sont comme suit :

1-1-Température:

Comme on a déjà expliqué au premier chapitre; l'importance de la détermination de la température de l'eau n'est plus à démontrer.

Celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gazes, la dissociation des sels dissouts, ainsi que la détermination du pH (Rodier *et al.*, 2005).

De point de vue agronomique, la température de l'eau à utiliser en irrigation doit être contrôlée. Si on irrigue avec de l'eau froide ou très froide, les nutriments (éléments nutritifs) vont prendre beaucoup plus de temps pour leurs solubilités et libération dans la rhizosphère et les systèmes racinaires des plantes auront des difficultés pour les atteindre. En contre partie, si la température des eaux d'irrigations est élevée, les vitesses des réactions chimiques augmentent, la concentration en oxygène diminue ce qui aura comme effets un manque de puissance et une diminution de la capacité d'alimentation de ces plantes ou cultures.

Entant qu'agronomes, on doit essayer de mettre les plantes ou les cultures dans des conditions qui assureraient leurs meilleurs développements en particulier leur alimentation en eau, éléments nutritifs et oxygène. Et bien que chaque culture ou plante ait des besoins particuliers,

les chercheurs ont proposé une température d'eau d'irrigation qui semble acceptable pour la majorité des cultures, entre 20°C et 25°C et ils ont même préconisé comme température optimale 23°C qui n'aura aucun problème.

Dans notre cas, nos eaux souterraines analysées (**Fig. 16**) affichent des valeurs comprises entre 19.8°C comme minimale et 23.2°C comme maximale, avec une moyenne de 21.5°C .

Selon les valeurs enregistrées de température, une alcalinité des eaux souterraines est fort probable due à la nature géologique des terrains traversés par ces eaux, en particulier riches en matériaux d'accumulation calcaires, gypseuses et salines (Dussart, 1966; Bermond et Vuichard, 1973, Joshi et al, 2009; Nouayti et al, 2015; Islam et al, 2017).

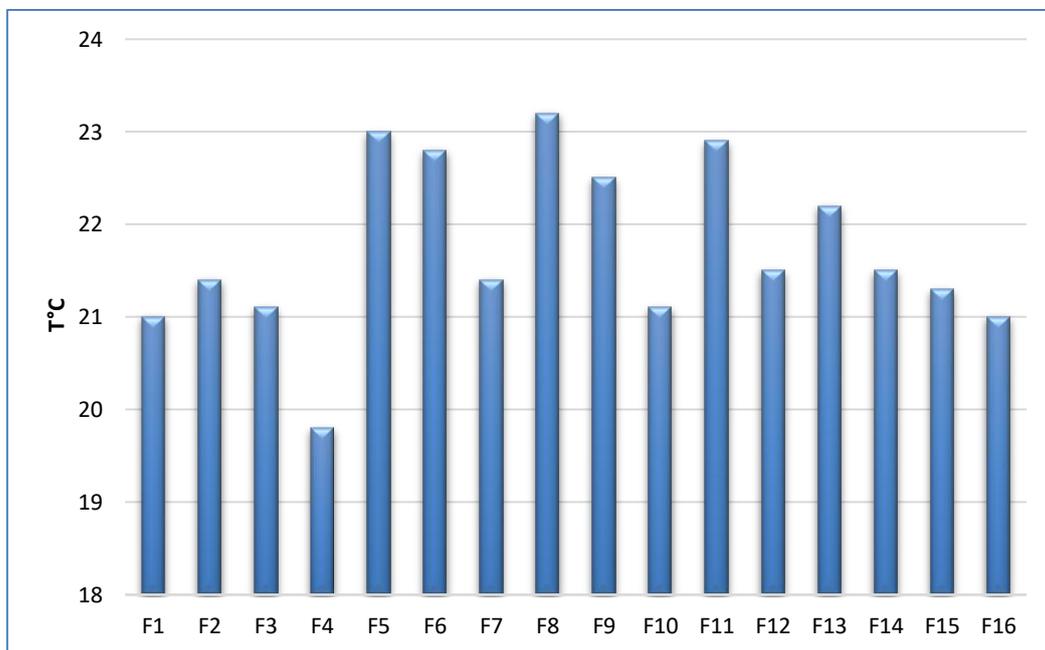


Fig. 16: Valeurs des températures enregistrées des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.

En comparant nos résultats avec la norme proposée par les chercheurs, on trouve que nos eaux de point de vue température sont acceptables pour l'ensemble de nos forages à l'exception de **F4** (de la zone de Maadid) qui affiche une valeur ($19,8^{\circ}\text{C}$) légèrement inférieure aux normes recommandées (**Fig. 16**).

1-2-pH des eaux analysées:

Nos résultats indiquent que nos eaux ont des valeurs de pH qui dépassent 7 pour l'ensemble des forages, avec une valeur moyenne de **7.65**, valeurs maximale de **8.26 (F7)** et minimale de **7.03 (F1)** (**Fig. 17**).

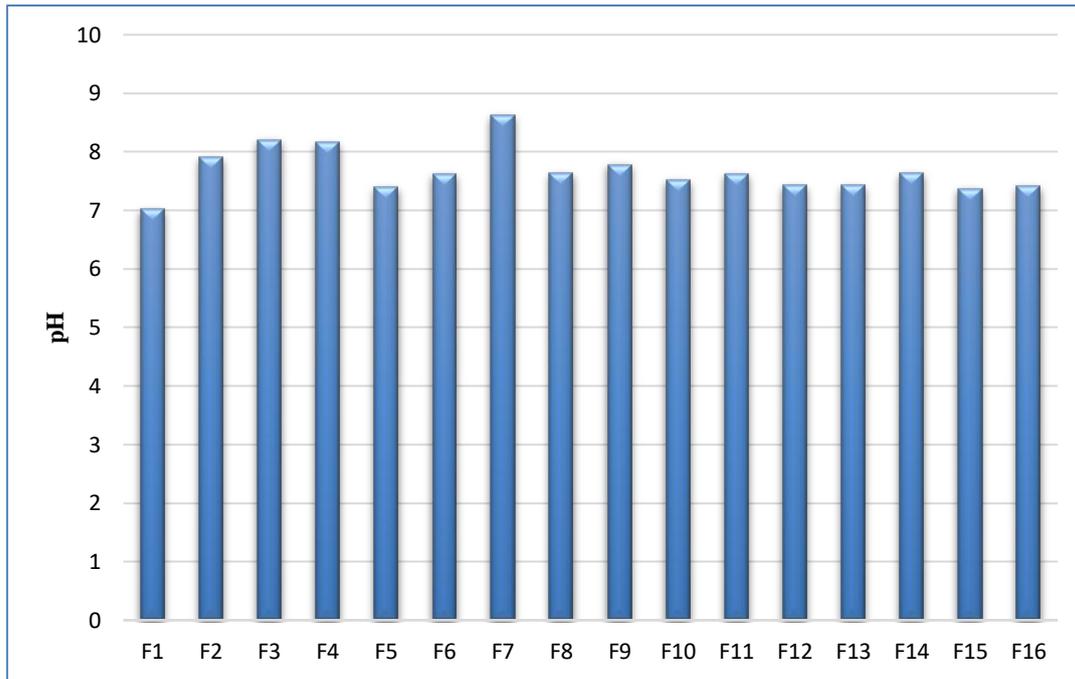


Fig. 17: Valeurs des pH des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.

Nos résultats indiquent l'affichage d'une légère alcalinité de nos eaux analysées.

En se basant sur les normes de détermination et d'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation proposées par Landreau et Monition, (1977), nos eaux qui affichent des valeurs de pH inférieures à **8.4** (Fig. 17) pour l'ensemble des forages sont considérées comme des eaux qui ne présentent pas de problèmes de point de vue pH et qui n'auront pas d'effets négatifs sur les cultures à installer de point de vue pH.

Selon les deux chercheurs précités (Landreau et Monition, 1977); on divise les eaux d'irrigation comme suit :

*Des eaux ne présentent **pas de problèmes** si on irrigue avec (s'il y en a pas d'autres facteurs tels que la salinité ou la toxicité de certains éléments...), de pH **entre 6.5 et 8.4** ;

*Des eaux d'irrigation qui présentent des **problèmes sérieux**, se sont ceux qui présentent des pH **inférieurs à 6 et supérieurs à 8.4**.

Ils existent d'autres normes pour l'interprétation des résultats des pH des eaux destinées à l'irrigation, qu'on cite aussi Couture (2004; 2006). Dans ces recherches, le pH devrait se situer **entre 5.5 et 6.5**, car à ces valeurs la solubilité des micro-éléments est optimale (surtout en micro irrigation).

L'OMS (2006), a fixé l'intervalle de pH **entre 6.5 et 8** comme recommandé pour l'irrigation. Nos eaux sont en conformité avec cet intervalle à l'exception des eaux des trois forages **F3, F4 et F7** qui présentent respectivement des valeurs de **8.21, 8.16 et 8.26** depH.

On ajoute aussi, que nos résultats trouvés de pH sont harmonieux (en concordance) avec les résultats des travaux de (Amroune, 2018). Et que l'intervalle des valeurs trouvées dans les deux cas sont caractéristiques des aquifères peu profonds dans les zones arides et semi-arides (Benabderrahmane, 2018).

D'ordre générale, les valeurs de pH des eaux naturelle oxillent entre 6 et 8.5 (Chapman et Kimstach, 1996). Nos résultats son enregistrés dans cette intervalle aussi.

1-3-Conductivité électrique (CE en $\mu\text{S/cm}$):

La conductivité électrique (CE) est une des caractéristiques des eaux d'irrigation primordiales à déterminer. Sa valeur est en relation étroite avec la température de l'eau et proportionnelles à sa minéralisation (Rodier et *al*, 2009; Mens et Drouane, 2000; Derwich et *al*, 2010)

La conductivité électrique de nos eaux souterraines analysées marque des valeurs de variation remarquables entre les 16 échantillons des eaux analysées (**Fig. 18**); allant d'une valeur **minimale de 886.8 $\mu\text{S/cm}$** au niveau du forage **F8** à celle maximale **de 3274 $\mu\text{S/cm}$** pour le **16^{ém} forage**. La valeur **moyenne** est de l'ordre **de 2156.55 $\mu\text{S/cm}$** .

Le recours aux normes recommandées pour la qualité des eaux d'irrigation proposées par Ayers et Westcot, (1994) qui proposent la valeur de **3000 $\mu\text{S/cm}$** comme limite **admissible acceptable**; nous a aider à classer nos eaux souterraines analysées comme suit :

*Un seul forage présente des eaux **non admissible**, il s'agit de **F16**;

***Le reste** des forages ont des valeurs de CE considérées comme **admissible**;

*Il est à noter aussi qu'on a des forages avec des valeurs de CE proches de la limite non recommandée à l'irrigation, on parle ici de **F1, F2 et F14** qui présentent respectivement des valeurs de **2722.60 $\mu\text{S/cm}$, 2974.75 $\mu\text{S/cm}$ et 2513.05 $\mu\text{S/cm}$** .

Les valeurs plus ou moins élevées de CE de nos eaux indique un éventuel enrichissement en certains sels dans les eaux souterraine de notre zone d'étude.

Rodier et *al*, 2009, résumant dans le tableau (**Tab. 24**) la relation entre la conductivité électrique d'une eau et son degré de minéralisation.

Tableau 24: Relation entre la CE d'une eau et son degré de minéralisation

Conductivité de l'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation
CE < 100	Très faible
100 < CE < 200	Faible
200 < CE < 333	Moyenne
333 < CE < 666	Moyenne accentuées
666 < CE < 1000	Importante
CE > 1000	Elevée

Source: (Rodier et *al*, 2009)

La comparaison de nos résultats d'analyses des **16** forages étudiés avec les normes figurant au tableau précédent fait ressortir la classification suivante des nos eaux vis à vis du paramètre minéralisation : **à l'exception** des eaux du **8^{em}** forage sont une minéralisation importante, les eaux des forages restants sont d'une minéralisation élevée.

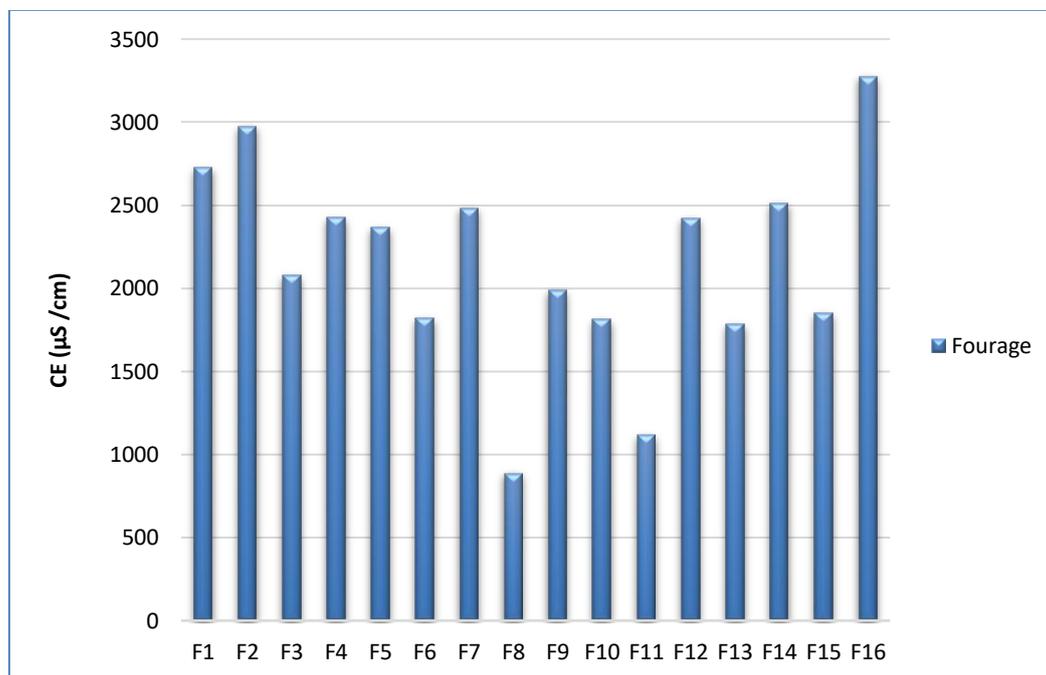


Figure 18: Variation des valeurs de CE des eaux souterraines analysées de la zone de M'Sila.

1-4-TDS des eaux analysées

D'après l'OMS (2006), les TDS rendent compte de la quantité de substances minérales dans l'eau, leurs valeurs varient considérablement dans différentes régions géologiques à cause de la différence de solubilité des minéraux.

Selon les normes d'interprétation du TDS mentionnées par Shib, (2014), nos eaux (**Fig. 19**) peuvent être classées en **eaux douces seulement pour ceux du forage (F8)** alors que **le reste est considéré comme des eaux saumâtres**.

On note aussi qu'Abdesselem et *al*, (2013), dans leur étude sur le Sud du Hodna (wilaya de M'Sila) ont montré une large variation (eux aussi) des valeurs de TDS entre les échantillons analysés et ont expliqué cette variation par le fait que les valeurs trouvées dans les eaux de la région sont caractéristiques des aquifères peu profonds dans les zones arides et semi-arides guidés par l'évaporation et l'évapotranspiration ainsi qu'à la précipitation des sels.

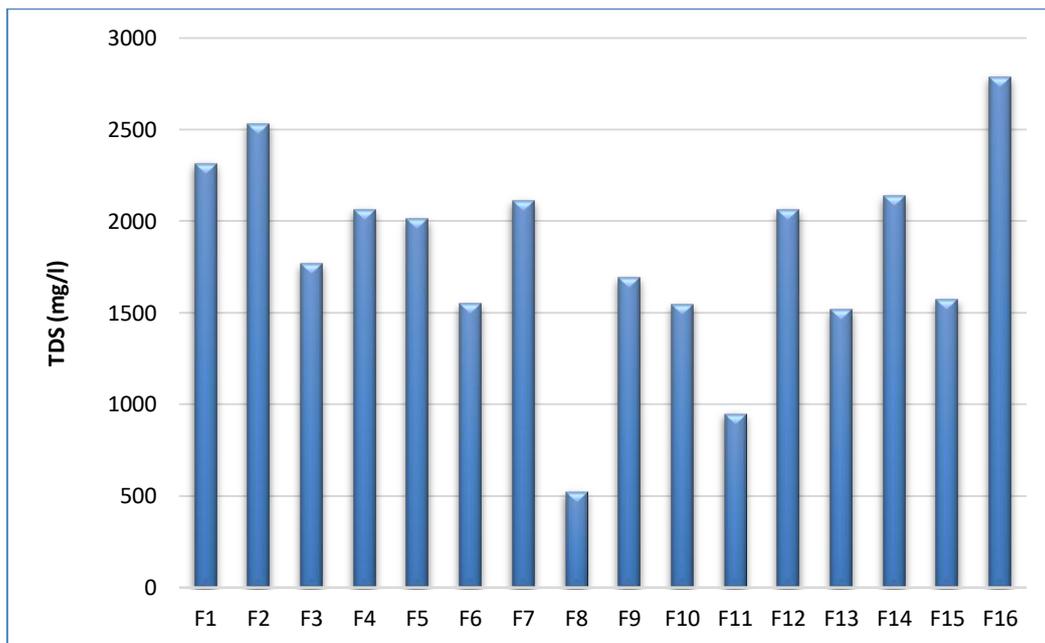


Figure 19 : Valeurs de TDS (en mg/l) pour l'ensemble des échantillons des forages analysés.

1-5-Résidus secs (RS) en mg/l:

A l'exception des eaux du forage **F8** qui sont considérées comme de bonne qualité en ce qui concerne le paramètre résidus secs, le reste affichent des valeurs qui les classent dans la gamme des eaux de qualité moyenne, acceptable et qui convient donc à l'irrigation de la majorité des cultures.

1-6-Dureté totale (TH°F) :

Parmi les mesures ou déterminations indispensables à l'évaluation de la qualité des eaux que se soit à usage industriel, domestique ou agricole, la dureté est considérée comme utilitaire (Sappa et al, 2014).

Pour la dureté totale (TH), et en comparant nos résultats trouvés (**Tab. 25**) aux normes proposées par Mayet, (1954 cité par Hadfi, 2012), on réalise que:

*Les eaux des forages **F11, F12, F13, F14, F15** et **F16** sont de faible dureté;

*Les eaux des forages **F2, F4, F6, F7, F8** et **F10** sont moyennement dures;

*Les eaux des forages **F1, F3, F5** et **F9** sont très dures.

Chaussat (2005), explique que l'augmentation des valeurs de la dureté totale est généralement du au contact des eaux avec des formations probablement carbonatées. Et c'est peut être aussi l'explication des valeurs de dureté enregistrée pour les eaux de **F1, F3, F5** et **F9**.

Tableau 25: Valeurs de dureté totale (TH) des eaux des 16 forages de la zone d'étude

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
TH°F	25.5	19.5	26.7	24.5	26.7	17	16.4	14.9	26	19	09	11	11	09	08.5	08.00

1-7-TA et TAC (en°F) :

Les valeurs de **TA** sont **nuls** pour l'ensemble des échantillons des eaux analysés.

En ce qui concerne le **TAC**, nos eaux sont marqués par **une valeur moyenne de 59.5°F**, une valeur **minimal de 29°F** enregistrés pour les eaux du forage **F15** et celle **maximale de 90°F** au forage **F3**.

1-8-Anions et cations des eaux souterraines de la zone d'étude (M'Sila):

Les résultats des analyses des anions et des cations sont résumés dans les deux tableaux (**Tab 26** et **Tab 28**).

1-8-1-Anions

Dans la zone d'étude les échantillons des eaux analysées affichent des pourcentages variés d'anions (Tab 26 et Fig. 20).

Tableau 26: Valeurs des anions des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila

	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)
F1	234.16	0	284.24	11.40	15.83	0.09
F2	3.75	0	901.55	24.77	5.64	0.07
F3	6.48	0	218.76	62.18	8.84	0.06
F4	9.93	0	513.20	58.35	0.67	0.09
F5	304.40	0	273.80	81.10	11.80	0.10
F6	326.32	0	183.08	3.38	4.27	0.08
F7	624.56	0	468.69	69.09	2.82	0.91
F8	530.10	0	251.24	127.19	2.67	0.81
F9	441.62	0	811.41	74.13	6.56	0.86
F10	73.22	0	78.20	604.65	4.10	0.10
F11	67.15	0	31.83	49.88	8.92	0.03
F12	93.72	0	33.18	744.62	7.89	0.14
F13	67.87	0	24.40	733.93	10.75	0.23
F14	107.77	0	48.60	1,783.11	6.76	0.28
F15	115.07	0	28.89	1,631.84	4.99	0.23
F16	119.20	0	74.85	2,004.51	2.63	0.25

On remarque que l'anion le plus **dominant** le **sulfate** avec un pourcentage de **52.98 %**, suivit du **chlorure** qui prends la valeur de **27.76 %**, puis le bicarbonate qui présente **18.53%** arrivant à la fin au nitrates et nitrites qui montrent des valeurs inférieures à 1% (**0.69 %** et **0.04 %** respectivement pour NO₃⁻ et NO₂⁻).

La répartition en pourcentage des anions des eaux analysées par rapport à leur total est mentionnée au **tableau 27**.

Tablea 27 : Répartitionn en pourcentage des anions par rapport à leur total

	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
%	52.98 %	27.76 %	18.53%	0.69 %	0.04 %

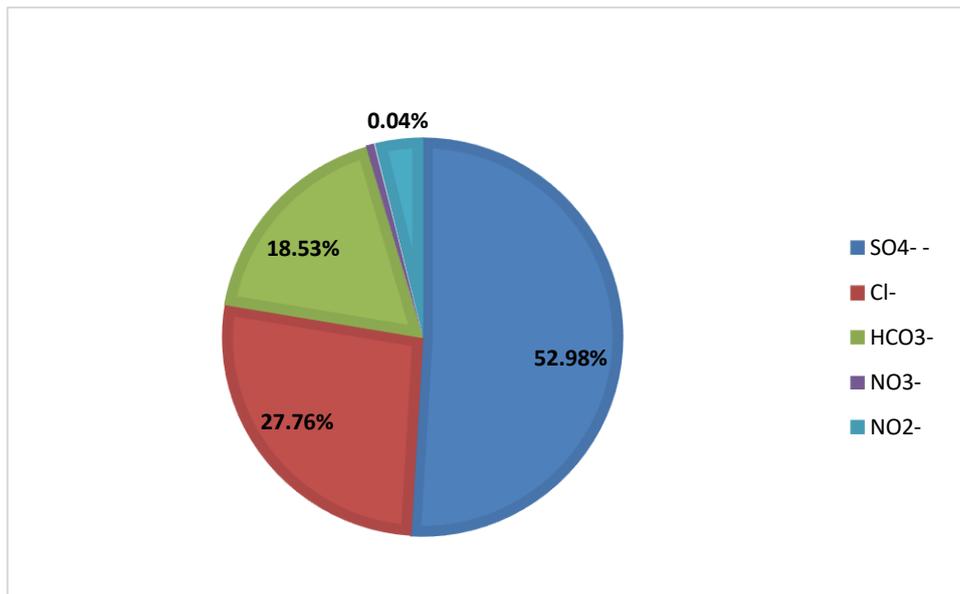


Figure 20: Répartition des anions en pourcentages par rapport à leur totalité (anions) pour les eaux analysées.

La représentation détaillée des résultats pour chacun de ces anions est comme suit :

1-8-1-1-Sulfates

Dans les eaux souterraines, les sulfates affichent des valeurs variables en fonction de l'origine de leurs provenances. Certains résultent de l'exclusion des eaux industrielles et usées, d'autres de la solubilité des formations géologiques gypseuses, comme ils proviennent aussi de l'utilisation abusive des engrais en terrains agricoles.

Plusieurs recherches ont prouvé que le soufre est rarement toxique pour les plantes, qui sont très tolérantes aux sulfates. Leur concentrations sont généralement mesurés afin d'en prévenir les carences plutôt que d'en définir les excès potentiels. Des carences en soufre peuvent être appréhendées si l'eau d'irrigation contient moins de **48 ppm** de sulfates (Couture, 2004).

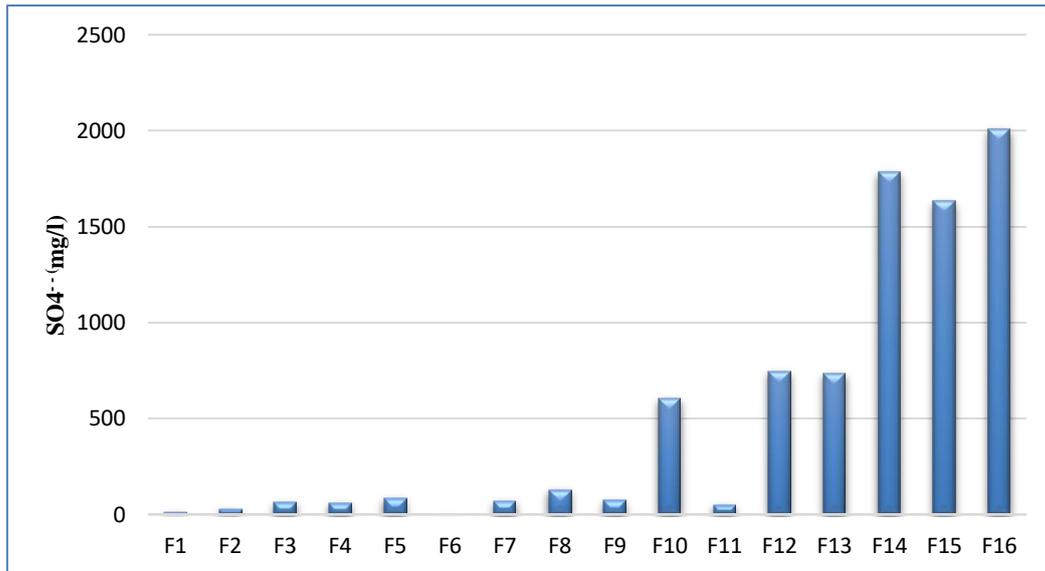


Figure 21: Les sulfates dans les eaux des forages de la zone d'étude.

Dans la présente étude, on remarque une grande variance entre la plus faible valeur (**3.38 mg/l** au forage **F6**) et celle la plus élevée (**2004.51 mg/l** pour **F16**). Sachant que la valeur moyenne était de **504.01 mg/l** (Fig. 21).

Donc à l'exception des trois forages (**F14**, **F15** et **F16**) qui présentent respectivement des valeurs de (**1783.11**, **1631.84** et **2004.51 mg/l**), les 13 forages restants affichent des valeurs inférieures à la norme (**960 mg/l**) proposée par Ayers et Westcot, (1994).

Dans de nombreux cas, un niveau élevé des sulfates est probablement dû à l'utilisation des engrais par les agriculteurs; ces engrais peuvent contenir des quantités relativement importantes de composés sulfurés organiques et inorganiques (Sharma et al, 2017). Et c'est probablement ce qui s'est passé dans notre cas.

1-8-1-2-Chlorures

Dans la nature, les chlorures sont considérés comme les anions les plus répandus. Leurs teneurs dans l'eau sont très variables et liées principalement à la nature géologique des terrains traversés (Couture, 2004).

Dans notre cas (Tab. 26 et Fig. 22), les valeurs des chlorures varient entre **24.4 mg/l** (enregistrée au forage **F13**) et **901.55 mg/l** (au niveau de **F2**).

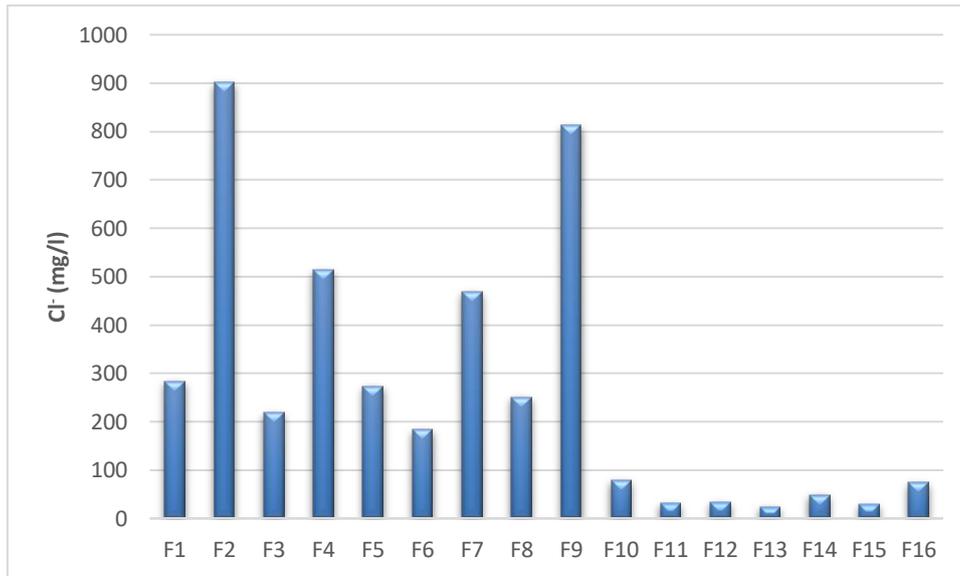


Figure 22: Valeurs des chlorures enregistrées pour l'ensemble des forages analysés.

Landreau et Montion (1977), divisent les eaux (et leurs effets sur la nutrition et le développement des plantes) en fonction de l'abondance ou de leur richesse en chlorures (en mg/l) en deux types ; des eaux à toxicité induite par l'absorption de l'eau **par les racines** et celle à toxicité induite par **absorption foliaire**....

Si on a à classer nos eaux analysées des 16 forages selon les deux cas, on a :

-Dans le premier cas (absorption par les racines) on trouve trois catégories :

*Catégorie des eaux qui ne créent pas de problèmes de toxicité en chlorures et c'est le cas des eaux avec des valeurs de chlorures **inférieurs à 150mg/l**. Dans laquelle on compte dans notre cas les eaux des forages **F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16**.

*Catégorie des eaux qui commencent de créer des problèmes en chlorures, ce sont ceux qui présentent des valeurs incluses **entre 150mg/l et 350mg/l**. Pour nos eaux analysées, il s'agit de ceux des forages **F1, F3, F5, F6 et F8**.

*Catégorie des eaux à problèmes remarquables en ce qui concerne les chlorures, elle englobe les eaux qui affichent des valeurs en chlorures qui **dépassent 350mg/l**. Dans notre cas, cette catégorie englobe les eaux des forages **F2, F4, F7 et F9**.

-Dans le deuxième cas (absorption foliaire) on a deux catégories seulement :

*Eaux d'irrigation qui ne posent pas des problèmes en ce qui concerne les chlorures; avec des valeurs **inférieures à 100 mg/l**. Pour nos eaux, ce sont ceux des forages **F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16**.

*Eaux d'irrigation posent des problèmes en ce qui concerne les chlorures, marquant des valeurs qui dépassent **100 mg/l**. Elles englobent dans notre cas les eaux des forages restant c.à.d. ceux de **F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8 et F9**.

1-8-1-3-Carbonates et bicarbonates

L'analyse des échantillons des eaux des 16 forages étudiés a fait ressortir des valeurs nulles des carbonates dans l'ensemble de nos eaux.

Les bicarbonates se présentent dans l'eau souvent sous leur formes solubles à très solubles comparativement à d'autres éléments chimiques ; elle représente la forme la plus oxygénée de l'azote.

La concentration ou l'abondance des bicarbonates dans l'eau est généralement en relation avec plusieurs facteurs, que les plus importants à citer sont : la température de l'eau en lui même, tension en CO₂, la concentration de l'eau en sels et surtout la nature géologique des terrains traversés.

Dans une eau souterraine, les taux élevés des bicarbonates sont souvent attribuée à l'agriculture et en particulier à l'utilisation des engrais azotés à des fins d'amélioration des rendements qualitativement et quantitativement

Les eaux des seize forages marquent une marge de variation assez importante entre les faibles valeurs enregistrées et celles les plus élevées; passant d'une valeur de **3.75 mg/l** à **624.56 mg/l** respectivement pour les forages **F2** et **F7**. La valeur **moyenne** est de **195.33mg/l** (**Tab. 26 et Fig. 23**).

Le recourt aux normes proposées par Ayers et Westcot, 1994 (limitant l'admicibilité des eaux d'irrigation pour l'élément chimique bicarbonate à une valeur de **610mg/l**), montre qu'à l'exception du forage **F7** que ses eaux présentent une valeur de **624.56 mg/l**; les eaux des **15 forages restants** ne présentent pas d'effet négatifs lors de leur utilisation pour irrigation.

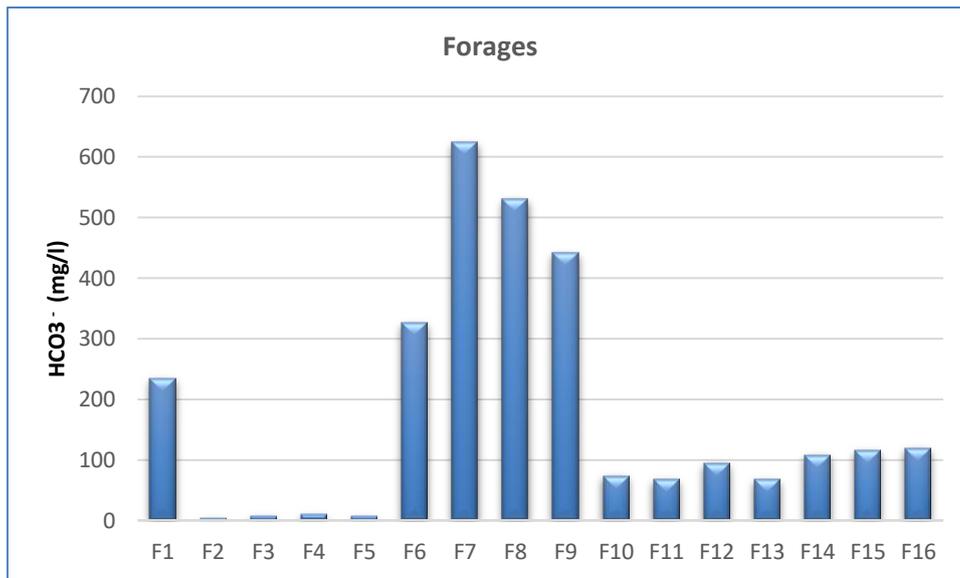


Figure 23: Valeurs de Bicarbonates (en mg/l) enregistrées pour l'ensemble des échantillons

1-8-1-4-Nitrates

L'azote est un des éléments majeurs indispensable au développement ainsi que la rentabilité (rendement qualitativement et quantitativement) des cultures et des plantes.

Dans le calcul des besoins de la plante en éléments nutritifs nécessaires surtout en cas de leurs déficiences, l'azote est le premier à prendre en considération, c'est la raison pour laquelle on doit apporter des éléments fertilisants à base de celui dernier. L'azote contenu dans l'eau d'irrigation est souvent négligeable dans ce calcul alors que dans certains cas et situation, l'azote qu'on trouve dans les eaux d'irrigation est de loin à être négliger.....

La concentration en NO_3^- dans nos échantillons d'eau analysés varie de **0,67** (au niveau de **F4**) à **15,83 mg/l** (au niveau du forage **F1**), avec une moyenne de **6,57 mg/l** (**Fig. 24**).

Les normes de qualité de l'eau fixent la limite acceptable de NO_3^- à des fins d'irrigation à 10 mg/l (Ayers et Westcot, 1994).

De ce fait, les eaux de nos forages sont divisées entre :

*Ceux de **qualité acceptable** représentés par (**F2, F3, F4, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F14, F15 et F16** avec les valeurs respectives de **5.64, 8.84, 0.67, 4.27, 2.82, 2.67, 6.56, 4.10, 8.92, 7.89, 6.76, 4.99 et 2.63mg/l**).

*Ceux qui ont dépassé le seuil représentées par (F1, F5 et F13 avec des valeurs de 15.83, 11.80 et 10.75mg/l).

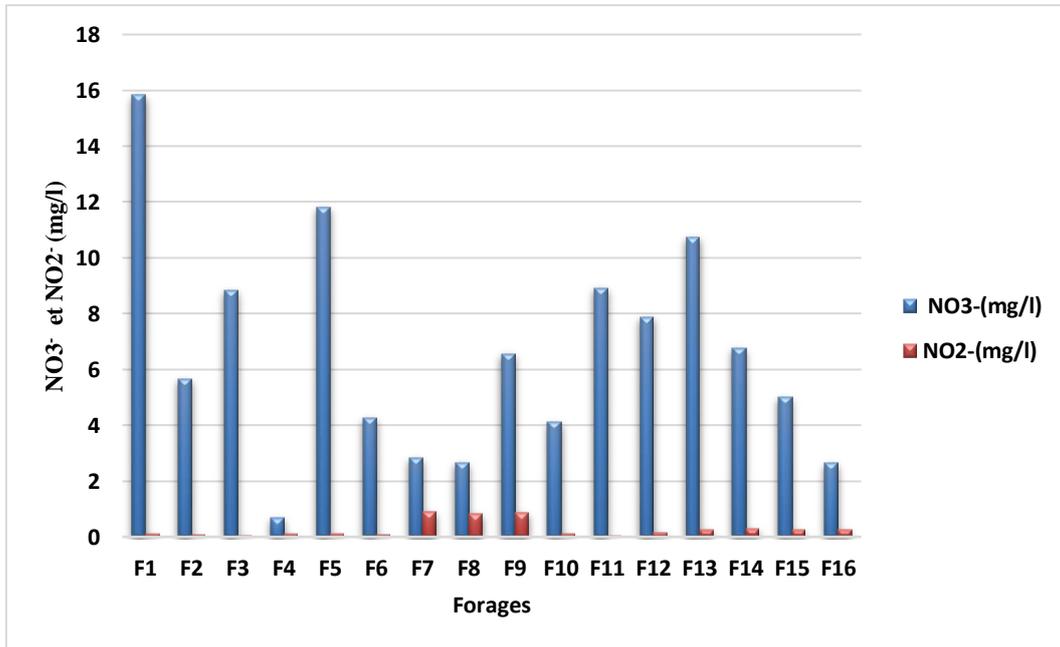


Figure 24: Valeurs des nitrates et nitrites des eaux des forages de la zone d'étude.

1-8-1-5-Nitrites

Les nitrites sont des puissants oxydants et leur abondance en quantité ou concentration importante dégrade la qualité de l'eau.

Plusieurs recherches confirment que les teneurs les plus élevées des nitrates et nitrites des eaux des puits et forages se rencontre généralement dans les zones ou régions où les activités agricoles sont intenses.

Pour nos échantillons des eaux analysés, on trouve que la concentration moyenne des nitrites est de l'ordre de **0.27 mg/l**, avec valeur **maximale de 0.91mg/l (F7)** et **minimale de 0.03 mg/l (F11)** (Fig. 24).

1-8-2-Cations

Les résultats des analyses des cations de nos eaux souterraines analysées sont résumés dans le **tableau 28**.

Tableau 28: Valeurs des cations des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila

	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
F1	175.54	79.96	23.14	4.13
F2	37.45	157.30	30.65	3.18
F3	57.36	181.40	9.46	4.32
F4	44.71	196.33	20.24	5.43
F5	168.91	97.29	15.94	6.85
F6	105.80	63.12	14.52	3.66
F7	135.98	27.53	1.44	3.61
F8	108.08	39.65	0.43	4.64
F9	172.20	86.61	2.02	3.58
F10	62.34	123.55	88.23	1.18
F11	19.38	68.17	4.00	0.31
F12	40.42	68.01	21.24	1.02
F13	37.40	68.87	1.16	0.41
F14	54.85	121.38	12.75	1.74
F15	37.67	45.22	2.38	0.44
F16	43.80	81.64	15.59	2.66

Si on compare les pourcentages de chacun des cations par rapport à leur totalité, on note que (**Tab 29** et **Fig. 25**):

Tableau 29: Répartition des cations en pourcentage par rapport à leur totalité

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺⁺	K ⁺
%	41.75%	48.30%	8.44%	1.51%.

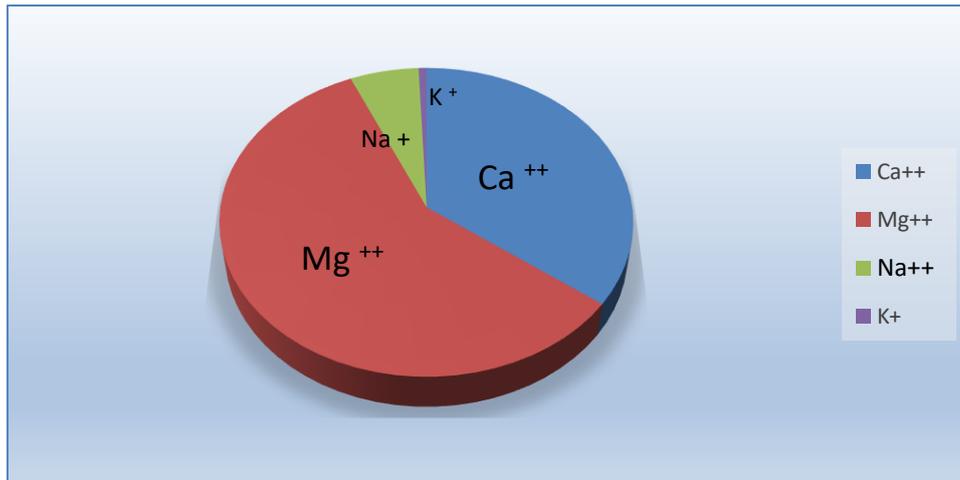


Figure 25: Répartition des anions en pourcentages par rapport à la totalité des anions des eaux analysées.

*Le cation dominant est le **magnésium (48.30%)**;

*En deuxième position on trouve le **calcium** avec la valeur de **41.75%** ;

*Le troisième est le **sodium** qui prend un pourcentage inférieur à 10% (**8.44%**);

*Le dernier est le potassium qui affiche un pourcentage qui peut être considéré comme négligeable comparativement avec les autres; **1.51%**.

Comme représentation détaillée de chacun de ces éléments dans nos eaux des 16 forages on a:

1-8-2-1-Magnésium

Dans presque la quasi-totalité des eaux naturelles quelques soient leurs natures ou origines, on trouve le magnésium associé au calcium mais avec des concentrations variées l'un par rapport à l'autre.

De plus l'origine du Mg⁺⁺ est semblable à celle du Ca⁺⁺, parce qu'il provient généralement de la dissolution des calcaires dolomitiques (Ca, Mg) CO₃ à fortes teneurs en magnésium (Sakaa, 2013).

Pour l'irrigation, le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ sont essentiels, leurs importance repose sur le fait que dans le cas des sols et à eaux riches à très riches en Na⁺, ils aident à contrebalancer l'effet de du sodium (Singh et al, 2006).

Nos résultats affichent des valeurs de magnésium comprises entre **27.53 mg/l** comme valeur **minimale** et **196.33 mg/l** comme valeur **maximale** respectivement pour les forages (**F7 et**

F4) (tableau 28 et figure 26). Indiquant qu'il s'agit des eaux souterraines de qualité acceptable comparativement aux normes (200mg/l) proposées par Ayers et Westcot, (1994).

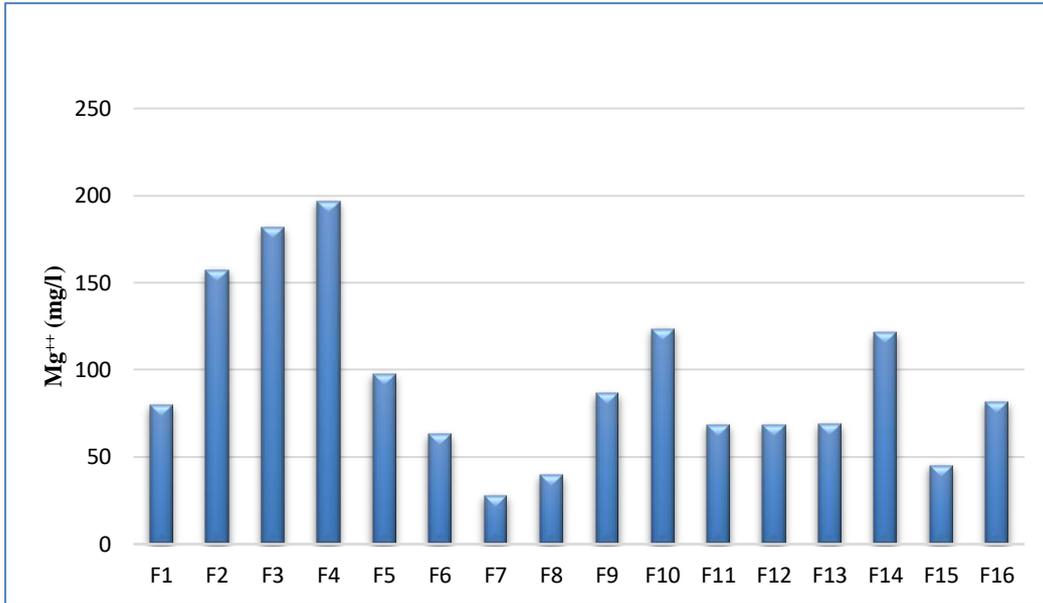


Figure 26: Concentration du Mg⁺⁺ dans les eaux des 16 puits étudiés.

1-8-2-2-Calcium

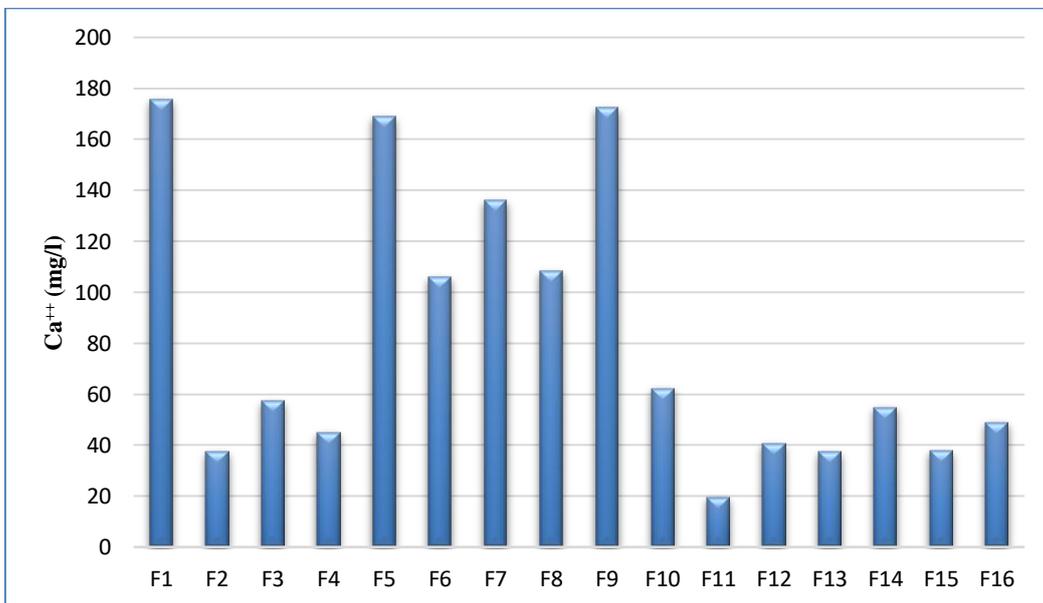


Figure 27 : Concentration du Ca⁺⁺ dans les eaux des échantillons étudiés

D'après les résultats mentionnés au **tableau 28** et aussi à la **figure 27**, on note que le calcium (Ca^{++}), affiche des **valeurs comprises entre 19.38 mg/l (F11)** comme valeur **minimale** et **175.54 mg/l (F1)** entant que **maximale**, la valeur **moyenne** est de l'ordre de **81.37 mg/l**.

Dans les eaux souterraines, la présence éventuelle du calcium (Ca^{++}) peut avoir deux principales origines; soit de la dissolution des formations carbonatés (en particulier du calcaire par présence du gaz carbonique) d'une part, ou de la dissolution des formations gypseuses.

Ajoutant aussi que la présence de Ca^{++} dans l'eau, qui est dissoute à partir de la terre et des roches conduisant à la dureté de l'eau, provient d'unités géologiques et de déchets agricoles et industriels (Deshpande et Aher, 2011; Kumaravel et *al.*, 2014).

Comparativement aux normes recommandée pour la qualité des eaux d'irrigation proposés par Ayers et Westcot, (1994); la valeur **limite** acceptable est de l'ordre de **400 mg/l** confirmant que **nos valeurs sont acceptable et ne présentent pas de risques** de point de vue calcium.

1-8-2-3-Sodium

L'évaluation de l'adéquation des eaux souterraines à l'irrigation est principalement basée sur l'évaluation de la teneur en Na^+ par rapport aux cations totaux dans le système (Varol et Davraz, 2015).

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation (Couture, 2004).

Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau. La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que les sols plus lourds lorsqu'ils sont irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, cependant un problème potentiel existe. Il (sodium) contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme les carottes, les haricots, les fraises, les framboises, les oignons, pour en nommer quelques unes. De grande quantité de sodium combiné avec du chlorure donne à l'eau un goût salé (Couture, 2004)

Dans notre cas, la concentration de Na^+ dans les eaux souterraines de la zone d'étude (**Fig. 28**) varie de **0,43 (F8)** à **88,23 mg/l (F10)**. La valeur moyenne est de **16,45 mg/l**.

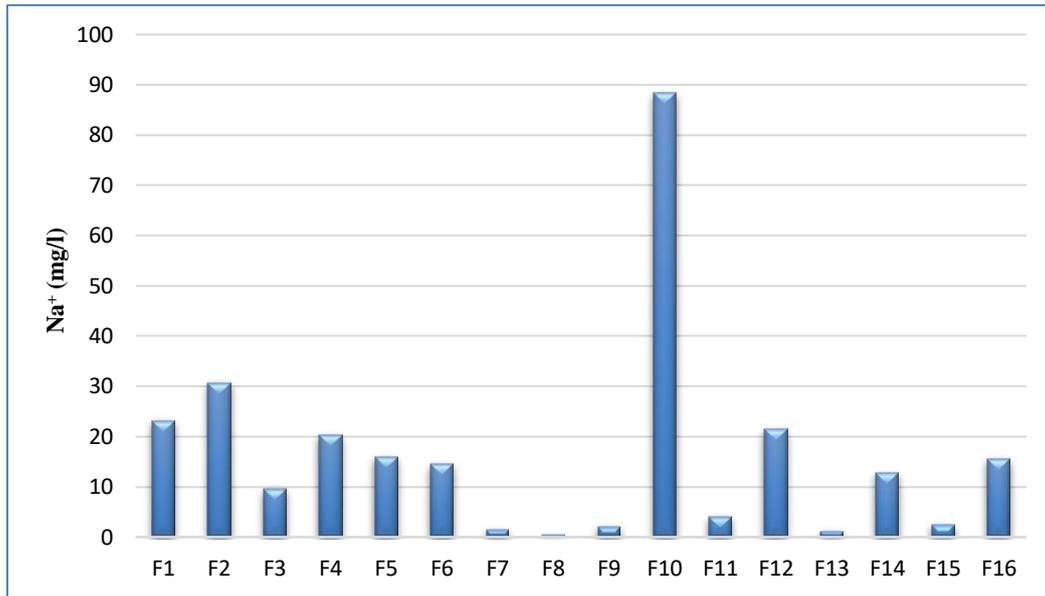


Figure 28 : Valeurs de sodium enregistrées pour nos échantillons analysés.

Lorsqu'on parle de toxicité spécifique des plantes par le Sodium, on se trouve obligé de préciser deux cas (Landreau et Monition, 1977):

*Cas d'**absorption** des eaux d'irrigation **par les racines**, dans lequel on distingue des eaux **sans problèmes** de toxicité, avec des valeurs de Sodium **inférieurs à 70mg/l** (dans notre cas, il s'agit de toutes les eaux des forages **à l'exception de F10**), des eaux qui présentent un **problème** avec des valeurs de Sodium incluant **entre 70 et 200 mg/l** (eaux de la limite de toxicité par le Sodium (dans notre cas, il s'agit de **F10** qui affiche une valeur de **88.23mg/l**) et enfin des eaux qui **présentent un sérieux problème** de toxicité en Sodium et c'est ceux qui ont des valeurs qui **dépassent 200mg/l** (qui n'existent pas dans le cas de nos eaux des forages destinées à l'irrigation).

*Cas d'**absorption** des eaux d'irrigation **par les feuilles** en cas d'irrigation par aspersion. On a des eaux qui ne présentent **pas de problèmes** en ce qui concerne leur taux en Sodium lorsqu'elles affichent des valeurs inférieures à **70mg/l** (toutes les eaux de nos forages **sauf (F10)**), et celles qui présentent des problèmes avec des valeurs qui dépassent **70mg/l** (dans notre cas ce sont les eaux du forage **F10**).

1-8-2-4-Potassium

C'est un élément assez important dans les zones riches en minéraux silicatés (plagioclases potassiques, argiles potassiques) et sa présence est souvent constant dans les eaux naturelles et ne dépasse pas habituellement **10 à 15mg/l** et dans le cas des nappes superficielles, le potassium provient de l'altération des formations argileuses en particulier les argiles potassiques (Sakaa, 2013).

Des concentrations élevées de K^+ peuvent introduire une carence en magnésium et une chlorose ferrique (Salifu et al, 2017).

Les valeurs du potassium (K^+) des eaux des forages de la zone d'étude varient entre **0,31 mg** (comme valeur **minimale** enregistrés au niveau F11) et **6.85 mg/l** (comme valeur **maximale** pour **F5**). Ces valeurs sont acceptables comparativement aux normes proposées pour le potassium dans les eaux d'irrigation pour **F10, F11, F12, F13, F14, F16** (car la limite acceptable admissible de K^+ recommandée par Ayers et Westcot, 1994 pour l'irrigation de l'eau qui est de 2 mg/l et légèrement élevées à élevées pour **F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9 et F15**).

Vu l'intervalle (**Fig. 29**) qui est assez important entre les valeurs (minimale et maximale), on déduit que les valeurs élevées (enregistrés à **F1, F3, F4, F5, F8**), sont probablement enregistrées dans les zones marquées par l'intervention de l'homme lors des travaux de fertilisation.

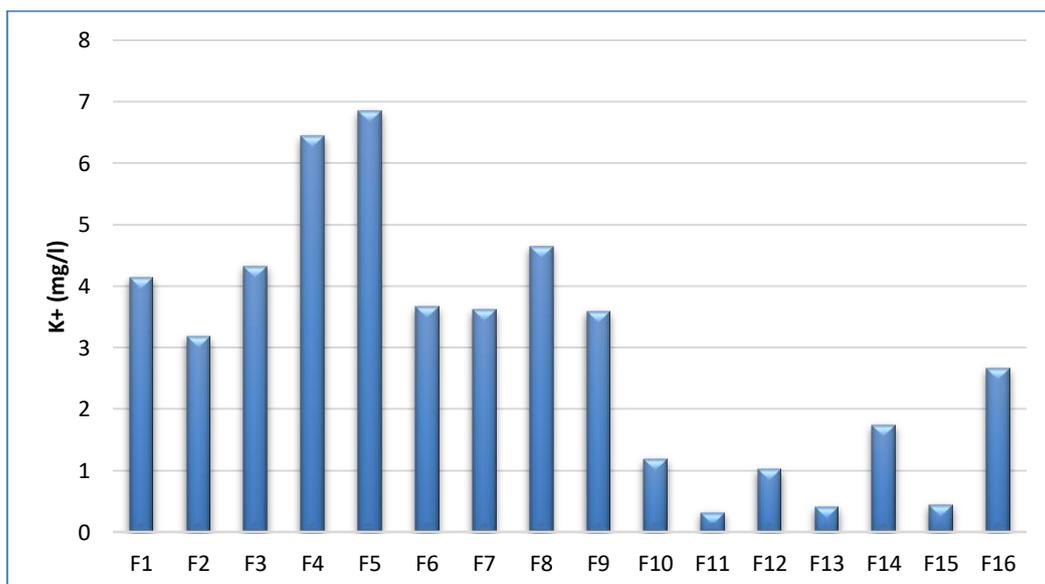


Figure 29 : Valeurs de potassium enregistrées pour nos échantillons analysés.

2-Caractérisation et classification hydro-chimique de nos eaux analysées

La classification hydro-chimique des eaux se base sur le fait de projeter les résultats des analyses trouvés sur des diagrammes, que chacun d'eux ai un objectif. Tel que la classification en fonction de la salinité, classification en fonction de la sodicité ou alcalinité et même la détermination des facies hydro-chimiques.....

Dans notre cas, le choix est tombé sur l'utilisation des diagrammes suivants :

2-1-Diagramme de Richards (Riverside)

C'est un diagramme dans lequel on combine entre les données ou résultats de la conductivité électrique et ceux de l'alcalinité fournis par le calcul du SAR.

La projection de nos résultats des 16 échantillons sur les deux axes du diagramme décrit par Richards (1954) a fait ressortir les constatations suivantes (**Fig. 30**):

Dans l'ensemble du secteur d'étude, le S.A.R représente les trois classes suivantes : C1S1, C3S1 et C4S1.

*La catégorie C1S1 représente un faible pourcentage avec 6,25 % des échantillons d'eau. Cette catégorie caractérise exclusivement l'eau du point F8;

*37,5 % des échantillons d'eau étaient dans la catégorie C3S1. Cette classe composée des points d'eau F1, F2, F4, F5, F12 et F14, désigne des eaux médiocres, utilisables seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité, avec une salinité qui doit être contrôlée;

*56,25 % étaient dans la catégorie C4S1. Cette distribution indiquant une salinité élevée à très élevée et un risque alcalin faible. Cette classe (F3, F6, F7, F9, F10, F11, F13, F15 et F16) indique des eaux de mauvaise qualité, fortement minéralisées, qui ne peuvent convenir qu'à des espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.

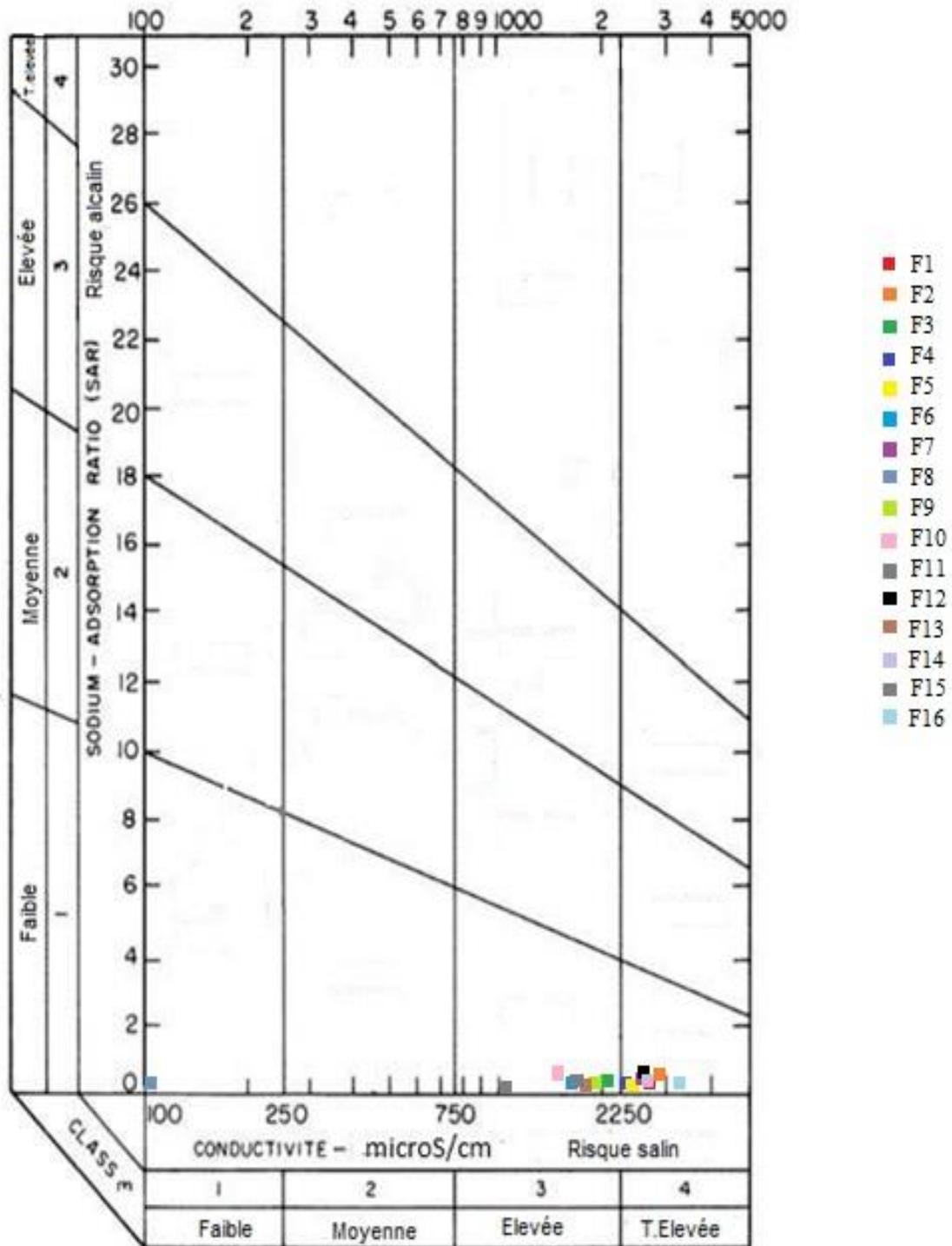


Figure 30: Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone d'étude sur le diagramme de Richards (Riverside).

2-2-Diagramme de Scoller et Berkallof

Ce diagramme se base sur la représentation des résultats des ions (anions et cations en meq/l) sur un graphe et permet aussi de déduire le faciès chimique de l'eau analysée.

Les figures (**Fig. 31, 32**) respectivement pour (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7et F8) et pour (F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15et F16) montrent que:

A première vue, on remarque une dominance des sulfates avec 37,5% de l'ensemble des points d'eau F10, F12, F13, F14, F15 et F16. En deuxième position les bicarbonates avec 31,25%. Le type bicarbonaté calcique se trouve dans les points d'eau F5, F6, F7, F8 et F11. La famille chlorurée représente un pourcentage de 31,25% des échantillons d'eau (F1, F2, F3, F4 et F9).

Les sulfates, les bicarbonates et les chlorures accompagnent toujours le calcium et le magnésium, qui semble être liées à la géologie, à la forte évaporation ou à l'influence du Chott El Hodna.

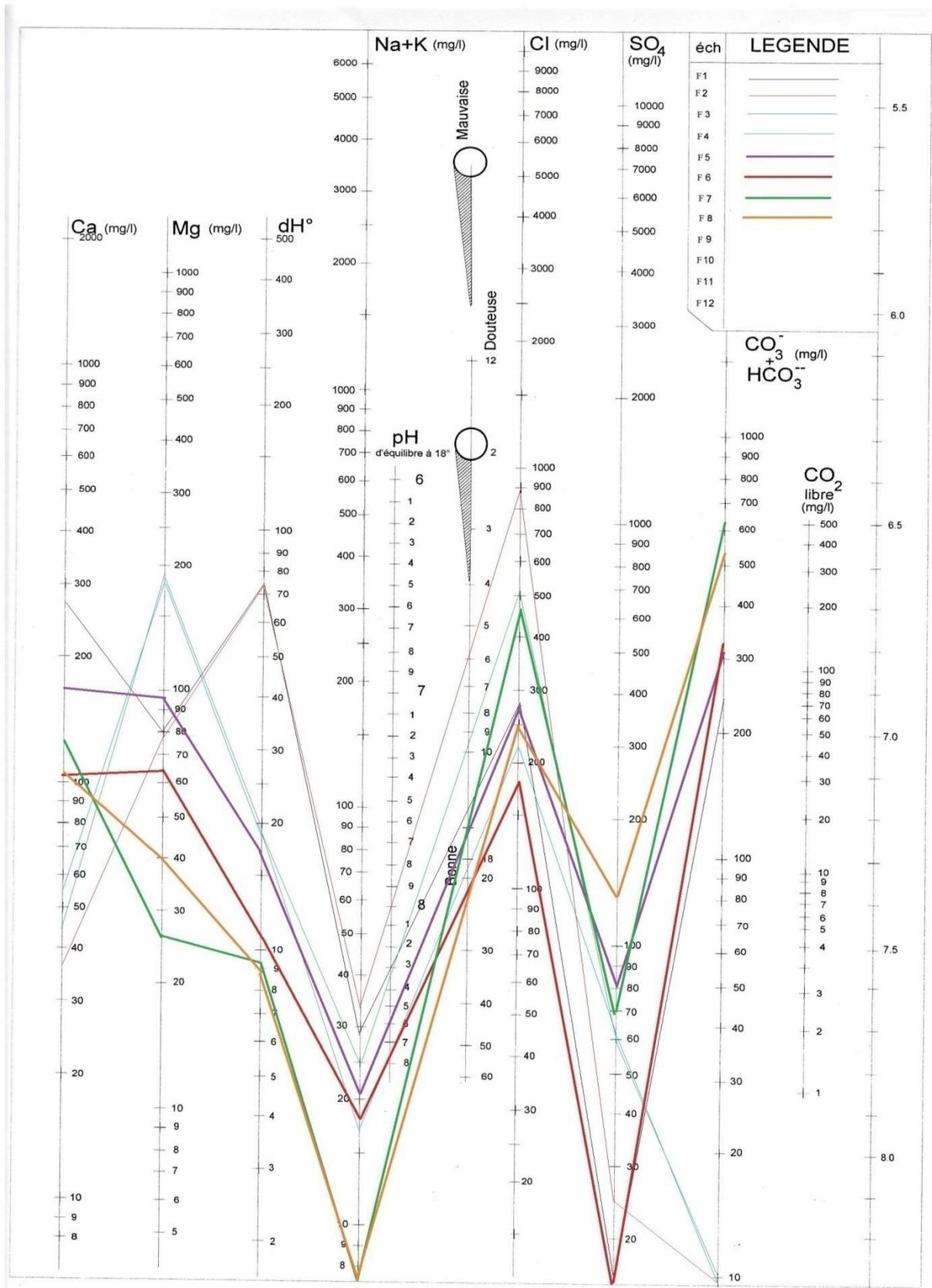


Figure 31 : Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone des forages (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7et F8) d'étude sur le diagramme de Scoller et Berkalfol

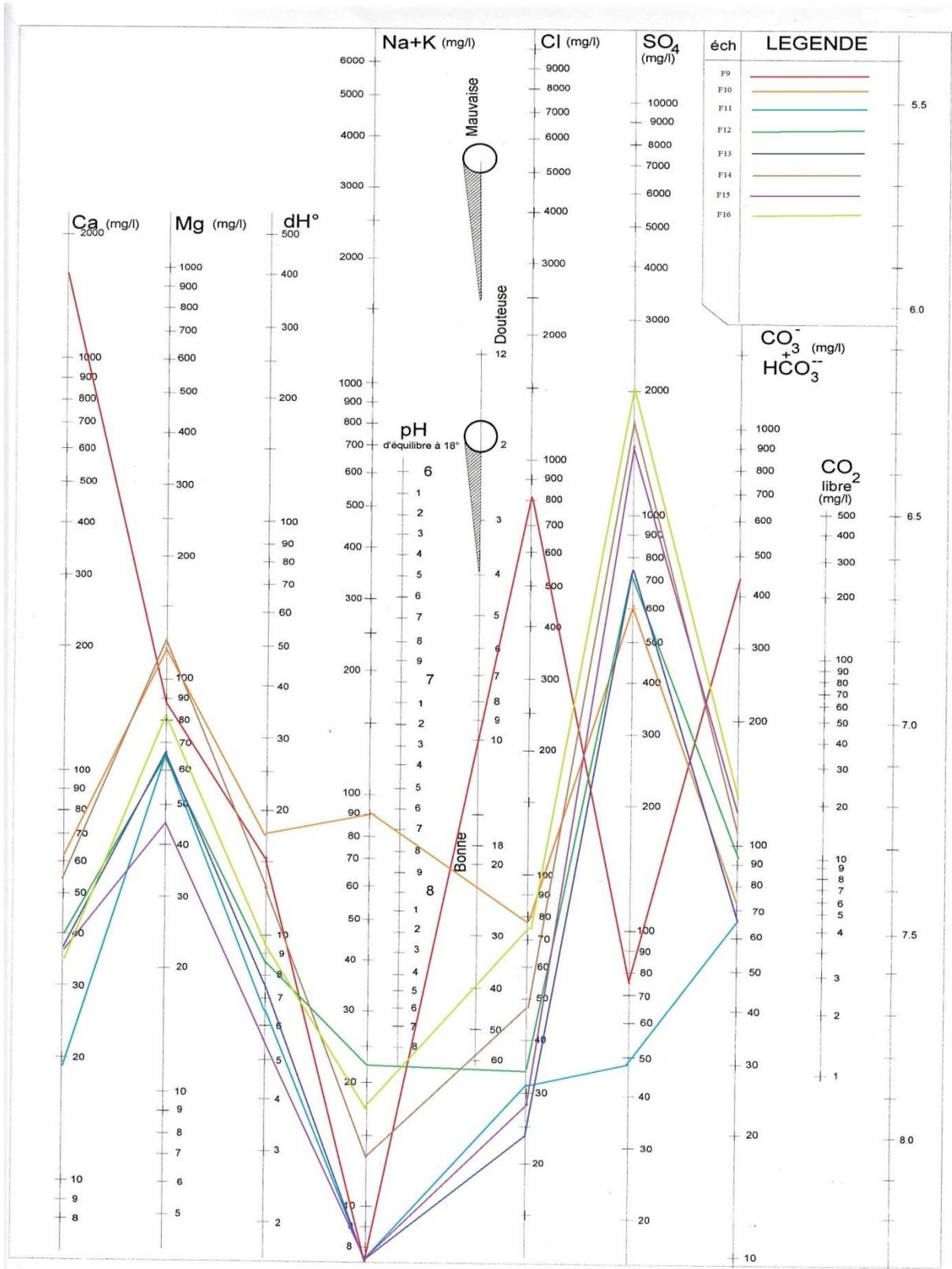


Figure 32 : Représentation des résultats de salinité et alcalinité des eaux de la zone des forages (F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16) d'étude sur le diagramme de Scoller et Berkalo

2-3- Diagramme de Piper

A partir du diagramme (**Fig. 33**), on arrive à tirer les informations suivantes :

Les différents échantillons d'eau ont été classés selon leur composition chimique en utilisant le diagramme de Piper.

En utilisant ce type de graphique, deux types d'eau (faciès) ont été définis pour la zone d'étude. L'analyse a montré que le type d'eau chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne caractérise 56,25% des échantillons. Ce type représente les points d'eau suivants : **F1, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11 et F12.**

Le deuxième type d'eau est hyper chlorurée calcique et hyper sulfatée calcique caractérise 43,75% des échantillons prélevés (F2, F3, F4, F13, F15 et F16). Cette situation est liée à l'influence des formations salées autour du Chott El Hodna comme les marnes et les argiles.

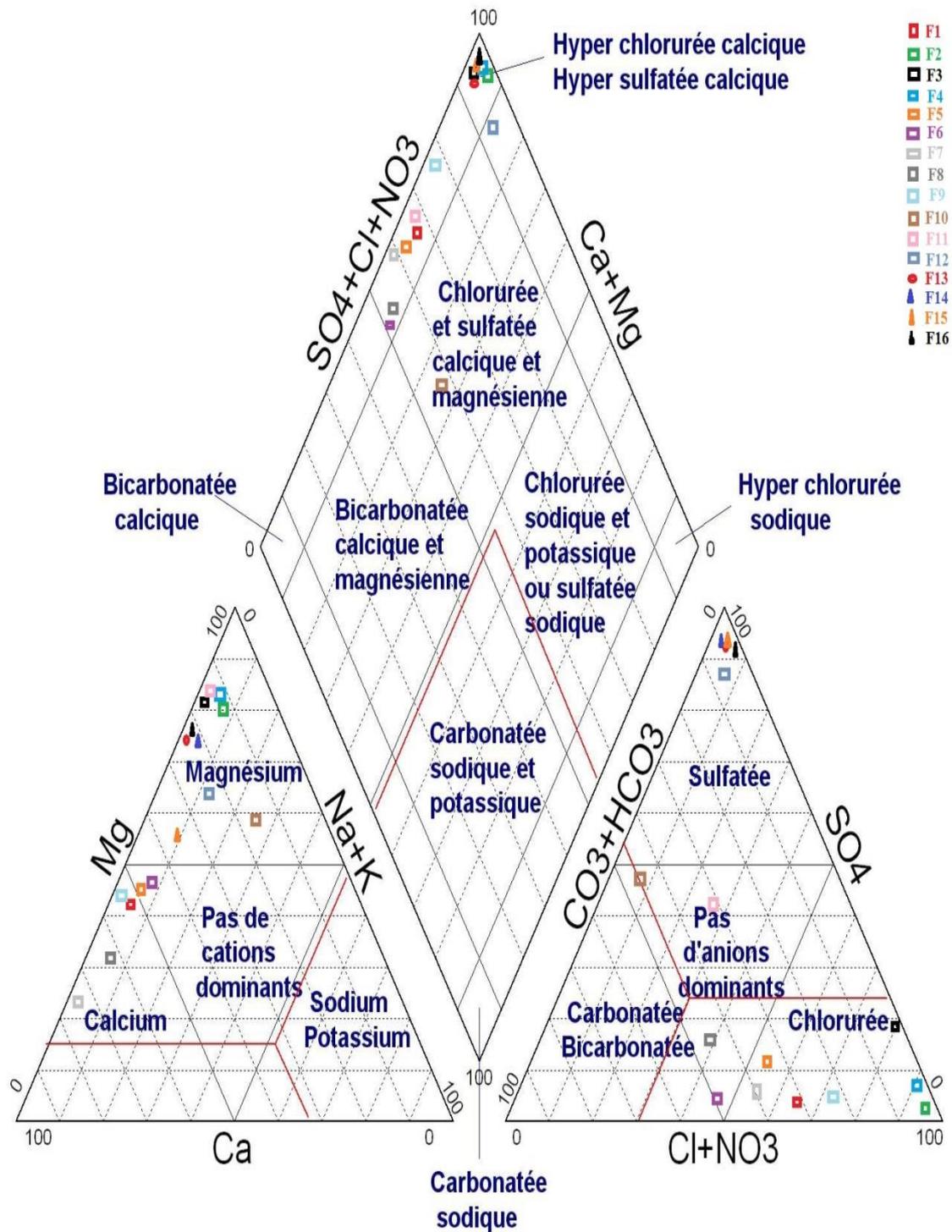


Figure 33 : Représentation des résultats des anions et des cations de nos échantillons d'eau analysées sur le diagramme de piper.

3-Détermination des principaux indicateurs (indices) de qualité pour les eaux de la zone d'étude

La détermination de la qualité d'une eau en vue d'un certain usage (domestique, industriel ou agricole) repose sur le calcul et la prise en considération des dizaines de critères.

Après calcul de certains indices, on les compare avec des normes spécifiques pour désigner la qualité d'une eau (Sidhu et *al*, 2015).

Le modèle le plus utilisé pour une évaluation des indices de qualité des eaux (WQI) est celui de l'OMS. Dans la présente étude on a utilisé le modèle développé par (Meireles et *al*, 2010).

Pour une eau destinée à l'irrigation des cultures, les plus importants à connaître ou à évaluer sont (**Tab. 30**).

Tableau. 30: Résultats des indicateurs de qualité de nos eaux des forages destinées à l'irrigation

	Na%	SAR	MH	KR	PI
F1	06.14%	0.36	42.89%	0.066	18.16%
F2	08.25%	0.49	87.37%	0.09	09.72%
F3	02.29%	0.14	83.93%	0.02	04.12%
F4	04.54%	0.29	87.87%	0.05	06.65%
F5	03.99%	0.24	48.72%	0.04	17.05%
F6	05.63%	0.27	49.62%	0.06	26.46%
F7	00.65%	0.03	25.06%	0.007	35.75%
F8	00.23%	0.01	37.69%	0.002	34.14%
F9	00.57%	0.03	45.36%	0.006	17.58%
F10	22.39%	01.49	76.58%	0.29	42.82%
F11	02.51%	0.09	85.26%	0.03	18.07%
F12	10.74%	0.47	73.49%	0.12	25.29%
F13	00.66%	0.03	75.20%	0.007	14.49%
F14	04.13%	0.22	78.48%	0.04	14.16%
F15	01.76%	0.05	66.43%	0.02	25.79%
F16	07.04%	0.322	75.42%	0.08	21.58%

3-1-Risque de Sodium (dit aussi pourcentage de sodium, danger du sodium)

C'est un critère de base qui vise la détermination ou l'évaluation de la proportion relative du cation Na⁺ dans l'eau par rapport aux autres cations. C'est aussi un paramètre calculable et commun de toutes sortes d'eau naturelle y compris celle destinée à l'irrigation. Il a été proposé par Wilcox, (1948) à fin d'évaluer la pertinence des eaux destinées à l'irrigation.

Le calcul du risque de sodium (Na%) se fait par la formule :

Ce risque est calculé comme suit :

$$\text{Na \%} = (\text{Na} / \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}) * 100.$$

Tout en prenant en considération que les concentrations cations sont exprimées en meq/l.

Après calcul, on interprète nos résultats en les comparant avec les informations présentées au tableau suivant (**Tab. 31**).

Tableau 31: Normes d'interprétation des valeurs du pourcentage du sodium (%).

% Na	Interprétation
< 20 %	Eau de qualité excellente
20–40 %	Eau de bonne qualité
40–60 %	Eau de qualité admissible
60–80 %	Eau de qualité douteuse
> 80 %	Eau de qualité inadéquate

Source: Khodapanah et *al.*, 2009.

Wilcox (1959), affirma que pour des valeurs des pourcentages des Na dans une eau, qui avoisinent et ne dépassent pas le seuil de 60%, cette eau est admissible et peut être utilisée pour irrigation des cultures.

Dans le cas des eaux de la présente étude; on trouve qu'elles sont (la totalité des échantillons analysés) de qualité excellente, pour la simple raison que les valeurs de Na % trouvées ne dépassent pas le seuil de 20% sauf ou **à l'exception** de ceux du forage **F10 (22.39%)**.

Dans le cas des eaux qui affichent des valeurs élevées à très élevées et qui dépassent beaucoup ou largement le seuil de 20%, les chercheurs estiment qu'il s'agit des eaux qui soit sont restées logiquement en contact avec les roches (formations géologiques) ou les sols riches en sels facilement hydrolysables, ou dans d'autres cas de l'effet anthropique par l'ajout des engrais chimiques aux eaux d'irrigation (Subba Rao et *al.*, 2012).

Dans notre cas, il s'agit des eaux du forage F10 (de la zone d'ouled Derradj).

3-2-SAR

C'est un indice d'importance majeure à déterminer surtout lorsqu'il s'agit de l'étude des eaux et des sols soumis aux contraintes climatiques en zones arides et semi arides.

Proposé par Richards, (1954) et se calcule en fonction des trois cations Na, Ca et Mg (en meq/l).

L'analyse des résultats des calculs figurants au tableau (Tab. 30), indique que les valeurs du SAR pour nos eaux analysées variaient de 0.01 comme minimale (dans le forage F8) à 1.49 comme maximale (pour F10). La valeur moyenne était de 0.75.

Par comparaison de nos résultats avec les normes d'interprétation proposées par Richards, (1954); Ayers et Westcot, (1985), on trouve que la quasi-totalité de nos eaux est jugée comme des eaux qui peuvent être utilisées en irrigation (de point de vue SAR) si elles ne présentent pas des problèmes relatifs à d'autres paramètres de qualité.

3-3-Danger du magnésium (MH, dit aussi taux d'adsorption du Magnésium)

Plusieurs recherches sur les eaux souterraines ont montré l'existence d'une relation importante entre les anions et les cations qui les composent.

Raos et *al*, (2012), montraient que parmi ces relations un éventuel déséquilibre entre les cations présents dans une eau et en particulier l'élévation (augmentation) du taux du magnésium par rapport aux autres cations provoque une augmentation de l'alcalinité qui nuit forcément aux rendements des cultures ainsi que la structure du sol.

Il a été aussi prouvé que dans une eau souterraine, ces alcalino-terreux sont en équilibre et sur cette base, Szabolcs et Drab, (1964) ont suggéré le calcul de ce qu'ils ont appelé '**danger du magnésium ou taux d'adsorption du magnésium 'MH'**'. C'est un indice par lequel on calcule le taux du Mg (meq/l) par rapport à ceux de Ca + Mg (meq/l) par l'équation :

$$\mathbf{MH = \frac{Mg}{Ca + Mg} \times 100}$$

Les résultats des calculs du **MH** des eaux souterraines de notre zone (**Tab 30**) se présentent comme suit:

*Valeur minimale de **25.06%** au niveau du forage **F7**;

*Valeur maximale de **87.87%** au niveau du forage **F4**;

*Valeur moyenne de **56.22%**.

Il ressort aussi que comparativement à la totalité de nos échantillons; que **62.5%** (**F2, F3, F4, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16**) sont qualifiés comme **inappropriées** à l'irrigation. Tandis que **37.5** (**F1, F5, F6, F7, F8 et F9**) sont **convenables à l'irrigation**.

Il est à noter que Khodapanah et *al*, (2009), proposaient la valeur supérieur à 50 de MH comme non recommandée à l'irrigation. Et c'est le cas de la majorité de nos échantillons d'eau analysés.

3-4-Kelly ratio (KR)

C'est un indice qui fixe comme objectif de sa détermination, la connaissance ou l'évaluation du risque d'alcalinité d'une eau, en calculant par une formule le rapport entre le rapport entre le sodium vis avis de la somme du calcium et magnésium (sachant que les tris éléments on comme unité meq/l). L'équation est comme suit :

$$KR = (Na / Ca + Mg).$$

Les résultats trouvés des calculs du rapport de Kelly (**Kelly's Ratio** ou **KR**) sont présentés dans le tableau (**Tab. 30**). Qu'à partir du quel on déduit que l'ensemble de nos échantillons des eaux souterraines analysés se trouvent dans la gamme des eaux qui conviennent à l'irrigation, avec des valeurs **inférieurs à 1**. On remarque aussi les valeurs maximales et minimale de **KR** sont respectivement de l'ordre de **0.29 (F10)** et **0.002 (F8)**.

Rawat et *al*, (2018), affirmaient dans leur étude que les eaux recommandées à l'irrigation doivent afficher des valeurs de KR inférieures à 1, tandis ceux de valeurs supérieures à 1 ne sont pas recommandés pour la simple raison qu'elles entraînent des risque élevés d'alcalinité.

3-5-Indice de perméabilité (PI)

Doneen, (1964) développa une équation sur ce qu'on appelle indice de perméabilité (**PI**), en utilisant les concentrations des ions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^- (exprimés en meq/l) dans l'équation :

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO}}{Ca + Mg + Na} \times 100$$

La comparaison de nos resultants (**Tab. 30**) avec les norms d'interprétations proposés par Doneen, (1964) on tire les informations suivantes:

*6 forages (**F6, F7, F8, F10, F12 et F15**) sur une totaly de 16 (**37.5%**) sont classés dans la catégorie des eaux de **bon qualité** avec des valeurs de PI **comprises entre 25 et 75%**;

*Le reste des échantillons (**F1, F2, F3, F4, F5, F9, F11, F13, F14 et F16**), présentent des valeurs de **KR inférieurs à 25%**, ce qui les classe dans la catégorie des eaux **impropre ou inadaptés** à l'utilisation en irrigation.

3-6-IQE(en anglais WQI)

Comme on a déjà expliqué au troisiém chapitre, cet indice est calculé à partir du modèle IWQI, développé par Meirele et *al* en (2010). Il permet d'évaluer la qualité d'une eau en se basant sur différents parmètres qui peuvent être de nature chimique, de nature biologique, ou les deux ensembles...

Les résultats trouvé après calcules sont mentionnés au tableau ci-dessous (**Tab. 32**) :

Tableau 32: Représentations de la qualité des eaux des 16 forages en fonction de l'indice (IQE)

	Interval de la valeur trouvée	Classe et interprétation	Forages
IQE (WQI)	0-25	Exélente qualité	F3, F5 et F7
	25-50	Bonne qualité	F2 et F4
	50-75	Mauvaise qualité	F6 et F8
	75-100	Très mauvaise qualité (qualité inadaptée)	F1, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16.

Nos résultats (**Tab. 32**) indiquent que les eaux des forages analysées de la zone M'Sila présentent des qualités différentes les une par rapport aux autres, on trouve :

*Des eaux de qualité excelente, il s'agit de celles des forages **F3, F5 et F7**;

*Des eaux de bonne qualité, on parle des eaux des forages **F2 et F4**;

*Des eaux de mauvaise qualité, c'est celles des deux forages **F6 et F8**;

*Des eaux de qualité inadaptées, pour neuf forages; **F1, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16.**

4-Matrice de corrélation de Pearson

Tableau 33: La Corrélation entre principaux indicateurs (indices) de qualité pour les eaux de la zone d'étude (en gris le r de Pearson, en blanc le P de probabilité)

	WQI	SAR	Kr	NA%	PI	MH	SSP
WQI		0,00436	0,01144	0,011092	0,57898	0,61086	0,028211
SAR	-0,6718		2,12E-05	4,97E-08	0,44206	0,043159	6,99E-09
Kr	-0,6137	0,8580		6,52E-10	0,99918	0,2827	0,0001074
NA%	-0,6158	0,9421	0,9691		0,55272	0,12739	1,17E-07
PI	0,1501	0,2068	-0,0002	0,1604		0,001527	0,13991
MH	0,1377	-0,5108	-0,286	-0,3974	-0,7237		0,041661
SSP	-0,5473	0,9565	0,8181	0,9344	0,3858	-0,5140	

La matrice de corrélation de Pearson des paramètres mesurés durant cette étude pour chaque paramètre est donnée dans le tableau ci- dessus (**Tab.33**).

*Le WQI a montré une corrélation négative avec: le SAR ($r = - 0,6710$, $P <0,01$), Kr ($r = - 0,6137$, $P <0,05$), NA% ($r = - 0,6158$, $P <0,05$) et le SSP ($r = - 0,5473$, $P <0,05$).

*Le SAR a montré une corrélation négative avec MH ($r = - 0,5108$, $P <0,05$) et des corrélation positive avec Kr, NA% et SSP (respectivement : $r = 0,8580$, $P <0,001$; $r = 0,9421$, $P <0,001$ et $r = 0,9565$, $P <0,001$).

*lors que, le Kr a montré une corrélation positive avec NA% ($r = 0,9691$, $p <0,001$) et SSP ($r = 0,8181$, $p <0,001$).

*Le NA% a montré une relation positive significative avec : le SSP ($r = 0,9344$, $p <0,001$). Une corrélation négative entre MH et PI ($r = - 0,7237$, $P <0,001$) et MH et SSP ($r = - 0,5140$, $P <0,05$).

5-Adéquation (éventuelles effets) de la qualité de nos eaux analysées sur le sol et les cultures

Après avoir présenté et interpréter les résultats des analyses des eaux souterraine de la zone de M'Sila, destinées à l'irrigation nous jugeons utile de présenter même brièvement les effets de la qualité de ces eaux sur le sol et les végétaux à installer.

En analysant nos résultats évoqués en haut, il nous paraît très clairement que le problème de salinité est un des principaux obstacles pour atteindre une productivité de nos sols ainsi qu'un rendement acceptable qualitativement et quantitativement et il y a d'autres.....

5-1-Sur le sol (perte du sol, de ces qualités ainsi que sa fertilité)

Le sol est un milieu complexe, il est à l'interface avec les autres compartiments de l'environnement (eau, air, lithosphère et biosphère), ce qui provoque d'une façon inévitable des échanges entre ces compartiment qui vont avoir des effets positives ou plus probablement négatives surtout lorsqu'il s'agit des propriétés, de la fertilité et de la productivité d'un sol (Faybishenco et *al.*, 2016).

Une compréhension adéquate des enjeux liées à la qualité de l'eau est essentielle pour garantir la productivité agricole (Bradai, 2017).

Par leurs compositions chimiques, les eaux d'irrigation peuvent avoir une large influence et un impact significatif sur le sol, ses propriétés et sa fertilité (Coutinet, 1965).

Les conséquences de la qualité des eaux d'irrigation sur les caractéristiques des sols ont fait l'objet de nombreuses études dans les écrits scientifiques (Douaoui et *al.*, 2006; Fan et *al.*, 2011; Gorgi et *al.*, 2015; Boufekane et Saighi, 2016; Bradai, 2017; Rechachi, 2017; Slimani 2017; Bouka et *al.*, 2019; Semar et *al.*, 2019; Boudibi et *al.*, 2019; Ncibi et *al.*, 2020; Lekoui., 2020; Abdennour, 2021; Ousmane, 2020; Ousmane et *al.*, 2022; Alberto et *al.*, 2022; Hamdane, 2023).

La qualité des eaux d'irrigation intervient sur le sol par plusieurs aspects ou phénomènes, que les plus importants à citer sont :

***La salinité et la salinisation**

La salinisation des sols et leurs dégradation sont devenues des enjeux majeurs pour les experts (scientifiques), les preneurs de décisions et a un impact significatif sur les agriculteurs et les exploitants agricoles (Szabolc, 1996; Abdennour, 2021).

Dans les zones arides et semi-arides, 21% des terres irriguées souffrent de la salinité et/ou de la sodicité (alcalinité) et que 27 millions d'hectares sont des sols salins induit par l'activité humaine (Lhissoui et al, 2014; Gorgi et al, 2015).

Il a été démontré que les eaux sujettes à une forte évaporation, notamment dans les zones arides et semi arides contiennent des sels qui ont tendance à s'accumuler, ce qui accroît le risque de salinisation des sols (Nezli et al, 2007).

Par définition, la salinisation est l'ensemble des mécanismes par lesquels le sol s'enrichit en sels solubles (Ayers et Westcott, 1985; Lozet et Mathieu 1990). Ce phénomène exerce des effets néfastes sur les propriétés des sols (Aubert, 1968; Chevry, 1974; Servant, 1978, Halitim, 1988; Loyer, 1989; Daoud, 1993; Daoud et Halitim, 1994; Szabolcs, 1996; Samba, 1998; Tabet, 1999; Marlet, 2004; Ben Abdou et al., 2014 ; Cendre et al., 2021 et il y en a d'autres).

La présence d'une quantité excessive de Na^+ dans l'eau par rapport à la concentration globale et totale des sels dissouts dans le sol, nuit à l'infiltration de l'eau. Ce problème d'infiltration de l'eau intervient habituellement dans les 10 premiers centimètres (Asano et Levine, 1998).

Dans notre cas en se basant sur les résultats trouvés, ce problème de salinité et salinisation des sols se rencontre probablement d'une manière légère dans les zones des 16 forages mais d'une façon plus accentuée dans la zone où se trouve le forage F10.

Le problème c'est qu'avec le temps et avec l'effet des conditions climatiques évaporantes surtout en saison sèche, les sols de la zone d'étude se dégradent rapidement et de plus en plus vers une situation grave de salinité et salinisation.

Pour cela on propose le suivi immédiat et rapide des solutions suivantes:

La première solution a été proposée par (Dubost, 2002), à fin de maintenir la composition saline de la solution du sol proche de celle de l'eau d'irrigation il faut essayer le maximum d'éviter la remontée capillaire de l'eau à partir des nappes phréatiques.

Parmi les solutions qu'on propose dans de telles circonstances celle de (Valles et *al.*, 1983), c'est d'utiliser une quantité supplémentaire de l'eau par rapport à celle que nos cultures ont besoins pour lessiver (lixivier les sels)

Ajoutons aussi une condition qui va plus ou moins garantir le contrôle de la salinité au niveau de nos sols, c'est qu'on doit immédiatement drainer ce surplus (d'eau) surtout au niveau de la partie superficielle et de la zone racinaire.....

***Effet sur le pH de notre sol**

L'irrigation avec une eau de mauvaise qualité peut également affecter le pH de notre sol, ce qui peut influencer à son tour la fertilité chimique de ce sol, sa capacité d'échange anionique et cationique, sa richesse (disponibilité ou le plus important que la disponibilité l'assimilabilité) en éléments nutritifs indispensables à la vie des plantes et dans certains cas la toxicité par certains éléments...

Sans oublier l'effet du pH sur la présence et l'activité des micro-organismes indispensables dans la transformation de matière organiques du sol (par les deux voies: minéralisation qui aura comme résultat la libération des minéraux essentiels à la vie et le développement des cultures et aussi en contre partie l'humification responsable de l'augmentation du stock de la matière organique).

***Effet sur la détérioration de la structure**

L'enrichissement du sol en Na^+ provoque une situation (comportement) chimique particulière du sol; c'est ce qu'on appelle la dispersion (séparation des constituants solides des sols les uns par rapport aux autres) ce qui provoque une détérioration de la structure du sol, diminution de sa stabilité structurale, avec diminution de la perméabilité à l'eau et à l'air (suite à la diminution des diamètres des pores ce qui provoque leurs colmatages par les colloïdes en état dispersées) (Quirk et Shofield, 1955; Ayers et Westcot, 1994; Gouaidia et *al.*, 2012; Bourrée, 2014; Sahli, 2010; Moussa et *al.*, 2021; Sahli, 2021); rendant notre sol instable et sujet à l'érosion éolienne et hydrique, avec dans certaines conditions la perte de perméabilité ...

Dans le cas de notre zone d'étude, elle est à l'ensemble sujette à ce grave problème mais beaucoup plus dans la zone d'Ouled Derradj (zone du forage F10).

Donc, en irrigant, on doit toujours tenir compte des caractéristiques de chaque terme du système-eau-sol- plante, qui sont étroitement liées et dont la connaissance permettra de calculer les doses d'irrigation, de lessivage (lixiviation) et de choisir avec soin les méthodes ou techniques d'irrigation en fonction toujours du même système (système-eau-sol- plante).

On ajoute aussi que toutes les pratiques culturales visant à améliorer la structure du sol et favoriser l'infiltration de l'eau, ont un impact positif sur la lixiviation des sels et le drainage interne.....

5-2- Sur les cultures

La qualité de l'eau d'irrigation est un facteur crucial à prendre en compte pour assurer la croissance et le développement sain des plantes et des cultures. Mais dans certains cas, elle peut être mauvaise ou présente certaines mauvaises propriétés qui vont exercer un effet beaucoup plus néfaste que bénéfique et peuvent perturber le développement de plantes (Person, 1978).

Parmi ces effets on cite :

***pH et absorption des éléments nutritifs**

Comme on a déjà expliqué, un pH trop élevé ou trop bas affecte l'absorption des nutriments par les végétaux et les plantes. Un pH inadapte peut également entraîner des carences en éléments nutritifs

Il (pH) influe aussi sur l'abondance des micro-organismes indispensables pour la dégradation (minéralisation) ou la condensation (humification) de la matière organique dans le sol. Qui est considérée au premier cas (minéralisation) comme élément de base de la libération (abondance, disponibilité) des éléments chimiques qui vont être utilisés dans la nutrition des plantes et dans le deuxième cas (humification) indispensable pour le stockage de la matière organique au niveau du sol....

En ce qui concerne notre zone d'étude (représentée par les eaux des 16 forages caractérisés), et malgré que certains échantillons présentent des valeurs plus ou moins élevées de pH (des

eaux à pH légèrement alcalin à alcalin, elles sont inférieures à 8.4 et ne présentent pas dans leur ensemble des problèmes sérieux sur les plantes de point de vue pH.

***Effet de la salinité sur les cultures :**

Plusieurs recherches ont montré les effets indésirables de la salinité sur les cultures, leurs développements ainsi que leurs rendements, on cite (Daoud et Halitim, 1994).

Une salinité élevée peut affecter la croissance des cultures et provoque des effets osmotiques et des troubles nutritionnels (Admilla et Venkatayogi, 2018; Li et *al.*, 2013; 2016; Muns 2002).

Elle conduit à ce qu'on appelle « stress hydrique », qui résulte de l'accumulation et la concentration de la solution du sol en certains sels, provoquant aussi la diminution de la capacité des plantes à absorber l'eau et les éléments nutritifs indispensables à leur vie et développement.....

Dans notre cas, la CE de nos eaux, on les divise en deux grandes catégories :

-Des eaux admissibles et proches de la limite recommandée pour presque l'ensemble des eaux des forages analysés (de F1 à F15)

-Des eaux non admissibles, celles du forage F16.

***Effet négatif accentué par l'intervention de l'homme (anthropique)**

On commence par le problème de la contamination chimique issue de l'utilisation non rationnelle des pesticides, engrais, amendement... Ces produits chimiques peuvent être toxiques pour les plantes..... Comme on a déjà expliqué, on trouve un problème pour les sulfates et les nitrates aussi, notamment pour les forages F1 et F13.

On passe vers la mauvaise gestion des irrigations, qu'en plus du problème des ressources hydriques faibles et mal réparties, s'ajoute la mauvaise conduite et gestion des projets d'irrigation (donc le choix des techniques et méthodes d'irrigation doit être motivé par une multitude de paramètres tels que les conditions climatiques et la nature du sol, ainsi que la culture choisit-elle même, il est à noter aussi que malgré que les méthodes à choisir se différencient, plusieurs récentes études recommandent celle du goutte à goutte comme c'est le cas des études de (Nikeima et al., 2021; Khamidov et Muratov., 2023; Khamidov et *al.*, 2023).

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude, nous avons essayé de caractériser et de déterminer la qualité des eaux souterraines de la région de M'Sila et son adéquation à l'irrigation des cultures.

Notre présente étude s'est basée sur une approche multidisciplinaire, passant du prélèvement des échantillons des eaux des forages à étudier, à la caractérisation de leurs propriétés physico-chimique, caractérisation hydro-chimiques, détermination des principaux indicateurs de la qualité de nos eaux, analyse statistique et enfin essai de détermination du degré d'adéquation de nos eaux analysées au sol et au culture (installation des cultures).

Les résultats trouvés indiquent que les eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la zone de M'Sila présentent:

*Des températures acceptables pour l'ensemble des forages, sauf pour le forage F4 qui présente une valeur légèrement inférieure aux normes;

* Des valeurs de pH indiquant des eaux légèrement alcalins à alcalins qui peut résulter probablement passage de nos eaux par les formations géologiques qui sont plus ou moins riches en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K ;

*Des valeurs de CE de variations remarquables les unes par rapport aux autres. Par classification des eaux de nos 16 forages, on les classe en trois grandes catégories: admissibles, non admissibles et proches de la limite non recommandée.

*Les eaux de l'ensemble de nos forages caractérisés sont considérées comme soumates, à l'exception de celles du forage F8 qui sont douces.

*Dans l'ensemble, les valeurs de RS traduisent des eaux qui conviennent à l'irrigation de la plupart des cultures.

*Pour la dureté, nos eaux se sont divisées de faible dureté (F11, F12, F13, F14, F15 et F16) moyennement dures (F2, F4, F6, F7, F8 et F10) à très dures (F1, F3, F5 et F9).

*Pour l'ambiance chimique on trouve que :

**Les anions sont classés en fonction de leurs abondances (pourcentages par rapport au total des anions) comme suit : Sulfates en première position avec un pourcentage de presque 53%,

suivit des chlorures (27.76%), puis les bicarbonates (18.53%), suivit des nitrates et nitrite qui présentent respectivement des pourcentages de presque 1% et 0.04%.

En ce qui concerne les sulfates; les trois forages (F14, F15 et F16) marquent des valeurs plus ou moins élevées et ceci est probablement due à l'utilisation des engrais par les agriculteurs de ces zones de M'Sila centre, tandis que les forages restants présentent des valeurs inférieures aux normes.

Les chlorures, avec leurs valeurs déjà signalées dans la partie résultats peuvent être divisés par rapport aux problèmes éventuelles qu'ils causent aux cultures en trois catégories: les eaux des forages (F10, F11, F12, F13, F14 et F15) qui ne créent pas des problèmes de toxicité en chlorures pour les plantes, les eaux des forages (F1, F3, F5, F6, et F8) qu'avec les valeurs qu'il affichent commencent à créer des problèmes de toxicité en Cl^- pour les plantes, les eaux des forages (F2, F4, F7 et F9) qui créent éventuellement des problèmes de toxicité en chlorures pour les plantes..

Les carbonates sont nulles, tandis que les bicarbonates affichent des valeurs indiquant qu'ils présentent pas des effets négatifs en cas de leur utilisation pour l'irrigation des cultures pour la quasi-totalité des eaux des forages analysées, à l'exception de celles du forage (F7 au niveau de la zone de Hammam Dalaa) qui va créer probablement des effets négatifs, donc on doit les utiliser avec soin.....

Les nitrites affichent des valeurs très faibles (négligeables par rapport aux autres), alors que les valeurs enregistrées des nitrates dévisent les eaux de nos 16 forages analysés en deux grandes catégories; des eaux de qualité acceptables pour (F2, F3, F4, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F14, F15 et F16) et celles qui ont affiché des valeurs qui dépassent le seuil recommandé (F1, F5 et F13).

**Pour les cations, ils ont été classés par rapport à la somme des cations comme suit: Magnésium, Calcium, Sodium et enfin Potassium.

Il s'agit des eaux de qualité acceptable par rapport aux normes proposés pour les 16 forages en ce qui concerne Mg^{++} et Ca^{++} , les racines peuvent absorber le Na^+ des eaux des forages à l'exception de celles du forage F10 et enfin pour K^+ on trouve deux catégories, celles des forages (F10, F11, F12, F13 et F16) qui sont de qualité acceptable puisqu'elle affichent des valeurs inférieures aux normes par opposition à ceux des forages (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7,

F8, F9, F14, et F15) qui présentent des valeurs légèrement élevées à élevées par rapport aux normes.

*L'approche hydrochimique montre que:

**A partir du diagramme de Richards on classe les eaux de la zone de M'Sila en trois classes : C1S1, C3S1 et C4S1.

**Le diagramme de Scholer et Berkhalof indique la dominance des sulfates dans l'ensemble des points d'eau (forages) (F10, F12, F13, F14, F15 et F16), des eaux bicarbonatées pour qui présentent un pourcentage de 31.25%, bicarbonatées calciques pour les eaux de F5, F6, F7, F8 et F11) et enfin chlorurées pour les eaux des forages F1, F2, F3, F4 et F9.

**Le recours au diagramme de Piper a montré la présence de deux types de faciès chimiques: Chloruré et Sulfaté Calcique et Magnésien pour les eaux des forages (F1, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11 et F12) et Hyper Chloruré Calcique et Hyper Sulfaté Calcique (F2, F3, F4, F13, F14, F15 et F16).

*Les principaux indicateurs de qualité calculés indiquent que :

**Pour le risque de sodium, on trouve une qualité excellente pour la totalité des eaux des forages analysées sauf celle de forage F10.

**Pour le SAR, la quasi-totalité des eaux des 16 forages sont classées comme excellentes et peuvent être utilisées en irrigation (de point de vue SAR), sauf si elles présentent un problème dans les autres paramètres indicateurs de qualité.

**En ce qui est du danger du Magnésium, 62.5% des eaux de la région de M'Sila sont jugées comme inappropriées à l'irrigation (F2, F3, F4, F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16), le reste sont convenables.

**Le recours au calcul du Kelly ratio, indique que l'ensemble des eaux des 16 forages sont recommandées à l'irrigation

**L'indice de perméabilité, les eaux des forages F6, F7, F8, F10, F12 et F15 sont de bonne qualité, alors que ceux restants sont impropres ou inadaptées à l'irrigation.

**L'IQE, classe les eaux de la zone de M'Sila d'excellente qualité pour F3, F5 et F7, de bonne qualité pour F2 et F4, de mauvaise qualité pour F6 et F8, de très mauvaise qualité (inadaptée) pour (F1, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 et F16).

Comme solution et perspectives on doit faire le suivi régulier des trois composantes initiales suivantes:

*Propriétés des sols (caractérisation, évolution et contraintes, avec contrôle de l'utilisation des engrais et amendements) dans le but d'éviter leurs détériorations et d'améliorer leurs fertilités ce qui va se répercuter obligatoirement sur le développement des cultures ainsi que leurs rendements qualitatifs et quantitatifs).

*Qualité (physique, chimique et hydrochimique), quantité des eaux utilisées en irrigation (avec calculs détaillés en prenant en considération en premier lieu les besoins des plantes ou cultures à installer et en second lieu les types des sols et leurs propriétés), sans oublier de veiller à la bonne gestion de l'irrigation et le choix des techniques qui n'aggrave pas les problèmes de dégradation des sols...

*Suivi de l'état des réseaux de drainages (s'ils existent) pour éviter leurs colmatages ce qui va engendrer des effets néfastes sur le sol ainsi que sur la qualité des eaux

Sans oublier l'organisation régulière des journées de vulgarisation aux agriculteurs de la région, à fin de faciliter les tâches précitées et d'éviter beaucoup de problèmes en matière de gestion des exploitations agricoles.....

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **A N S., 1992.** Qualité de l'eau d'irrigation. 12 p.
2. **Abdelhamid K., 2016.** Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Tadjnant- Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines. Doctorat en Science. Université de Batna 2. 160 p.
3. **Abdessalem S., Halitim A., Jan A., Trolard F., Bourrié G., 2013.** Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: case study of southern Hodna (Algeria). *Environmental Earth Sciences*, vol.70, no.5, pp. 2129-2141.
4. **Abdenmour M.A., 2021.** Variabilité spatio-emporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Zibane (Biskra)- Apport de la géostatistique et de la télédétection. Doctorat en Sciences Agronomique. Université Mohames Khider Biskra. 161p.
5. **Abdesselam S et Halitim A., 2014.** Land use change and soils degradation in arid area. A case study of South-Hodna. Algeria. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 2, 1: 152–163.
6. **Acharya S., Sharma S.K., et Khandegae V., 2018.** Hydro-geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Dwarka. Delhi. *Jornal of Pollution research*. 37(1). Pp: 209-220.
7. **Admilla N et Venkatayogi S., 2018.** Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi arid region of Basara, Telangana state, South India *Appl Water Sci*. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>.
8. **AFNOR., 1985.** Recueil des normes françaises des eaux, méthodes d'essais. AFNOR 2^{ème} édition. Paris.
9. **Agharimou N., Hammoutene O., 2022.** L'économie algérienne, une dépendance alimentaire chronique. *Revue TADAMSA*, volume n°2. Pp: 41-51.
10. **Alberto F.C., Casiano A.E., Bertha L.W.F., Janette L.T.C., Werner P.R., 2022.** Water quality for irrigation in the Huallaga basin, Peru. *Scientea Agropecuarea* 13 (3): 239-248.
11. **Amiot L., Dubreuil V., Launay J., Bardon E., Massa F. et Keromnes E., 2021.** Diagnostic climatique territorial focus « Ressource en eau », Guide méthodologique. Document de collaboration Université Rennes 2, UMR6554 CNRS - LETG (Littoral - Environnement - Télédétection – Géomatique), Creseb, Conseil régional de Bretagne et Météo-France DIRO/PREVI Rennes. Juillet 2021, 146 p.
12. **Amroune A., 2018.** Etude de l'apport hydrochimique dans la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale de la région nord du Hodna (Sud-Est algérien). Thèse doctorat Science, Université Moustapha Benboulaïd, Batna 2. 207p.
13. **Amroune A., Boudoukha A., Lopez-Chicano M., Benevente J., 2016.** Etude hydrochimique d'une nappe alluviale près d'un lac salé (Chott El Hodna, Sud-est Algérien) en utilisant des techniques statistiques. Colloque international des ressources hydriques: évaluation économique, 21-22 Novembre Ouargla (Algérie). 4p.
14. **Amroune A., Mihoub R., Enrico G., Carlos U. N., 2020.** Groundwater Flow Dynamics and Distribution of Hydrochemical Facies Using GIS in Hodna Plain, M'Sila, Southeastern Algeria. *Planning*, vol.15, no.6, pp.789-800.

15. **Andre M., Christophe H., 2004.** Hydrologie 1. Une science de la nature, première Ed. 314p.
16. **ANRH., 2016.** Agence Nationale des Ressources Hydriques: Rapport sur les apports des OuedsLham, Fagues, Soubella, K'Sobet Boussaâda.
17. **Arrus D.R., 1985.** L'eau en Algérie. Maison d'édition PUG Collection. Ed 1, 390p.
18. **Asano T., et Levine A.D., 1998.** Water reclamation, recycling and reuse in industry. Integrates environmental technology series. IWA Publishing; London UK. 560 p.
19. **Aubert G., 1968.** Transformation des sols de la zone aride sous l'influence des eaux d'irrigation. ORSTOM. Collection des références n°14266. Pp:75-82.
20. **Ayers R. S., Westcot D. W., 1985.** Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization, Rome, pp. 186.
21. **Ayers R.S., Westcot D.W., 1994.** Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Food, agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, Paper,29, 77044-2, pp. 174.
22. **Belouam N., 1976.** Caractérisation macro morphologiques et micro- morphologiques de quelquessols à accumulation calcaire du Hodna. Annales INA, Alger Vol.
23. **Benabdelli K., Mederbal K., Mohammedi H., 1995.** Comptes rendus 2éme colloque national: climat-Environnement. En vironnement écologique et gestion intégrée des ressources hydriques, Oran.Pp : 58-61.
24. **Benabderrahmane A., 2018.** Simulation numérique de la pollution saline d'un système aquifèredans une région semi-aride à aride, exemple des systèmes aquifères de la plaine de M'Sila (Hodna, Algérie). Thèse deDoctorat. UniversitédeFrancheComté, France. 185pages.
25. **Ben Abdou M., Fadil F., El Hadj M., 2014.** Evaluation de la qualité des cours d'eaux de la ville de Taza utilisés dans l'irrigation des cultures maraichères, Maroc. Journal of Applied Biosciences 77 : 6462-6473.
26. **Benblidia M et Thivet G., 2010.** Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre. Les notes d'analyse de CIHEAM, n° 58-Mai 2010. 15p.
27. **Benmihoub A et Bedrani S., 2011.** L'altitude des irrigants vis-à-vis de l'augmentation du tarif de l'eau: Cas d'un périmètre d'irrigation publique en Algérie. Cahier du Cread n°98-99/2011-2012. Pp: 75-101.
28. **Benzaria M., 2008.** Approche méthodologique pour les projets de réutilisation des eaux usées en irrigation. Université du Québec à Montréal, 85p.
29. **Bermond R., Vuichard R., 1973.** Paramètres de qualité des eaux. Ministère de la protection de la nature et de l'environnement. SPEPE. Paris. 179p.
30. **Binet P. et Aymonin G.G., 1987.** Analyses bibliographiques, Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques, 134 (2):207-208.
31. **Bouabdallah E., 1992.** La végétation steppiquesursolssalés deshautes plainessud-algéroises. Composition, structure et production. Thèse de doctorat en sciences. Université deParis-SudCentred'Orsay.206p.
32. **Boucenna F., 2021.** Cours d'hydrochime et hydrogéochimie. Université Tamenrasset, 63p.
33. **Bouchelaghem S., Benzara S., Méradi W., Rezkallah S., 2014.** Etude comparative de

- la qualité chimique et microbiologique des eaux de l'Oued El Kebir (region d'El Taref). International Journal of innovation and scientific research. 3 (1), 71-74.
34. **Boudibi S., Sakaa B Zapata-Sierra A., 2019.** Ground water quality assessment using GIS, ordinary kriging and WQI in an arid area. Ponte International Scientific Researchs Journal 75.
 35. **Boufekane A et Saighi O., 2016.** Kriging method of study of groundwater quality used for irrigation-case of Wadi Djendjen plaine (North-East Algeria). Journal of Fundamentam Applied Sciences 8, 346-362.
 36. **Bouka L., Ganyo K.K., Ablede K.A., Mathe E.E, Sogbedji J.M., 2019.** Caractérisation de l'état de salinité des sols et des eaux du site maraichère d'Atti-Apedokoe dans la préfecture de l'Avé au Togo. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), numéro spécial. Pp: 163-174.
 37. **Boulaine J., 1972.** Cours d'hydro-pédologie. Ecole Nat. Du Génie Rural des eaux et des forêts. Alger, 122p.
 38. **Bounab S., 2020.** Biodiversité végétale de la région du Hodna (M'Sila) : Etude phytochimique et activité biologique de quelques espèces médicinales. Thèse de Doctorat 3ème Cycle. Université de Sétif 1, Sétif, Algérie. 156 p + annexes.
 39. **Bouriée G., 2014.** Swelling clays and salt-affected soils: demixing of Na/Ca clays as the rational for discouraging the use of sodium adsorption ratio (SAR). Eurassian J Soil Sci 3: 245-253.
 40. **Bouyadgiev T.G., 1975.** Contribution to the knowledge of gypsiferous soils. AGRON/SF/SYR/76/522, FAO Rome.
 41. **Bouziani M., 2006.** L'eau dans tous ses états, Ed.Dar El Gharb.260p.
 42. **Bradai A., 2017.** Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du bas-Chelif. Thèse doctorat d'état.
 43. **BRGM., 2011.** Résumé détaillé de la situation des ressources en eau dans le monde (Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales). 127 p.
 44. **C.P.C.S., 1967,** Commission de pédologie et de cartographie des sols. Classification des sols. Institut national de recherche agronomique (IN RA). Paris: Laboratoire de géologiepédologie de l'ENSA, 87p.
 45. **Cardot C et Gilles A., 2013.** Analyse des eaux : réglementation, analyses volumétriques et spectrophotométrie statistiques, cours et exercices corrigés. Edition Paris.
 46. **Chapman D., Kimstach V., 1996.** Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition 2nd ed. London, pp: 59-129
 47. **Chevry C., 1974.** Contribution à l'étude des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse Science, UIP, Strasbourg, 257p.
 48. **Chossat J., 2005.** La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Ed TEC et DOC.
 49. **Colas-Belcour R, Renout R, Valance M., 2015.** Synthèse Eau et Agriculture, tome 1. Rapport n°14061 de CGAAER (conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, France). 32p.

50. **Coutinet S., 1965.** Méthodes d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux, analyses d'eau. Institut de recherche agronomiques tropicales et rivières (services de coopération technique Outre-Mer). Agronomie tropicale. Pp: 1262-1269.
51. **Couture I., 2004.** Analyse d'eau pour des fins d'irrigation.8p. Agri vision 2003-2004.
52. **Couture I., 2006.** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. Colloque sur l'irrigation: L'eau source de qualité et de rendement. 10 février 2006, Hôtel Mortagne, Boucherville. 13p.
53. **CREPA., 2007.** Contrôle et suivi de la qualité des eaux usées. Protocole de détermination des paramètres physico chimiques et bactériologiques.43p.
54. **Dajoz R., 2006.** Précis d'écologie.8^e éd. Dunod, Paris, 621p.
55. **Daoud Y., 1993.** Contribution à l'étude des sols des plaines de Chelif, le phenomena de salinisation, consequences sur les proprietes physique des sols argileux. Thèse de doctorat, 230p.
56. **Daoud Y. et Dogar A.M.1985.** Le régime du potassium dans quelques types de sols du Hodna (Algérie).Revue de lapotasse. Berne, n°6. p: 1-7.
57. **Daoud Yet Halitim A., 1994.** Irrigation et salinisation au sahara Algérien. Secheresse n°3, volume 5.Pp:151-160.
58. **David .G., Marisol O., Carlos A. H., 2023.** Smart irrigation systems in Agriculture: A systematic review. Agronomy (13), 26 pages.
59. **De Parceveaux S et Huber L., 2007.** Bioclimatologie.Ed.Quae, Paris, 324p.
60. **Dégremont G., 2005.** Mémento technique de l'eau. Tome 1, 10^{ème} édition. Edit tech et doc. Pp 3-38.
61. **Dekhil S., 1991.** L'eau et le développement de l'irrigation en Algérie. Médit n°1-2/91. Pp: 34-38.
62. **Dekkiche B., 1974.** Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe. Thèse Université de Gant, Belgique. 210p.
63. **Derwich E., benaabidate L., Zian A., sadki O., Belghity D., 2010.** Caractérisation physico-chimique de la nappe Alluviale du haut Sebou en aval, influence avec Oued Fes. Larhyss Journal, n° 08. Pp: 101-112.
64. **Deshpande S.M., Aher K.R., 2011.** Hydrogeochemistry and quality assessment of groundwater in Chikalthana industrial area of Aurangabad, Maharashtra, India.Bionano Frontier, vol.4, no. 1, pp.157-161.
65. **Despois J., 1953.** Le Hodna (Algérie) (compt redu). Revue de géographie Alpine. n°8. France, P.U.F. 409p.
66. **Djebaili S., 1984.** Steppe Algérienne, Phytosociologie et écologie. Ed O.P.U Alger, 177p + annexes.
67. **Domenico P.A et Schwartz F.W., 1990.** Physical and chemical hydrogeology 'John Wiley and sons, New York. 824p).
68. **Doneen L.D., 1964.** Notes on water quality in agriculture.Ed. University of California, Davis.
69. **Douaoui A.E.K., Nicolas H, Walter C., 2006.** Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote sensing Data. Geoderma 134: 217-230. **Doi:** 10.1016/j.geoderma.2005.10.009.

70. **Dubost D., 2002.** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis Algériennes. Edition CRESTRA. 423p.
71. **Duckson, D.W., 1987.** Continental climateIn: Climatology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. 364-365https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4_54.
72. **Durand J.H., 1970.** Les sols irrigables, étude pédologique. Ed. Presse universitaire de France, Paris, pp158-160.
73. **Durand J.H., 1984.** Les sols irrigables, étude pédologique. Ed, S.E.S. Alger.189p.
74. **Dussart B-H., 1966.** L'étude des eaux continentales Gauthier-Villars. Edition Paris. 678p.
75. **EL-Aslouj J., Kholtei S., El Amrani N et Hilali A., 2007.** Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées. Afrique SCIENCE 03(1) (2007) 109-122.
76. **Elgabaly M., 1970.** Problèmes d'échantillonnage, d'analyse et de cartographie des sols salins. La salinité, Sém. Baghdad(1970), Bull. Irrig. Drain. FAO, Rome. pp: 34-44.
77. **Fan G, Qiang H., Xiaoyi S., Zenglong Y., 2011.** Study on dynamic changes of soil salinization in the upper stream of the Tarim River based on RS and GIS. Procedia Environmental sciences 11, 1135-1141.
78. **FAO., 1975.** Guide des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricole dans la région du Hodna: les sols du Hodna. Rapport technique vol 5, 141 p.
79. **FAO., 1976.** La qualité de l'eau en agriculture 'Bull .Irrigation et drainage n°29'. Rome, 81p.
80. **FAO., 1985.** Water quality for agriculture Bull .Irrigation and drainage paper n°29' rev1. Rome, 173p.
81. **FAO., 1973.** L'emploi agricole dans les pays en développement.
82. **FAO., 1991.** La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture (situation par régions politiques, leçons des années 80 et perspectives pour les années 90. 251p.
83. **FAO., 2003.** L'irrigation avec des eaux usées traitées; manuel d'utilisation, 68p.
84. **FAO., 2004.** Agriculture mondiale-Horizon 2015-2030, ed. FAO, 94P.
85. **FAO., 2014.** La situation de l'alimentation et de l'agriculture. Résumé: www.fao.org/3/a-i4036f.pdf.
86. **FAO., 2024.** Etat de l'art de la productivité, de l'eau, des cultures en Tunisie. 89p.
87. **Faybishenco B., Wang W.X., Sui W.H., Strinf fellow W.T., 2016.** Permeability variations withing mining-induced fractured rock mass and its influence on groundwater inrush. Environmental Earth Sciences, volume 75. 15p.
88. **Ferahtia A., 2021.** Effets des activités humaines sur les ressources en eau dans les régions semi-arides et arides de l'Algérie. Doctorat 3ém cycle, Université Mohamed Boudiaf M'sila. 175p.
89. **Ferahtia A., Halilat M.T., Mimeche F., Bensaci E., 2021.** Surface water quality assessment in semi-arid region (el hodna watershed, Algeria) based on water quality index (WQI). StudiaUniversitatis Babes-Bolyai, Chemia, vol.66, no.1, pp: 127-142.
90. **FNS., 2013.** Manuel pratique d'analyse de l'eau. 4ème édition. Brazilia. 142p. (Fondation Nationale de la Santé).
91. **Gargaud M., Despois D et Parisot J.P., 2005.** L'environnement de la Terre primitive. Ed. Presses Universitaires de Bordeaux, 653 p.
92. **Gaujour D., 1995.** La pollution des milieux aquatiques: aides mémoire. 2ème Ed.

- Lavoisier. P: 49.
93. **Géhu J.M., Kaabèche M. et Gharzouli R., 1993.** Une remarquable toposéquence phytocoenotique en bordure du Chott El Hodna (Algérie). *Fragm. Flor. Geobot. Suppl.* 2(2): 513-520.
 94. **Gendre S., Tscheiller R., Moynier J-L., Deschamps T., 2021.** Tenneur en eau des sols : quel est l'effet d'interculture? *Revue Perspectives Agricoles*, n° 984.
 95. **Gendronneau M., 2006.** Etude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé: estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles. Programme de surveillance et évaluation de l'état des eaux du littorales. Edition IFREMER, 267p.
 96. **Gilli E., Mangan C et Murdy J., 2004.** Hydrogéologie: Objectifs, méthodes, applications. Dunod, Paris. 303 pages.
 97. **Gomella C et Guerree H, 1974.** La distribution d'eau dans les agglomérations urbaines et rurales. Edi 3, Paris. 280p.
 98. **Gorgi T., Tanik A., Sertel E., 2015.** Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies. *Procedia Earth and Plantery Science* 15, 507-512.
 99. **Gouaidia L., 2008.** L'influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride (cas de la nappe de meskiana Nord-est Algérienne), mémoire doctorat, université d'Annaba. 130p.
 100. **Gouaidia L., Guefaifia O., Boudoukha A., Laid Hemila M., Martin C., 2012.** Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est de l'Algérie). *Revue Géographie Physique et Environnement*, volume 6. Pp: 141-160.
 101. **Guechi N. O., 2022.** Études floristique et ethnobotanique du massif de Maadid (M'Sila, Algérie). Thèse de Doctorat 3ème Cycle (LMD), Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, Algérie. 122 p + annexes.
 102. **Guiraud R., 1970.** Carte géologique au 1/200000 et notice du bassin du Hodna. Ed F.A.O et ML.A.R.A Algérie.
 103. **Guiraud R., 1973.** Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse de doctorat, Université de Nice. France.
 104. **Guy J., 1996.** Les fondamentaux, le cycle de l'eau. Ed. Harchette supérieur. Paris. 157p.
 105. **Haddad H., Ghoualem H., 2014.** Caractérisation physicochimique des eaux du bassin hydrographique Cotier Algérois. *Larhyss Journal*, 18. 155-167.
 106. **Hadfi A., 2012.** Evaluation du pouvoir entartrant des eaux du secteur agricole du grand Agadir et mise en évidence de l'effet inhibiteur de quelques engrais phosphatés. Doctorat, Université d'Agadir, 141p.
 107. **Hadjab M., 1998.** Aménagement et protection des milieux naturels dans la cuvette centrale du Hodna (Algérie). Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix Marseille- Université de Provence (France). 237 p + annexes.
 108. **Halimi A., 1980.** L'Atlas Blidéen : Climats et étages végétaux. Ed. OPU, Alger. 523p.
 109. **Halitim A., 1988.** Sol des regions arides d'Algérie. Ed OPU. 384p.
 110. **Hamdane A., 2023.** L'avenir de l'irrigation en milieu aride : (troisième partie) les axes

- stratégiques relatifs à l'utilisation des eaux non conventionnelles. 19 p.
111. **Haouari A., 2013.** Influence des modifications de l'équilibre source-puits sur les paramètres physiologiques et biochimiques chez l'Olivier (*Olea europaea* L.), sous bioclimat semi-aride de Tunisie. Thèse de Doctorat. Faculté des sciences en bio-ingénierie, Université de Gand, Belgique et Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie. p186.
 112. **HCDS., 2010.** Base de données du Haut Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) sur l'occupation des terres des wilayas steppiques. Cas des wilayas de M'Sila et Batna (zones limitrophes à la zone humide de Chott El Hodna).
 113. **Hceeflc D., 2006.** Etude sur la pisciculture au barrage Almassira, CR dar Chafaal, cercle d'Elbrouge. Provincede Settat. 201p.
 114. **Hébert S., 1996.** Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières de Québec. Adresse:http://repository.upi.edu/1360/l/s_d551_0604180_chapter.pdf.
 115. **Heriarivony S., Razanampaan Y et Rakotomalala J., 2015.** Caractères physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de consommation (puit) de la commune rurale d'Antanifotsy, région Vakinankaratra, Madagascar. Larhyss journal, n°24. 7-17p.
 116. **Hétier J. P. et Lilin C., 1989.** Elevage et espaces boisés méditerranéens. *Forêt Méditerranéenne*, tome XI, n° 3, Décembre 1989. pp 187-202.
 117. **Islam M.A., Rahman M., Bodrud-Doza M., Muhib M., Shammi M., Zahid A., Akter Y., 2017.** Investigation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the south central part of the coastal region in Bangladesh, expo Health. <http://doi.org/10.1007/s12403-016-0220-z>.
 118. **Kurasaki M., 2018.** A study of groundwater irrigation water quality in south-central Bangladesh: a geo-statistical model approach using GIS and multivariate statistics. *ActaGeochimica*, vol.37, no. 2, pp.193-214.
 119. **Joshi D.M., Bhandari N.S., Kumar A., Agrawal N., 2009.** Statistical analysis of physicochemical parameters of water of River Ganga in Haridwar district. *Rasayan Journal of Chemistry*, vol.2, no. 3, pp. 579-587.
 120. **Julian M et Nicod J., 1977.** Deux thèses sur la géologie et l'hydrogéologie du bassin du Hodna et de ses bordures. *Comptes rendues, Méditerranée* n°2. Pp : 103-105.
 121. **Kaabèche M., 1990.** Les groupements végétaux de la région de Bou Saada (Algérie) Essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb. Thèse doctorat.
 122. **Kaabèche M., 1995.** Flore et végétation dans le Chott El-Hodna (Algérie). *Doc. Phytosoc.*, N.S. Camerino. 15: 393-402.
 123. **Kaabèche M., 1996.** Les relations climat-végétation dans le bassin du Hodna (Algérie). *Acta Botanica Gallica*, 143 (1): 85- 94. <https://doi.org/10.1080/12538078.1996.10515321>.
 124. **Kaabèche M., Gharzouli R. et Géhu J.M., 1995.** Observations phytosociologiques sur le Tell et les Hautes Plaines de Sétif (Algérie). *Documents Phytosociologiques*. N.S. Vol. XV. Camerino. pp 117-125.
 125. **Kadi A, 1997.** La gestion de l'eau en Algérie. *Journal des sciences hydrogéologiques*. Pp : 190-197.
 126. **Karakuş C.B., Yıldız S., 2020.** Evaluation for irrigation water purposes of groundwater quality in the vicinity of Sivas City Centre (Turkey) by using GIS and an irrigation

- water quality index. *Irrigation and Drainage*, vol.69, no. 1, pp.121-137;
127. **Kebiche M., 1994.** Le bassin versant du Hodna (Algérie) : ressources en eau et possibilité d'aménagement. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reim*, n°85-86, 1994. Pp: 25-34.
 128. **Kelley W.P., 1963.** Use of saline irrigation water. *Soil science*, vol.95, no. 6, pp. 385-391.
 129. **Kemmer, F.N., 1984.** Manuel de l'eau. Ed.Technique et documentation, Lavoisier, Paris 930p.
 130. **Kerambrun P., 1985.** Les effets de stress dans les eaux saumâtres côtières conséquences écophysologiques. *CIESM Congress 1984*, Lucerne, article 0067, *Rapp. Comm. int. Mer Medit.*, 29, 4 (1985). pp 89-92.
 131. **Kettab A., Mitiche R et Bennaceur N. 2008.** De l'eau pour un développement durable : enjeux et stratégies. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 21 (2), 247-256.
 132. **Khamidov M. KH., Juraev U.A., Buriev X.B., Juraev A.K., Saksonov U.S, Sharifov F.K., Isabaev K.T., 2023.** Efficiency of drip irrigation technology of cotton in saline soils of Bukhara oasis. In *ternational Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future. Earth and Environmental Science*. 6p.
 133. **Khamidov M. KH., Muratov A., 2023.** Effectiveness of rainwater irrigation in agricultural crops in the context of water resources. *IOP conference Series. Materials Science and engineering* 130 (1) 012130.
 134. **Khodapanah L.W.N.A., Sulaiman W.N.A., Khodapanah N., 2009.** Groundwater quality assessment for different purposes in Eshtehard District. Tehran, Iran. *European journal of scientific research*, vol.36, no. 4, pp.543-553.
 135. **Kieken M., 1970.** Résumé des connaissances acquises au cours des vingt dernières années dans le Hodna, le Titteri et la partie occidentale des Biban. *Bulletin B.R.G.M*, section IV, N°1. Département d'Alger.
 136. **Kieken M, 1962.** Notice explicative de la carte géologique au 1/50 000e, M'sila (168), Première édition. Service de la carte géologique de l'Algérie, Alger
 137. **Kouassi A. M., Kouamé K. F., Koffi Y. B., Dje K. B., Paturol J. E. et Oulare S., 2010.** « Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire », *Cybergeo:European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 513, mis en ligne le 07 décembre 2010, consulté le 03 avril 2023. URL: <http://journals.openedition.org/cybergeo/23388>; DOI:<https://doi.org/10.4000/cybergeo.23388>.
 138. **Khamidov M. Kh., Juraev U.A., Buriev X.B., Juraev A.K., Saksonov U.S., 2023.** Efficiency of drip irrigation technology of cotton in saline soils of Buukhara oasis. *International conference of advanced agriculture for sustainable future*. 6 pages.
 139. **Kumaravel S., Gurugnanam B., Bagyaraj M., Venkatesan S., Suresh M., Chidambaram S., JeyavelR.T., Gnanachandrasamy G., 2014.** Mapping of groundwater quality using GIS technique in the east coast of Tamilnadu state and Pondicherry union territory, India. *International Journal of Advanced Geosciences*, vol.2, no. 2, pp.43-47.
 140. **Lallemand B, 1980.** Aménagement des sols salins : irrigation avec des eaux salines, 34p.
 141. **Landreau A et Monition L., 1977.** Nouvelle évaluation de la qualité de l'eau

- pour l'irrigation. Département d'hydrogéologie Orléan. 77 SGN 628 HYD Septembre 1977. 25.
142. **Le Houérou H., N., 1995.** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique: diversité biologique, développement durable et désertisation. Montpellier: CIHEAM, pp1-396 (Options Méditerranéennes: Série B, Etudes et Recherches, n°10).
 143. **Le Houérou H., N., 2009.** Bioclimatology and biogeography of Africa. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 241 p.
 144. **Le Houérou H., N., Claudin J., Haywood N. et Donadieu J., 1975.** Etudes des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricoles dans la région du Hodna, Algérie. Etude phytoécologique du Hodna, Volume 1, PNUD – FAO, Rome, 154 p. +cartes.
 145. **Lekoui S., 2020.** Impact des retours d'eau sur la qualité des eaux des aquifères d'Annaba, El Taref (Nord-Est Algérien). Thèse doctorat en Sciences. Université Badji-Mokhtar (Annaba). 212p.
 146. **Leynaud J., 1968.** Les pollutions chimiques; influence de la température sur la vie aquatique. B.T.T Ministère de l'agriculture, pp: 224-881.
 147. **L'Haridon S., 2017.** Etude de la diversité microbienne des bassins hypersalés anoxiques profonds de la Mer Méditerranée orientale. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale (UBO) - France. 280p.
 148. **Lhissoui R., Elharti A., Chokmani K., 2014.** Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data. Eurasian Journal of soil science 3, 82-88.
 149. **Li P, Li X, Meng X, Li M et Zhang Y, 2013.** Appraising groundwater quality and health risks from contamination in a semi arid region of Northwest China. Expo Health 8: 361-379.
 150. **Li P, Wu J, Qian H, 2016.** Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors: a case study in around Hua country. Arab J. Geo oasis 9; 15p.
 151. **Loucif S, 2003.** Les ressources en eau et leur utilisation dans le secteur agricole en Algérie. Revue H.T.E, n° 125; Pp: 94-101.
 152. **Loyer J-Y., 1989.** Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine Sahélien. Le risque en agriculture (ouvrage). P: 531-539.
 153. **Lozet G et Mathieu C., 1990.** Dictionnaire de science du sol. Ed Lavoisier n°2. 384p.
 154. **Mahamat S, Maoudombaye T, Ndoumtamia G et Loukman B, 2015.** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'adduction publique de la société Tchadine. Journal of Applied Biosciences 95:8973–8980p.
 155. **Marlet S., 2004.** Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Acte du séminaire « Modernisation de l'Agriculture Irriguée ». Rabat, du 19 au 23 Avril 2004.
 156. **Mebarki A., 1982.** Le bassin du Kebir-Rhumel (Algérie)» Annuaire hydrologique de l'Algérie 1951/52, Alger, DSCH, S.E.S., pp5-12.
 157. **Meddour R., 2010.** Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie. Exemples des groupes forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjurienne. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences. Université Mouloud Mammeride Tizi Ouzou. 397 p

+Annexe.

158. **Meireles A.C.M., Andrade E.M.D., Chaves L.C.G., Frischkorn H., Crisostomo L. A., 2010.** A new proposal of the classification of irrigation water, *Revista Ciência Agronômica*, vol.41, n°3, pp.349-357.
159. **Milos H, 1971.** L'eau et l'environnement *Bull. Rome. FAO.* 8: pp 32-38.
160. **Mimeche F., 2014.** Ecology of the Algerian Barbel *Luciobarbuscallensis* (Valenciennes, 1842) (Pisces: Cyprinidae) in the El K'sob dam (M'Sila). Doctoral Thesis. National Superior School of Agronomy - EL- Harrach, Algiers. pp 117.
161. **Mimoune S., 1995.** Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (Sud du Chott El Hodna). Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I - 204p.
162. **Mouhouche B et Guemraoui M, 2004.** Réhabilitation des grands périmètres d'irrigation en Algérie. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, Rabat, du 19 au 23 Avril 2004. 13p.
163. **Moukhokha M., Sebaa M., Berrahou A., Clooster V. M., 2011.** Contribution à l'étude des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, 9. 149-169.
164. **Moussa M., Hallaire V., Michot D., Hachicha M., 2020.** Micro-and macrostructure changes of soil underirrigation with electromagnetically treated water. *Soil and tillage research* 203 (3).
165. **Mozas M et Ghosn A, 2013.** Etat de lieu sur secteur de l'eau en Algérie. Institut de prospective économique du monde méditerranéen. 27p.
166. **Munns R., 2002.** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell and environment* 25, 239-250.
167. **Nahal I., 1981.** The mediterranean climate from a biological viewpoint. In: di Castre F., Goodall D. W. & Specht R. L. (Eds), *Mediterranean type shrublands*, Elsevier Scient. Publ., Amsterdam, 63-86.
168. **Nancy M, 1997.** La qualité de l'eau d'irrigation : un facteur à ne pas négliger. Pp 33-34.
169. **Ncibi K., Chaar H., Hadji R., Baccari N., Sebei A., Khelifi F., Abbes M., Hamed Y., 2020.** ASIG-based statical model for assessing groundwater susceptibility index in shallow aquifer in Central Tunisia (Sidi Bouzid basin). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 98.
170. **Nezli I, Achour S, Djabri L., 2007.** Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). *Larhyss Journal*. Volume 6, n°1. Pp: 121-134.
171. **Nichane M et Khelil M A, 2014.** Changement climatique et ressources en eau en Algérie: vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Revue des Bio Ressources*, Volume 4. Pp: 1-7.
172. **Nikiema D., Sawadogo N., Baiez H.R., Sinarey I., Ouedraogo M.H., Barry M.L., Sawadogo M., 2021.** Effet de l'irrigation goutte à goutte sur les paramètres agromorphologiques de trois variétés de riz de Bas –Fon. Colloque International « Regards croisés sur les territoires en crise et sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne », Université Alassane Ouattara (Bouaké-Côte d'Ivoire). 275-269.
173. **Nouayti N, Khattach D et Hilali M, 2015.** Evaluation de la qualité physicochimique des

- eaux souterraines des nappes du Jurassiques du haut bassin de Ziz (haut Atlas central, Maroc), *Journal of Materials and Environmental Science* 6 (4) (2015) 1068-1081.
174. **Olier C et Poirée M, 1981.** Irrigation, les réseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie d'arrosage. 5^{ème} édition .499p.
175. **Omari, C., Moisseron, J.Y., Alpha, A., 2012.** L'agriculture algérienne face aux défis alimentaires. *Revue Tiers Monde*, N° 210, Avril-juin, 2012).
176. **OMS, 2006,** La guerre de l'eau. The water conflict.
177. **Oudin L., 2006.** Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, *La Houille Blanche*, 92:6, 113-120, DOI: 10.1051/lhb:2006109.
178. **Oulhaci D, 2016.** Ruissellement interannuel en Algérie Septentrionale (Relation entre, ruissellement pluie et évaporation). Thèse doctorat. Université Kasdi Merbeh. Ouargla. 207p.
179. **Ozenda P., 1982.** Les Végétaux dans la biosphère. Ed. Doin, Paris. 427 p.
180. **Palayan D., 2003.** Structure et fonctionnement d'un agroécosystème touché par la crise de l'eau en Inde du sud: étude de cas autour des réservoirs d'eau de deux villages du district de Pudukkottai, Tamil Nadu. Mémoire de maîtrise. Université Paris 1 Pantheon-Sorbonne. UFR de géographie. 141p.
181. **Parida A.KA et Das A.B., 2015.** Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety* 60.342-349.
182. **Person J., 1978.** Irrigation et drainage en Tunisie, problème posé par la salinité des sols et des eaux. *Bulletin de BRGM*, 2^{ème} série, section III, n°2. Pp:143-151.
183. **Pettyjohn, W.A., 1971.** Water pollution by oil-field brines and related industrial wastes in OHIO. *The Ohio Journal of Science*. Volume 71, n°5 .Pp: 257-269.
184. **Phocides, A., 2008.** Manuelle des techniques d'irrigation sous pression. 2^{ème} Edition. FAO, Rome. 308 pages.
185. **Plauchu, 2004.** Economie de l'environnement.
186. **PNUD, 2009.** Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. 19p.
187. **PNUE, 1991.** Pollution des eaux douces. Bibliothèque de l'environnement **PNUE/GEMS**. N°6. Nairobi. 130p.
188. **Potelon J.L et Zysman K., 1989.** Le guide des analyses de l'eau potable. « La lettre du carte territoriale ». S.E.P.T. Voiron. Cedex 253p.
189. **Quirk J.P., Shofield I., 1955.** The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Journal of Soil Science*, n°6, 136-146.
190. **Qureshimatva UM., Maurya RR., Gamit SB., Patel RD et Solanki HA., 2015.** Determination of Physico-Chemical Parameters and Water Quality Index (Wqi) of Chandlodia Lake, Ahmedabad, Gujarat, India. *J Environmental and Analytical Toxicology* Volume 5:4. 6p.
191. **Ousmane D., 2020.** Les « territoires salés » de l'eau du Delta du Sénégal : cartographie et pratiques de gestion dans les périmètres irrigués du Gorome-Lampsar. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France. 290 p.
192. **Ousmane D., Pascal B., Laurent T., 2022.** Indicateurs et pratiques de gestion de la salinité des sols dans le Gorome-Lampsar (Delta du Sénégal). *Revue Vertigo*, volume 22

n°3. 12 p.

193. **UNESCO., 2024.** L'eau pour la prospérité et la paix. Rapport Mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau en 2024.
194. **Ramade F., 2003.** Elément d'écologie, écologie fondamentale. 3^e éd. Dunod, Paris, 690 p.
195. **Rao N.S., Rao P.S., Reddy G.V., Nagamani M., Vidyasagar G., Satyanarayana N. L.V.V., 2012.** Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha River Basin, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India. Environmental monitoring and assessment, pp.5189-5214.
196. **Ravi R., Aravindan S., Shankar K., Balamurugan P., 2020.** Suitability of groundwater quality for irrigation in and around the main Gadilam river basin on the east coast of southern India. Archives of Agriculture and Environmental Science, vol.5, no. 4, pp.554-562.
197. **Rawat K.S., Singh S.K., Gautam S.K., 2018.** Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study. Applied Water Science, vol.8, no. 8, pp.1-24.
198. **Rebbas K., 2014.** Développement durable au sein des aires protégées algériennes, cas du Parc National de Gouraya et des sites d'intérêt biologique et écologique de la région de Béjaïa. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas Sétif1, Sétif, 180 p.
199. **Rechachi M.Z., 2017.** Impactes de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en région aride et semi-aride : cas de la région de Zibane. Thèse Doctorat Science, Université de Biskra. 412p.
200. **Remini B, 2005.** La problématique de l'eau en Algérie. Larhyss Journal. N°8. Pp: 27-47.
201. **Richards L.A., 1954.** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, pp.166.
202. **Rieu M, Touma J, guey R; 1992.** Sodium-Calcium exchange on Brazilian soils: modeling the variation of selectivity coefficients. Soils. Sci. Ann. J, pp: 1294-1300.
203. **Rieul L et Ruelle P, 2003.** Irrigation, guide pratique. Ed 3, Paris France, 344p.
204. **Rodier J, Bazin C, Broutin J-P, Chomobon P, Champsaur H., 2005.** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer (chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie), interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris. 1384p.
205. **Rodier J, Legube B, Merlet N, 2009.** L'analyse de l'eau, edi 9 Dunod, Paris 1526 P.
206. **Rodier J., Bazin C., Broutin J.P, Chomobon P et Rodi L., 1996.** L'analyse de l'eau: eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. Chimie, physicochimie, microbiologie et interpretation des resultants. Ed.8 Dunod. Paris, 13-84p.
207. **Rodier J., Bzin C., Droutin J-P. Chomobon P., Champsaur H., et Rdi L., 2005.** L'analyse de l'eau: eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. Chimie, physicochimie, microbiologie et interpretation des resultants. Ed. Dunod. Paris, 13-84p.
208. **Rodier J., Legube B et Merlet., 2009.** L'analyse de l'eau. 9^{ème} édition, Dunod, Paris, France. 152p.
209. **Sahli N., 2010.** Exploration des indicateurs de la qualité des eaux d'irrigation dans la plaine du bas Chellif. Thèse master, Université Hassiba Benbouali Chellif. 60p.
210. **Sahli N., 2021.** Impact des eaux d'irrigation sur la qualité des sols de la plaine du bas-Chellif. Thèse doctorat, Université Hassiba Benbouali Chellif. 126p.

211. **Sakaa B, 2013.** Développement durable vers un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf, Nord-Est Algérien. Thèse doctorat sciences, Université Badji Mokhtar (Annaba). 163 p.
212. **Salcedo-Sánchez E.R., Hoyos S.E.G., Alberich M.V.E., Morales M.M., 2016.** Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environmental monitoring and assessment*, vol.188, no. 10, pp.1-20.
213. **Salifu M., Aidoo F., Hayford M.S., Adomako D., Asare E., 2017.** Evaluating the suitability of groundwater for irrigational purposes in some selected districts of the Upper West region of Ghana. *Applied water science*, vol.7, no. 2, pp. 653-662.
214. **Samba R., 1998.** Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve du Sénégal. Analyses comparées des fonctionnements hydro-salines des sols du Delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture. Thèse Doc, Uni Cheikh Anta Diop de DAKAR (Sénégal). 175p.
215. **Sappa G., Ergul S et Ferranti F., 2014.** Water quality assessment of carbonate aquifers in southern Latium region, CentralItaly: a case study for irrigation and drinking purposes. *Applied Water Science* 4:115–128.
216. **Sari M et Capolini J., 1975.** Etude geomorphologique du Hodna (zone Nord et zone Sud). 201p.
217. **Sbai A., Mouhdi A., Adouk N. et Paul F., 1994.** Modélisation de la vitesse du vent et calcul du potentiel éolien du Maroc oriental: Le cas d'Oujda-Angad. *La Météorologie* 8^{ème}série, n° 5 -Mars 1994. pp: 54-60.
218. **Seltzer P., 1946.** Le climat de l'Algérie. Inst. Météorol. Phys. GI., Alger, Carbonel, 219p.
219. **Semar A., Bachir T., Hartani H., 2019.** Soil and water salinity evaluation in new agriculture land under arid climate, the case of Hassi Miloud area, Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 4, 40.
220. **Servant, 1978.** La salinité dans le sol et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage. *Bulletin BRGM* (2).III2
221. **Sharma K.K., Kaur S., Sharma K., 2017.** Seasonal variations in physico-chemical parameters of Dilli pond, Sainik Colony, Jammu and Kashmir. *International Journal of Applied Research*, vol 3, no. 7, pp. 686-691.
222. **Shib A., 2014.** Seasonal Variations in Physico-Chemical Characteristics of RudrasagarWetland - A Ramsar Site, Tripura, North East, India.*Research Journal of Chemical Sciences*. Vo l4(1). Pp: 31-40.
223. **Sidhu N., Rishi M.S., Kishore N., 2015.** A water quality index approach to appraise temporal variation and heavy metal accumulation in urban storm water flow with special emphasis on irrigation utility, Chandigarh, India. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol.4, pp. 484-496.
224. **Singh K.P., Malik A., Mohan D., Vinod KS and Sinha S., 2006.** Evaluation of Groundwater Quality in Northern Indo-Gangetic Alluvium Region. *Environmental Monitoring and Assessment* 112: 211-230.
225. **Slimani R., 2017.** Etude qualitative des ressources en eau souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d'un aquifère au climat aride méditerranéen: cas de la cuvette d'Ouargla Algérie. Thèse de doctorat, Université Kasdi Lerbah Ouargla.

- 132p.
226. **Subba Rao N, Surya Rao P, Venktram R G, Nagamani M, Vidyasagar G et Satyanarayana NLW, 2012.** Chemical characteristic of groundwater and assesment of groundwater quality in Varaha river basin, Visakhapatnam district, Andhra Pradesh; India. *Environ Monit Assess* 184: 5189-5214.
 227. **Szabolcs I., Darab C., 1964.** The influence of irrigation water of high sodium carbonate content on soils.In *Proceedings of the 8th international congress of ISSS*, Tsukuba, Japan, pp.803- 812.
 228. **Szabolcs I., 1996.** An over-view on salinity and alkalinity in Europe. *European society for soil conservation*. Chap1, pp: 1-12. Special publication.
 229. **Tabet D.H., 1999.** Interet d'une approche spéciale par suivi de la salinité des sols dans les systèmes irriguésdes. Cas de la subdivision de Panjab (Pakistan). Thèse Doctorat E .N.G.R.E.F, Montpellier, 435p.
 230. **Talbi B et Souak F., 2016.** Le management intégré des ressources en eau en Algérie : enjeux et contraintes. *International Journal of Economics and Strategic Management of Business Process (ESMB)*. Pp.67-72.
 231. **Tir Ch., Bouziane MT., Mimeche L., Alouani R., Madani Dj., Mimeche F., 2022.** Assessment of groundwater quality forirrigation use in the m'sila region (Algeria). *Revue natural ressources ans sustainable developement*, volume 12. 15p.
 232. **UNESCO., 2003.** Observatoire du Sahara et du Sahel, Système aquifère du Sahara Septentrionale, gestion commune d'un bassin transfrontière. *Rapport desynthèse*. 129 pages.
 233. **VallesV, Valles M et Dosso M., 1983.** Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cah ORSTOM; Série pédol*, vol XX n°2. Pp:117-129.
 234. **Varol S., Davraz A., 2015.** Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, vol.73, no. 4, pp.1725-1744;
 235. **Virgine M et Arnaud L., 2023.** Droit de l'eau: retour sur l'année 2022-2023. *Revue Droit de l'Environnement*. N° 35.
 236. **WHO., 1987.** Global pollution and health results of related environnemental monitoring system. WHO, UNEP.
 237. **WHO., 1996.** Total disolved solids in drinking-water: Background document for development of WHO guidlines for drinking water quality.
 238. **Wilcox L V., 1959.** Determining the quality of irrigation water. Dept of agriculture, USA. P6.
 239. **Wilcox L.V., 1948.** The quality of water for irrigation use. Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Washington.
 240. **Xiao J., Wang L., Deng L., Jin Z., 2019.** Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, vol.650, pp. 2004-2012.
 241. **Zedam A. et Fenni M., 2015.** Vascular flora analysis in the southern part of Chott El Hodna wetland (Algeria). *AES Bioflux*, 7 (3): 357-368.
 242. **Zedam A et Fenni M., 2021.** Vascular Flora Analysis in the Southern Part of Chott El Hodna Wetland, Algeria: An Advanced Research. *Challenging Issues on Environment and Earth Science* Vol. 9, 19 November 2021, Page 88-100.

<https://doi.org/10.9734/bpi/ciees/v9/13218D>

243. **Zedam A., 2015.** Etude de la flore endémique de la zone humide de Chott El Hodna : Inventaire-Préservation. Thèse de Doctorat en Science. Université de Sétif 1, Sétif, Algérie. 150 p + annexes.
244. **Zeghaba.N, 2018.** Etude et suivi de la qualité des eaux de Hammam Debagh (Nord-est Algérien). Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 150p.
245. **Zella L et Smadhi D., 2006.** Gestion de l'eau dans les oasis Algériennes. Larhyss Journal, n°5 Juin 2006.Pp: 149-156.
246. <http://fr.tutempo.net/climat/>, accéder le 22/ 12 2019.

*Production scientifique en
relation avec la thèse*

1-Publication

ASSESSMENT OF GROUNDWATER QUALITY FOR IRRIGATION USE IN THE M'SILA REGION (ALGERIA).

Url de la revue/article : <https://www.nrsdj.com/issues-year-2022-2/assessment-of-groundwater-quality-for-irrigation-use-in-the-m-sila-region-algeria.html>

2-Communications :

1- Etude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines destinée à l'irrigation de la zone de M'TERFA (Est de la wilaya de M'Sila) Algérie. 1^{er} Séminaire international sur la sécurité alimentaire et développement durable dans l'environnement semi aride. Université de Ferhat Abas Sétif 1 Algérie 8-9-10/12/ 2018.

2- Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'irrigation et des sols de la région de Kef Tiour (Sud Ouest de la wilaya de M'Sila), Algérie. VI Meeting international sur l'agriculture oasisienne et développement durable (Zerzis), 19-20-21/12 2018.

3- Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la wilaya de M'Sila. Cas de la zone de Maadid (NE M'Sila, Algérie). 1st International Conference of Sustainability of Saharan Agriculture and Water Use (SSWU). Université Hamma Lakhdar (Eloued) (2-3/3/2020).

4- Qualité physico-chimique des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans la wilaya de M'Sila (Algérie). Cas de la zone de Kef Tiour (S O M'Sila, Algérie). Colloque Maghrébin sur l'eau et l'environnement dans les zones arides et semi arides " CMEEZASA '2021 " Université Mohamed Khider (Biskra) (22-23/3/2021).

5- Qualité des eaux destinées à l'irrigation, facteur à ne pas négliger en agriculture. Cas des eaux souterraines de la zone de M'Sila (Nord-Est de l'Algérie). 1^{er} Séminaire national en Sciences Agronomiques : Recherches à vision économique en sciences Agronomiques. Université Mohamed Boudiaf-M'sila (15-16/6/2021).