

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHESCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA



MEMOIRE
Présente
A la Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Nature et de la Vie
Pour obtenir le Diplôme de
Master Académique en Science du Sol et Environnement
Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie
Filière Science Agronomique

Thème

Contribution à l'étude hydro chimique des eaux
d'irrigation en zone semi aride -cas de la plaine
de BOU SAADA (Sud-Est Algérien)

présentée par :
ATMANI Sarra
BAZA Kaouthar

Soutenue publiquement le 06 Juillet 2017

Devant le jury composé de :

MEZRAG Fadila	Président	MCA, université de M'sila
AMROUNE Abdelouahab	promoteur	MAA, université de M'sila
TIR Chafia	Examinatrice	MAA, université de M'sila

Année universitaire 2016/2017

Remerciements

Avant tous nous remercierons **ALLAH**. Le tous puissant de nous avoir donné la santé la volonté et la patience afin d'accomplir ce mémoire.

En premier lieu nous remercierons **Mr.AMROUNE Abdelouahb** d'avoir accepté de diriger ce mémoire par ses conseils sa compétence et sa gentillesse . on le remercie pour son encadrement professionnel et exceptionnel .

Nous avons l'honneur que le jury soit présidé par **Mme.MEZRAG Fadila** et **Melle TIR Chafia** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous ne saurons oublier de remercier les enseignants qui ont étudié et l'administration d'Agronomie nos remerciements à tout les personnes qui nous ont aidés et toute la promotion

SSE (2016-2017)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chère parents

A mes très chère sœurs et mon frère

A ma grande famille et mon oncle Abdlkader

A tous mes amis

Et à tous ce qui m'ont enseigné

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.

Atmani Sarra

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chère parents

A mes très chère sœurs

A ma grande famille

A tous mes amis

Et à tous ce qui m'ont enseigné

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.

Baza Kaouthar

Sommaire

Introduction générale.....	1
Première partie : Recherche bibliographique	
1.1 Introduction	2
1.2 Les ressources en eau en Algérie.....	2
1.2.1 Les ressources souterraines.....	2
1.2.2 Les ressources de surfaces	3
1.3 Définition irrigation.....	4
1.3.1 L'irrigation en Algérie.....	4
1.4 Les caractéristiques des eaux d'irrigation.....	4
1.4.1 Les normes de qualité des eaux d'irrigation.....	4
1.4.2 Les indicateurs de qualité.....	6
1.4.2.1. Les analyses physico-chimiques.....	6
1.4.2.2 Enquête sanitaire	7
1.5 Classification des eaux d'irrigation.....	7
1.5.1 Classification basée sur la salinité.....	7
1.5.2 Classification basée sur la conductivité électrique (CE).....	8
1.5.2 Classification basée sur l'alcalinité.....	9
1.6 Les propriétés des eaux d'irrigation.....	9
1.6.1 Les propriétés physiques	9
1.6.1.1 La température.....	9

1.6.1.2 Le pH	9
1.6.1.3 Minéralisation.....	10
1.6.1.4 Résidu sec.....	10
1.6.1.5 L'oxygène dissous.....	10
1.6.1.6 La conductivité électrique.....	11
1.6.2 Les propriétés chimiques.....	11
1.6.2.1 Titre alcalimétriques (TA).....	11
1.6.2.2 La Dureté des eaux.....	12
1.6.2.2.1 La dureté totale ou degré hydrotimétrique.....	12
1.6.2.3 Les cations.....	12
1.6.2.3.1 Sodium.....	12
1.6.2.3.2 Potassium.....	13
1.6.2.3.3 Le calcium.....	13
1.6.2.3.4 Magnésium Mg^{++}	13
1.6.2.4 Les anions.....	13
1.6.2.4.1 Le sulfate.....	14
1.6.2.4.2 Le bicarbonate (HCO_3^-).....	14
1.6.2.4.3 Le chlorure.....	14
1.6.2.4.4 Le nitrate NO_3	15
1.7 Etude des valeurs relatives.....	15
1.7.1 Rapports caractéristique.....	15

1.7.1.1 Le rapport rMg^{++}/rCa^{++}	15
1.7.1.2 Le rapport rNa^{++}/rCl^{-}	15
1.7.1.3 Le rapport rSO_4^{-}/rCl^{-}	15
1.7.2 Indice d'échange de base i.e.b.....	16
1.8 Les problèmes liés à la qualité des eaux d'irrigation.....	16
1.8.1 Salinité.....	16
1.8.2 Toxicité.....	16
1.9 Les diverses nuisances.....	17
1.9.1 Les chlorures et les sulfates.....	17
1.9.2 Le bore.....	17
1.9.3 Le bicarbonate.....	17
1.9.4 Sodium.....	17

Deuxième partie : Matériels et méthodes d'étude

Chapitre 1 : Etude du milieu physique

2.1.1. Introduction.....	19
2.1.2. Situation géographique	19
2.1.2.1. Caractéristiques géographiques	19
2.1.2.2. Aperçu socio-économique.....	20
2.1.2.2.1. Habitat.....	20
2.1.2.2.2. Agriculture.....	20
2.1.2.3. Géomorphologie	21
2.1.2.4. Réseau hydrographique	21
2.1.2.5. Climat.....	21
2.1.2.6. Sol.....	21
2.1.2.7. Végétation	23

2.1.2.8. Géologies	23
2.1.2.8.1. Secondaire.....	23
a-Trias	23
b-Jurassique.....	23
c-Crétacé supérieur	23
c-1 Cénomanién	23
2.1.2.8.2. Tertiaire.....	23
2.1.2.8.3. Quaternaire	24
a-Terrains de chott	24
b-Dunes	24
c-Cônes de déjections	24
2.1.2.8.4. Interprétation de la colonne litho-stratigraphique.....	26
-Les formations favorables de constituer des aquifères poreux.....	26
-Les terrains favorables d constituer des aquifères Karstiques	26
-les formations qui jouent le rôle de limites étanches entre les aquifères	26
2.1.2.9. Conclusion	26
2.1.3. Climat et caractéristiques météorologique	27
2.1.3.1. Introduction.....	27
2.1.3.2. Aperçu général sur le climat de l'Algérie.....	27
2.1.3.3. Zone d'étude et son équipement.....	27
2.1.3.4. Les Températures.....	28
2.1.3.5. Précipitation.....	28
2.1.3.6. Interprétation de la carte pluviométrique.....	30

2.1.3.7. Le vent.....	31
2.1.3.8. Humidité relative.....	32
2.1.3.9. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement.....	33
2.1.3.10. Calcul de l'ETP suivant la formule de C.W.THORNTHWAITE.....	34
2.1.3.11. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	35
2.1.3.11.1. Méthode de TURC.....	35
2.1.3.11.2. Méthode de WUNDT.....	36
2.1.3.11.3. Méthode de P. VERDEIL.....	38
2.1.4. Etude du climat de la région	39
2.1.4.1. Indice de D. MARTONNE.....	39
2.1.4.2. Le diagramme de L. EMBERGER.....	40
2.1.4.3. Diagramme Ombrothèrmique de Gaussen et Bagnouls.....	42
2.1.4.4. Méthode de THORNTHWAITE	43
2.1.4.4.1. Le bilan hydrique.....	44
2.1.4.4.2. Discussion de bilan de Thornthwaite.....	45
2.1.5. Conclusion	46

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.2.1. Echantillonnage	47
2.2.1.1. Prélèvement de l'eau.....	47
2.2.1.2. Conservation de Prélèvement.....	47
2.2.2. Mesures physico-chimique de l'eau de forage	48

2.2.2.1. Sur terrain.....	49
2.2.2.1.1. Température.....	49
2.2.2.1.2. Potentiel hydrogène (pH).....	49
2.2.2.1.3. Salinité.....	49
2.2.2.1.4. Conductivité électrique	49
2.2.2.2. Au laboratoire.....	49
2.2.2.2.1. Résidu sec (R.s).....	49
2.2.2.2.2. Chlorure (Cl).....	50
2.2.2.2.3. Sulfates (SO ₄).....	50
2.2.2.2.4. Nitrate (NO ₃).....	50
2.2.2.2.5. Calcium (Ca).....	51
2.2.2.2.6. Magnésium (Mg).....	51
2.2.2.2.7. Sodium(Na)	51
2.2.2.2.8. Potassium.....	52
2.2.2.2.9. Les carbonates et les bicarbonates.....	52

Troisième partie : Résultats et discussions

3.1. Introduction.....	53
3.2. Etude des paramètres physico-chimiques	53
3.2.1. Etudes des paramètres physiques	54
3.2.1.1. La température	55
3.2.1.2. Le potentiel hydrogène (pH)	56
3.2.1.2.2. Equilibres calco carboniques	57
3.2.1.3. La conductivité	58
3.2.1.4. La dureté	60
3.2.1.5. Résidus secs	61
3.2.2. Etude des paramètres chimiques	62
3.2.2.1. Calcium.....	63
3.2.2.2. Magnésium	64

3.2.2.3. Le sodium	64
3.2.2.4. Le potassium	65
3.2.2.5. Chlorures	66
3.2.2.6. Les sulfates.....	67
3.2.2.7. Les bicarbonates	69
3.2.2.8. Les nitrates.....	70
3.3. Etude des rapports caractéristique des éléments dominants.....	71
3.3.1. Rapport Na^+ - Cl^-	71
3.3.2. Origine des éléments Na^+ et SO_4^{2-}	72
3.3.3. Origine du Calcium.....	73
3.4. Indice d'échange de base i.e.b.....	74
3.5. Faciès chimique des eaux.....	75
3.5.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	75
3.5.2. Diagramme de Piper	80
3.6. Aptitude à l'irrigation	82
3.6.1. Salinité	82
3.6.2. Infiltration	84
3.6.2.1. Eaux peu salées.....	84
3.6.2.2. Eaux à forte teneur en sodium	84
3.6.2.2.1. Classification de Richards	85
3.6.3. Etude de la toxicité des végétaux	86

3.6.3.1. Sodium	86
3.6.3.1.1. Classification de Wilcox.....	88
3.6.3.2. Chlore	89
3.7. Analyse en Composantes Principales (A.C.P).....	90
3.7.1. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de la plaine de M'Sila.....	90
3.7.2. Analyse statistique	90
3.7.3. Matrice de corrélation.....	91
3.7.4. Etude des variables et des individus	92
Conclusion générale et recommandations.....	106
Référence bibliographique	
Annexe	

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition spatiale des eaux de souterraine de l'Algérie.....	3
Tableau 2 : Répartition spatiale des eaux de surface de l'Algérie.....	3
Tableau 3: Les normes de qualité des eaux d'irrigation.....	5
Tableau 4: Les indicateurs de qualité d'eau d'irrigation.....	6
Tableau 5 : Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale de sels, selon différent sources.....	8
Tableau 6: Classification des eaux d'après leur pH	10
Tableau 7: La dureté des eaux en °F.....	12
Tableau 8 : Présentation des coordonnées de la station retenue dans cette présente étude.....	27
Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles de la région de BOU SAADA Durant la période (2004-2016).....	28
Tableau 10 : Précipitations moyennes mensuelles en(mm) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).....	29
Tableau 11 : Vitesses moyennes mensuelles en (mm) de la région de BOU SAADA durant période (2004-2016).....	31
Tableau 12 : L'humidité moyenne mensuelle en (%) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).....	32
Tableau 13 : Evapotranspiration en (mm) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).....	33
Tableau14 : Calcul de l'ETP selon C.W.Thornthwaite de la Station de BOU SAADA	35
Tableau 15 : Bilan hydrique de la station BOU SAADA (méthode de Thornthwaite).....	44
Tableau 16 : Différentes valeurs de l'ETP et de l'ETR.....	45
Tableau 17 : Conditions de conservation de prélèvement.....	48

Tableau 18: les paramètres physiques mesurés sur terrain	54
Tableau 19 : les paramètres physique.....	55
Tableau 20 : L'agressivité ou l'incrustante de l'eau.....	58
Tableau 21 : Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité.....	59
Tableau 22 : résultat des cations.....	62
Tableau 23 : Résultat des anions	62
Tableau 24 : Faciès chimiques des eaux selon SCHOELLER-BERKALOFF.....	75
Tableau 25 : Classification des eaux souterraines selon PIPER.....	80
Tableau 26 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité).....	83
Tableau 27 : Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988).....	83
Tableau 28 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.....	85
Tableau 29 : Directives concernant la qualité de l'eau d'irrigation (Toxicité spécifique de certains ions).....	87
Tableau 30 : Résultats de l'utilisation du diagramme de WILCOX.....	88
Tableau 31: Paramètres statistiques des éléments chimiques des eaux souterraines.....	90
Tableau 32: Matrice de corrélation.....	91
Tableau 33 : les différentes corrélations entre les variables.....	91
Tableau 34: Pourcentage de variance exprimée.....	92

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de BOU SAADA.....	20
Figure 2 : Carte pédologique de la zone d'étude.....	22
Figure 3 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna. (SONATRACH, 2005).....	25
Figure 4 : Températures moyennes mensuelles de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).....	28
Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la région de Boussaâda durant la période (2004-2016).....	29
Figure 6 : Carte pluviométrique.....	30
Figure 7 : Variations des vitesses moyennes mensuelles en (mm) de la région de Boussaâda durant la période (2004-2016).....	31
Figure 8 : L'humidité moyenne mensuelle en (%) de la région de Boussaâda durant la période (2004-2016).....	32
Figure 9 : Evapotranspiration de la station de BOU SAADA durant la période (2004-2016).....	34
Figure 10 : Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE.....	37
Figure 11 : Abaque de VERDEIL.....	38
Figure 12 : Indice de D. MARTONNE.....	39
Figure 13 : Diagramme d'EMBERGER.....	41
Figure 14 : Diagramme ombrothèrmique de Gaussen et Bangoulas.....	42
Figure 15 : Bilan hydrique de la station BOU SAADA selon Thornthwaite.....	44
Figure 16 : Variation des températures des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	56
Figure 17 : Variation des pH des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	57
Figure 18 : Variation des conductivités des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	60

Figure 19 : Variation de la dureté totale des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	61
Figure 20 : Variation de résidu sec des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	61
Figure 21 : Distribution des concentrations en Calcium des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	63
Figure 22 : Distribution des concentrations en Magnésium des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	64
Figure 23 : Distribution des concentrations en sodium des eaux de la plaine de BOU SAADA....	65
Figure 24 : Distribution des concentrations en potassium des eaux de la plaine de BOU SAADA....	66
Figure 25 : Distribution des concentrations en Chlorures des eaux de la plaine de BOU SAADA.	67
Figure 26 : Répartition des concentrations en sulfates des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	68
Figure 27 : Répartition des concentrations en bicarbonates des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	70
Figure 28 : Variation des concentrations en nitrates des eaux de la plaine de BOU SAADA.....	71
Figure 29 : Origine des éléments Na^+ et Cl^-	72
Figure 30 : Origine des éléments Na^+ et SO_4^-	72
Figure 31-a : Origine du Ca^{+2}	73
Figure 31-b : Origine du Ca^{+2}	74
Figure 32-a : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA..	76
Figure 32-b : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA....	77
Figure 32-c : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA....	78
Figure 32-d : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA..	79
Figure 33-a : Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA.....	81
Figure 33-b : Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA.....	81
Figure 33-c : Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA.....	82

Figure 34 : Diagramme du SAR.....	86
Figure 35 : Classification de l'eau d'irrigation des forages selon le diagramme de Wilcox	89
Figure 36 : Plan des factures F1/F2.....	93
Figure 37 : Plan des factures F2/F3.....	94
Figure 38 : Plan des individus selon le plan F1/F2.....	94
Figure 39 : Plan des individus selon le plan F2/F3.....	95

Liste d'abréviation

AET :	l'alimentation en eau potable
FAO :	Food Agriculture Organisation
CE :	Conductivité Electrique
ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydraulique
pH :	Potentiel Hydrogène
Cl⁻ :	Chlorure
HCO₃⁻ :	Bicarbonate
SO₄⁻ :	Sulfate
NO₃⁻ :	Nitrate
Na⁺ :	Sodium
Ca⁺² :	Calcium
Mg⁺² :	Magnésium
K⁺ :	Potassium
SAR :	Sodium Absorption Ratio
i.e.b :	indice d'échange de base
P :	Précipitation (mm)
T :	Température (°C)
E D T A :	Ethylène Diamine Tetraacetic
DSA :	Direction des Services Agricoles
TAC :	Titre Alcalimétrique Complète
TA :	Titre Alcalimétrique
F :	Forage
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
meq/l :	mili équivalent par litre.
Mmhos/cm :	mili mohos par centimètre

ESP : Pourcentage de Sodium Echangeable.

RS : Résidus secs

T moy : Température moyenne

RFU : Réserve Facilement Utilisable

ETR : Evapotranspiration réelle

ACP : Analyse en Composantes Principales.

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rurale

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

Introduction générale

Introduction générale

La plaine de Boussaâda (Sud-est de l'Algérie) est célèbre par son climat aride très sévère, une forte évapotranspiration et une salinisation des sols qui ne cesse d'augmenter. L'extension de l'agriculture irriguée, une forte sécheresse depuis deux décennies et une industrialisation galopante ont contraint les agriculteurs à utiliser les eaux souterraines comme sources d'irrigation.

Toutes ces contraintes nous conduisent à réaliser ce modeste travail au niveau de cette région afin d'arriver à estimer qualitativement les ressources hydriques souterraines de la région en particulier la contribution à l'étude hydro chimique des eaux destinées à l'irrigation.

Pour arriver à cet objectif on a pris en considération les points suivants :

La première partie, comporte :

- une analyse bibliographique sur les eaux d'irrigation, leurs caractéristiques et leurs effets sur les cultures.

La deuxième partie, traite le contexte du milieu physique, avec un premier chapitre, qui englobe:

- Un aperçu géographique de secteur d'étude
- Une aperçue géologique consistera à définir la lithologie liée à l'histoire géologique de la région et de définir le principal aquifère de la zone d'étude.
- Une étude hydro climatologique pour évaluer la lame d'eau tombée sur la zone d'étude, et de faire ressortir un bilan hydrique plus proche de la réalité.

Et le deuxième chapitre contient le Matériel et méthodes.

La troisième partie, intéresse sur :

- Une étude hydro chimique, qui nous permette de déterminer la qualité chimique des eaux, l'évolution des principaux éléments chimique, les principaux types de faciès et estimer l'aptitude des eaux à l'irrigation.

En fin une conclusion générale qui permette de montrer la synthèse de toutes les études.

Première partie :
Recherche bibliographique

Première partie : Recherche bibliographique

1.1 Introduction

L'Algérie est confrontée depuis les années soixante dix à des enjeux vitaux, d'ordres économiques, sociaux et environnementaux, relatifs à la satisfaction de leurs besoins croissants en eau, de bonne qualité particulièrement dans leurs régions les plus sèches (> de 90 % de la superficie totale du territoire), à savoir les régions subsahariennes et sahariennes, où les systèmes aquifères du Continental Intercalaire (C.I) et du Complexe Terminal (C.T) constituent, sinon l'unique, du moins la principale ressource en eau (**MADR, 2003**).

Dans ce pays les terres arables ne constituent que 3 % du territoire, l'agriculture souffre de la dégradation des sols et de la faiblesse de l'irrigation. Elle a en outre été délaissée dans les années 1970 en faveur de l'industrie. Aujourd'hui, le secteur primaire emploie environ 26 % de la population active (**AGID, 2003**).

Les problèmes de l'eau revêtent donc en Algérie une exceptionnelle importance parce que le pays est essentiellement agricole, sous un climat rude, méditerranéen et steppique, et qu'il doit nourrir une population de plus en plus importante, à laquelle le développement des cultures irriguées apporte à la fois du travail, de la richesse et des éléments de nutrition toujours plus abondants (**MADR, 2003**).

1.2 Les ressources en eau en Algérie

Le pays est divisé en cinq grands bassins hydrographiques regroupant les 17 bassins versant. 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). (**ANRH, 2006**).

1.2.1 Les ressources souterraines

Les eaux souterraines sont constituée par les nappes aquifères se trouvent sur des différentes profondeurs dans les couches géologiques avec des natures variables.

Si l'on évite leur pollution par la surface c'est certainement l'eau ayant souvent la meilleure qualité avant stockage.

Les ressources en eau souterraine contenues dans les nappes du Nord du pays (ressources renouvelables) sont estimées à près de 2 Milliards de m³/an. Les ressources superficielles y sont estimées à 12 milliards de m³/an (ANRH, 2006).

Le Sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraine considérables provenant des nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT).

Tableau 1 : Répartition spatiale des eaux de souterraine de l'Algérie

Bassin hydrographique	Oranie chott chergui	Chellif zahrez	Algérois Souman Honda	Constantinois seybaus Mellègue	Total
Ressources pot. (Hm ³ /an)	375	231	745	28,9	1379,9
Pourcentages (%)	27.17	16.74	54	2.09	100

Source : rapport CNES, 2000

1.2.2 Les ressources de surfaces

Les eaux de surfaces se trouvent dans les rivières, les lacs naturels ou artificiels. La qualité de ces eaux est variable en fonction des régions agricoles ou industrielles traversées par les cours d'eau.

Tableau 2 : répartition spatiale des eaux de surface de l'Algérie

Bassin hydrographique	Oranie Chott Chergui	Chéllif Zahrez	Algérois Soumam Hodna	Constantinois Seybaus Mellègue	Sahara	Total
Ressources pot. (Hm ³ /an)	1025	1840	4380	4500	600	12 345
Pourcentages (%)	8.30	14.90	35,48	36,19	4.86	99.73

Source : rapport CNES, 2000

1.3 Définition d'irrigation

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides et semi-arides (**El-Assloujet al,2007**).

1.3.1 L'irrigation en Algérie

L'Algérie compte 17 bassins-versants. Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques (**Kadi, 1997**).

Globalement, la superficie irriguée actuellement est de l'ordre de 420.000 ha dont 100.000 ha dans les régions sahariennes et ce, sur une superficie agricole utile de 8.666.715 ha soit près de 5% de la surface agricole utile (SAU) (**Messahel et al. 2003**).

Les 320.000 ha irrigués dans le Nord du pays (soit 4,6% de la SAU) (**Benblidia, 2011**).

1.4 Les caractéristiques des eaux d'irrigation

1.4.1 Les normes de qualité des eaux d'irrigation

Une eau conforme à l'irrigation est une eau dont les caractéristiques respectent les valeurs limites imposées par des textes de lois et inscrites dans des tableaux de normes. L'exemple du, tableau 3 donne les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation (**Maynard et Hochmuth, 1997**).

Les normes varient selon les pays, mais dans la majorité des pays on fait référence, à quelques exceptions près, aux cinq critères de qualité sus cités.

(**BOUAROUJ.2011**)

Tableau 3: Les normes de qualité des eaux d'irrigation

Type de problèmes	Sévérité du problème		
	Aucune	Légère	Élevée
-Salinité -Conductivité (dS/m) -Matières dissoutes totales (mg/litre)	<0,75 <700	0,75-3,0 700-2000	>3 >2000
RAS (Ration d'Absorption du Sodium)	<3	3-9	>9
Alcalinité ou dureté (équivalent en CaCO ₃)	80-120		>200
pH (risque de colmatage)	<7,0	7-8	>8,0
Fe mg/l (risque de colmatage)	<0,2	0,2-1,5	>1,5
Manganèse mg/L (risque de colmatage)	<0,1	0,1-1,5	>1,5

Source : Maynard et Hochmuth, 1997.

C'est ainsi que des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ont été établies afin de :

- protéger le public et les ouvriers agricoles .
- protéger les consommateurs des produits agricoles .
- protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols.
- protéger le matériel d'irrigation.
- maintenir des rendements acceptables.

La loi 10-95 sur l'eau se base sur des principes en relation avec la qualité de l'eau. Elle vise les objectifs suivants :

- La protection et la conservation des ressources en eau ;
- La protection de la santé de l'Homme par la réglementation de l'exploitation, de la distribution et de la vente des eaux à usage alimentaire ;
- La réglementation des activités susceptibles de polluer les ressources en eau.

1.4.2 Les indicateurs de qualité

Selon (Gros Claude, 1999) des eaux d'irrigations, les principaux moyens disponibles sur le terrain pour estimer la qualité de l'eau sont sanitaire, complétée par l'analyse bactériologique et les analyses physico-chimiques.

1.4.2.1 Les analyses physico-chimiques

Les paramètres à analyser dans une eau d'irrigation sont choisis en fonction de l'objectif recherché.

Tableau 4: Les indicateurs de qualité des eaux d'irrigations

Objectifs	Les paramètres analysés dans une eau d'irrigation
Analyses en vue de caractériser le milieu (eau souterraine)	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité • Température • pH • Cations (calcium, magnésium, potassium, et sodium) • Anions (chlorure, sulfate, nitrate et bicarbonate) • Eléments
Analyses en vue de caractériser le milieu (eau de surface)	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité • Température • Turbidité • pH • Cations (ammoniaque et potassium) • Anions (nitrate et potassium) • Eléments traces (Fer / Manganèse) • Oxydabilité et DBO • Oxygène dissous • Indice biologique
Analyses en vue de caractériser l'aptitude de l'eau à l'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité • Cations (calcium, magnésium et sodium)

Source : OMS ,2004

1.4.2.2 Enquête sanitaire

Par rapport aux autres indicateurs, l'enquête sanitaire permet d'avoir une approche beaucoup plus globale et donc plus significative de la situation. Elle permet, de mettre en évidence la vulnérabilité de l'eau par rapport à la pollution ; elle a donc valeur dans le temps. Dans la plupart des cas, une enquête de terrains peut à elle seule donner une idée assez juste de la qualité bactériologique de l'eau et de sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution sanitaire (Allouchef et al, 1998).

1.5 Classification des eaux d'irrigation

Selon (BERKANI et BENARFA, 2005), tous les eaux naturelles utilisées pour l'irrigation contiennent des sels minéraux en solution, provenant des roches ou des matières solides à travers les quelles 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 déterminé l'aptitude de ces eaux à irrigation. Les caractéristiques chimiques qui conditionnent le choix de la qualité des eaux d'irrigation sont : la teneur totale en sels, la composition ionique et la présence d'oligo-éléments. C'est ainsi qu'on trouve plusieurs classification des eaux d'irrigation dont on peut citer :

1.5.1 Classification basée sur la salinité

Les schémas de classification de l'eau d'irrigation qui ont essayé de définir le danger de salinité pour une eau donnée sont tous bases sur de larges généralisations concernant la croissance des cultures, le climat, l'aménagement de l'irrigation, les propriétés du sol, etc. (ANONYME, 1978). Des exemples typiques de classifications suggérées par différents auteurs sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 5 : Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale de sels, selon différentes sources

	Classe de salinité				
	C1	C2	C3	C4	C5
Us Salinity Laboratory de Riverside (1954) CE (DS/m)	0.1 à 0.25	0.25	0.75	>2.25 à 2.5	/
Thorn and Peterson (1954) CE (do/m)	<0.25	0.25 à 0.75	0.75 à 2.25	2.25 à 4.0	4.0 à 6.0
Carter (1969) CE (DS/m)	<0.4	0.4 à 0.75	1.2 à 2.25	3.0 à 4.0	/
Ayers and Westcot (1976) CE (dS/m)	<0.75	0.75 à 1.2	1.5 à 2.25	2.25 à 2.5	/

Sources: (ANONYME, 1978)

- **C1** : satisfaisante pour toutes les cultures excepté les cultures très sensibles
- **C2** : généralement satisfaisante bien que quelques cultures sensibles seront affectées
- **C3** : satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conductions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats
- **C4** : normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées les lessivages et les drainages sont impératifs (ANONYME, 1978)

1.5.2 Classification basée sur la conductivité électrique (CE)

CE 25°C < 250 µmhos/cm; eaux non salines.

250 < CE 25°C < 570 µmhos/cm; eaux à salinité moyenne.

750 < CE 25°C < 2250 µmhos/cm; eaux à forte salinité.

2250 < CE 25° C < 5000 µmhos/cm; eaux à très forte salinité.

À salinité excessive. 5000 < CE 25° C < 20 000 µmhos/cm eaux.

La limite des 20 000 µmhos/cm a été retenue 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.

Les eaux dont la CE (à 25°C) dépasse 20 000 µmhos/cm sont inutilisables pour l'irrigation. En effet, la qualité d'une eau d'irrigation ne peut être établie qu'en fonction du sol irrigué et la culture à pratiquer (**BERKANI et BENARFA, 2005**).

1.5.3 Classification basée sur l'alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bicarbonates, de carbonates et d'hydroxydes. La détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser, aux pH 8.3. La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC) (**RODIER al, 2005**).

1.6 Les propriétés des eaux d'irrigation

1.6.1 Les propriétés physiques

1.6.1.1 La température

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indicateurs sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

La température doit être mesurée in situ. Les appareils des mesures de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre. (**L'équipes techniques RÉFEA**)

1.6.1.2 Le pH

Le pH (potentiel hydrogéné) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14,7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre

caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimètre. (**L'équipes techniques RÉFEA**).

Tableau 6: Classification des eaux d'après leur pH

pH <5	Acidité forte =présence d'acide minéraux ou organique dans les eaux naturelle
pH =7	pH neutre
7<pH <8	Neutralité approche =<majorité des eaux de surface
5,5<PH <8	Majorité des eaux souterraine
PH=8	Alcalinité forte, évaporation intense

1.6.1.3 Minéralisation

La minéralisation d'une eau est la concentration en sels solubles, elle est exprimée en mg /l et peut être estimée à partir de la conductivité selon la formule suivant (**Amroune et al, 2000**)

$$\text{Min (mg/l)} = \text{6réelle (micro mho/cm)} \times 0,850$$

1.6.1.4 Résidu sec

La détermination du résidu sec sur l'eau non filtrée permet d'évaluer teneur en Matières dissoute est en suspension la mesure après filtration correspond aux matières dissoutes .C est valeurs peuvent être recoupé à partir d e la conductivité permettent d'apprécier la minéralisation de l'eau (**RODIER et al,2005**).

1.6.1.5 L'oxygène dissous

L'eau Saturée d'air, à 20 "C et sous la pression normale contient 9,1 mg /l d'oxygène On devra Recherche la cause de toute variation du taux; celle-ci pouvant être fonction de la présence des végétaux, des matières organique oxydables des germes et

des organismes aérobies ainsi que de la perturbation des changes atmosphériques D'autre part, si la teneur est inférieure à 5 mg/, la couche protectrice dans les canalisations métalliques se formera difficilement et l'anhydride carbonique libre d'une eau non agressive sera susceptible d'amener la corrosion.

1.6.1.6 La conductivité électrique

C'est la mesure de la capacité de l'eau à transmettre un courant électrique. La conductivité électrique est directement proportionnelle à la quantité des sels (ions) dissous dans l'eau. Elle s'exprime en milimhos/cm ou en (dS/m), et est proportionnelle à la somme des cations ou des anions) (**RODIER et al, 1996**).

$$p. CE = \sum \text{anions} = \sum \text{cations}$$

$$\sum \text{Anions} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^- + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--} \text{ et}$$

$$\sum \text{Cations} = \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ \text{ (en me/l)}.$$

P : 12 si la salinité dominante est chlorurée.

cations ou Anions (me/l) = CE*10. Cette expression est valable pour une conductivité électrique comprise entre 0.1 et 5 dS/m.

Teneur en sels (ppm) = CE*640, Cette expression est valable pour une conductivité électrique comprise entre 0.1 et 5 dS/m.

Par ailleurs la conductivité électrique traduit le degré de minéralisation des eaux souterraines exprimée en concentration des sels dissous.

1.6.2 Les propriétés chimiques

1.6.2.1 Titre alcalimétriques (TA)

Le TA présente la teneur en hydrates alcalins Na k(OH) carbonates alcalins (Na+k) CO₃ et alcalins terreux (Ca+Mg)

Titre alcalimétriques complet (TAC) exprime la teneurs en carbonates (CO₃), bicarbonates (HCO₃), alcalins (Na+k) et alcalinaterreux (Ca⁺⁺+Mg⁺⁺) dans l'eau. Il est exprimé en degré français (°F) et d'une manière général T.A.C est défini ainsi. (**Amroune et al, 2000**)

$$\text{T.A.C (}^\circ\text{F)} = (\text{r CO}_3 + \text{HCO}_3 + \text{r OH}) \times 5$$

1.6.2.2 La Dureté des eaux

1.6.2.2.1 La dureté totale ou degré hydrotimétrique

le degré hydrotimétrique totale représente approximativement la teneur de l'eau en sels de Calcium et Magnésium il est exprime en degré Français, les eaux potables de bonnes qualités ont un degré hydrotimétrique inférieur à 15°F , elles sont acceptables jusqu'à 50°F .

si elles sont dépassent 60°F , leur utilisation sera extrêmement difficiles.

Il est calculé par la formule suivant : (**Amroune et al, 2000**).

$$\text{D.H.T (}^\circ\text{F)} = (\text{rCa}^{++} + \text{rMg}^{++}) \times 5$$

Ou le rCa^{++} et rMg^{++} désigne respectivement la quantité en réaction du Calcium et du Magnésium

La dureté d'une eau ou (TH) désigne la totalité des cations alcalino-terreux présents dans une eau (**BOEGLIN, 1997**).

Pour calculer la dureté des eaux on a utilisé le degré hydrotimétrique ou le degré français , avec $1^\circ\text{F} = 10\text{mg/l}$ de CaCO_3 est calculée par la formule suivante :

$$\text{DT} = (\text{Ca} + \text{Mg}) \times 5 \quad \text{ou} \quad \text{Ca}^{++} \text{ et } \text{Mg}^{++} \text{ sont exprimés en meq/l.}$$

Tableau 7: La dureté des eaux en °F

D.H.T(en °F)	0-7	7-22	22-32	32-54	>54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure

Source : (**W. Theobald et A. Gama, 1969**).

1.6.2.3 Les cations

1.6.2.3.1 Sodium

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation.

Le 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 (COUTURE,2004)

1.6.2.3.2 Potassium

Le potassium présent 2,59 % d'éléments de là l'écorce terrestre.

La source essentielle de potassium provient des roches ignées (orthose, Muscovite)

Sa présence est à peu près constante dans les eaux naturelle, On en retrouve généraleme10 fois moins que de sodium.

Les teneurs en potassium des eaux peuvent provenir d'altération météorique et d'érosion des minéraux contenant du potassium comme le feldspath, lessivage des sols contenant des Engrais, eau de mer (dans les régions où il peut avoir invasion d'eau salée). Les adoucisseurs d'eau à base de chlorure de potassium représentent la source la plus fréquente de potassium dans l'eau potable. (AL-QAWATI, 2015).

1.6.2.3.3 Le calcium

Provient de la dissolution des formation carbonatées et les formations gypseuse (Amroune et al, 2000)

Le phénomène de dissolution se produit selon la formule suivante :



1.6.2.3.4 Magnésium Mg^{++}

Il provient de la dissolution des roches magnésiennes , des dolomies et les calcaires dolomitique. Ces roches libèrent le magnésium par l'attaque des eaux en présence du gaz carbonique.

Le magnésium provient essentiellement des massifs montagneux par l'action des eaux météoriques sur les formations carbonatées. (Amroune et al, 2000)

1.6.2.4 Les anions

Les principaux anions analyses sont les chlorures (Cl^-) les sulfates (SO_4) et les bicarbonates (HCO_3^-)

1.6.2.4.1 Le sulfate

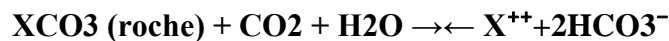
Le SO_4 présente l'élément le plus dominant dans les eaux de notre plaine, sa présence dans l'eau provient :

- De la légère solubilité des sulfates de calcium (CaSO_4) des formations gypseuses
- L'oxydation des sulfates
- Les lessivages des terrains argileux et marneux
- L'eau de pluie par la phénomène d'oxydation de soufre dans l'atmosphère
- D'origine agricole issue des scories potassiques utilisées comme engrais.

(Amroune et al, 2000)

1.6.2.4.2 Le bicarbonate (HCO_3^-)

Les bicarbonates résultent de l'équilibre de la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation suivant :



Leur origine est principalement due à la dissolution des roches carbonatées, la concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivant :

- La tension de CO_2 dissout
- La température de l'eau
- Le pH de l'eau
- La concentration de l'eau en sels nature et nature lithologiques des terrains traversés

(Amroune et al, 2000)

1.6.2.4.3 Le chlorure

Les chlorures proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains, ils proviennent aussi des rejets des eaux usées d'origine domestique ou industrielle.

La teneur de l'eau en chlorures est fixée par l'O.M.S à 250mg/L. Le chlorure est présent à l'état naturel dans les eaux souterraines en raison de l'altération météorique et la lixiviation

des roches sédimentaires et des sols, ainsi que de la dissolution des dépôts de sel, la concentration des chlorures dans l'eau dépend de l'origine de l'eau, du terrain traversé et de la composition chimique des sols et des roches qui sont contacts avec les sources en eau. (AL-QAWATI,2015).

1.6.2.4.4 Le nitrate NO_3^-

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote. Leur présence dans l'eau, si la source est organique a teste que l'autoépuration a joue. ils proviennent du lessivage des engrais et des rejets urbains et industriels. Les nitrates sont l'un des éléments nutritifs majeurs des végétaux. leur présence associée aux autres éléments nutritifs, stimule le développement de la flore aquatique. Le développement excessif des végétaux aquatiques s'observe au-delà de 2à5mg/l

1.7 Etude des valeurs relatives des éléments chimiques

1.7.1 Rapports caractéristique

Un rapport caractéristique désigne le rapport de certains éléments chimiques exprimés en milliéquivalents par litre (Még/L). les rapports utilisés pour cette étude sont :

$$r\text{Mg}^{++}/r\text{Ca}^{++}, r\text{SO}_4^{--}/r\text{HCO}^-, r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$$

Ces rapports donnent des indications sur la zone d'alimentation des eaux dans la nappe

1.7.1.1 Le rapport $r\text{Mg}^{++}/r\text{Ca}^{++}$

lorsque le rapport est supérieur à 1, il traduit la prédominance du magnésium (Mg^{++}), par contre si ce rapport est inférieur à 1 le calcium domine. (Amroune et al, 2000)

1.7.1.2 Le rapport $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$

1.7.1.3 Le rapport $r\text{SO}_4^{--}/r\text{Cl}^-$

Les valeurs élevées des sulfates sont dues à la stabilité des sulfates de calcium (CaSO_4) des formations gypseuses et au lessivage des terrains argileux et marneux (Amroune, 2000)

1.7.2 Indice d'échange de base i.e.b

(Schoeller en 1934) appel indice d'échange de base (i.e.b), le rapport entre les ions échange et les ions de même nature primitivement, lorsqu'il ya échange de Na^+ et K^+ de l'eau contre les alcalino-terreux des argiles : (Amroune et al, 2000)

$$\text{i.e.b} = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes. (Amroune et al, 2000)

1.8 Les problèmes liés à la qualité des eaux d'irrigation

1.8.1 Salinité

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires.

La salinité peut se mesurer de deux façons, soit par les matières dissoutes totales (MDT) exprimées en mg/L ou, plus couramment, par la conductivité électrique. La conductivité électrique est exprimée en millisiemens/centimètre (mS/cm). L'ancien nom de cette unité est le mho. Un mho/cm est l'équivalent de 1 mS/cm qui est l'équivalent de 1 desiemens par mètre (dS/m) et en moyenne, à 640 ppm de sel. . (AL-QAWATI,2015)

1.8.2 Toxicité

Les problèmes de toxicité sur viennent lorsque certaine constitution du sol ou de l'eau sont assimilés par les plantes et s'accumulent pour atteindre des concentrations préjudiciables aux récoltes et aux rendements, la brûlure des feuilles constitue en général le premier symptôme. Le chlorure, le sodium et le bore constituent les principaux ions, les problèmes de toxicité peuvent survenir meme lorsque ces ions presentment une faible concentration.

La toxicité peut ainsi se produire en irrigation par aspersion à partir d'une absorption directe par les feuilles des ions toxiques (ABDELHAFIDI, 2005).

1.9 Les diverses nuisances

1.9.1 Les chlorures et les sulfates

Lorsqu'ils sont présents dans l'eau d'irrigation, ces éléments contribuent à augmenter la concentration des sels solubles. Des concentrations excessives de chlorures et de sulfates peuvent causer des brûlures sur le bout des feuilles du gazon et voire même entraîner la mort des plants. Des concentrations de 250 à 400 ppm sont considérées comme indésirables pour l'irrigation des plantes sensibles aux sels.

Heureusement, les sels de chlorure et de sulfate sont rapidement solubles. Ils peuvent donc être lessivés dans les sols qui se drainent bien.

1.9.2 Le bore

Le bore (B) est un élément mineur essentiel à la croissance de la plante mais il n'est requis qu'en minime quantité. Le bore est soluble dans l'eau et on le retrouve dans plusieurs sources d'eau utilisées pour l'irrigation. Lorsque sa concentration dans l'eau excède 1 à 2 ppm, le bore peut être toxique pour le gazon. De plus, le bore a tendance à s'accumuler dans le sol en formant des complexes chimiques qui sont difficiles à lessiver. (Nancy, 1997)

1.9.3 Le bicarbonate

L'abondance des ions bicarbonates (HCO_3^-) dans l'eau d'irrigation mérite aussi d'être évaluée. Dans le cas où l'eau d'irrigation contient un taux élevé de bicarbonates, on constate une tendance à la précipitation du calcium et du magnésium ce qui fait augmenter le SAR. On considère que l'eau d'irrigation est inadéquate pour l'irrigation lorsque la concentration résiduelle de NaHCO_3 est supérieure à 2,5 meq / L. Par contre, si la concentration est en dessous de 1,25 meq / L, l'eau est probablement sécuritaire. (Nancy, 1997)

1.9.4 Sodium

1.9.4.1 Proportion relative des cations sodium (Na^+) par rapport aux autres

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 (ABDELHAFIDI, 2005; BERKANI et BENARFA, 2005).

De grande quantité de sodium combiné avec du chlorure donne à l'eau un goût salé. Si l'eau passe par un système d'aspersion et que le calcium et le magnésium sont bas, des teneurs moyennes à élevées de sodium peuvent défolier les plantes sensibles.

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (RAS).

Le RAS 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 de l'eau avec un RAS de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas.

Un usage continue d'eau avec un RAS élevé provoque une déstructuration du sol.

L'eau avec un RAS se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium. Quand le RAS se situe entre 6 et 9, les risques de problème reliés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol. (COUTURE, 2004).

Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de RAS encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm avec un RAS au-dessus de 4 doivent être utilisé avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols. (Couture, 2004).

Deuxième partie : Matériels et méthodes d'étude

Chapitre 1 : Etude du milieu physique

2.1.1. Introduction

La zone de BOU SAADA se trouve dans une région désertique très peu étudiée particulièrement du point de vue pédologique et hydrologique. A travers ce chapitre nous allons essayer de la présenter selon les rares documents que nous avons consultés.

2.1.2. Situation géographique

2.1.2.1. Caractéristiques géographiques

La ville de BOU SAADA est située à environ 241 km au Sud Est d'Alger et à 75km au Sud-Ouest de M'Sila (**Figure 1**) aux coordonnées géométriques suivantes : $35^{\circ}45'N$ et $4^{\circ}35'E$ et étant l'oasis la plus proche de littoral algérien.

La plaine du BOU SAADA s'intègre dans le cadre géographique des hautes plaines du bassin algérois; elle est limitée - Au Nord par les monts du Hodna, et au Sud et Sud-Ouest par les premiers chaînons de l'Atlas saharien aux coordonnées géométriques $35^{\circ}20'N$ et $04^{\circ}12'E$.

- A l'Est, par la rencontre des deux chaînes (Monts du Bellezma) aux coordonnées géométriques $4^{\circ}45'E$ et $5^{\circ}45'E$.

La zone d'étude est limitée :

-Au Nord et au Sud par les coordonnées Lambert suivantes : 211Km-238Km ;

- A l'Ouest et à l'Est par les coordonnées Lambert suivantes : 625Km-658Km.

Cette zone occupe la partie Nord-Ouest du bassin avec une superficie de $957Km^2$, elle couvre totalement ou partiellement les feuilles au 1/50.000 de BOU SAADA (224) et Chellal (195).

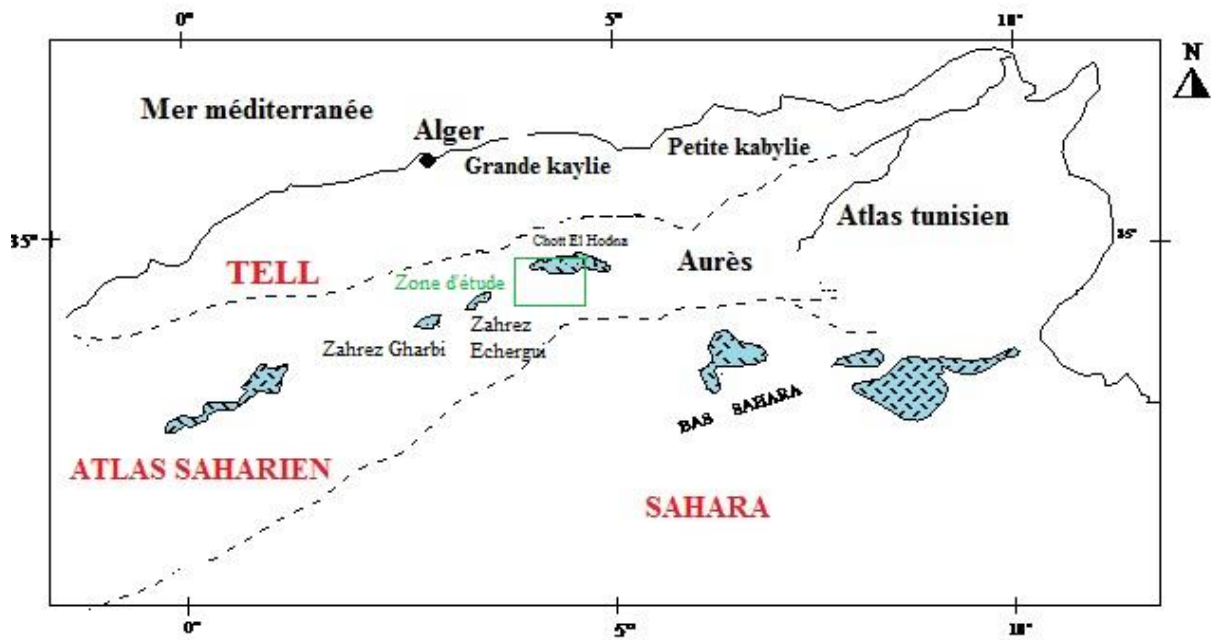


Figure 1: Situation géographique de BOU SAADA.

2.1.2.2. Aperçu socio-économique

2.1.2.2.1. Habitat

La répartition démographique se fait de deux manières :

- Au Sud : la répartition de la population est dense, où le centre urbain est bien peuplé, par contre la zone rurale est moins peuplée ;
- Au Nord la répartition de la population est moins dense avec des centres urbains éloignés les uns des autres, et une zone rurale moins habitée à cause de la sécheresse et du manque des moyens.

2.1.2.2.2. Agriculture

L'agriculture occupe une place importante au sein des activités de la population rurale. La principale activité dans la région est les cultures maraichères, l'arboriculture et la céréaliculture.

2.1.2.3. Géomorphologie

Le relief se compose de deux ensembles nettement différenciés. A l'ouest les monts de Ouled Nail caractérisés par des pentes abruptes et des altitudes élevées (Dj Sellât 1256 m, Belguerb 1247 m, Lakbedj 830 m, Dj Arar 897 m et Dj Bateun 1027 m).

Ces monts sont de nature essentiellement carbonatée à structure complexe et faillée entaillée par les oueds. Le piémont est bien représenté au Nord-Ouest (500 m) et au sud-ouest (650-700) pour aboutir au niveau de la plaine qui correspond à des niveaux de glacis profondément entaillés par les oueds.

La plaine proprement dit est définie par la courbe (450m-500 m) couvrant la majorité de la zone étudiée jusqu'aux bordures du Chott El Hodna (400 m d'altitude) (**AMROUNE et al, 2000**)

2.1.2.4. Réseau hydrographique

La forme des reliefs la tectonique complexe, la couverture végétal discontinue et l'hétérogénéité de la lithologie, toutes ces valeurs réunies influent sur le schéma du réseau hydrographique de la zone étudiée, ce dernier est organisé par deux oueds principaux, le plus important est l'Oued El-Maiter, c'est un oued à écoulement pérenne, il présente une pente abrupte au Sud- Ouest puis décroît vers le Nord-Est jusqu'à l'embouchure (sebhka) et Oued BOU SAADA moins important, il coupe la ville en deux et constitue l'exutoire des eaux usées de la ville de BOU SAADA.

Au Sud de la région d'étude existe des cours d'eaux indécis, Oued Roumana, Oued El Mehakoube, Oued Oultem et Oued Defla ces Oueds sont caractérisés par des écoulements temporaires surtout après les grandes averses. (**AMROUNE et al, 2000**)

2.1.2.6. Sol

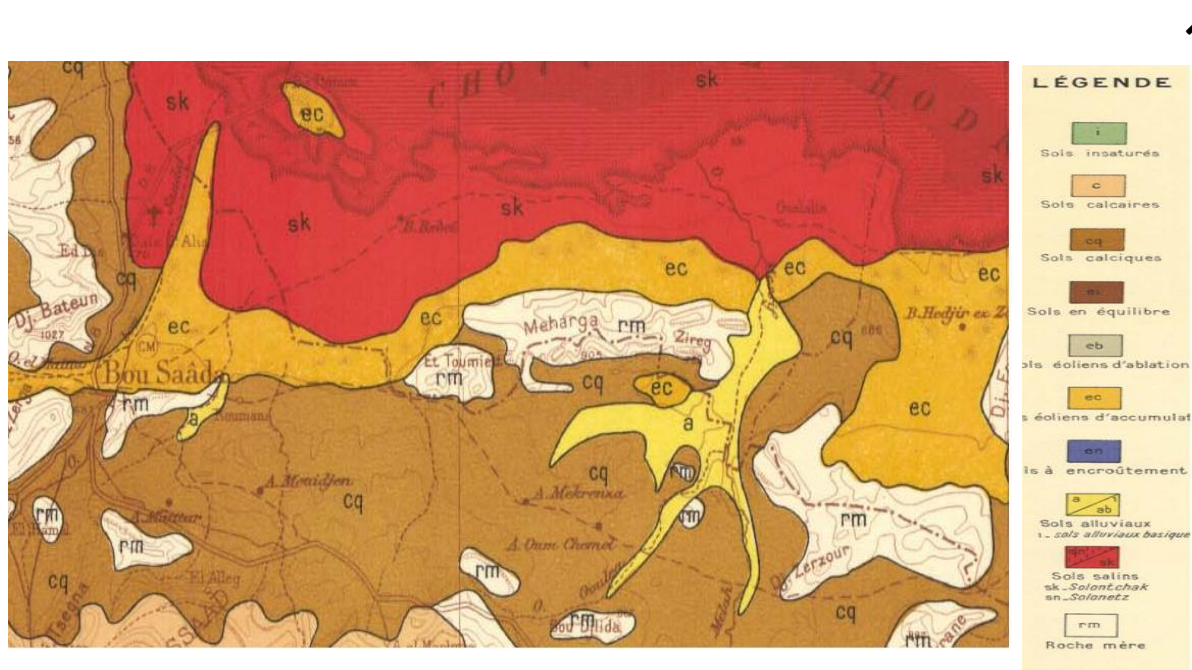
La plaine du BOU SAADA se caractérise par la formation des sols minéraux bruts éoliens (**figure 2**).

La texture du sol est dominée par le sable. Outre le quartz, les composants du sol sont dominés par les carbonates (calcite), le gypse et les sels. En raison de la texture sableuse et de la faible teneur en matière organique, la fertilité des sols est faible avec de petites CEC et la

capacité de retenue de l'eau; Les intrants d'engrais et les modifications organiques sont donc nécessaires pour obtenir des rendements corrects, mais la fertilisation est empirique.

Selon l'étude des sols de Hodna (Boyadgiev 1975) et de WRB (2006), les principaux types de sol présents dans la zone irriguée sont:

- Hautes Arenosols (Arides);
- Fluvisols compliqués (Aride, Gypsique);
- Gypsisols prolongés (Aridique);
- Gleysols gypsiques (Aridique);
- Gypsic Solonchaks (Aridique);
- Haond Solonchaks (Aridique).



Echelle : 1/500 000

Figure 2 : Carte pédologique de la zone d'étude

2.1.2.7. Végétation

La couverture végétale au niveau de notre secteur d'étude est pauvre, elle est constituée également par des taches forestières sur les monts de l'Ouest et du Sud ainsi qu'une végétation steppique sur le pourtour du chott el Hodna, constitué en majorité par des espèces qu'on rencontre le plus souvent dans les steppes algériennes telles que les teracissima (Halfa), Artémisia helba-Alba (Armoise). Atriplex Halimus (Atriplex), les espèces arbustives sont également rencontrées dont les plus importantes sont : Tamarix GALLICA (tamaris) et Ziziphitzus (jujubier) et on rencontre des palmiers. (Ramsar, 2001).

2.1.2.8. Géologies

2.1.2.8.1. Secondaire

a- Trias :

Le trias n'affleure que par diapirisme, reconnu en Dj kerdada. Il est formé par des argiles lie-de-vin et violettes légèrement gypseuses.

b-Jurassique :

Les formations du jurassique ont une tendance carbonatée. On trouve des dolomies. Des calcaires gréseux et de marnes.

c-Crétacé supérieur :

Ce système a été érodé de la région, sauf le cénomaniens qui est faiblement représenté sur quelques sommets de reliefs.

c-1 Cénomaniens :

Entre le Djebel Dalaat Ezzdin et Djebel Moubakrera à 2 Km à l'Ouest de , le Cénomaniens est constitué par des calcaires à débris, parfois lumachelliques avec de rares interstratifications de marnes, des calcaires argileux, des marnes gypseuses et a Ostréa (Exogyra) et des calcaires. L'épaisseur du Cénomaniens est de l'ordre de 120 m.

2.1.2.8.2. Tertiaire

Les formations continentales du Tertiaire reposant en discordance sur les séries du Crétacé inférieure et moyen.

Ce matériel provient de l'érosion des formations crétacées supérieures de l'Atlas Saharien. Elles sont constituées de conglomérats, des sables, des galets, des graviers et des passées marneuses. La puissance du tertiaire est de 200 m environ.

Cette description à été faite à partir du forage implanté dans la partie sud d'Ain Disse aux coordonnées Lambert

X=643.500, Y=220.600.

2.1.2.8.3. Quaternaire

Constitue de galets des sables des graviers, des marnes, des limons, des argiles et des gypses. L'épaisseur du Quaternaire est croissante du Sud au Nord de 14 à 123 m proche du Chott.

a-Terrains de chott :

Se sont des limons de couleur gris à cristaux au association de cristaux de gypse type (roses des sables)

b-Dunes :

N'existant que dans la partie Nord de la région. Strictement limités à la cuvette des Oueds Temsa- Maiter et à la plaine bordière du Chott El-Hodna, ce sont des sables quartzeux fins de couleur ocre relativement chargés en matériel argileux. Ils proviennent de l'érosion des grès Barremiens et Albiens qui affleurent largement.

c-Cônes de déjections :

Les plus importants sont situés sur le flanc Nord du Dj Tsegna et sur le versant SE du Dj Fenane, constituants de large glacis caillouteux qui, à leur base, s'inter stratifient dans les limons des nappes alluviales anciennes. (AMROUNE et al, 2000)

Hydrogéologie

Malgré sa complexité lithologique, l'aquifère est constitué par des niveaux perméables formés des sables, graviers et des galets d'âge tertiaire continental, des conglomérats d'âge quaternaire.

Mais vu le tarissement de la totalité des puits (30 à 60 m), c'est-à-dire le tarissement de la nappe superficielle, on va s'intéresser dans la présente étude à la nappe profonde Plio-Quaternaire.

ETAGES	LITHOLOGIE	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE	
PLIO - QUATERNAIRE		Alluvions, limons et sables	
MIOCENE		Marnes et calcaires gréseux	
		Grès et conglomérats	
		Marnes	
		Argiles gréseuses Grès Conglomérats de base	
PALÉOGENE		Argiles et grès	
		Marnes gypseuses	
		Calcaires à silex Marnes	
CRETACE	Supérieur	Calcaires à silex	
		Marnes et calcaires	
		Marnes gypseuses	
	Inférieur	TURONIEN	Calcaires et marnes
		CENOMANIEN	Calcaires
		ALBIEN	Argiles
		APTIEN	Calcaires et marnes
		BARREMIEN	Calcaires à Huitres
		Grès blanc	
		NEOCOMIEN	Argiles et calcaires Marnes
JURASSIQUE	Supérieur	Marnes et calcaires	
	Moyen	Marnes, calcaires et dolomies	
	Inférieur	Calcaires dolomitiques	
TRIAS		Argiles, gypse et dolomies	
		Grès	

Figure 3 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna. (SONATRACH, 2005)

2.1.2.8.4. Interprétation de la colonne litho-stratigraphique

La lithologie et les caractères hydrodynamiques (perméabilité) constituent les points les plus importants qui peuvent nous aidé à tirer les formations susceptibles de renfermer des nappes aquifères et à partir de ces paramètres on a classé les formations en 3 catégories :

- 1-la formations favorables de constituer des aquifères poreux
- 2-les formations favorables de constituer des aquifères Karstiques.
- 3-les formations imperméables qui jouent le rôle des limites étanches entre les aquifères.

- **Les formations favorables de constituer des aquifères poreux :**

- a) Les alluvions récents et anciennes du Quaternaire.
- b) Les conglomérats et argiles sableuse du Tertiaire continental.
- c) Les grés et les dolomies du Barrémo-Bedoulien.

- **Les terrains favorables d constituer des aquifères Karstiques :**

- a) Les calcaires à débris du Cénomamien.
- b) L'Albien supérieure avec les calcaires et les calcaires dolomitiques.
- c) Les calcaires du Gargasien.
- d) Les calcaires dolomitiques et les dolomies du Valanginien-Hautérvien et les calcaires Zoogènes du Rhetien.
- e) Les calcaires du Jurassique.

- **les formations qui jouent le rôle de limites étanches entre les aquifères :**

Le système hydraulique de la région de la plaine est formé par des nappes superposées (séparées entre-elles par des horizons imperméables et semi-perméables)

Ce sont essentiellement les argiles, les marnes et les marnes gypseuses, les gypses et les argiles versicolores gypseuses qui forment ces horizons. (AMROUNE et al, 2000)

2.1.2.9. Conclusion

L'étude géologique de la région a permis de connaitre la nature lithologique de différentes formations qui se présentent comme facteur limitant de la perméabilité.

Les formations susceptibles d'être un aquifère renseigne sur deux systèmes aquifères :

- Système aquifère superficiel correspond au Barrémo-Bédoulien de quaternaire.
- Système aquifère profond qui va du Barrémo-Bedoulien jusqu'au jurassique probablement (AMROUNE et al, 2000)

2.1.3. Climat et caractéristiques météorologique

2.1.3.1. Introduction

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour appréhender le fonctionnement d'un système hydraulique de surface ou de subsurface, passe impérativement par la connaissance des paramètres climatiques tels que la pluie, l'évapotranspiration, l'écoulement ou le ruissellement et l'infiltration qui constituent le cycle de l'eau. L'infiltration des eaux de pluie conditionne la recharge du sol et de certains réservoirs souterrains en eaux météoriques.

2.1.3.2. Aperçu général sur le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est caractérisé par l'influence méditerranéenne, climat doux et tempéré, surtout au Nord. Mais l'Algérie très vaste en superficie (2.3 M Km²), possède une bonne partie de son territoire, bien à l'intérieur du continent aussi; on y trouve divers types de climats et microclimats, allant du pluvial jusqu'au climat aride (Sahara) en passant par le semi-aride.

2.1.3.3. Zone d'étude et son équipement

La région d'étude est une partie du sous bassin versant de BOU SAADA, lequel fait partie du bassin versant endoréique hodnéenne. Dans cette étude hydro climatique, on tentera de procéder à des calculs à partir de données météorologiques disponibles, en usant de méthodes de calcul qui s'adaptent plus ou moins bien à une région telle que la plaine de BOU SAADA .

Tableau 8 : Présentation des coordonnées de la station retenue dans cette présente étude

Station	Altitude	Longitude	Latitude	Années d'observation
Boussaâda	459m	04°12'E	35°20'N	2004-2016

Source : station météo de BOU SAADA 2017

2.1.3.4. Les Températures

L'étude de l'évolution de la température dans le temps a une grande importance à l'hydrologie, du fait qu'elle constitue le paramètre principal qui conditionne le phénomène d'évaporation, autrement dit, elle a une grande influence sur le bilan hydrique.

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Température Moy (c°)	24,6	19,92	12,33	12,47	10,12	11,41	13,97	19,44	22,01	28,72	31,7	29,71

Source : station météo de BOU SAADA ,2017

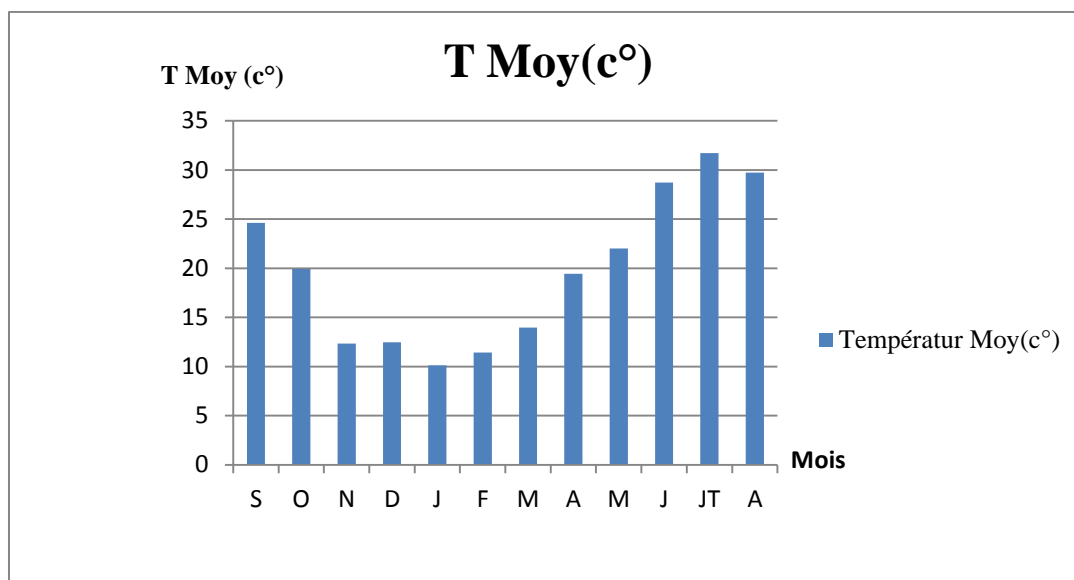


Figure 4 : Températures moyennes mensuelles de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016) .

La **Figure 4** montre que la température maximale est enregistrée au mois de Juillet avec 31.7 c°, alors que la température minimale est enregistrée au mois de Janvier avec 10.12 c°

2.1.3.5. Précipitation

Selon Dubief (1953) , les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme des pluies

Les précipitations constitue un facteur écologique d'importance fondamentale pour le fonctionnement des écosystèmes terrestres et limniques (**Ramade , 1984**).

Tableau 10 : Précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Précipitation (mm)	20,09	9,39	15	46,54	7,69	9,96	12,37	18,55	13,84	11,31	10,21	8,66

Source : station météo de BOU SAADA ,2017

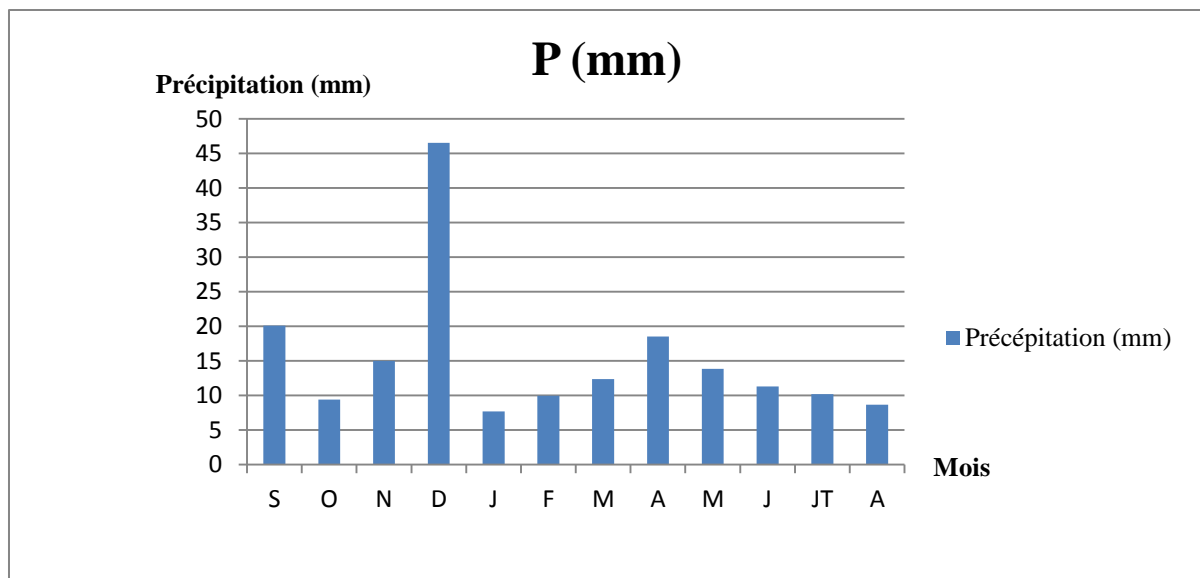


Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

D'après la **Figure 5**, nous remarquons que la quantité pluviométrique est répartie d'une manière relativement hétérogène pour les périodes pluvieuses. Les précipitations mensuelles dans le mois du Décembre représentent une forte valeur (46.54 mm) c'est le mois le plus pluvieux, Alors que le mois le plus sec est le mois de Janvier qui représente une basse valeur (7.69 mm).

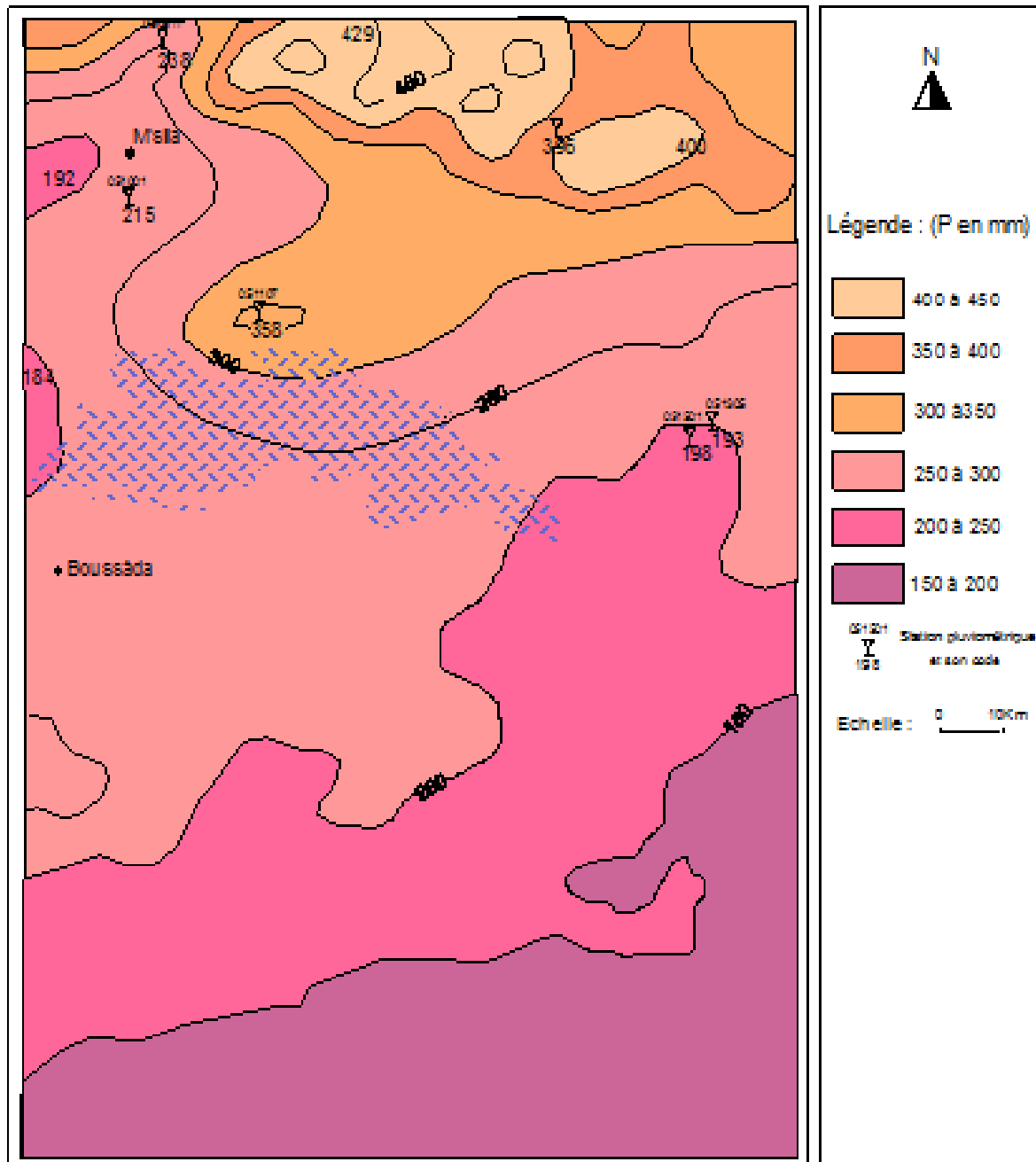


Figure 6 : Carte pluviométrique de la zone de BOU SAADA

2.1.3.6. Interprétation de la carte pluviométrique

L'Agence Nationale des ressources Hydrauliques (A.N.R.H) (**Figure 6**) a établi une carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à une échelle 1/500 000 pour une période de 60 ans

(1922/60 – 1969/89) avec un intervalle entre les isohyètes de 50 mm ce qui lui donne une assez bonne précision. Cette carte reflète les traits essentiels de la distribution des précipitations dans le secteur d'étude. On s'aperçoit alors que les précipitations étant essentiellement d'origine orographique. On note une augmentation de ces dernières avec l'altitude, les isohyètes suivent grossièrement les courbes de niveaux. Les précipitations décroissent du Nord vers le Sud, elles passent de plus de 350 mm sur les sommets de montagnes au Nord du Chott El Hodna à 200 à 250 mm au Sud au niveau de la plaine de BOU SAADA.

2.1.3.7. Le vent

Le vent est un facteur important du climat. Il influe sur la température, l'humidité et l'évaporation et même sur l'irrigation par aspersion qui représente la deuxième technique utilisée au niveau de la plaine agricole de BOU SAADA.

Tableau 11 : Des vitesses moyennes mensuelles en (m/s) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Vitesse du vent (m/s)	1,74	1,49	1,72	2,73	2,77	4,28	3,97	3,02	2,98	2,63	2,45	2,02

Source : station météo de BOU SAADA ,2017

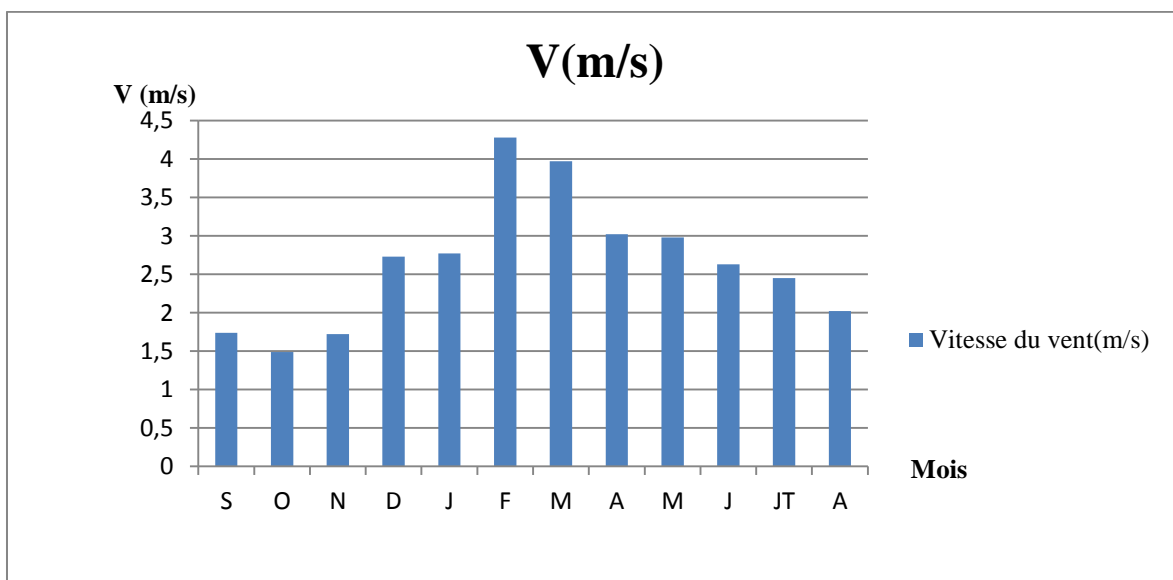


Figure 7 : Variations des vitesses moyennes mensuelles en (m/s) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

D'après le **tableau 11** la vitesse des vents est variable au cours de l'année. Elle varie de 1,49 m/s au mois d'octobre à 4,28 au mois du février avec une direction principale Sud-Nord à cause de faibles altitudes des monts de l'Atlas saharien.

2.1.3.8. Humidité relative

L'humidité relative est définie comme le rapport entre la quantité de vapeur d'eau qu'un volume contient à une température donnée (humidité absolue) et la quantité maximale de vapeur d'eau que ce même volume peut contenir à la même température (humidité à saturation). L'humidité relative est exprimée en pourcentage (LAFFONT, 2015)

L'humidité est un paramètre essentiel pour les calculs des besoins en eau d'une culture.

Tableau 12 : L'humidité moyenne mensuelle en (%) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Humidité %	49,6	53,8	69,62	65,37	67,62	62,32	54,3	46,57	42,95	36,45	33,82	38,25

Source : station météo de BOU SAADA, 2017

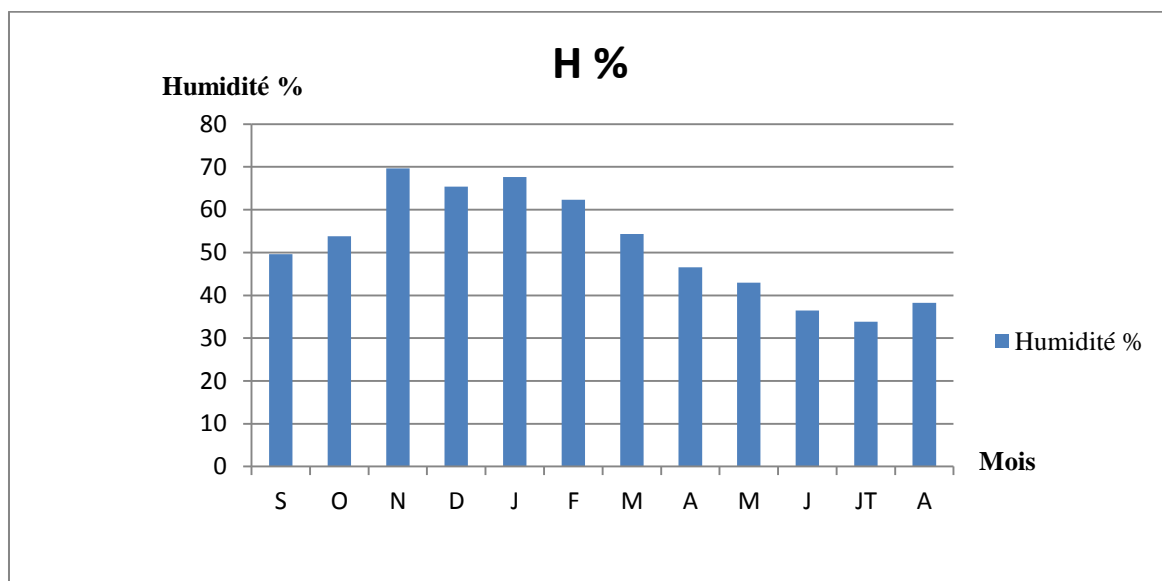


Figure 8 : L'humidité moyenne mensuelle en (%) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

La valeur du tableau ci-dessus indique que le mois de Novembre est le plus humide avec 69.62 % par contre le taux d'humidité le plus faible est noté au cours du mois Juillet avec 33.82 %.

2.1.3.9. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement

La connaissance du bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation. L'évapotranspiration est définie, comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Cette notion englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes.

Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique, et dépend de plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal...etc.

Tableau 13 : Evapotranspiration en (mm) de la région de BOU SAADA durant la période (2004-2016).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Evapotranspiration (mm)	172,35	130,77	55,85	166,95	67,68	85,95	128,7	165,2	218,24	260,33	307,76	264,22

Source : station météo de BOU SAADA ,2017

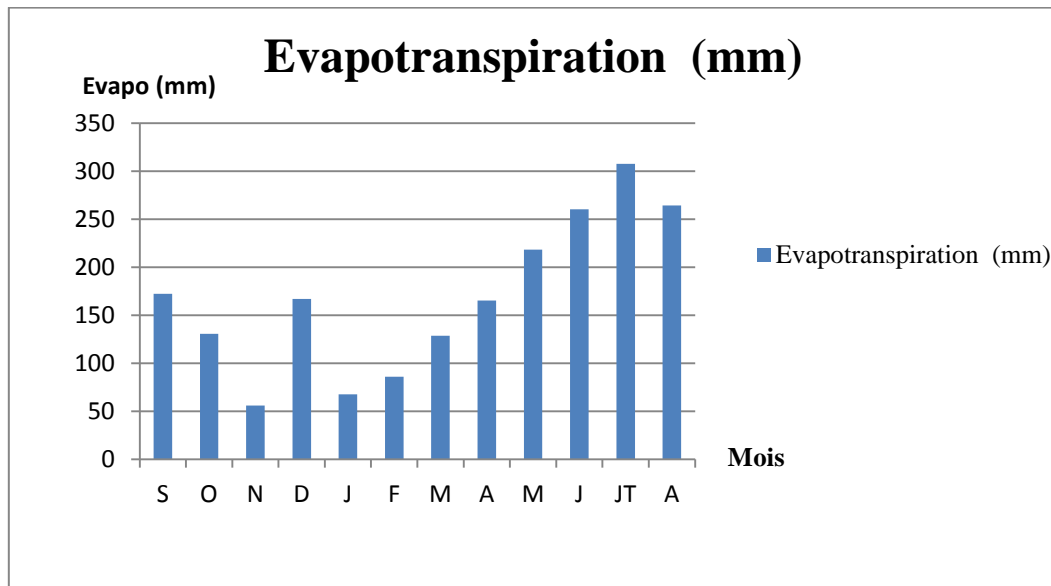


Figure 9 : Evapotranspiration de la station de BOU SAADA durant la période (2004-2016)

Pendant les années d'observations, le maximum de l'évapotranspiration a été enregistré au mois de **Juillet** avec 307.76 mm, alors que le minimum a été mesuré au mois de **Novembre** avec 55.85 mm. L'évapotranspiration moyenne de 13 ans est de 168.66 mm. Les données du bac d'évapotranspiration sont des mesures pratiques de terrain, donc réelles.

2.1.3.10. Calcul de l'ETP suivant la formule de C.W.THORNTHWAITE

La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon C.W Thornthwaite tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

La formule de l'ETP est la suivante :

$$ETP = 16(10T / I)^a * K, \text{ (en mm).}$$

Où : ETP : Evapotranspiration mensuelle non corrigée, (en mm) ;

T : Température moyenne mensuelle, (en °C) ;

I : Indice thermique annuel, $I = \sum i$;

i : Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression suivante : $i = (T/5)^{1.5}$;

a : Coefficient calculé par la formule suivante : $a = 1.6*(I/100) + 0.5 = 2.09$

K : Coefficient de correction, qui dépend du temps et de l'altitude.

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode de C.W. Thornthwaite sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau14 : Calcul de l'ETP de la Station de BOU SAADA selon C.W.Thornthwaite

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
T (°C)	24.6	19.92	12.33	12.47	10.12	11.41	13.97	19.44	22.01	28.72	31.7	29.71	19.7
I	10.9 1	7.95	3.87	3.94	2.88	3.45	4.67	7.67	9.23	13.76	15.96	14.48	99.13
ETP (calculée)	106.93	68.79	25.24	25.84	16.70	21.46	32.77	65.37	84.74	147.79	181.66	158.64	962.93
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	-
ETP(corrigé) mm	110.14	66.73	21.70	21.96	14.52	18.24	33.75	71.25	102.53	178.82	223.44	184.02	1047.1

2.1.3.11. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Pour le calcul de l'ETR, nous appliquerons plusieurs méthodes, mais l'ETR s'écarte plus ou moins de l'ETP, selon le climat et la nature des surfaces évaporantes.

2.1.3.11.1. Méthode de TURC

Cette relation est applicable à tous les climats, elle est fonction des précipitations et des températures moyennes mensuelles. La formule est la suivante :

$$\text{ETR} = P / (0.9 + P^2/L^2)^{1/2} \quad ; \text{ en mm.}$$

Où :

P : Précipitation moyenne annuelle, en mm ;

L = $300 + 25T + 0.05T^3$: Pouvoir évaporant de l'atmosphère ;

T : Température moyenne annuelle, en °C ;

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle, en mm.

$P = 183.61 \text{ mm}$; $T = 19.7^\circ\text{C}$; $L = 1174.77$

Donc : $\text{ETR} = 193.27\text{mm}$; soit 105 % des précipitations.

2.1.3.11.2. Méthode de WUNDT

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne permet de déduire la valeur de l'ETR en prenant en considération la température moyenne annuelle (°C) et les précipitations annuelles (mm)

Pour le secteur d'étude : $\text{ETR} = 260.5 \text{ mm}$; soit 142 % des précipitations.

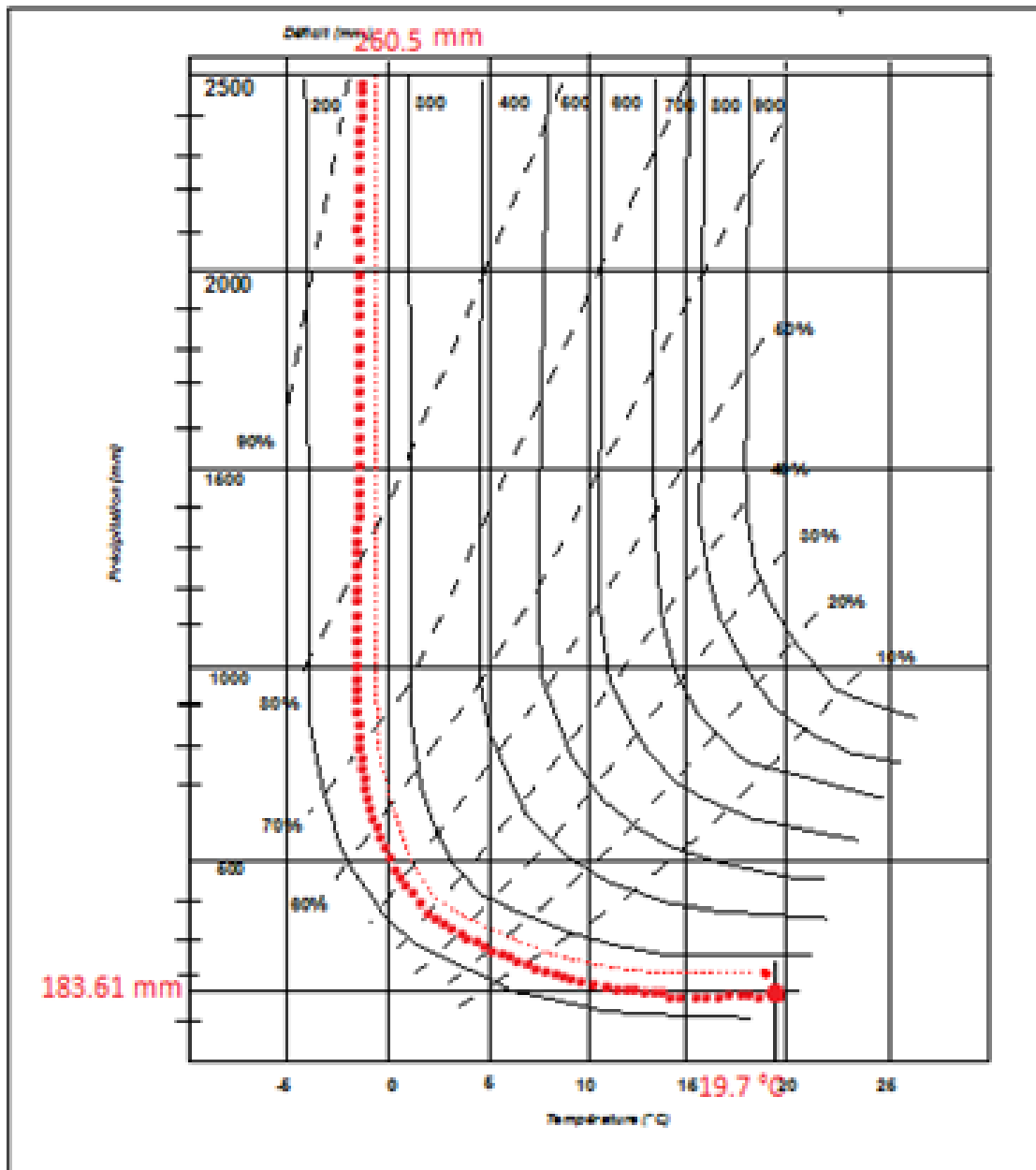


Figure 10 : Abaque de WUNDT modifié par COUTAGNE

2.1.3.11.3. Méthode de P. VERDEIL

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, P. Verdeil a établi en 1988 un abaque bi-logarithmique pour les régions semi arides en tenant compte uniquement des précipitations annuelles (**Figure 11**).

$ETR = D = 170.6 \text{ mm}$; soit 93 % des précipitations.

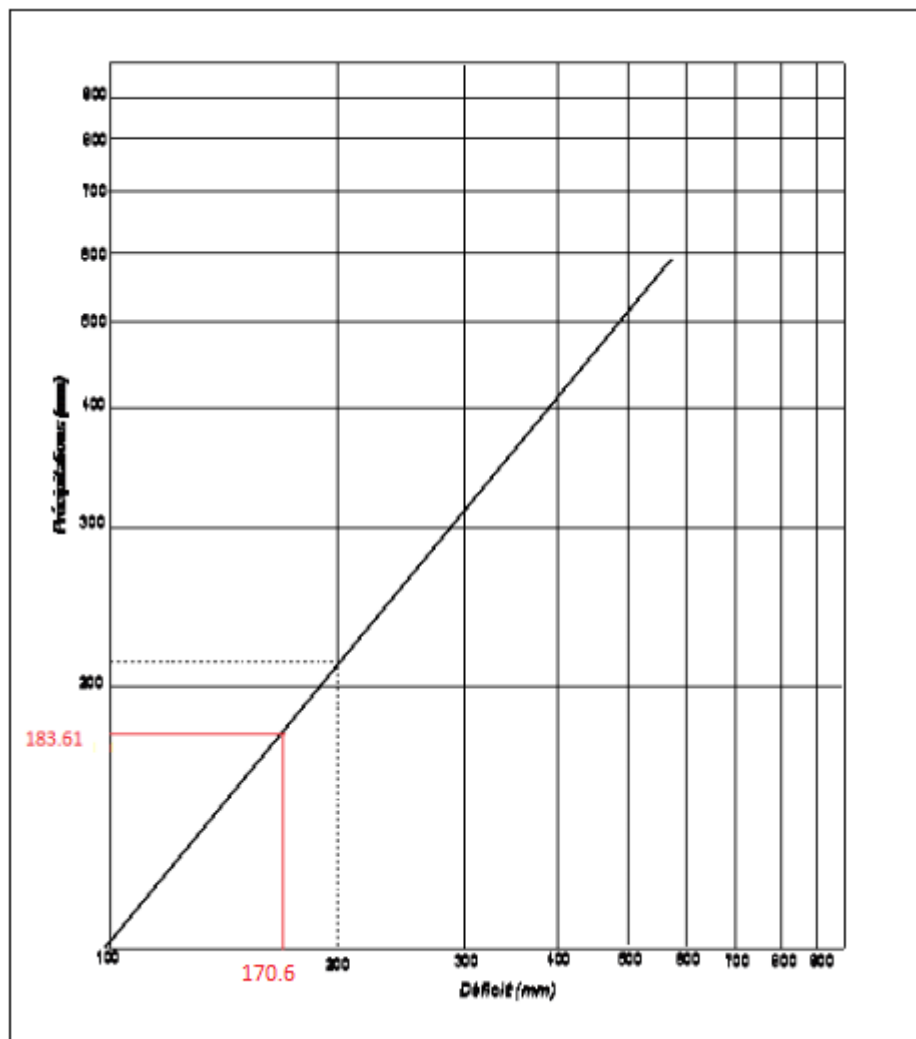


Figure 11 : Abaque de VERDEIL

2.1.4. Etude du climat de la région

Afin de situer le climat, nous allons utiliser les différentes méthodes suivantes :

l'indice d'aridité de D. Martonne, le diagramme de L. Emberger, la méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls et la méthode de G. Euverte.

2.1.4.1. Indice de D. MARTONNE

Ce géographe a proposé une formule climatique basée sur le calcul d'un indice d'aridité fonction de la température et des précipitations. Cette formule est la suivante :

$$I = P / T + 10$$

Où : **P** : représente les précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Représente les températures moyennes annuelles (°C).

Donc : $I = 183.61 / 19.65 + 10 = 6.19$

L'application numérique permet de voir que cet indice est égal à 6.18

Pour cette méthode quand I est compris entre 5 et 10, on est dans un régime désertique écoulement temporaire, ce qui est le cas pour la station de BOU SAADA (**Figure 12**).

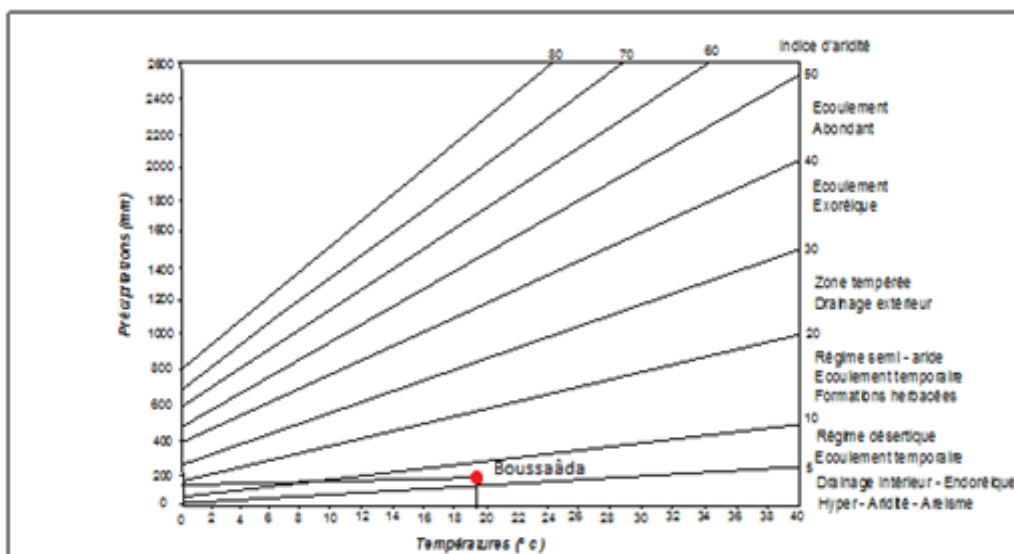


Figure 12 : Indice de D. MARTONNE

2.1.4.2. Le diagramme de L. EMBERGER

L. EMBERGER propose le report des données relatives à la station, sur un système d'axe avec en abscisse la moyenne des minima de la saison froide (en °C), et en ordonnée le paramètre Q_2 donné par la formule suivante :

$$Q_2 = 2000 P / M^2 - m^2 \quad , \text{ Avec :}$$

Q_2 : Le quotient pluviométrique d'Emberger.

P : Précipitation annuelle en mm ;

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimé en degré absolu (°K) ;

Sachant que le passage de la température °C en °K se fait selon la formule suivante :

$$T^{\circ} K = T^{\circ} C + 273.$$

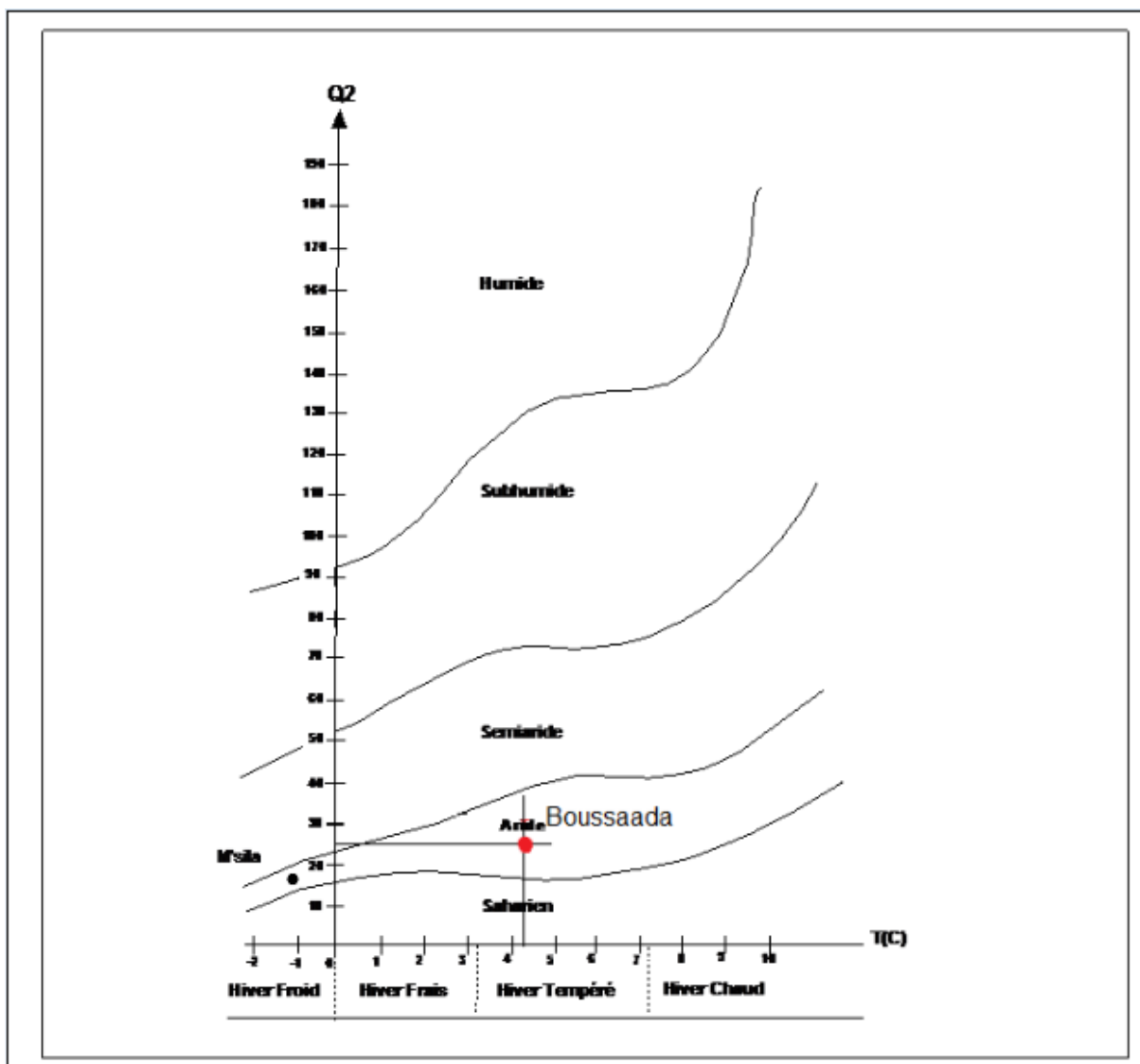


Figure 13 : Diagramme d'EMBERGER

Le report de ces valeurs sur le diagramme de L. Emberger, permet de constater que la station de BOU SAADA est aride à hiver tempéré (Fig. 13).

2.1.4.3. Diagramme Ombrothèrmique de Gausсен et Bagnouls

Le diagramme Ombrothèrmique de Gausсен et Bagnouls utilise les deux principaux paramétriques climatiques, qui sont la température et la précipitation. Pour ces deux auteurs un mois sec est le mois où le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne

Cette relation permet d'établir un diagramme ombrothèrmique pour lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations.

Avec $P=2T$.

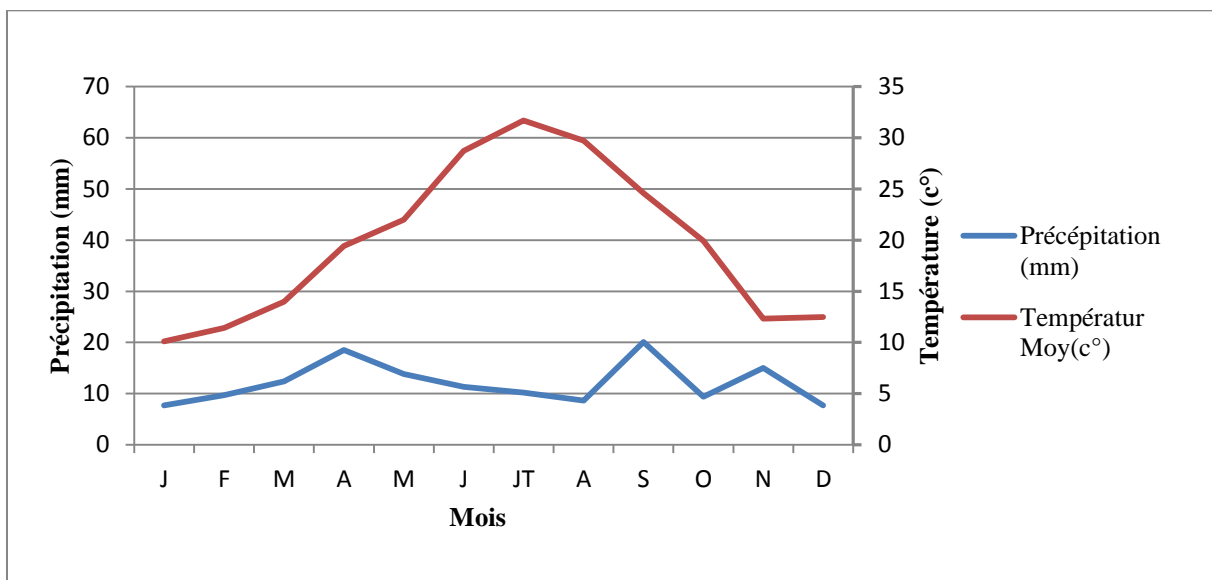


Figure 14 : Diagramme ombrothèrmique de Gausсен et Bagnouls

Le diagramme Ombrothermique précise les périodes sèches et humides durant l'année, Alors on observe l'existence d'une période sèche longue et très chaude presque toute l'année.

2.1.4.4. Méthode de THORNTHWAITE

Pour établir le bilan hydrique il faut d'abord calculer la RFU qui est la réserve facilement utilisable. Cette RFU est nécessaire pour le bon fonctionnement physiologique des plantes.

Thornthwaite, dans ces calculs utilisait une valeur moyenne de la RFU = 100mm, en 1954 Hallaire, a proposé une méthode permettant d'améliorer la connaissance de la réserve en eau du sol qui est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{RFU = (C - F /100)* h * D + 30 \text{ mm.}}$$

Où :

RFU : Réserve facilement utilisable en (mm) ;

C : Capacité de rétention aux champs ;

F : Capacité au point de flétrissement des plantes ; c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes ;

h : Profondeur du sol en (mm) ;

D : Densité apparente du sol (Hallaire propose de prendre $D = 1$) ;

Les 30 mm supplémentaires correspondent au déracinement capillaire.

Hallaire propose :

$C - F = 05 \%$ → pour un sol sablo – limoneux ;

$C - F = 10 \%$ → pour un sol limoneux ;

$C - F = 20 \%$ → pour un sol argilo – limoneux ;

Nous avons pris $C - F = 05 \%$ et nous pris $h = 400$ mm (profondeur moyenne d'enracinement des cultures de la région).

La RFU calculée donne une valeur égale à 50 mm.

(Le tableau 15) résume le calcul de bilan hydrologique pour la station de Boussaâda à partir de la pluviométrie et des températures mensuelles.

2.1.4.4.1. Le bilan hydrique

Tableau 15 : Bilan hydrique de la station BOU SAADA (méthode de Thornthwaite)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Année
P	7,69	9,96	12,37	18,55	13,85	11,31	10,21	8,66	20,10	9,40	15,00	46,54	183,62
ETP	14,52	18,24	33,75	71,25	102,53	178,82	223,44	184,02	110,14	66,79	21,7	21,96	1047,16
P-ETP	-6,83	-8,28	-21,38	-52,7	-88,68	-167,51	-213,23	-175,36	-90,04	-57,39	-6,7	24,58	-863,52
RFU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46,66	46,66	93,32
ETR	7,69	9,96	12,37	18,55	13,85	11,31	10,21	8,66	20,10	9,40	21,70	21,96	165,74
I+R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6,7	24,58	17,88

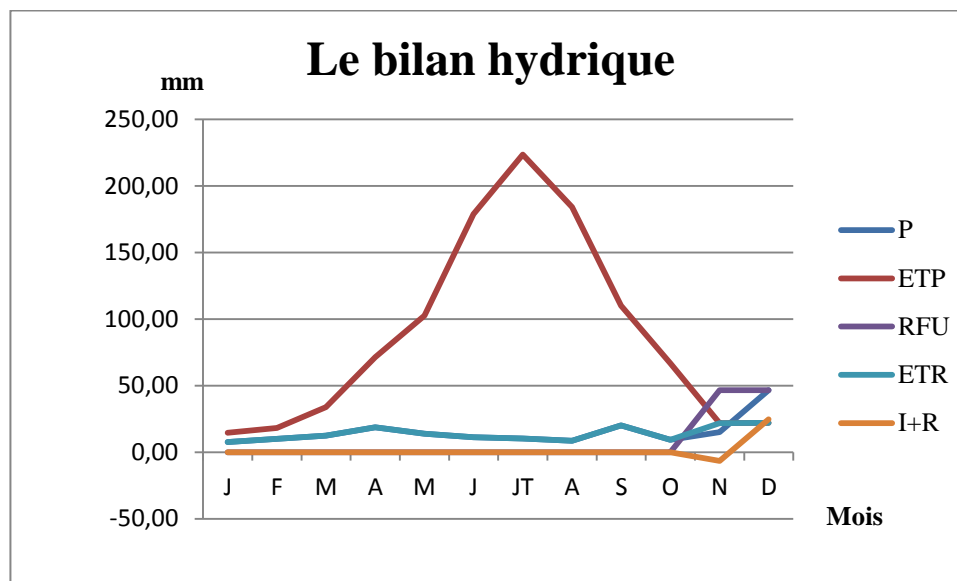


Figure 15 : Bilan hydrique de la station BOU SAADA selon Thornthwaite.

Les calculs du bilan hydrique de la station de Boussaâda nous permettent de faire les observations suivantes :

Les précipitations sont toujours inférieure à l'ETP ($P < ETP$) ce qui implique que les réserves du sol sont toujours nulles (pas de reconstitution des réserves de sol) qui résulte un excédent nul

pendant toute l'année, et donc nécessitent une exploitation des eaux souterraines pour faire de l'irrigation.

Tableau 16 : Différentes valeurs de l'ETP et de l'ETR

	Méthode	Valeurs en mm
ETP	Bac d'évaporation	2024
	Thornthwaite	1047.1
ETR	Turc	193.27
	Wundt	260.5
	Verdeil	170.6
	Thornthwaite	165.74

Les valeurs de l'ETR calculées par les quatre méthodes sont différentes, par contre celle de Verdeil et Thornthwaite se rapprochent, ce qui nous invite à prendre la moyenne de ces deux valeurs ; soit 168.17 mm.

2.1.4.4.2. Discussion de bilan de Thornthwaite

Le bilan hydrique de la station de Boussaâda est présenté sur le graphe ci-dessus (**Figure 15**), l'examen de cette figure montré :

- à l'échelle annuel, on observe que l'ETP dépasse largement les précipitations, on passe du simple au double ;
- Si on examine l'évolution de l'ETP à l'échelle mensuelle, on constate l'existence d'une température élevée.

2.1.5. Conclusion

Au terme de ce chapitre nous pouvons dire que :

- La précipitation moyenne est de l'ordre de 183.61 mm/an.
- La température moyenne est de l'ordre 19.7 °C.
- La station de Boussaâda se situe dans la zone climatique aride à hiver tempéré.
- La valeur de l'évapotranspiration réelle moyenne pour la station de Boussaâda est de l'ordre de 168.17 mm soit 90.26% des précipitations moyennes annuelles.
- Le déficit agricole des précipitations est de l'ordre de 17,88 mm, ce qui nécessite un apport d'eau pour l'irrigation des cultures pendant toute l'année.
- La valeur de l'ETR de Thornthwaite, est sous-estimée, car on trouve à la fin que l'infiltration tend vers zéro ce qui est invraisemblable et pose le problème d'alimentation de la nappe.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.2.1. Echantillonnage

2.2.1.1. Prélèvement de l'eau

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il est conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui on sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif, et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Un prélèvement correct est indispensable à l'obtention de résultats analytique significatif, il tout aussi important de connaître le devenir de l'échantillon entre le prélèvement et l'arrive où laboratoire.

Le prélèvement subira obligatoirement un certain temps de transport et une attente au laboratoire avant la mise en route analytique. Ces temps devront être réduits au minimum.

D'une façon générale, le transport à la température de 4°C et à l'obscurité dans des emballages isothermes permet d'assurer une conservation satisfaisant.

Dans notre cas, le **22.04.2017**, on à effectuer notre échantillonnage, on a pris de 6 récipient de 1 litre en plastique, on a mesuré le pH, la CE et la température de l'eau des prélèvement surplace.

2.2.1.2. Conservation de Prélèvement

Avant de procéder aux opérations analytiques, il est essentiel que toutes les dispositions soient prises pour que les résultats donnent bien une représentation exacte de la composition de l'eau. (**Tableau 17**).

Tableau 17 : Conditions de conservation de prélèvement.

Caractéristique à analysé	Volume minimum du prélèvement (mL)	Température de Conservation à (°c)	Effectuer la mesure avant
Ph	-	4	24h (obsc)
CE	100	4	48h (obsc)
O₂	300	4	24h (obsc)
Résidu sec	500	4	07 jours
Chlorure	100	-	15jours
Sulfate	200	4	07 jours
Nitrate	-	4	48h (obsc)
Nitrite	-	4	48h (obsc)
Calcium	800	4	Plusieurs mois
Magnésium	-	4	Plusieurs mois
Potassium	-	4	Plusieurs mois
Sodium	-	4	Plusieurs mois
Carbonate et bicarbonate	500	4	Quelques jours (obsc)

Rodier ; 1996

2.2.2. Mesures physico-chimique de l'eau de forage

La qualité de l'eau d'irrigation peut être mieux déterminée par une analyse physico-chimique en laboratoire. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont les suivants:

2.2.2.1. Sur terrain

2.2.2.1.1. Température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélange éventuels, etc. en outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques et du point de vue industriel pour les calculs d'échange thermique.

2.2.2.1.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH indique le caractère acide ou basique de l'eau. Le pH des eaux de forage est déterminé, en partie, par la nature géologique du bassin de drainage. Le pH est également influencé par les précipitations acides, l'activité biologique et certains rejets industriels. **(Menviq, 1990 in Safer et Agoun, 2007).**

2.2.2.1.3. Salinité

La salinité d'une eau correspond à sa concentration en sels dissous dans leur ensemble. **(Belaid, 2010)**

2.2.2.1.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau traduit l'aptitude que possède celle-ci à laisser passer le courant électrique. Le transport des charges se faisant par l'intermédiaire des ions contenus dans l'eau, il est logique d'admettre que la conductivité d'une eau sera d'autant plus importante que sa minéralisation sera élevée.

Il existe donc une relation entre la conductivité d'une eau et sa minéralisation, d'où l'intérêt que présente la mesure de la conductivité, mesure quasi instantanée, pour connaître la minéralisation d'une eau **(OMS, 2007).**

2.2.2.2. Au laboratoire

2.2.2.2.1. Résidu sec (R.s)

La détermination du résidu permet d'estimer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau **(Rodier, 1996).**

En effet à 100 à 105°C, une partie ou la totalité tant de l'eau interstitielle que de l'eau de cristallisation de certains sels peut s'évaporer.

-Expression des résultats

Le poids de résidu sec multiplié par 10 donne le poids du résidu sec d'un litre d'eau.

2.2.2.2.2. Chlorure (Cl)

Très répandu dans la nature, généralement sous forme de NaCl, KCl ou CaCl les chlorures constituent 0.05% de la lithosphère (**Rejsek, 2002**)

Les chlorures présents dans une eau peuvent avoir plusieurs origines:

- Percolation de l'eau à travers de terrain salé.
- Infiltration d'eau marine dans la nappe souterraine, de manière naturelle ou par intervention humaine par pompage excessif.
- Rejets humains, en particulier d'urine.
- Industries extractives comme des mines de potasse ou des salines.

-Expression des résultats

$$F.G = V_{AgNO_3} \times N_{AgNO_3} \times M_{Cl} / PE$$

V_{AgNO₃}: Volume d'Ag NO₃ nécessaire pour le dosage de l'échantillon

N_{AgNO₃}: Normalité d'Ag NO₃

M_{Cl} : Masse des chlorures

F: Facteur de correction du titre d'Ag NO₃

PE: Prisse d'essai

2.2.2.2.3. Sulfates (SO₄)

La concentration en ions sulfate des eaux naturelles est variable, leur présence résulte de la légère dissolution des sulfates de calcium, des roches gypseuses, de l'oxydation des sulfures dans les roches (pyrites), des matières organiques d'origine animale (**Belouadah et Khermouche, 2003**).

2.2.2.2.4. Nitrate (NO₃)

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote et ils se trouvent naturellement dans les eaux de surface ainsi que dans les eaux souterraines (**Rejsek, 2002**)

-Expression des résultats

Pour une prise d'essai de 10 ml, la courbe donne directement la teneur en azote nitrique exprimée en milligrammes par litre d'eau. Pour obtenir la teneur en nitrate (NO_3^-), multiplier ce résultat par 4,43.

2.2.2.2.5. Calcium (Ca)

Le calcium est un métal alcalino terreux dextrement réparti dans la nature et en particulier dans les roches calcaire sous forme de carbonates.

Composant majeur de la dureté de l'eau, Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potable (**Rodier, 1996**).

-Expression des résultats

Pour une prise d'essai de 50 ml la teneur en calcium est égale à :

$$\text{Ca (mg/l)} = V1 \times 0.4008 \times 1000 / 50.$$

2.2.2.2.6. Magnésium (Mg)

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature; il constitue environ 2.1% de l'écorce terrestre.

La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau, Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau.

Il est présent sous forme de carbonates et d'hydrogencarbonates (**Rodier, 1996**).

-Expression des résultats

Pour une prise d'essai de 50 ml la teneur en magnésium est égale à:

$$\text{Mg (mg/l)} = V2 \times 0.243 \times 1000 / 50.$$

La dureté totale exprimée en CaCO_3 (mg/l), est égale à :

$$(V1+V2) \times 1000 / 50.$$

- V1: volume du dosage du calcium.
- V2: volume du dosage du magnésium.

2.2.2.2.7. Sodium(Na)

De point de vue agricole, le sodium est un élément des bases alcalines et alcalinoterreuses. Jouent un rôle dans la maintien de la perméabilité des sols pour l'irrigation.

-Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en milligrammes de sodium par litre d'eau.

2.2.2.8. Potassium

Le potassium résulte de l'altération des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés massivement par les agriculteurs. La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques dans la plaine.

-Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en milligrammes de sodium par litre d'eau.

2.2.2.9. Les carbonates et les bicarbonates

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations Carbonatées qui bordent la nappe, selon la réaction suivante :



Troisième partie :
Résultats et discussions

Troisième partie : Résultats et discussions

3.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons prélevés au niveau de l'aquifère de Tertiaire continental de la plaine de BOU SAADA. Nous avons sélectionné 15 points d'eau (on a déjà 12 forages comme des données et on fait échantillonnage des 3 forages) pour la campagne de 2017 répartis sur l'ensemble du secteur d'étude. Ce choix a été justifié, d'une part par leur répartition spatiale et d'autre part, par l'importance des formations hydrogéologiques.

Le but de ce chapitre est de définir les faciès chimiques des eaux souterraines, de les comparer et de suivre leur évolution dans l'espace. Il sera également question de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis de l'irrigation. Pour cela, un certain nombre de cartes et de diagrammes ont été élaborés et serviront de base à l'interprétation générale des résultats d'analyses chimiques.

L'étude hydro chimique a porté sur l'analyse et l'interprétation d'une seule campagne hydrochimique (Avril 2017). Les éléments dosés ont été portés essentiellement sur les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- et NO_3^-).

3.2. Etudes des paramètres physico chimiques :

Cette étude a permis d'acquérir un certain nombre de paramètres habituellement utilisée pour l'estimation pour la qualité des eaux d'irrigation (**Tableaux 20, 21, 22 et 23**).

3.2.1. Etudes des paramètres physiques

Ces paramètres sont très importants car ils jouent un rôle majeur dans la solubilité de l'eau, donc sur la conductibilité et la détermination de leur origine, pour cela les paramètres principaux ont été étudiés sont :

- La température
- Le potentiel Hydrogène (pH)
- La conductivité
- La dureté

Tableau 18 : Paramètres physiques mesurés sur terrain

Paramètre Forage	Paramètres physiques		
	CE ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
F1	3723,07	22	7,4
F2	10490	18,5	7,5
F3	2220	21	7,1
F4	1943,18	20	7,3
F5	1770	17,8	7,2
F6	1881	19	7,3
F7	1300	20	7,4
F8	4520	20,5	7,1
F9	4165	21	7,2
F233	2895,4	20,5	7,3
F225	2091,3	26,5	7,2
F214	1936	18,9	7,0
F232	2200	18,6	6,8
F236	2166	18,3	6,5
F226	2120	26	6,9

Tableau 19 : les paramètres physique

Paramètre Forage	Dureté totale (F°)	Salinité (mg/l)	SAR (meq/l)	Résidu sec (mg/l)
F1	100	1210	0,56	2824,11
F2	49,9	7549	0,12	1200
F3	90,65	1595,34	0,18	2400
F4	72,6	860	1,57	1473,98
F5	71 ,6	1770	1,26	1342,62
F6	87,1	1351,26	0,14	2500
F7	38,8	480	1,03	986,10
F8	152	2030	0,84	3428,61
F9	143,8	3570	0,35	3159,33
F233	100	1250	0,75	2195,28
F225	142,2	1170	0,44	1586,34
F226	82,5	1523,34	0,016	1607
F214	60,4	1390,86	1,04	1467
F232	82,15	1580,94	0,63	1667
F236	70,8	1556,46	0,88	1658

3.2.1.1. La température

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, donc sur son origine. La quasi-totalité des eaux de la plaine de BOU SAADA présentent une température qui varie entre 17,8°C au forage F5 et 25°C au forage F1, ceci explique par la liaison des eaux par les failles et le Trias gypseux. Au point d'eau F226, l'eau atteint exceptionnellement 26°C ; ce qui traduit l'appartenance des nitrates, et ce qui a été confirmé par sa valeur dans le tableau 23.

D'après les directives de qualité des eaux d'irrigation, les forages F1 et F225 dépassent la température optimale qui est de l'ordre de 25°C.

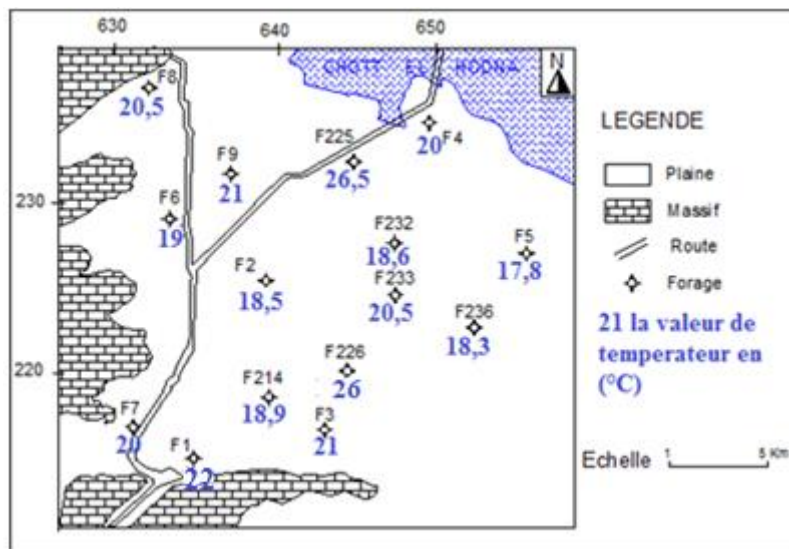


Figure 16 : Variation des températures des eaux de la plaine de BOU SAADA

3.2.1.2. Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est défini selon sa concentration en ions H^+ contenus dans la solution. Il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu ; c'est également un élément important qui renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

Le PH mesuré sur le terrain au niveau des forages est varié de 6,5 pour le F236 et 7,56 pour le F2. La valeur moyenne calculée sur 15 échantillons est de 7,15; ce qui reflète un caractère basique des eaux de la région.

Les eaux d'irrigation de la plaine de BOU SAADA présente un danger léger à modéré pour les cultures selon les indicateurs de qualité des eaux d'irrigation ($pH < 6.5$ et $pH > 8.5$)

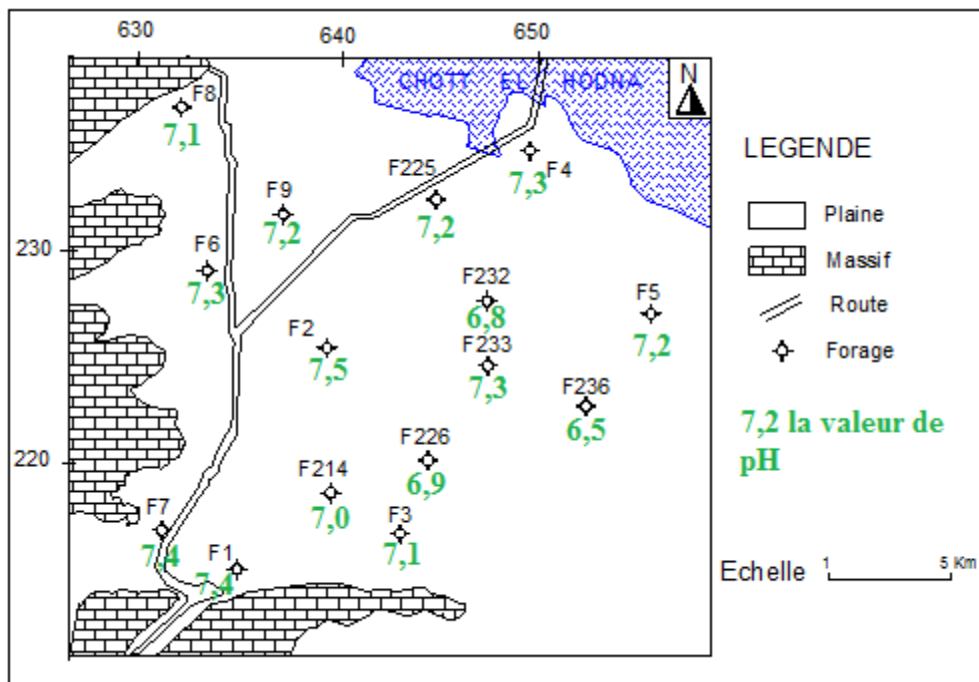


Figure 17 : Variation des pH des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.1.2.2. Equilibres calco carboniques

On peut avoir une idée sur l'état d'équilibre de l'eau en comparant le pH d'équilibre au pH mesuré. Le pH d'équilibre est obtenu graphiquement à partir du diagramme de Schoeller-Berkaloff.(voir Annexe 4)

- Si le $\text{pH}_{\text{mesuré}} > \text{pH}_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est incrustante.
- Si le $\text{pH}_{\text{mesuré}} < \text{pH}_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est agressive.
- Si le $\text{pH}_{\text{mesuré}} = \text{pH}_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est neutre ou en équilibre.

L'examen du tableau 24 montre que la majorité des points d'eau (80%) sont caractérisées par une eau agressive. Ceci c'est traduit par une forte corrosion du tubage des forages.

Tableau 20 : L'agressivité ou l'incrustante de l'eau

Relation entre pH mesuré et pH équilibre	Pourcentages des points d'eau
	Avril 2017
pH mesuré = pH équilibre	0 %
pH mesuré > pH équilibre	20%
pH mesuré < pH équilibre	80%

3.2.1.3. La conductivité

La conductivité ou son inverse la résistivité permet donc une estimation de la minéralisation des eaux. On sait qu'une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante.

Le tableau ci-dessous montre que la majorité des valeurs des conductivités sont comprise entre 750 et 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec 67% de la somme des échantillons, tandis que 23% ont une CE supérieure à 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On conclure donc que les eaux de la plaine de BOU SAADA ont un degré de minéralisation élevée, donc un risque salin élevé à très élevé pour les cultures.

Tableau 21 : Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 25 °C	Risque salin	Pourcentage des points d'eau (Avril 2017)
< 250	Faible	0%
250 – 750	Moyen	0%
750 – 2250	Elevé	67%
> 2250	Très élevé	33%

La gamme de variation de la conductivité des eaux souterraines de la plaine de BOU SAADA va de $1300\mu\text{S}/\text{cm}$ au forage F7 à $10490\mu\text{S}/\text{cm}$ au point d'eau F2 (Fig. 18). On constate en général une augmentation de la conductivité dans toute la zone d'étude. Dans la partie Sud-Ouest de la plaine, la conductivité est moyenne ($1300\mu\text{S}/\text{cm}$), c'est-à-dire l'équivalent de $980\text{ mg}/\text{l}$ de résidu sec, donc cette zone est caractérisée par une eau de bonne qualité selon les normes de l'OMS.

La conductivité ne peut être liée à l'écoulement lequel est en liaison direct avec les pompages ; de ce fait aucune corrélation ne peut se faire entre les deux, vu que les pompages ont fossé l'écoulement naturel et donc l'explication de l'acquisition du chimisme de l'eau (Abdessalem et al., 2007).

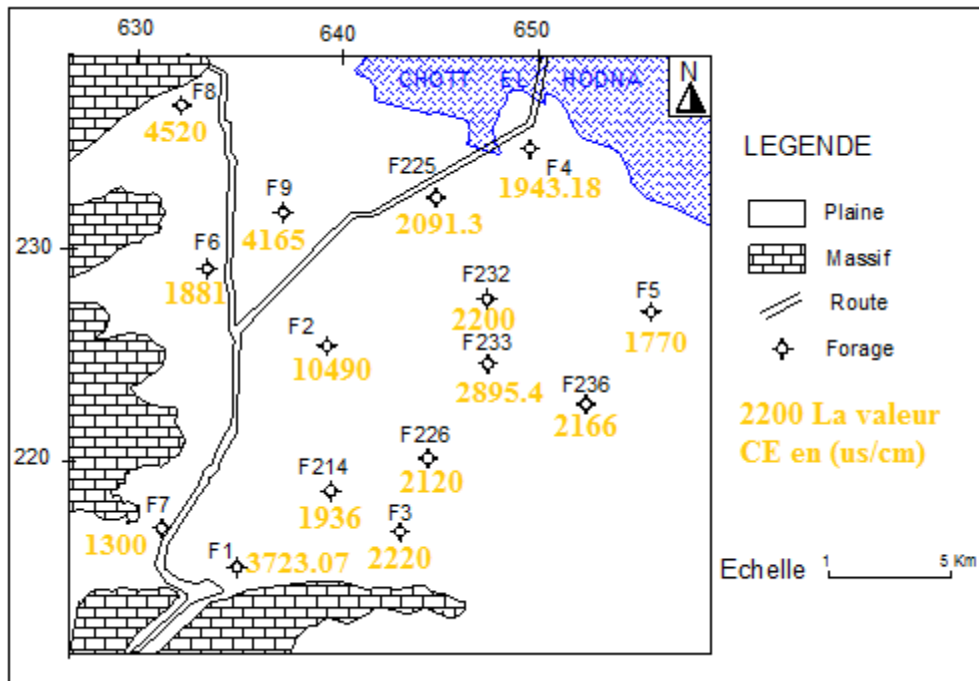


Figure 18 : Variation des conductivités des eaux de la plaine de BOU SAADA

3.2.1.4. La dureté totale

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium.

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en } \text{még/l})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en degré Français } ^\circ F)$$

Le tableau 21 montre que la quasi-totalité des eaux analysées sont très dures, sauf F2 (49.9) °F et F7 (38.8) °F avec un D.H.T supérieur à 54 °F, avec un maximum au forage F8 (152 °F) et un minimum au forage F7 (38.8 °F). Cette dureté a des conséquences plus ou moins néfastes telle que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs, ce qui a été signalé par les habitants au cours de notre campagne sur le terrain. Nous pouvons dire que les eaux souterraines de la plaine de BOU SAADA sont de qualité chimique médiocre.

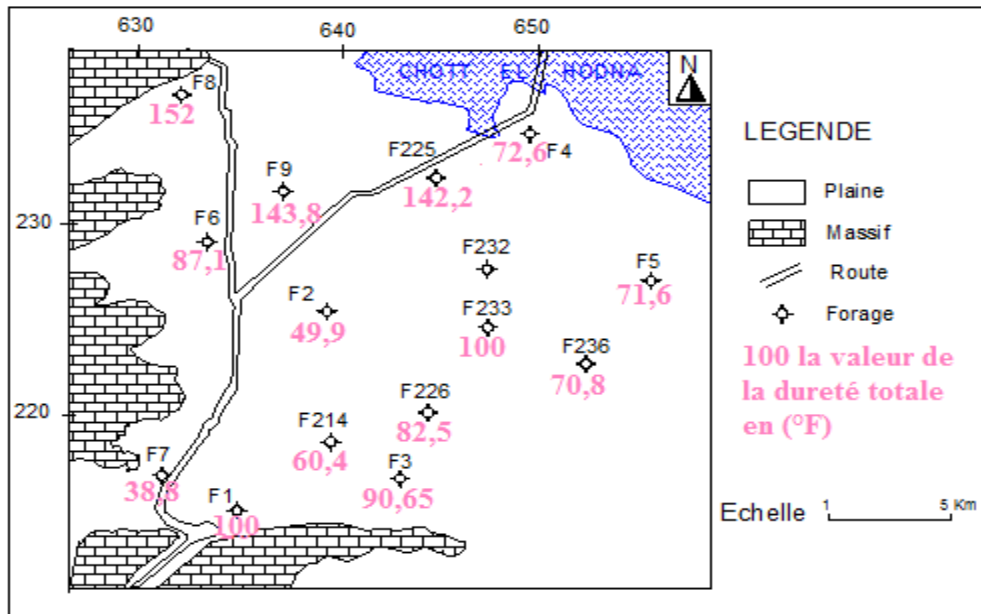


Figure 19 : Variation de la dureté totale des eaux de la plaine de BOU SAADA

3.2.1.5. Résidus secs

L'examen de la carte (Fig. 20) et le tableau 21 montrent que les teneurs de résidu sec varient entre 986 mg/l au forage F7 et 3428 mg/l au forage F8.

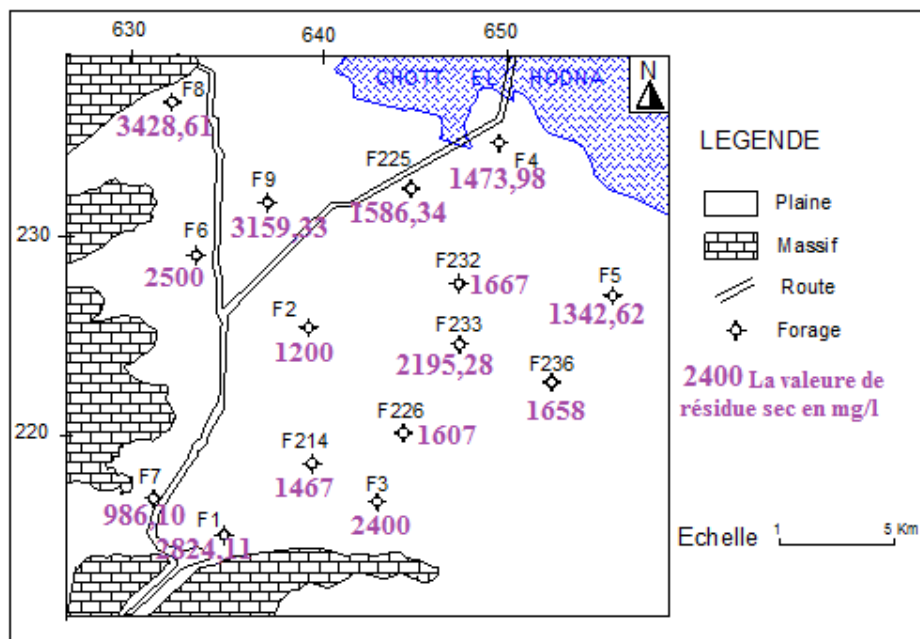


Figure 20 : Variation de résidu sec des eaux de la plaine de BOU SAADA

3.2.2. Etude des paramètres chimiques

Tableau 22 : résultat des cations

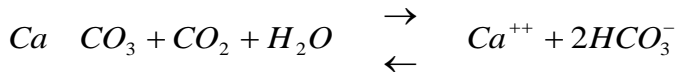
Paramètres Forage	Les cations							
	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		K ⁺	
	mg/l	meq/L	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
F1	264,52	13,22	81,36	6,78	48,68	2,11	9,73	0,84
F2	157,6	7,88	25,2	2,1	6,3	0,27	8	0,25
F3	256	12,8	64	5,33	1,22	0,53	10	0,53
F4	181,96	9,09	65,10	5,43	87,76	3,81	9,75	1,41
F5	188,37	9,41	58,92	4,91	68,02	2,95	9,71	1,12
F6	306,4	15,32	25,2	2,1	9,8	0,42	6	0,15
F7	108,21	5,41	28,2	2,35	39,1	1,7	7,82	0,68
F8	288,72	19,06	23,92	1,04	17,94	0,69	5,98	0,34
F9	267,73	13,38	148,56	12,38	21,73	0,84	7,24	0,42
F233	252,50	12,62	88,56	7,38	45,63	1,98	9,1	0,79
F225	371,14	18,55	118,68	9,89	58,83	2,55	9,8	0,56
F214	200	10	73	6,08	68	2,95	13	0,33
F232	272	13,6	34	2,83	42	1,82	9	0,23
F236	144	7,2	87	6,96	54	2,34	2	0,05
F226	240	12	54	4,5	1,12	0,05	5,5	0,14

Tableau 23 : Résultat des anions

Paramètres Forage	Les anions							
	Cl ⁻		So ₄ ²⁻		No ₃ ⁻		Hco ₃ ⁻	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
F1	220,1	6,2	608	12,66	9	0,14	224,48	3,68
F2	127,8	3,6	60	1,25	2,904	0,05	220	3,60
F3	411,8	11,6	120	2,5	1,89	0,03	310	5,08
F4	43,7	4,05	548	11,41	80	1,29	201,3	3,3
F5	134,9	3,8	538	11,20	8	0,12	164,7	2,7
F6	227,2	6,4	190	4	9,30	0,15	230	3,7
F7	56,8	1,6	288	6	6,5	0,10	134,2	2,2
F8	362,1	10,2	656	13,66	6,60	0,10	462,38	7,58
F9	340,8	9,6	650	13,54	5,60	0,09	236,68	3,88
F233	223,65	6,3	624	13	4	0,06	187,88	3,08
F225	323,05	9,7	656	13,66	130	0,48	168,36	6,76
F226	129	3,63	750	15,62	125	2,01	305	4,92
F232	135	3,80	600	12,5	86	1,38	293	4,80
F236	235	6,61	110	2,29	36	0,58	244	4
F214	153	4,30	740	15	79	1,27	305	4,92

3.2.2.1. Calcium

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :



L'examen de la carte (Figure 21) et le tableau 22 montrent que les teneurs de calcium varient entre 108.2 mg/l au forage F7 et 371.1 mg/l au forage F225. Les valeurs des forages inférieure 300 mg/l est adapté à l'irrigation ; sauf F225 = 306.4 mg/l et F225 = 371.14 mg/l (voir annexe 4)

L'apport du calcium est assuré à l'Est et au Sud par les entrées qui donnent des teneurs élevées car c'est le foyer des infiltrations sans oublier les apports provenant du lessivage des évaporites et des formations gypseuses. Une fois les eaux sont dans la nappe, les vitesses d'écoulements sont faibles, les eaux se mélangent avec l'ensemble des réserves de l'aquifère et se diluent dans ces réserves.

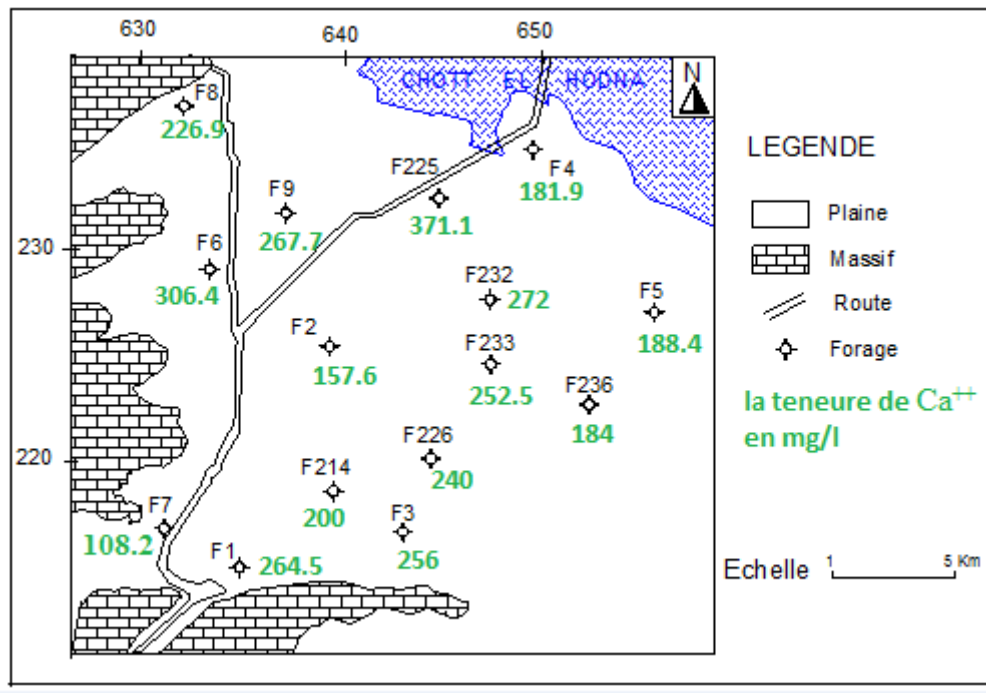


Figure 21 : Distribution des concentrations en Calcium des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.2. Magnésium

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, et provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens.

La teneur minimale du magnésium est enregistrée au forage F2 et F6 avec des valeurs de 25.2 mg/l. et la teneur maximale est enregistrée au forage F8 avec 228.72 mg/l. les valeurs des forages qui inférieure 300 mg/l est adapté à l'irrigation (voire l'annexe 4).

La carte (Figure 22), montre que les valeurs élevées s'observent au Nord de la plaine de (> 110 mg/l) alors que le reste des valeurs du secteur sont inférieures à 90 mg/l.

Le magnésium provient en partie du flanc Sud des monts de l'atlas saharien à partir des calcaires dolomitiques du Cénomaniens.

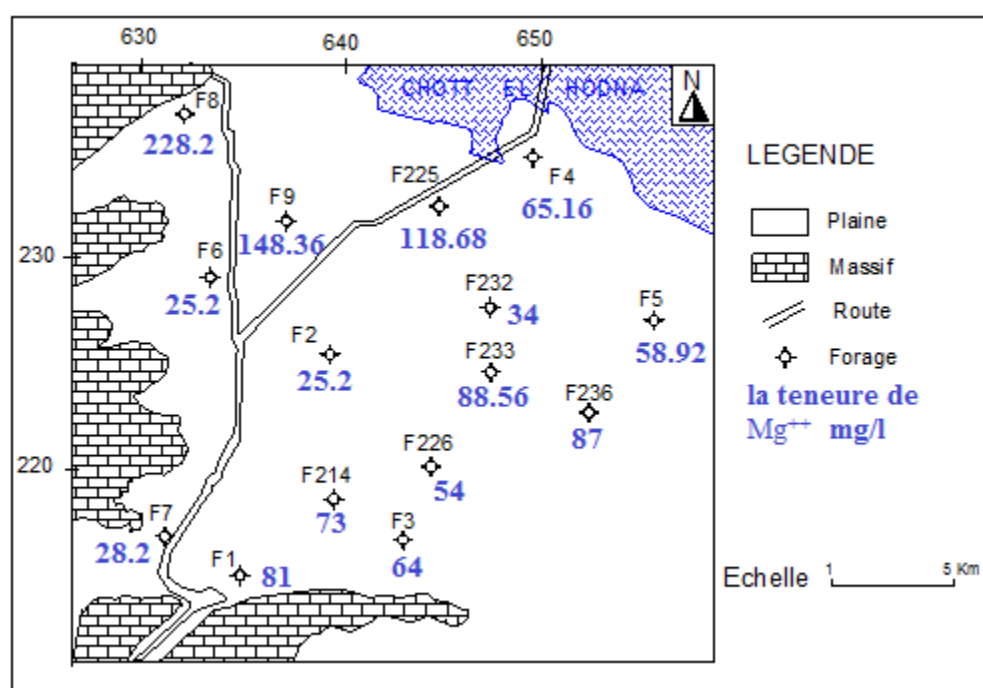


Figure 22 : Distribution des concentrations en Magnésium des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.3. Le sodium

Les concentrations du sodium des eaux de la région d'étude varient entre 45.63 mg/l au forage F233 et 68 mg/l au forage F214. Les eaux de la région d'étude ne représentent aucun

problème potentiel pour l'irrigation des cultures que se soit la technique utilisée ($\text{Na}^+ < 70 \text{ mg/l}$) sauf F4 avec valeur 87.76 mg/l.

La carte de répartition de cet élément montre une augmentation des concentrations du Sud vers le Nord (Figure 23). Cette élévation est due à la présence des formations géologiques riche en NaCl (les argiles gypseuses et les évaporites) et même l'influence des eaux du Chott El Hodna par son écoulement inverse vers la nappe. Ce retour est causé principalement par la surexploitation des eaux particulièrement par les agriculteurs.

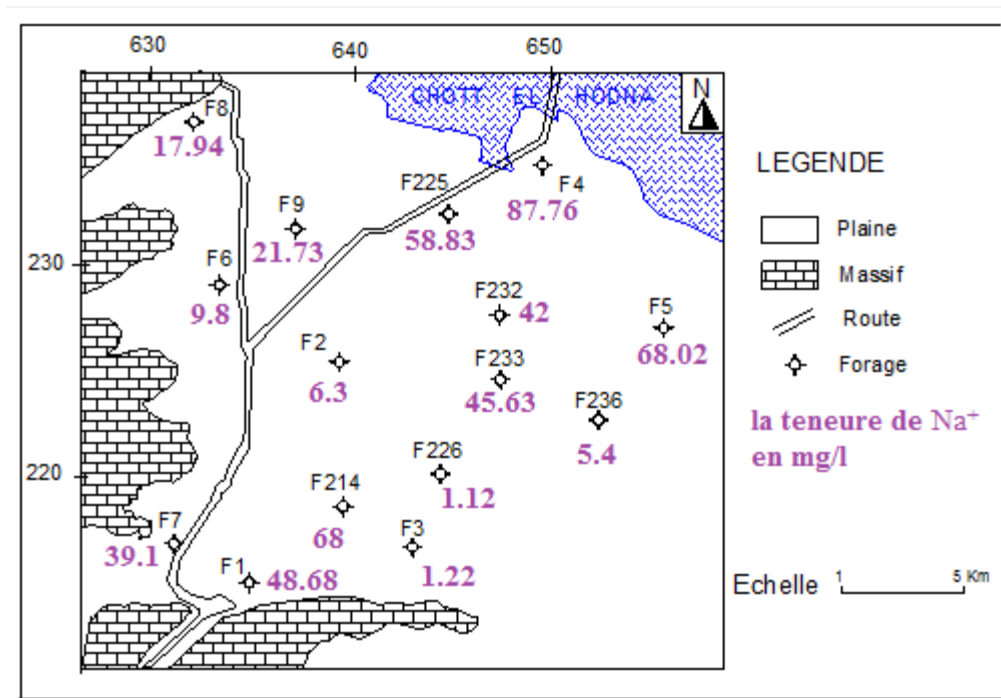


Figure 23 : Distribution des concentrations en sodium des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.4. Le potassium

Les teneurs en potassium au niveau de la plaine de BOU SAADA varié entre 13 et 2 mg/l aux forages F214 et F236 respectivement (Figure 24). Le potassium est de probablement du des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques utilisés durant l'activité agricole.

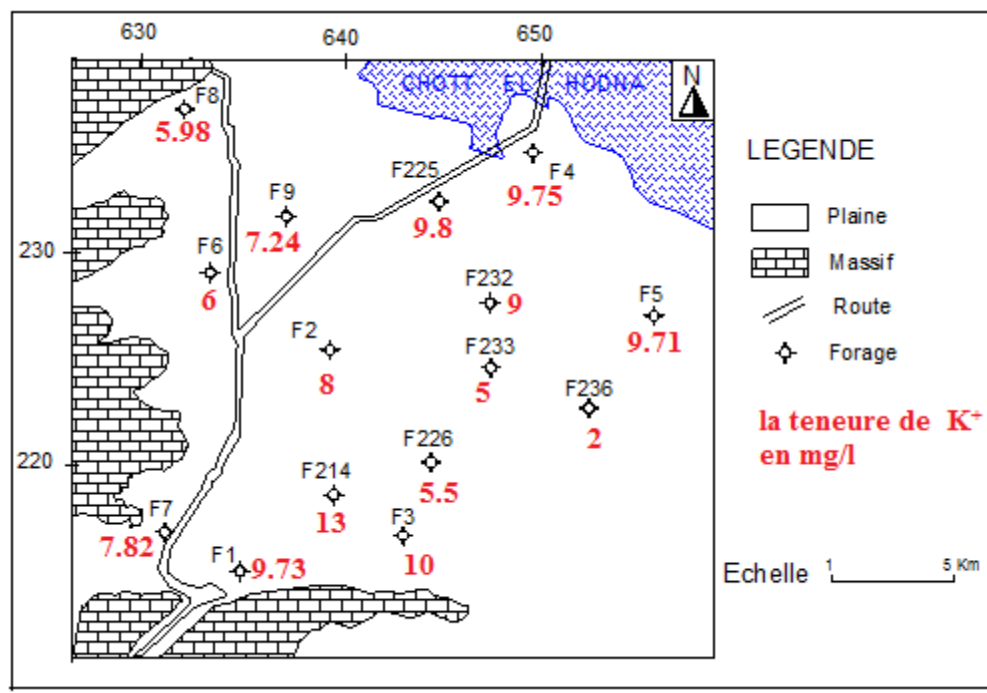


Figure 24 : Distribution des concentrations en potassium des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.5. Chlorures

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple. Ainsi, ils peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination par les eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion des canalisations du réseau d'irrigation et des réservoirs à partir de 50 mg/l (norme de l'O.M.S).

Les valeurs de Cl^- varient entre 56,8mg/l (Forage F7) et 411,8 mg/l (F3). Cet élément présent un risque potentiel léger à modéré pour l'irrigation des cultures dans le cas où l'arrosage se fait par gravité. Dans le cas d'irrigation par aspersion, le problème devient sérieux pour les

forages d'eau qui ont des concentrations supérieures à 100 mg/l. ce qui est le cas pour tous les forages sauf F4 et F7.

La carte (Figure 25), montre que la majorité des points d'eau qui ont des fortes teneurs se trouvent au voisinage du lac. Le Cl⁻ provient d'une intrusion des eaux salées du Chott El Hodna à partir de la nappe superficielle (mélange des eaux des deux nappes).

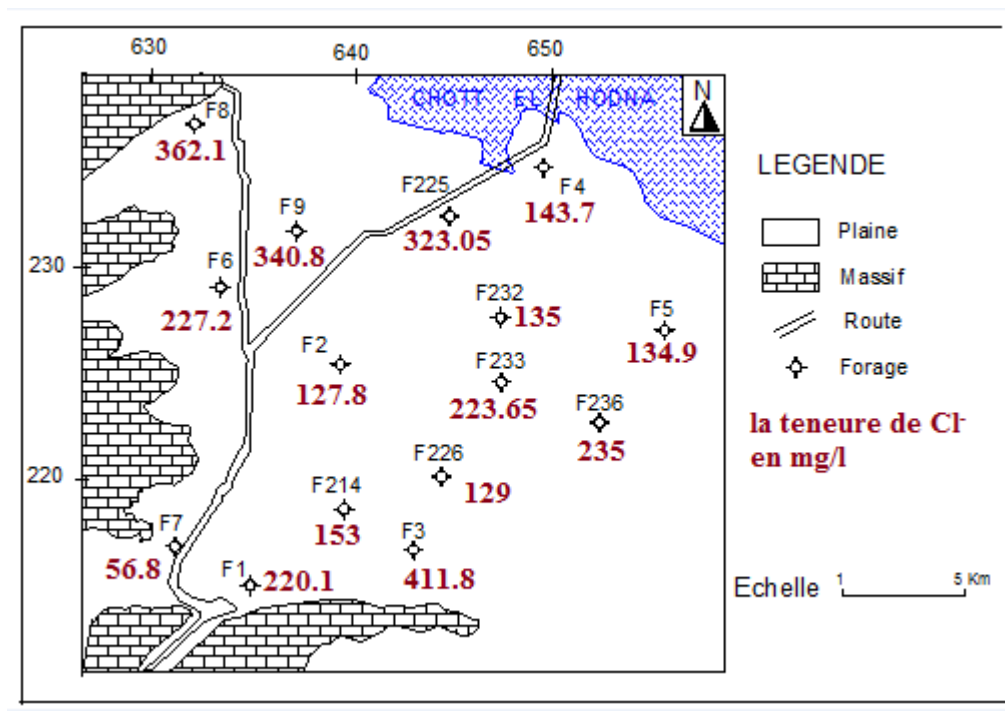
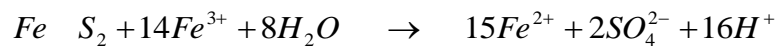
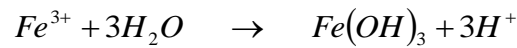
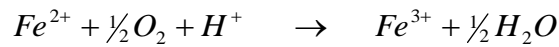
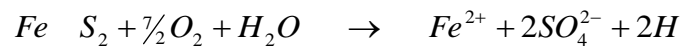


Figure 25 : Distribution des concentrations en Chlorures des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.6. Les sulfates

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des profondeurs très variables. Ils peuvent provenir de:

- ❖ La dissolution du gypse. Ce dernier peut être triasique, comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles Quaternaire.
- ❖ La dissolution des minéraux sulfurés d'une manière générale comme la pyrite (Morgan, 1970) selon le processus suivant:



Les résultats des analyses chimiques, donnent des valeurs qui varient entre 60 mg/l dans F2 et 750 mg/l dans F226. Toute valeur dépasse 300 mg/l donc no adapté à l'irrigation.

D'après la carte de répartition de cet élément (Figure 26), nous distinguons que plus de 60% des points d'eau ont des teneurs élevées, qui sont supérieures à 500 mg/l en liaison avec le les entrées qui fournissent ce minéral à partir des niveaux gypseux et des niveaux argileux du Trias des monts du BOU SAADA, et puis les eaux mélanges avec l'ensemble des réserves de la nappe qui sont lui diminués leur concentration dans d'autres endroits de secteur d'étude (F2 et F6 par exemple).

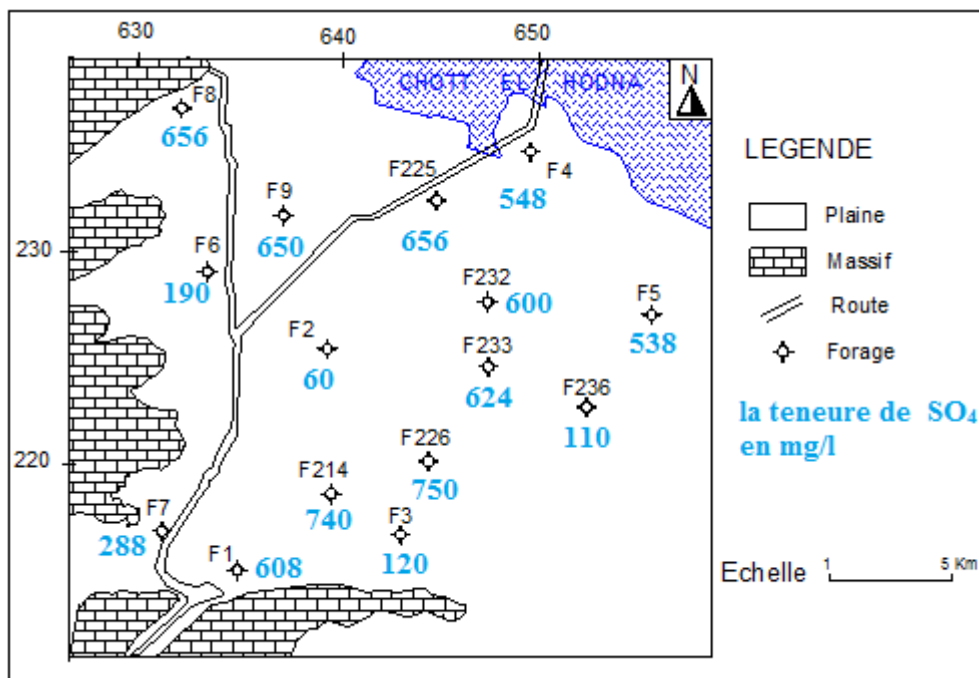
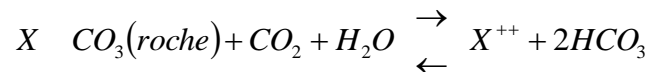


Figure 26 : Répartition des concentrations en sulfates des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.7. Les bicarbonates

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :



Remarque :

L'élément (X) peut être le (Ca⁺⁺), ou le (Mg⁺⁺), il est beaucoup probable que ce soit le Ca⁺⁺, car le Mg⁺⁺ est très solubles, sauf si l'eau est thermale.

Les teneurs des eaux dans la plaine de BOU SAADA en bicarbonates varient entre 134,2 mg/l au forage F7 et 462,38 mg/l au forage F8.

D'après la carte (Figure 27), la majorité des fortes teneurs se localisent dans la partie Ouest et Sud, c'est à dire au voisinage des affleurements carbonatés. Les bicarbonates proviennent en partie du flanc Sud et Ouest des monts du l'Atlas saharien (calcaires à silex du Barrémien et calcaires Gargasien).

Les bicarbonates dans les eaux d'irrigation représentent un risque léger à modéré (90-500 mg/l) pour les cultures si les agricultures utilisent la technique d'irrigation par aspersion, et c'est le cas pour l'ensemble de la plaine.

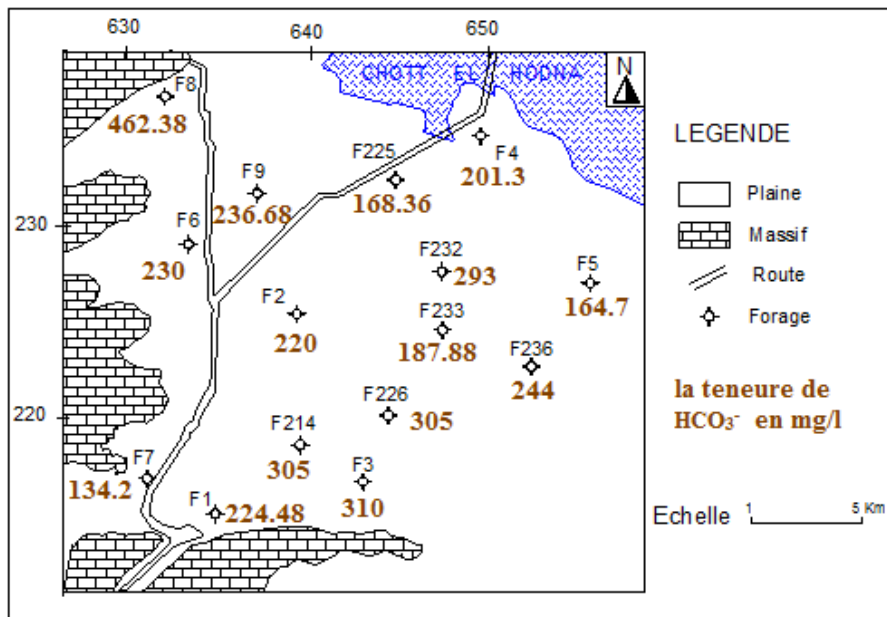


Figure 27 : Répartition des concentrations en bicarbonates des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.2.2.8. Les nitrates

L'examen du tableau 23 montre que 33 % d'échantillons d'eau ont des teneurs en NO_3^- supérieures à la norme maximale admissible (50 mg/l) durant la campagne d'Avril 2017. Les concentrations du nitrate des eaux de la région d'étude varient entre 1,89 mg/l au forage F3 et 130 mg/l au forage F225 qui se trouve au centre de la plaine avec celle du forage F226.

La présence des nitrates est un indice d'utilisation intensive d'engrais et/ou de rejet d'eaux usées.

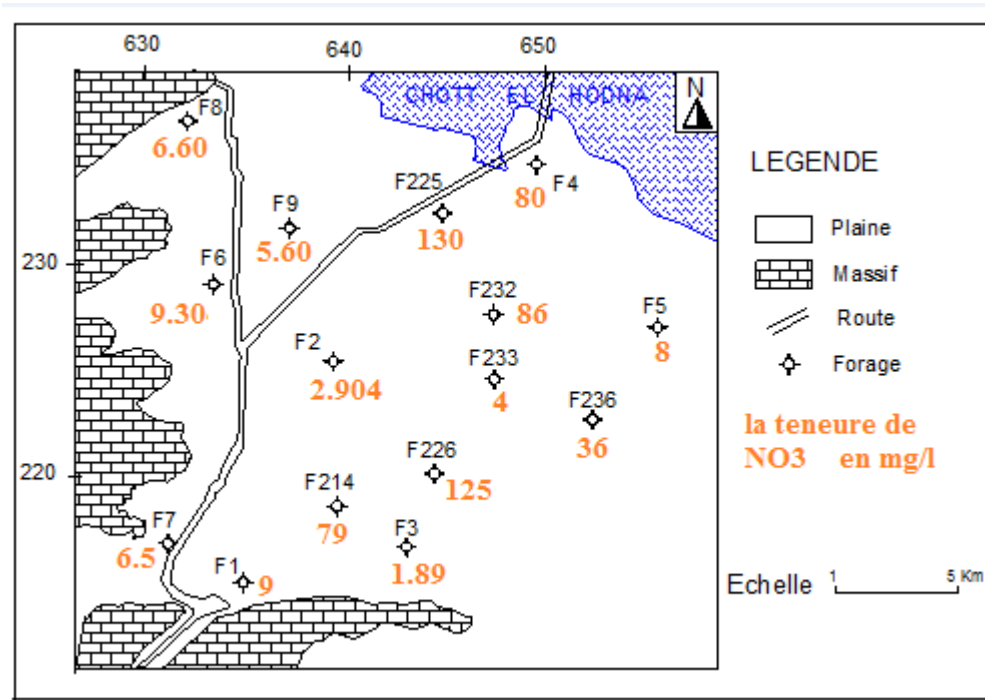


Figure 28 : Variation des concentrations en nitrates des eaux de la plaine de BOU SAADA.

3.3. Etude des rapports caractéristique des éléments dominants

3.3.1. Rapport $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$

Pour avoir une idée sur les éléments dominants, nous avons fait une représentation graphique sur une échelle arithmétique avec en ordonnée la teneur en milliéquivalent des chlorures et en abscisse celle du sodium.

L'examen de la figure 29 permet de remarquer que la majorité des points d'eau se trouvent au-dessus de la droite d'une pente égale à 1. Dans ce cas c'est les chlorures qui l'emportent sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de cet élément.

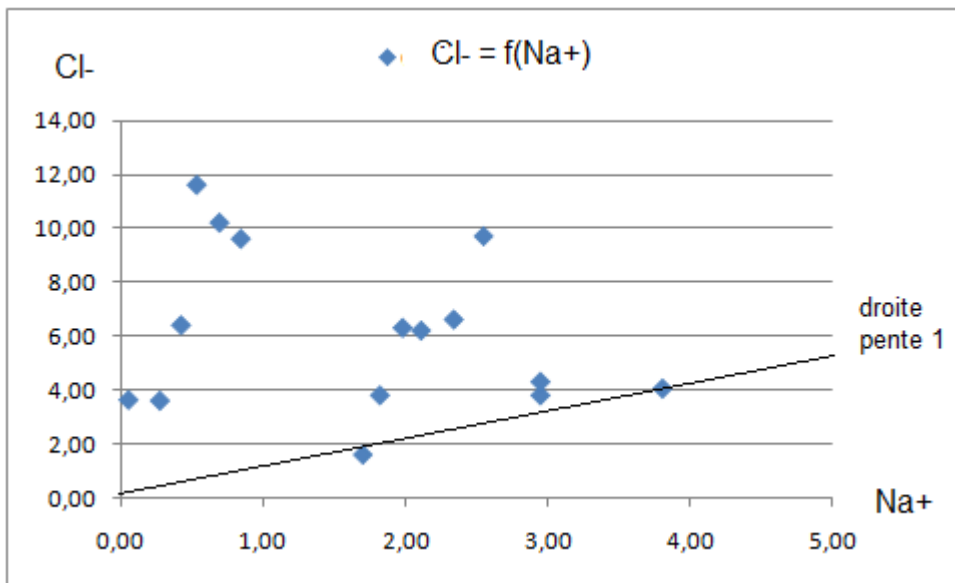


Figure 29 : Origine des éléments Na^+ et Cl^-

3.3.2. Origine des éléments Na^+ et SO_4^{--}

A partir de la figure 30 on distingue que 93 % des points d'eau se trouvent au-dessous de la droite d'une pente égale à 1. C'est-à-dire que les sulfates qui l'emporte sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de celles-ci. Ce diagramme a confirmé que SO_4 est d'origine évaporitique.

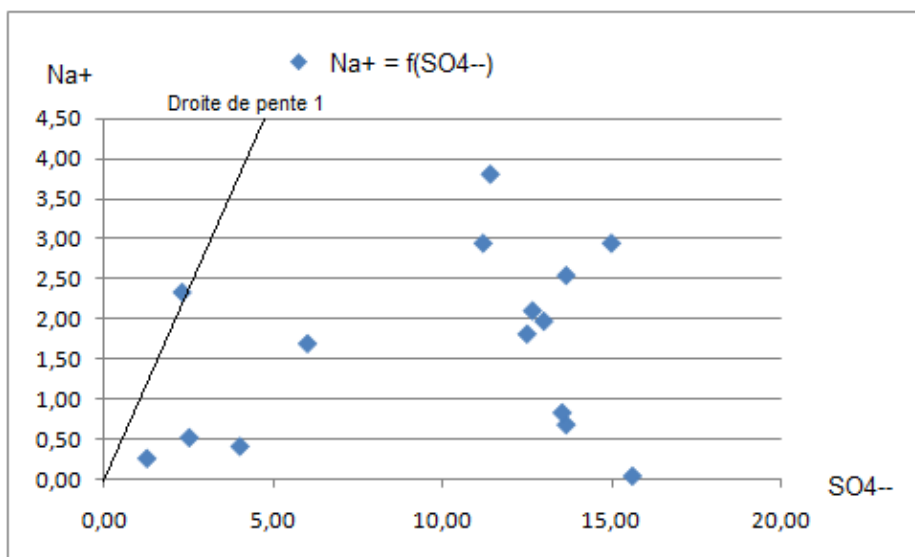


Figure 30 : Origine des éléments Na^+ et SO_4^{--}

3.3.3. Origine du Calcium

Le faciès calcique a été étudié à l'aide de deux diagrammes, à cause de sa double origine (carbonatée et évaporitique).

La mise en examen du calcium avec les bicarbonates montre qu'on a un excès du calcium par rapport à ces derniers. Donc l'origine du calcium ne peut pas être évaporitique (Figure 31-a). Cette tendance est confirmée par le diagramme $\text{Ca}^{++}/\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$ (Figure 31-b) où on remarque qu'on a un excès des bicarbonates par rapport au calcium

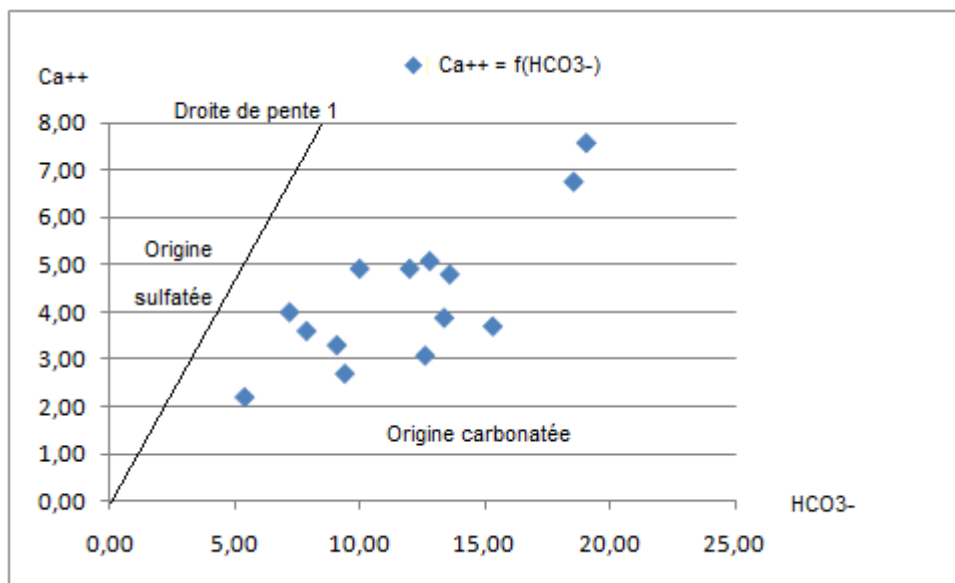


Figure 31-a : Origine du Ca^{+2} en fonction de $\text{Ca}^{++}=f(\text{HCO}_3^-)$

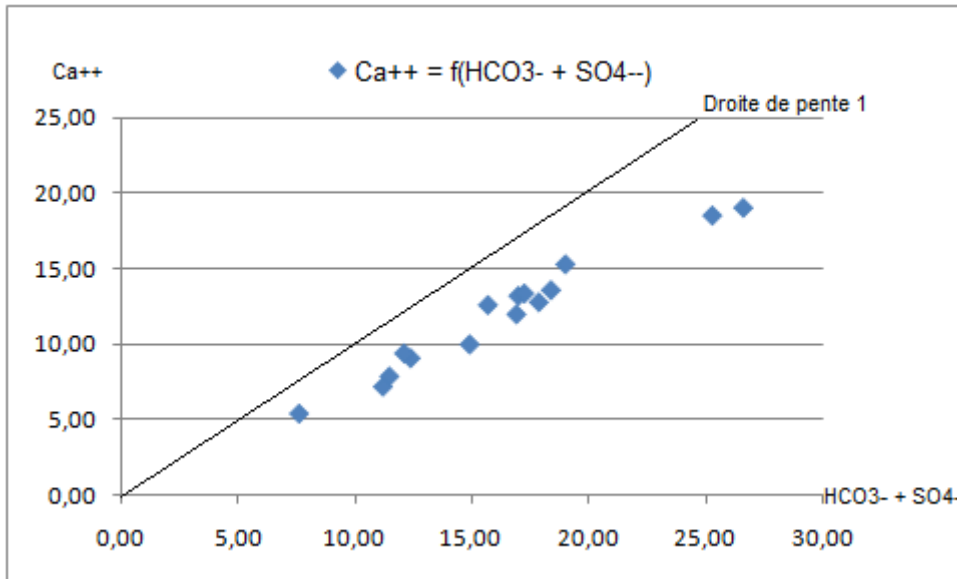


Figure 31-b: Origine du Ca⁺² en fonction de (HCO₃⁻+SO₄⁻)

3.4. Indice d'échange de base i.e.b

L'indice d'échange de base défini par SCHOELLER en 1934 est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante :

$$i.e.b = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'eau sont échangés contre les ions K⁺ et Na⁺ des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions Na⁺ et K⁺ de l'eau sont remplacés par les ions Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ des formations encaissantes.

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son parcours souterrain.

Le calcul de cet indice a montré que 80 % des points d'eau ont un i.e.b positif, donc le sodium de l'eau est échangé contre le calcium du terrain; et 20 % ont un i.e.b négatif c'est-à-dire que le calcium de l'eau est échangé contre le sodium du terrain (annexe).

3.5. Faciès chimique des eaux

Il existe un grand nombre de classification des eaux naturelles d'après leur composition chimique, les classifications les plus utilisées sont celles de Schoeller-Berkaloff et Piper

3.5.1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Cette classification est basée sur la présentation des résultats des analyses chimiques sur un diagramme mis au point par H. Schoeller et révisé par Berkaloff en 1952. Ce diagramme se compose de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés. Tous les éléments chimiques analysés sont répartis directement en mg/l.

Ce type de diagramme permet de déterminer le pH d'équilibre ($\text{pH}_{\text{équilibre}}$) qui donne une idée sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

Les diagrammes logarithmiques (Figures 33a, 33b, 33c et 33d) ont permis d'identifier les grandes familles chimiques suivantes (Tableau 26).

A première vue, on remarque une dominance des sulfates avec 73% de l'ensemble des points d'eau, en deuxième position les bicarbonates avec 20%, qui semble être liées à la géologie ou à la forte évaporation. Les sulfates, les bicarbonates et les chlorures accompagnent toujours le calcium, à cause de sa présence dans les carbonates (CaCO_3) et dans les sulfates ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

Tableau 24 : Faciès chimiques des eaux selon SCHOELLER-BERKALOFF

Campagne chimique	Faciès chimique		Effectif	Pourcentage %
Avril 2017	Famille des eaux chlorurées	Chlorurée calcique	1	7%
	Famille des eaux sulfatées	Sulfatée calcique	11	73%
	Famille des eaux bicarbonatées	Bicarbonatée calcique	3	20%

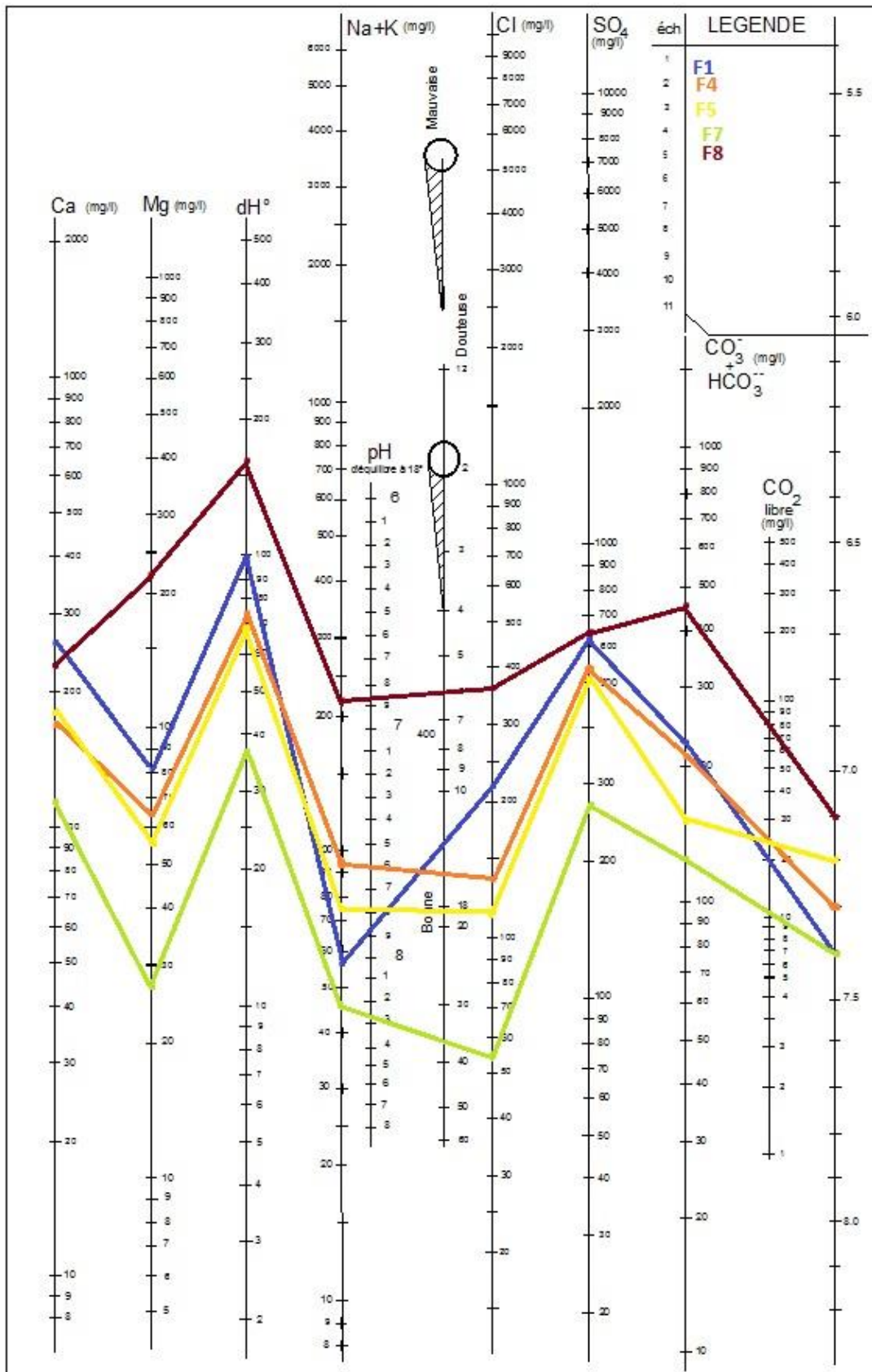


Figure 32-a : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017).

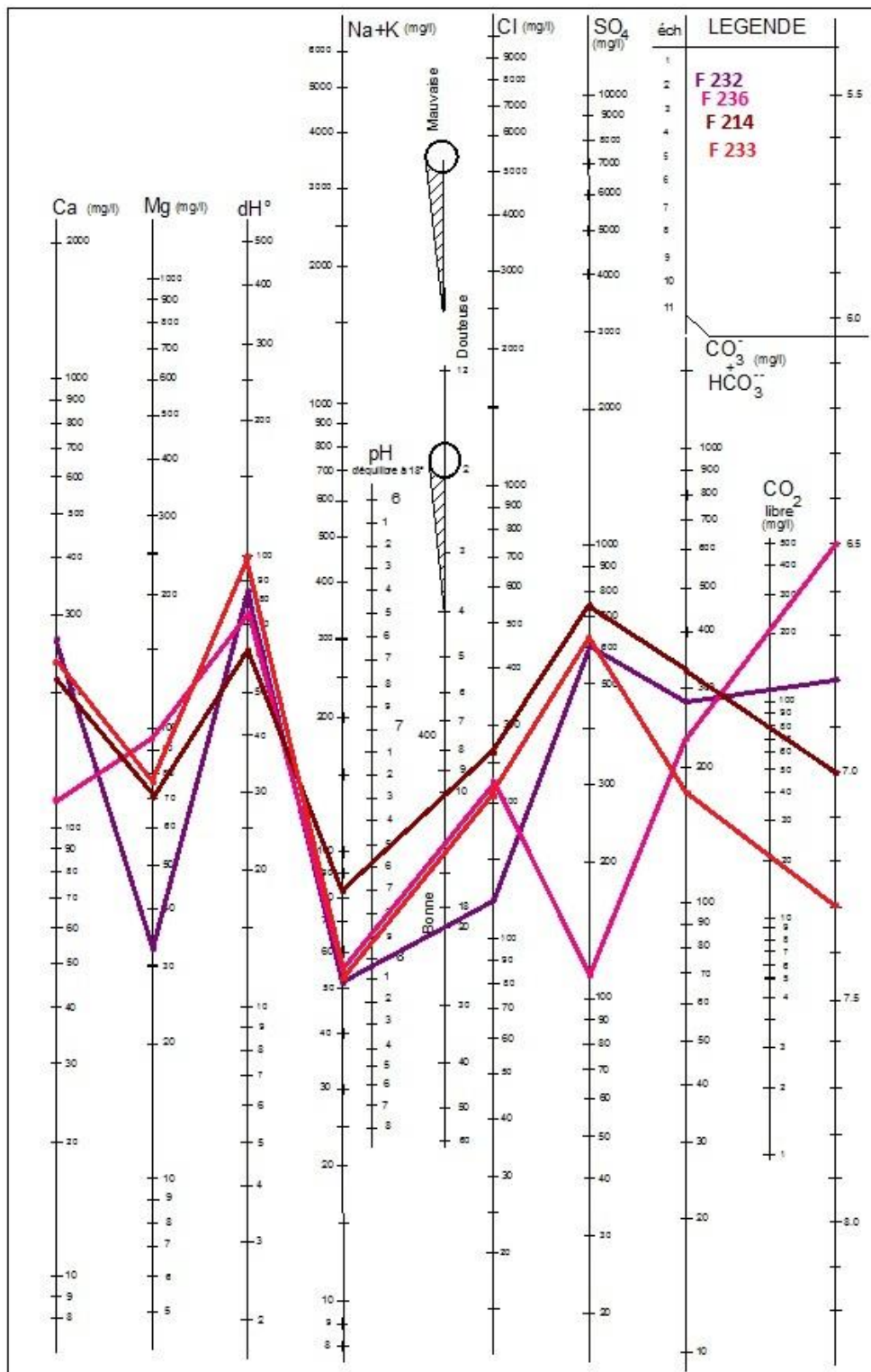


Figure 32-b : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017)

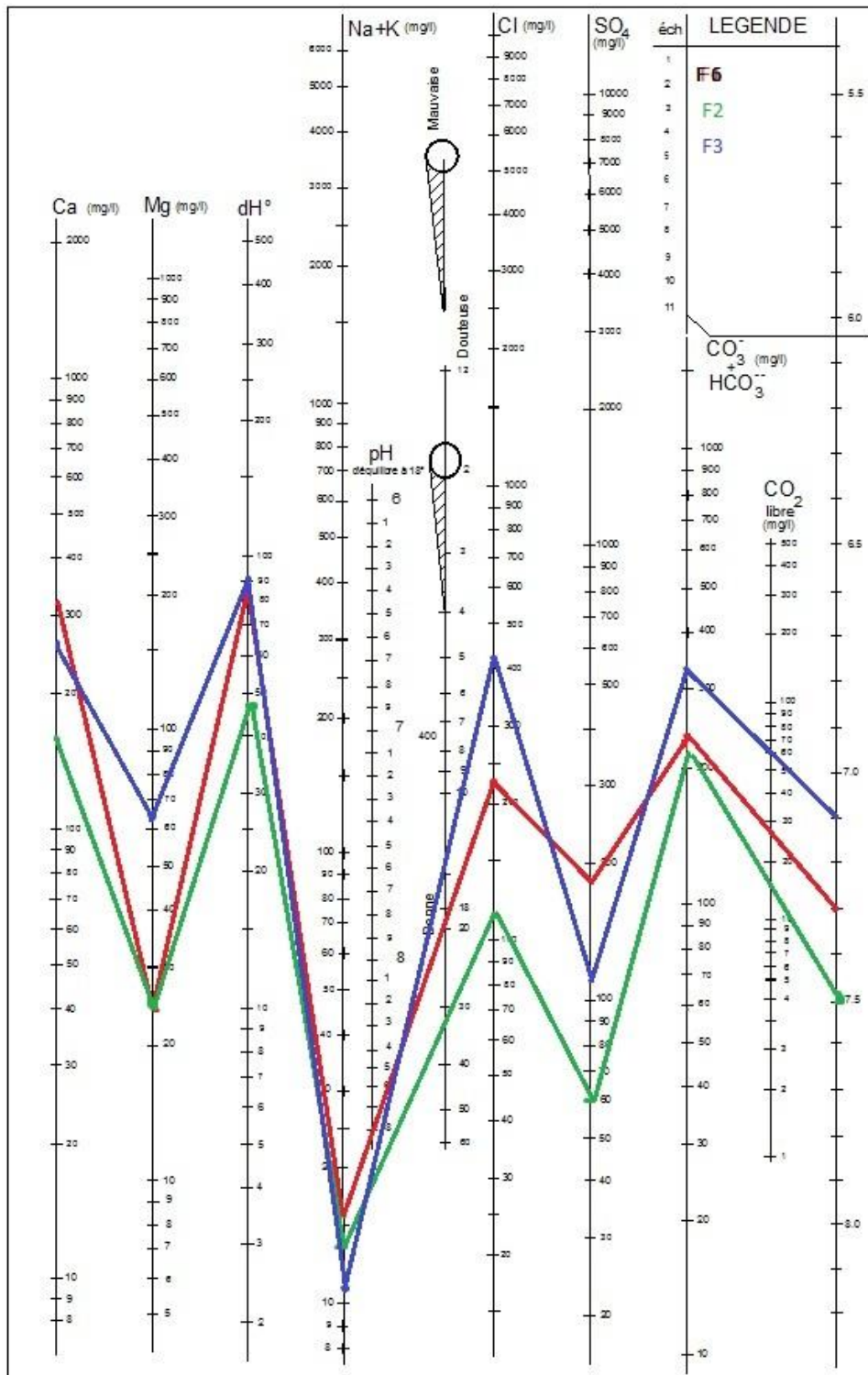


Figure 32-c : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017).

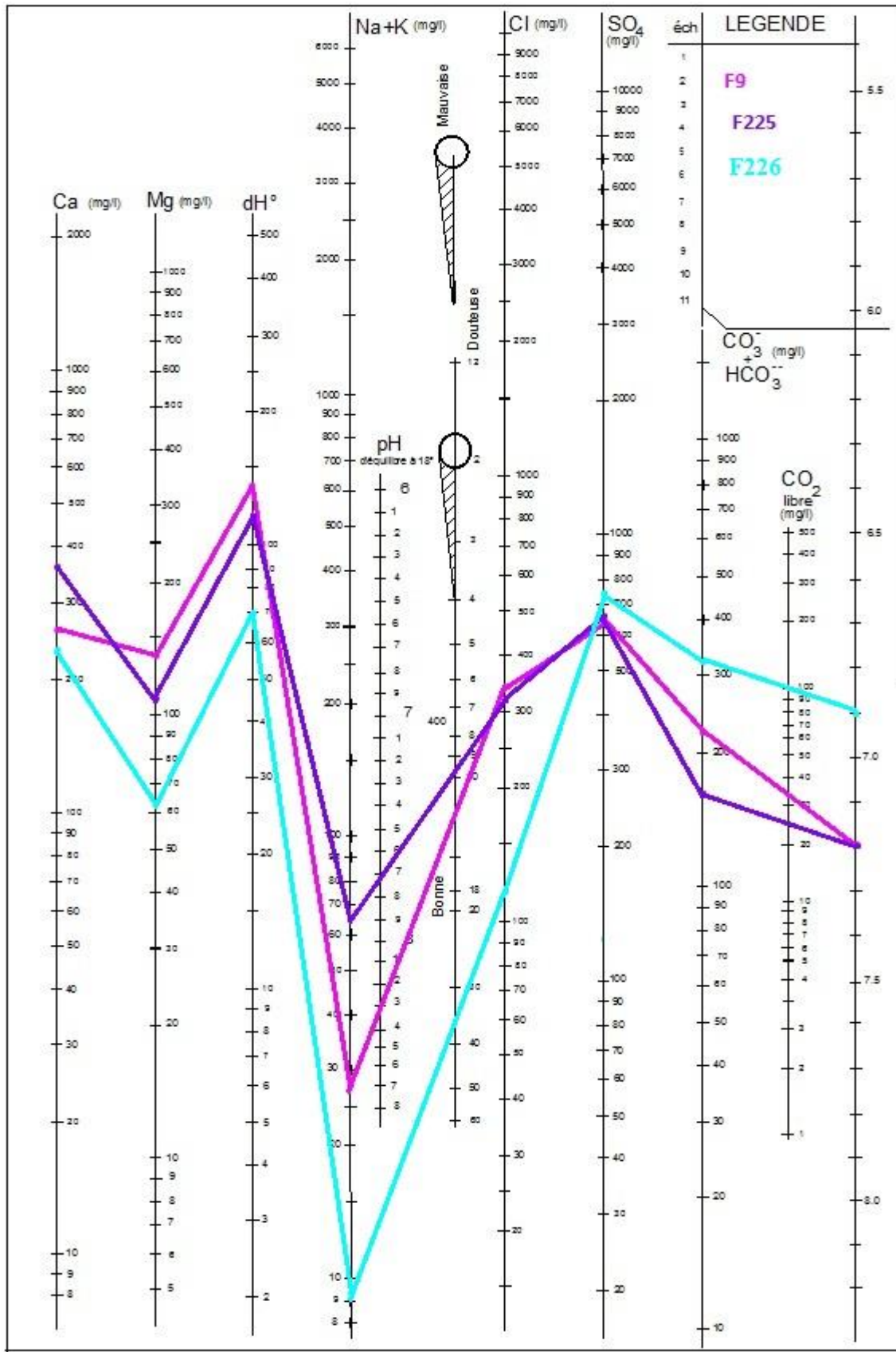


Figure 32-d : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017).

3.5.2. Diagramme de Piper

Cette classification est faite à l'aide d'un diagramme qui comprend un losange représentatif A, B, C, D et deux triangles équilatéraux, dont les cotes sont divisées en cent parties égales correspondant à des quantités en réaction d'ions par rapport à la somme des ions de même signe.

$$r\% \quad x^+ = (100 \cdot r^+) / (\sum r^+)$$

$$r\% \quad x^- = (100 \cdot r^-) / (\sum r^-)$$

La présentation des analyses chimiques des différents points d'eau sur ce type de diagramme (Figures 33a, 33b et 33c) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines. Le tableau 27 montre que les eaux de la plaine de Boussaâda pour campagne d'Avril 2017 présentent une dominance totale de la famille : Chlorurée sulfatée calcique et magnésienne. A l'exception du forage F2, qui présente la famille bicarbonatée calcique et magnésienne.

Tableau 25 : Classification des eaux souterraines selon PIPER

Campagne chimique	Famille des eaux	Pourcentage
Avril 2017	Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique	100%

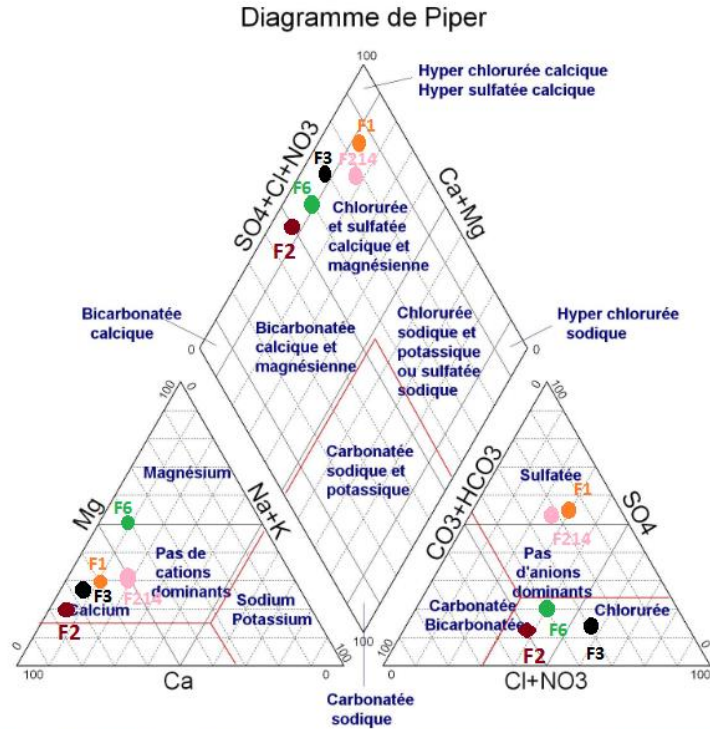


Figure 33-a : Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017)

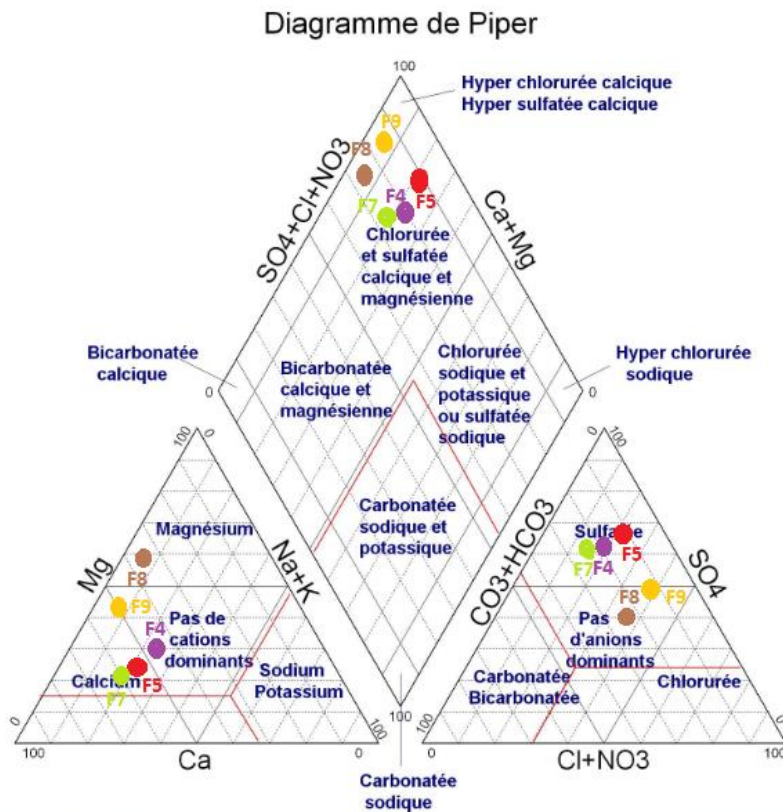


Figure 33-b. Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017)

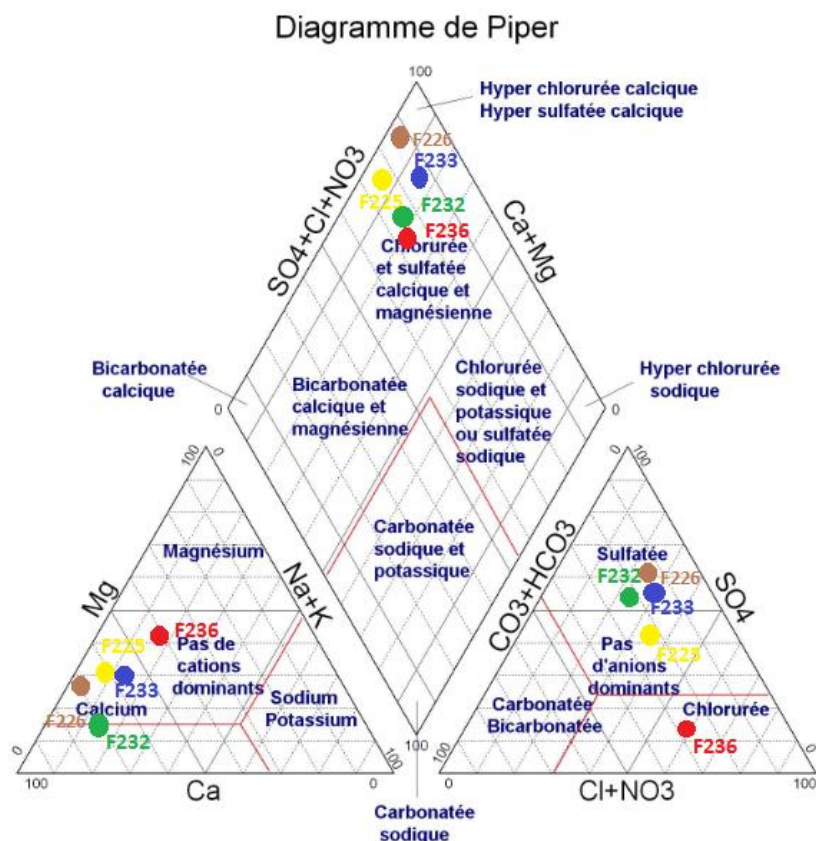


Figure 33-c. Diagramme de PIPER pour les eaux de la plaine de BOU SAADA (Avril 2017)

3.6. Aptitude à l'irrigation

Par sa qualité chimique l'eau souterraine doit être destinée prioritairement à l'AEP, malheureusement au niveau de la plaine de Boussaâda les aquifères sont exploités anarchiquement pour l'irrigation. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous allons utiliser plusieurs méthodes à fins de les classer.

3.6.1. Salinité

Selon (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988)) quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture.

L'examen du tableau 26 montre que la majorité des points d'eau de la plaine de BOU SAADA représentent une restriction légère à modérée avec 40%, et une restriction forte comprenant 60 % des points d'eau. En cas d'irrigation avec ces eaux chargées en sels, on peut s'attendre des chutes de rendements (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) de certaines cultures pratiquées au niveau de la plaine de BOU SAADA (Tableau 26).

Tableau 26 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité).

Restriction pour l'irrigation	CE en $\mu\text{S} / \text{cm}$	Pourcentage des échantillons
Aucune	< 500	0%
Légère à modéré	500 - 2000	40%
Forte	> 2000	60%

Tableau 27 : Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988)

		Conductivité (CE) en $\mu\text{S} / \text{cm}$			
Cultures	Orge	5300	6700	8700	12000
	Blé	4000	4900	6400	8700
Chute de rendement en %		0	10	25	50

Il est recommandé dans ce cas d'utiliser ces eaux pour des cultures tolérantes en sels, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux) qui pratiquement caractérisent cette région d'étude, de faire des apports d'eau supplémentaires et de réaliser le drainage.

3.6.2. Infiltration

Les problèmes d'infiltration liés à la qualité de l'eau apparaissent lorsque la vitesse de pénétration de l'eau d'irrigation ou de la pluie est notablement réduite provoquant une stagnation de l'eau à la surface du sol. L'infiltration influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et elle diminue la qualité d'eau mise en réserve tandis que la salinité diminue la disponibilité de l'eau en réserve.

3.6.2.1. Eaux peu salées

Les eaux peu salées dont la conductivité électrique est inférieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol ce qui entraîne la dispersion des particules plus (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) et l'obturation des espaces poreux.

La valeur minimale de conductivité des eaux de la plaine de BOU SAADA est supérieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$, donc ce problème ne se pose pas.

3.6.2.2. Eaux à forte teneur en sodium

L'abondance du sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ration » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

3.6.2.2.1. Classification de Richards

Le tableau 30 récapitule les résultats obtenus après interprétation de diagramme de Richards (Figure 34).

Tableau 28 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards

Classes		Pourcentage des points d'eau %
Admissible	C3 S1	73%
Médiocre	C4 S1	27%
Mauvaise	C4 S2	0%
Momentanée	C4 S3	0%

La distribution du S.A.R dans l'ensemble de secteur d'étude représente un faible danger d'alcalinité à moyen pour 100 % des échantillons analysés, par contre 73 % de ces derniers peuvent provoquer un danger de salinité du sol.

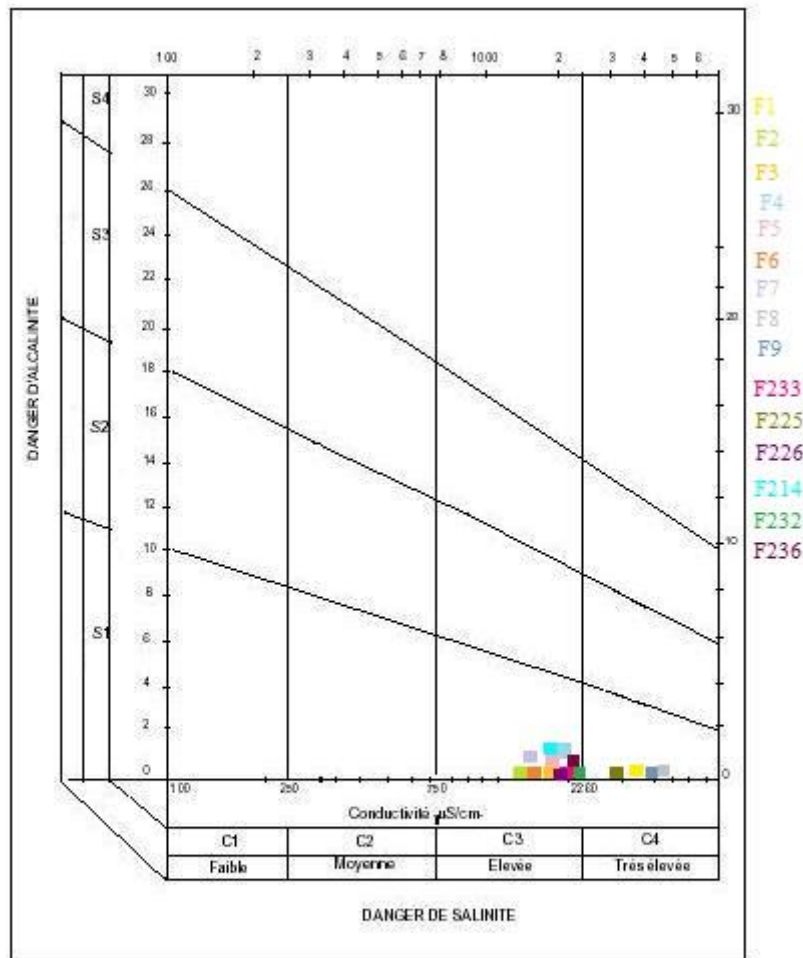


Figure 34 : Diagramme du SAR

3.6.3. Etude de la toxicité des végétaux

La toxicité se manifeste dans les végétaux suite à l'absorption et à l'accumulation de certaines substances contenues dans l'eau d'irrigation. Ces substances toxiques provoquent l'échec de la récolte comme le cas du sodium et celui du chlore.

3.6.3.1. Sodium

L'emploi d'une eau d'irrigation riche en sodium se traduit généralement par une accumulation du sodium dans le sol. Les modifications qui peuvent apparaître dans le sol sont

fonction des fréquences d'irrigations (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT 1988). Les cultures absorbent le sodium en même que l'eau et celui-ci se concentre dans les feuilles tandis que l'eau s'échappe par transpiration. Il peut en résulter une toxicité si l'accumulation de sodium atteint une concentration dépassant la tolérance de la culture. Les symptômes caractéristiques en sont les brûlures et le roussissement du feuillage ainsi qu'une nécrose des tissus situés sur le bord des feuilles. Souvent la toxicité par le sodium se modifie et s'atténue en présence du calcium.

L'interprétation des analyses les directives du tableau 31 permet de dire que :

- ❖ 93 % des points d'eau ne présentent aucune restriction pour l'irrigation ;
- ❖ 07 % des points d'eau pendant le mois d'Avril 2017 présentent une restriction légère à modérée ;

Tableau 29 : Directives concernant la qualité de l'eau d'irrigation

(Toxicité spécifique de certains ions)

		Sodium (méq/l)	% des points d'eau	Chlore (méq/l)	% des points d'eau
Restriction pour l'irrigation	Aucune	< 3	93	< 4	33
	Légère à modéré	3 - 9	7	4 - 10	53
	Forte	> 9	0	> 10	14

3.6.3.1.1. Classification de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, est définie par la formule suivante :

$$\%Na^+ = \frac{Na^+}{Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+} \times 100, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente – Bonne – Admissible - Médiocre - Mauvaise. (Figure 36).

Tableau 30 : Résultats de l'utilisation du diagramme de WILCOX

Classe	Pourcentage %
Excellente	0
Bonne	40
Admissible	0
Médiocre	40
Mauvaise	20

D'après le tableau 32 80% des points d'eau sont entre bonnes et médiocres, par contre les 20 % de l'ensemble des échantillons représentent une eau de mauvaise qualité.

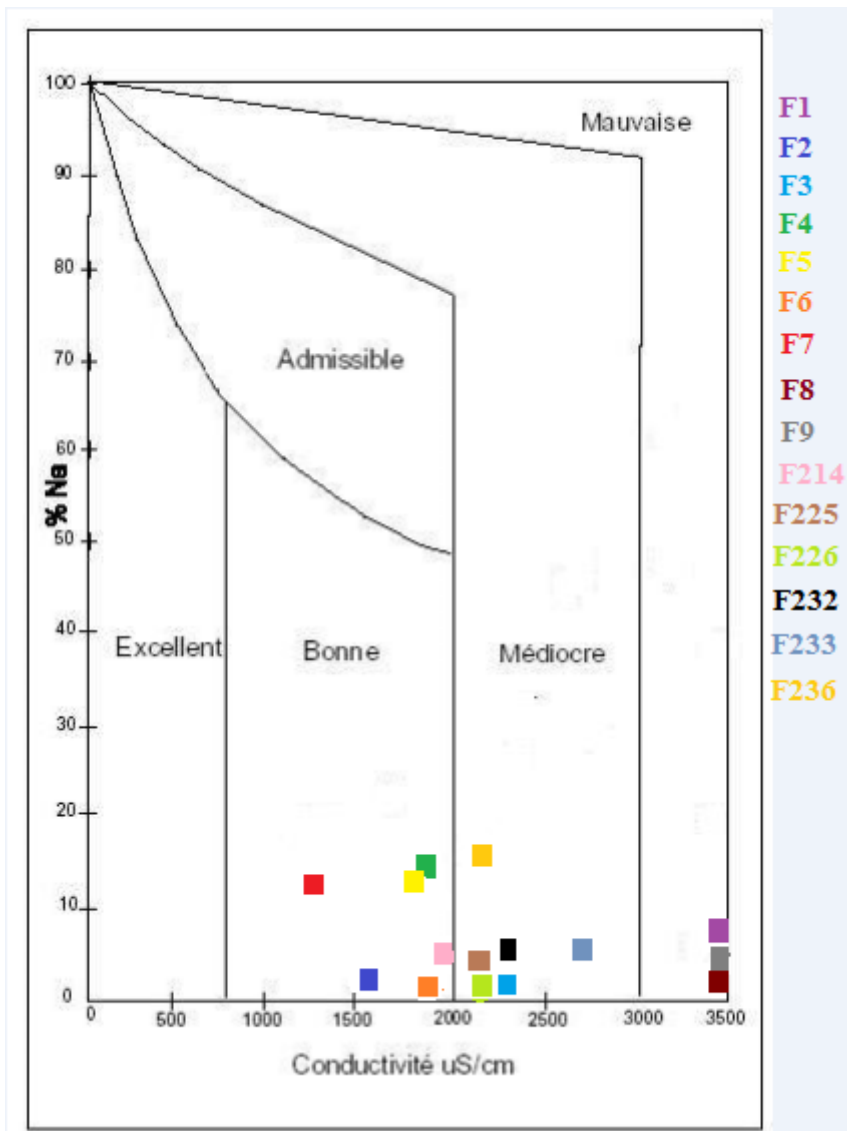


Figure 35 : Classification de l'eau d'irrigation des forages selon le diagramme de Wilcox.

3.6.3.2. Chlore

Le chlore est un ion qui n'est pas absorbé par les sels mais se déplace facilement avec l'eau du sol. Il est absorbé par les racines et s'accumule dans les feuilles, comme le sodium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Les symptômes se manifestent par des brûlures du feuillage.

Pour évaluer le degré de toxicité du chlore, on utilise le tableau 23 Ce tableau montre que les teneurs en chlore qui sont inférieures à 4 méq/l représentent 33 % des points d'eau. Celles comprises entre 4-10 méq/l constituent une restriction légère à modérée, Il correspond à un pourcentage de 53% des points d'eau testés alors que 14 % présentent une forte restriction.

3.7. Analyse en Composantes Principales (A.C.P)

L'A.C.P est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » (forages, sources,...) sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » (CE, teneurs en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^- et NO_3^-) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières. (Güler and al., 2002)

3.7.1. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de la plaine de M'Sila

L'analyse effectuée est une A.C.P centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de données à 08 variables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , NO_3^-) et à 15 échantillons prélevés au niveau de la campagne d'Avril 2016. L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations données par le logiciel (XLSTAT 2016). Les résultats de cette A.C.P sont présentés en (annexe 8).

3.7.2. Analyse statistique

D'après le tableau ci-dessous (Tableau 33), les ions Ca^{++} , K^+ , HCO_3^- présentent un $C_v < 0,5$. Pour le reste des ions (Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) la dispersion est importante ($C_v > 0,5$).

Tableau 31 : Paramètres statistiques des éléments chimiques des eaux souterraines

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coeff de variation Cv
Ca^{++}	15	108,210	371,140	233,277	69,239	0,296
Mg^{++}	15	23,920	148,560	65,047	36,415	0,559
Na^+	15	1,120	87,760	38,009	27,172	0,714
K^+	15	2,000	13,000	8,175	2,590	0,316
Cl^-	15	43,700	411,800	208,260	111,441	0,535
SO_4^{2-}	15	60,000	750,000	475,867	247,049	0,519
NO_3^-	15	1,890	125,000	43,406	35,895	0,826
HCO_3^-	15	134,200	462,380	245,799	81,102	0,329

3.7.3. Matrice de corrélation

Le premier résultat de l'ACP qui apparaît, est le coefficient de corrélation qui est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables. C'est un outil statistique simple pour montrer le degré de liaison entre deux variables. La matrice de corrélation des neuf (09) variables a été présentée dans le tableau ci-dessous. (Güler and al., 2002)

Tableau 32: Matrice de corrélation

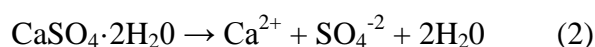
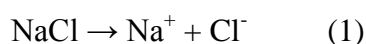
Variables	CE	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
CE	1								
Ca ⁺⁺	0,552	1							
Mg ⁺⁺	0,520	0,695	1						
Na ⁺	0,691	-0,204	0,290	1					
K ⁺	0,022	0,132	0,113	0,394	1				
Cl ⁻	0,588	0,234	0,405	0,747	-0,123	1			
SO ₄ ²⁻	0,726	0,618	0,353	0,339	0,368	-0,032	1		
NO ₃ ⁻	0,113	0,190	0,255	0,068	0,604	-0,165	0,616	1	
HCO ₃ ⁻	0,245	0,677	-0,267	-0,408	-0,170	0,440	-0,698	0,186	1

Le tableau ci-dessous présente les différentes corrélations entre les variables. Le coefficient de corrélation significatif d'après Mangin est $r = 0,518$ ($r^2 = 0,268$) pour 11 couples de données, ce qui permet de dégager les associations suivantes :

Tableau 33 : les différentes corrélations entre les variables

Ca ⁺⁺ - Mg ⁺⁺ : r = 0,695	Ca ⁺⁺ - SO ₄ ²⁻ : r = 0,618	Ca ⁺⁺ - HCO ₃ ⁻ : r = 0,677
Na ⁺ - Cl ⁻ : r = 0,747	K ⁺ - NO ₃ ⁻ : r = 0,604	SO ₄ ²⁻ - NO ₃ ⁻ : r = 0,616
CE- Ca ⁺⁺ : r = 0,552	CE-Mg ⁺⁺ : r = 0,520	CE-Na ⁺ : r = 0,691
CE-Cl ⁻ : r = 0,588	CE- SO ₄ ²⁻ : r = 0,726	

Les valeurs de la CE présentent une grande corrélation positive (0,52 à 0,72) avec Ca, Mg, Na, Cl et SO₄. Ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux souterraines. Ces corrélations, avec la corrélation inverse SO₄-HCO₃, semble indiquer un processus de dolomitisation. Le chlorure et le sodium possèdent également une très bonne corrélation positive (0,74). Les fortes teneurs de Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ et SO₄²⁻, détectés dans certaines échantillons peuvent suggérer la dissolution de sels de chlorure et de sulfates selon les formules (1) et (2).



3.7.4. Etude des variables et des individus

Le traitement a été poussé jusqu'à 3 facteurs. A ce stade seulement 90 % de la variance ont été exprimés. Les résultats sont résumés dans le tableau

Tableau 34: Pourcentage de variance exprimée

Axes	F1	F2	F3
Valeurs propres	3,567	2,364	1,268
% variance exprimée	44,593	29,552	15,855
% variance cumulée	44,593	74,145	90,000

Trois composantes principales (CP) ont été retenues et les résultats montrent que les trois CP représentent 90 % de la variance totale, ce qui est bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie.

CP1 représente environ 44,59% de la variance et il est déterminé par Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , (Figure 35). C'est le facteur de la contamination par les sulfates et le sodium issue de l'effet du Chott El Hodna. Le CP2, qui représente 74,14 % de la variance totale est déterminé positivement par Ca^{++} , Cl^- et HCO_3^- (Figure 36). Ce facteur montre que la dissolution des évaporites ne se fait pas de la même manière que celle de formations carbonatées au Sud et à l'Est de la région d'étude. Ces deux facteurs montrent clairement que les eaux souterraines de la région du BOU SAADA suivent deux processus différents dans la dissolution des minéraux. Celui des évaporites et celui des carbonates. Le processus se termine par une contamination par l'azote, issue de l'utilisation intense des engrais chimiques. CP1 et CP2 sont supposées donc être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau et de l'interaction eau-roche.

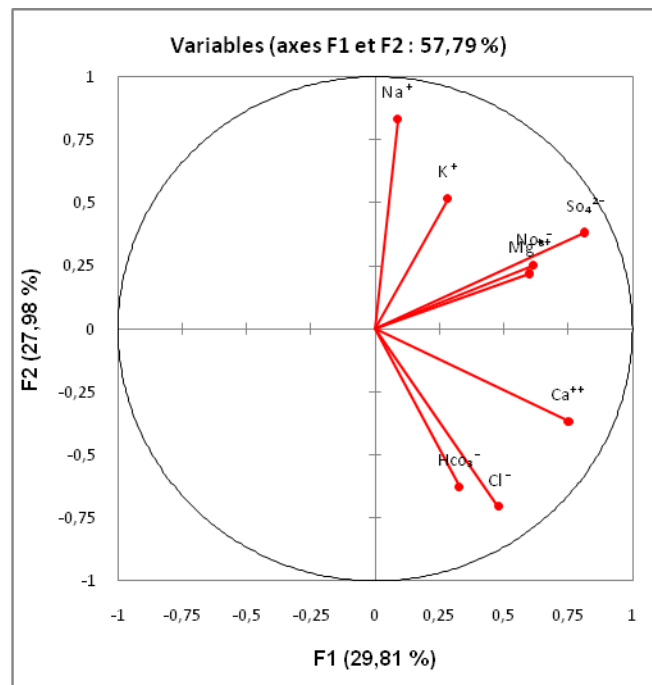


Figure 36 : Plan des facteurs F1/F2

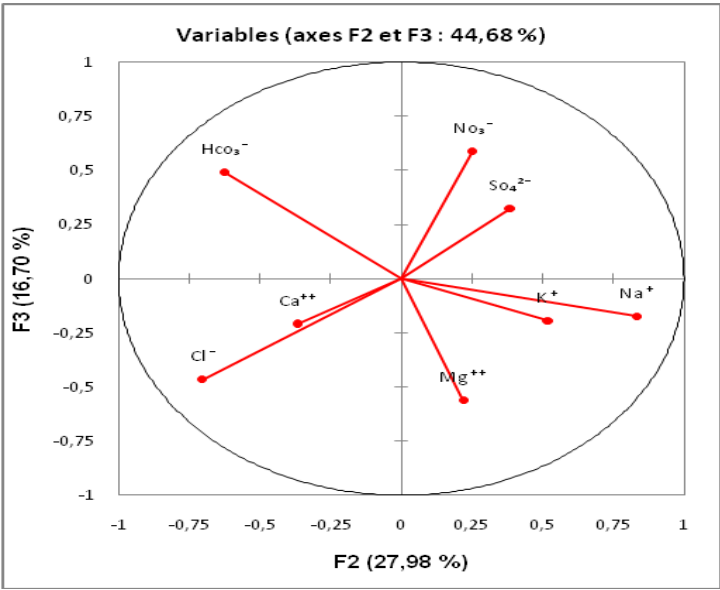


Figure 37: Plan des facteurs F2/F3

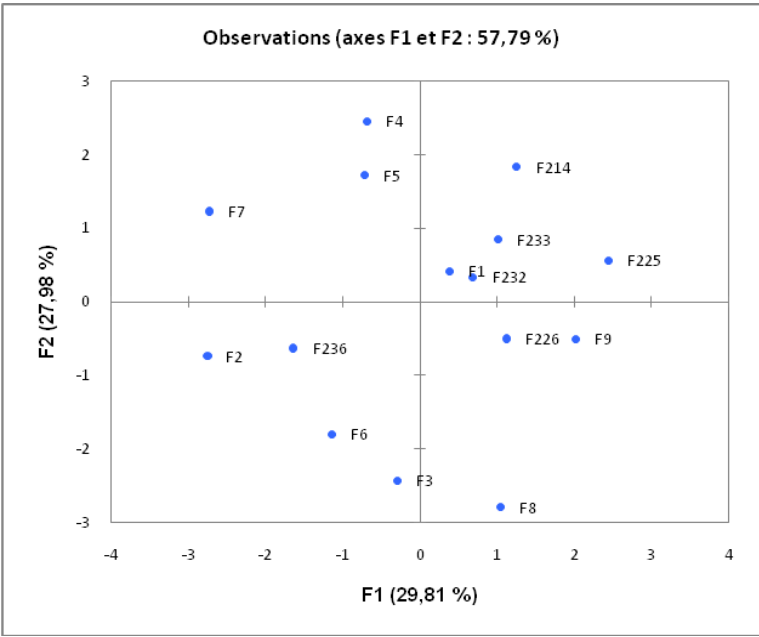


Figure 38 : Plan des individus selon le plan F1/F2

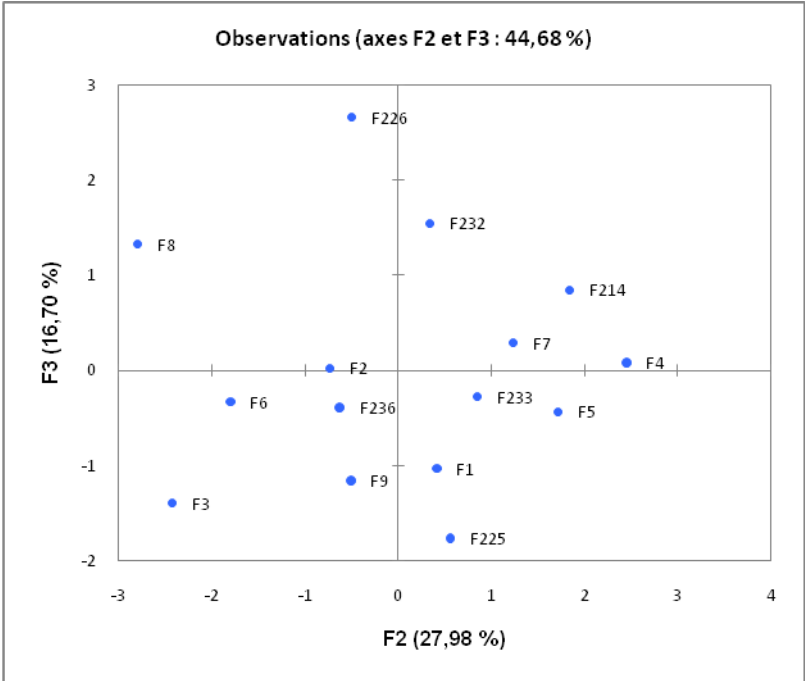


Figure 39 : Plan des individus selon le plan F2/F3

Conclusion générale et recommandations

La contribution que nous avons entreprise dans la région de BOU SAADA, nous a permis d'approfondir la connaissance des paramètres hydrochimiques des eaux destinées pour l'irrigation. Les principaux résultats que nous avons obtenus peuvent se résumer ainsi,

De point de vue géomorphologique, la région d'étude est caractérisée par un relief très fort à l'Ouest et au Sud, un réseau hydrographique relativement dense et une végétation assez fragile.

L'étude lithologique, nous ont permis de distinguer deux aquifères :

- Système aquifère superficiel d'âge quaternaire, qui est caractérisé par une capacité quasiment nulle à cause du tarissement de la nappe.
- Système aquifère profond d'âge Tertiaire continental constitué essentiellement par des conglomérats et argiles sableuse, qui est pratiquement la principale ressource exploité dans cette région.

Le secteur d'étude est caractérisé par un climat aride avec des précipitations moyennes de l'ordre de 15.30 mm/an pour une température moyenne de 19.7 °C. L'évapotranspiration est de l'ordre de 168.6 mm soit 90.26 % des précipitations moyennes annuelles pour la station de Boussaâda.

D'après l'analyse climatologique, on peut dire que la lame d'eau précipitée est insuffisante pour alimenter la nappe du moins du niveau de la plaine.

L'interprétation des diagrammes de PIPER et SCHOELLER-BERKALOFF a montré que les sulfates dominant et s'accompagnent le calcium. Les chlorures et les bicarbonates eux accompagnent le calcium ou le magnésium.

L'analyse des éléments chimiques majeurs fait ressortir que le calcium, le magnésium et les bicarbonates ont des concentrations élevées sous l'effet des formations carbonatées tel que les calcaires et les calcaires dolomitiques. Par contre les chlorures et les sulfates ont des teneurs élevées suite à l'influence des eaux salées du Chott El Hodna d'une part et les formations salifères ou évaporitiques d'autre part comme les gypses.

La distribution du S.A.R dans l'ensemble de secteur d'étude représente un risque alcalin faible contre un risque salin élevé pour la totalité des échantillons analysés, qui peuvent provoquer un danger de salinité du sol. Les eaux de la nappe souterraine exploitées au niveau

de la plaine de BOU SAADA représentent des eaux bonnes à médiocre pour l'irrigation des cultures, donc une restriction légère à modérée.

En guise de recommandations, nous souhaitons :

- L'équipement de la région par une station pluviométrique au niveau du Chott et les massifs du Sud ou l'Ouest ;
- Les doses d'engrais en eau d'irrigation apportées aux cultures devraient être calculées ;
- De veiller à une meilleure gestion des eaux en évitant l'exploitation anarchique des eaux souterraines par les nombreux forages existants.
- Reconstitution des retenues collinaires au niveau d'Oued BOU SAADA pour l'accumulation des eaux de ruissellement pendant la période des averses.
- Réaliser un programme de suivre l'état de la nappe et les variations chimiques des eaux.
- Une surveillance permanente de la qualité des eaux d'irrigation pour éviter l'effet de la salinité des sols.
- L'exploitation des eaux de la région Sud-Ouest de la plaine qui ont de bonne qualité chimique (conductivité $\leq 1200 \mu\text{s/cm}$).

En conclusion, nous espérons que cette contribution hydrochimique que nous avons mené au niveau de la plaine de BOU SAADA se trouvant en zone aride, a apporté un certain nombre d'informations supplémentaires et de précisions qui pourront orienter les futurs travaux dans le domaine de la maîtrise de la ressource en eau.

Références bibliographiques

- **ABDELHAFIDI N.,(2005)-** Contribution à l'étude qualitative des ressources hydriques souterraines en zone semi-aride (cas de synclinal nord de Djelfa). Mémoire d'ingénieur, université Djelfa, 77p.
- **AMROUNE A., METTAI M., (2000)-** Contribution a l'étude hydrogéologique de la plaine de Boussaâda. Mémoire d'ingénieur, université Constantine,7-196p.
- **ALLOUCHEF F.,LAMARI D et ZAHF F., (1998) -** Surveillance de la qualité bactériologique et physico-chimique des eaux contamination niveau des trois communes :Aliiboussid, Saby, Ben badis, wilaya de sidi bel abbé, mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état en biologie, Université de sidi bel abbés.
- **ANONYME A., (1978) –** Classification de l'eau d'irrigation basé sur la concentration totale en sels, selon différents sources, 24-25p.
- **AGID (2003).** Efficience de l'irrigationdans les grandspérimètres en Algérie. Séminaire Franco Algeriansur la gestion de l'irrigationdans les conditions de ressource en eau limitée. Ghardaïa
- **AL-QAWATI1 M., AZAMI IDRIS1 Y., ALEMAD1 A., BELHAILI I., MARC1 I., BAICHOUT F., EL KHARRIM1 K., et BELGHYTI D., (2015)-** Analyse et Contrôle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines De la région SIDI ALLAL TAZI-Gharb-MAROC.Laboratoire l'ORMVAG Kénitra, Maroc. 420-429p.
- **A.N.R.H.,(2006)-** Etude pédologique du Hodna(Wilaya de M'SILA).Rapport année 2005-2006,Alger. 41p.
- **ABDELLAOUI F., BEN CHENIT A., (2012)-** caraterisation des sols et des eaux d'irrigation dans deux stations Ben srour et Maadher (W-M'sila)41 P.

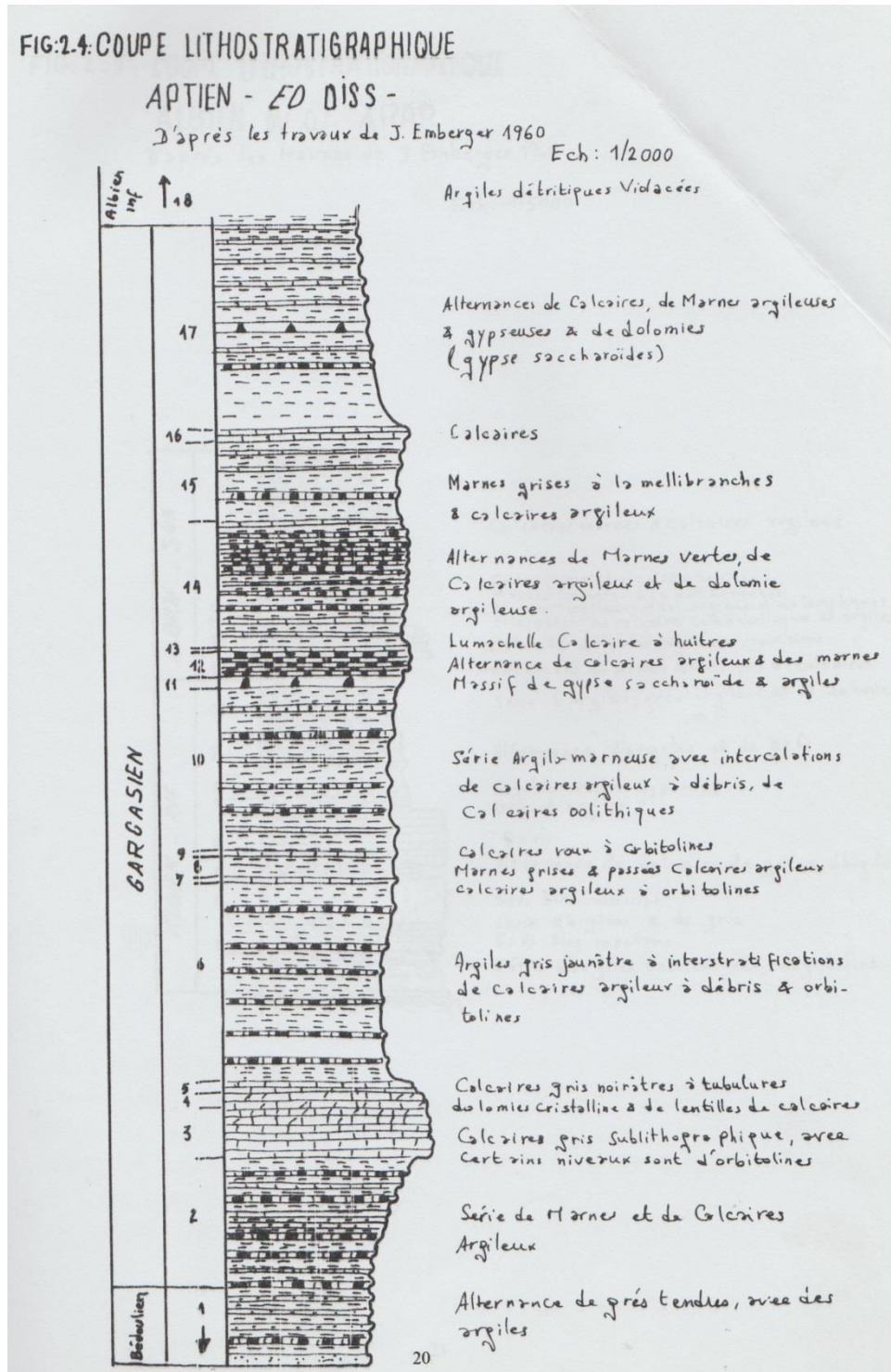
- **BELOUADAH et KHERMOCHE,**(2003)-Analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau potable du bassin versant du hodna, Mem. Ing, Dép. Chimie, Univ. M'Sila, 80 p.
- **BENBLEDIA.,**(2011)-L'efficacité d'utilisation de l'eau et approche économique. Etude nationale. Algérie. Version finale. Plan bleu. Centre d'activités régionales. PNUE/PAM. 23-59p
- **BERKANI I., et BENARFA N., 2005-** Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation des zones semi-aride, cas de la région de DELDOUL (plain de Ouledtolba) wilaya de Djelfa. Mémoire d'ingénieur, université Djelfa. 92 p.
- **BOYADGIEV TG (1975)**Soils of Hodna (in French). Tech. Rep. Rapport Algérie 9, FAO, Rome
- **BOUAROUDJ S., (2011)-** Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation. MÉMOIRE Magistère, université Constantine, 3p.
- **CNES (2000).** *La formation en agriculture.*: CNES. 24 p
- **COUTURE I.,(2004)** –Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation, Ed Québec,13p
- **COUTURE I.,(2004)-** Analyse d'eau pour fin d'irrigation, MAPAQ Montérégie-Est, 8p.
- **EL ASSLOUJ J., E 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) 109- 122.
- **EQUIPES TECHNIQUES RÉFEA.,** analyses physico-chimique, 3p.

- **GÜLER, C., THYNE, G.D., MCCRAY, J.E., TURNER, A.K.,** (2002)- Evaluation of graphical and multi variate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*. 10: 455-474.
- **KADI A.,** (1997)- La gestion de l'eau en Algérie *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(2), April, 1997. 191p.
- **KREJCIE, R.V., & MORGAN, D.W.,** (1970). Determining Sample Size for Research Activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30, 607-610p.
- **LAFFONT C.,**(2015)- L'air et l'humidité, guide du propriétaire-problème et solutions, p23.
- **MADR, 2003.** Recensement général de l'agriculture - 2001. Rapport général des résultats définitifs.
- **MESSAHEL M., BENHAFID M. et CHERIF M.,**(2003)-Efficience des systèmes d'irrigation en Algérie.
- **MOHAND S.,** (2001)- cours de procédés unitaires biologique et traitement des eaux. Ed.O.P.U.Alger.156p.
- **MAYNARD D.N. et HOCHMUTH G.J.,** (1997)-Knott'sHandbook for Vegetable growers.582p.(http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_html), 4p.
- **NANCY MORIN.,** (1997) – La qualité de l'eau d'irrigation: un facteur à ne pas négliger,33.34p.
- **OMS .,** 2004. Liens entre l'eau, l'assainissement, l'hygiène et la santé faits et chiffres - Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux d'adduction publique de huit.
- **REJSEK F .,** (2002)- Analyse de l'eau : Aspects et règlementaire et technique .Ed CRDP d'Aquitaine .France, 358 p .

- **RGA-FAO.** Direction des statistiques agricoles et des systèmes d'information. Juin 2003. Algérie. 125 p.
- **RODIER J, BAZIN C, BROUTIN J-P, CHOMOBON P et RODI ., (1996)-** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eau résiduaires, eau de mer, DUNOD, 8^{ème}. Paris, 1384p.
- **RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J-P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., et RODI L., (2005)-**L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation de résultats. Ed. Dunod, Paris, 1384p.
- **RODIER J., LEUBE B., MERLET N et coll., (2009) -** l'analyse de l'eau : eaux naturelles, eau résiduaires, eau de mer, DUNOD, 9^{ème} .paris, 1526p.
- **WRB (2006)** World reference base for soilresources—a framework for international classification, correlation and communication. Word soilresources reports 103, FAO, Roma
- **ZID EL KHIR F., BAOUCH Z., (2016)-**Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation les paramètres physico-chimiques en zone semi-aride Cas des eaux souterraines de l'aquifère Moi-Plio-Quaternaire de la plaine de m'Sila. Mémoire master, université de m'sila, 8-10p.

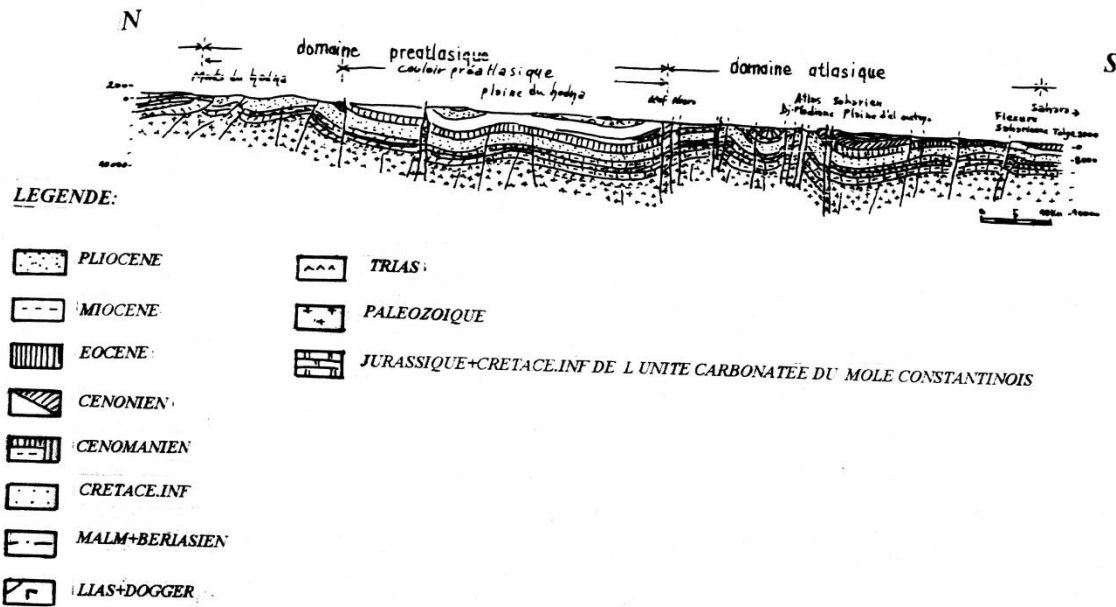
Annexe 1

Figure 1 : Coupe lithostratigraphique



Annexe 2

Figure 2 : Coupe géologique au niveau du Hodna oriental d'après (R.GUIRAUD).1975



Annexe 3

SONDAGE MAADHER 04

236/255

N° Fiche Forages

N° Inventaire

Carte :

Date des travaux :

Echelle de la coupe : 1/1000

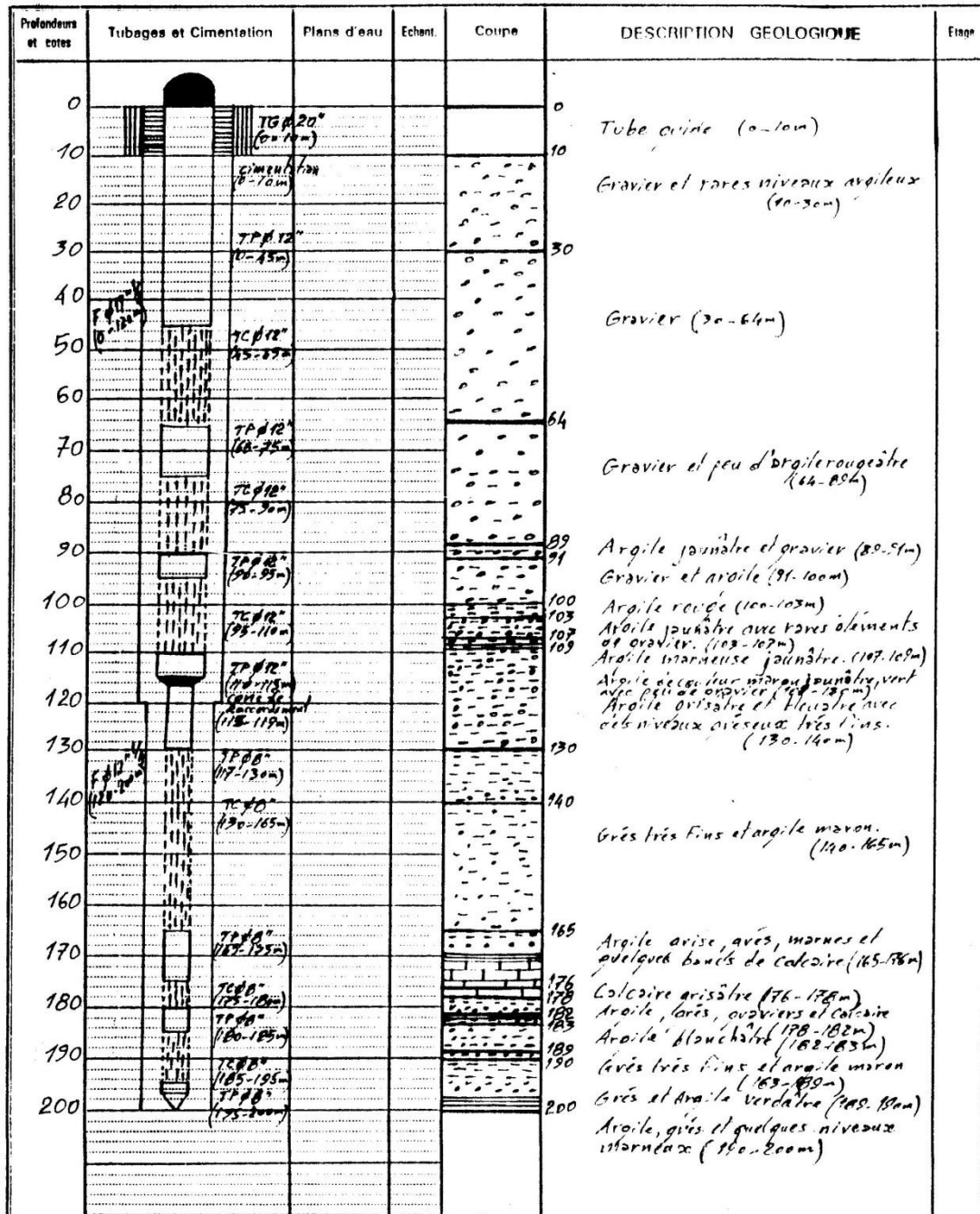
Long :

X 643.600

Lat :

Y 47.600

Z 485 m



Annexe 4

Tableau 1 : Résultats de pH équilibre et Co2 de la région de BOU SAADA

Forages	pHéquilibre	Co2
F1	6,8	80
F2	>9	18
F3	>9	60
F4	7,6	35
F5	7,8	35
F6	8,8	28,8
F7	8,3	10
F8	6,9	80
F9	8,3	34
F233	7,9	20
F225	7,7	25
F232	8	103
F214	7,6	80
F236	7,9	200
F226	>9	100

Annexe 5

Tableau 2 : Résultats des rapports i.e.b

Forages	i.e.b	rNa^+/rCl^-	$rCa^{++}/HCO_3^-+SO_4^-$	rNa^+/rSO_4^-
F1	0,59	0,40	0,809	0,16
F2	0,87	0,075	1,62	0,216
F3	0,93	0,045	1,688	0,212
F4	-0,04	0,60	0,617	0,596
F5	0,11	0,88	0,676	0,263
F6	-1,40	0,065	1,989	0,105
F7	-0,27	1,27	0,659	0,283
F8	0,89	0,1	0,533	0,050
F9	0,86	0,13	0,768	0,062
F233	0,62	0,37	0,784	0,152
F225	0,82	0,17	0,908	0,186
F232	0,58	0,478	0,786	0,145
F214	0,39	0,639	0,502	0,196
F236	0,65	0,354	1,144	1,021
F226	1,02	0,013	0,584	0,003

Annexe 6

Tableau 3 : Les coordonnées des points de prélèvements

N° de Forages	X	Y	Z
F1	636,3	215,2	560
F2	635	225	
F3	643	215	
F4	650	240	
F5	655,2	226,3	423,18
F6	634	229	
F7	633,4	216,9	546,5
F8	632,2	237	490
F9	637,6	231,5	436,25
F233	647	224	445
F214	639,250	218,350	480
F225	644,5	232,5	415
F226	643	220,6	480
F232	647	227	445
F234	649,5	225,5	445

Annexe 7

Température

a-Mesure de Température

b-Principe

La mesure de la température a été effectuée sur terrain. Il y a lieu de déterminer la température de l'air au même endroit et au même moment (**Rodier, 1996**).

c-Mode opératoire

La température a été mesurée au même moment et au même endroit que pour les prélèvements d'eau à l'aide d'un thermomètre Marque en respectant les précautions décrites par Rodier (1996); lors de la mesure de la température de l'air, nous avons évité le rayonnement solaire direct et la chaleur dégagée par l'opérateur.

Annexe 8

Mesure de potentiel en hydrogène (pH)

La mesure de pH est lue directement avec le pH-mètre,

Annexe 9

Mesure de Salinité

Elle est exprimée soit par la valeur de la conductivité électrique (CE) ou par le résidu sec (RS).

Annexe 10

Mesure de la conductivité électrique (CE)

b-Principe

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (Rodier, 1996).

c-Mode opératoire

La mesure de la conductivité est lue directement avec le conductimètre,

Annexe 11

Détermination de Résidu sec (R.s)

a-Principe

Une certaine quantité d'eau est évaporée dans une capsule tarée, le résidu desséché est ensuite pesé.

b-Mode opératoire

Evaporer progressivement au bain- marie dans un bécher tarée 100ml d'eau. Le bécher n'étant rempli qu'à mi-hauteur. Après évaporation totale de l'eau ; porter le bécher à l'étuve à 105°C pendant 4 heures et laisser refroidir un quart d'heure, peser immédiatement et rapidement.

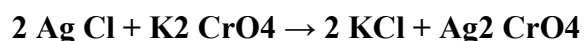
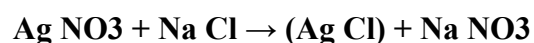
Soit P le poids du bécher. La pesée est obtenue par la méthode différentielle.

Annexe 12

Dosage volumétrique de chlorure (Cl)

a-Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium, la fin de réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent (RODIER, 1996). La cause de changement de coloration est le début du précipité rouge de Ag_2CrO_4 , au moment où il précipite sous forme d' AgCl :



b-Mode opératoire

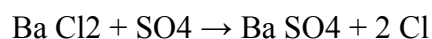
La mesure des chlorures a été effectuée par la méthode volumétrique. A 5 ml d'eau à analyser, sont ajoutés 2 gouttes de K_2CO_4 (coloration jaunâtre), puis titrer avec AgNO_3 (Fluka) à 0.01 N à la coloration brunâtre.

Annexe 13

Dosage colorimétrique des sulfates (SO₄)

a-Principe

Les ions sulfates sont précipités et passés à l'état de sulfate de baryum en présence de BaCl₂ (RODIER, 1996):



Gomme d'acacia 0,25%

Dans une fiole jaugée de 100mL, dissoudre dans de l'eau déminéralisée (4-3-1) 0,25 g de gomme d'acacia. Ajuster au volume homogénéisé.

- Chlorure de baryum (BaCl₂, 2H₂O) en poudre.
- Solution mère de sulfate de sodium (Na₂SO₄) 200mé.l⁻¹

Dans une fiole jaugée de 500mL, contenant environ 400 mL d'eau déminéralisée (4-3-1) dissoudre 7.1025g de sulfate de sodium anhydre (Na₂SO₄). Ajuster au volume. Homogénéiser.

- Solution filles de sulfate de sodium (Na₂SO₄)

Dans une fiole jaugée de 1000mL, diluer respectivement 5, 10, 15, 20 et 25mL de la solution mère (4-3-5) avec de l'eau déminéralisée (4-3-1), ces solution contiennent respectivement 1, 2, 3, 4, et 5 mé.l⁻¹. Ajuster au volume homogénéisé.

b-Mode opératoire

- transférer 25 mL de l'extrait dilué (à 10 ou 100) dans une fiole jaugée de 100mL et ajouter 10 mL de la solution NaCl.HCl (4.3.2) 2mL de gomme d'acacia (4.3.3) et 1g de poudre de chlorure de baryum (4.3.4)

- Agiter à la main, ajuster au volume avec l'eau déminéralisée (4.3.1) homogénéiser.

- Préparer un témoin et les solutions filles selon le même protocole.

- En prenant le témoin comme référence, ajuster à 0,00 l'absorbance du spectrophotomètre réglé à 600 nm.

- Mesurer l'absorbance au spectrophotomètre à 600 nm pour les solutions filles et les échantillons.

Annexe 14

Dosage colorimétrique du nitrate (NO₃)

a-Principe

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent des paranitrosalicylate de sodium coloré en jaune susceptible d'un dosage spectrophotométrique (Rodier, 1996).

b-Mode opératoire

La mesure des nitrates a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption moléculaire (HACH, Odyssey DR/ 2500). A 10 ml d'eau à analyser sont ajouté 1 ml de salicylate de sodium (Biochem chemopharma), le mélange est amené dans un évaporateur à 75 °C jusqu'à la vaporisation total du liquide. Après refroidissement, sont ajouté 2 ml d'acide sulfurique (Organics), la solution est alors laisser repos pendant 10 min pour assurer le déroulement total des réactions, puis 15 ml d'eau distillée et 15 ml de la solution de tartrate de sodium (PROLABO), et après 10 mn de repos finalement obtenue est passée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 415 nm.

Annexe 15

Dosage volumétrique du calcium (Ca)

a-Principe

Le calcium est dosé avec une solution aqueuse d'E.D.T.A à pH compris entre 12 et 13. Ce dosage se fait en présence de murexide. L'E.D.T.A Réagit tout d'abord avec les ions des calciums libres, puis avec les ions calciums combiné avec d'indicateur qui vire alors de la couleur rouge à la couleur violet, (Rodier 1996).

b-Mode opératoire

A 50 ml d'eau à analyser, sont ajouté 2 ml de Naoh à 2 N (Fischer scientifique), puis du murexide (PROLABO), et titrer avec l'E.D.T.A. (MERCK) jusqu'au virage «Violet», puis notée «V1».

Annexe 16

Dosage volumétrique du magnésium (Mg)

a-Principe

Le magnésium est dosé avec une solution aqueuse d'E.D.T.A., ce dosage se fait en présence de noir eriochrome. L'E.D.T.A. réagit tout d'abord avec les ions du magnésium libre, puis avec les ions magnésium combiné avec d'indicateur qui vire alors de la couleur violet à la couleur bleue (Rodier, 1996).

b-Mode opératoire

A 50 ml d'eau à analyser, sont ajouté du 2 ml de NH₄ OH à (10.1), puis noir eriochrome (PROLABO) et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage «Bleu» puis notée «V2».

-Méthode par spectrophotométrie à flamme

a-Principe

Cette méthode physique d'analyse utilise la propriété qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum.

b-Mode opératoire

Nébuliser l'eau à analyser dans une flamme air-acétylène oxydant en intercalant de l'eau permutée entre chaque échantillon. Effectuer les lecture à la longueur d'onde de 589nm.

Annexe 17

Potassium

a-Méthode par spectrophotométrie à flamme

b-Principe

Cette méthode physique d'analyse utilise la propriété qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum

d-Mode opératoire

Nébuliser l'eau à analyser dans une flamme air-acétylène oxydant en intercalant de l'eau permutée entre chaque échantillon. Effectuer les lecture à la longueur d'onde de 766.5nm.

Annexe 18

Dosage volumétrique de carbonates et bicarbonates

a-Principe

Les carbonates n'existent qu'à $\text{pH} > 8,3$ et les bicarbonates si le pH est compris entre 4,4 et 8,3. Au cours d'un dosage cimérique doublé d'une mesure de pH , à quel moment ces ions sont encore présents ou non dans l'échantillon.

b-Mode Opérateur

- Prélever 20 ml de la solution de l'eau + 3 gouttes de Phynolphtaline , sil y a une coloration rose, donc il y a les carbonates.
- Titrer avec l'acide sulfurique jusqu'à la disparition de la couleur rose.
- S'il n'y a pas une coloration de la solution => il y a les bicarbonates.
- Ajouter des gouttes (3-4) de l'indicateur coloré méthyle orange et titrer avec l'acide sulfurique jusqu'à l'apparition de la coloration orange (changement de coloration jaune à orange)

Calcul :

$$\text{Les carbonates (meq / l)} = (X * 0.05 * 1000) / Y$$

X : volume de l'acide sulfurique utilisé Y : volume de la solution du sol ou de l'eau = 20 ml

$$\text{Les bicarbonates (meq / l)} = (2 * X * 0.05 * 1000) / Y$$

Pour la titrations

Annexe 19

Tableau 4 : Grille standard multi usage d'appréciation globale de la qualité des eaux

Classes Parameters	Très Bonne 1A	Bonne 1B	Moyenne 2	Mauvaise 3	Très mauvaise HC
Conductivité à 20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 400	400-750	750-1500	1500-3000	–
Température(°C)	< 20	20-22	22-25	25-30	
PH	6.5-8.5	6.6-8.5	6-9	5.5-9.5	–
MES(mg/l)	≤ 30	≤ 3	≤ 30	30-70	
Résidus sec (mg/l)	≤ 500	500-1500	1500-2500	2500-3500	–
O2 dissous (mg/l)	> 7	5-7	3-5	< 3	
Oxydabilité(mg/l)	≤ 3	3-5	5-8	–	–
SO_4^{-2} (mg/l)	≤ 200	–	200-300	300-400	> 400
Cl^{-} (mg/l)	≤ 150	–	150-300	300-400	$>$
Mg^{+2} (mg/l)	≤ 50	50-75	75-100	100-400	–
Ca^{+2} (mg/l)	≤ 160	160-230	230-300	300-500	–
NH_4^{+} (mg/l)	≤ 0.1	0.1-0.5	0.5-2	2-8	> 8
NO_3 (mg/l)	≤ 5	5-25	25-50	50-80	> 80
NO_2 (mg/l)	≤ 0.1	0.1-0.3	0.3-1	1-2	> 2

Annexe 20

Cosinus carrés des variables :

	F1	F2	F3	F4	F5
Ca ⁺⁺	0,563	0,134	0,043	0,036	0,079
Mg ⁺⁺	0,359	0,048	0,316	0,208	0,010
Na ⁺	0,008	0,692	0,030	0,002	0,177
K ⁺	0,079	0,267	0,037	0,512	0,016
Cl ⁻	0,230	0,497	0,216	0,000	0,028
So ₄ ²⁻	0,663	0,147	0,104	0,004	0,002
No ₃ ⁻	0,377	0,063	0,347	0,127	0,027
Hco ₃ ⁻	0,106	0,391	0,242	0,065	0,180

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

Cosinus carrés des observations :

	F1	F2	F3	F4	F5
F1	0,058	0,068	0,417	0,198	0,009
F2	0,835	0,060	0,000	0,019	0,041
F3	0,008	0,562	0,185	0,123	0,000
F4	0,063	0,815	0,001	0,015	0,062
F5	0,128	0,728	0,046	0,036	0,007
F6	0,189	0,473	0,016	0,012	0,139
F7	0,778	0,157	0,009	0,004	0,020
F8	0,078	0,567	0,128	0,065	0,122
F9	0,467	0,029	0,153	0,245	0,000
F233	0,441	0,310	0,032	0,073	0,092
F225	0,570	0,030	0,297	0,002	0,038
F214	0,186	0,400	0,085	0,157	0,059
F232	0,122	0,029	0,623	0,066	0,036
F236	0,243	0,036	0,514	0,101	0,179
F226	0,113	0,022	0,633	0,145	0,075

Les valeurs en gras correspondent pour chaque observation au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

ملخص

هذه المساهمة علي المستوى الاقليمي في بوسعادة-ولاية مسيلة -خلال شهر افريل .والتي تركزت على دراسة خصائص الفيزيائية و الكيميائية للماء الجوفية لا غراض الري وخاصة علي مستوي الياه العصر الثلاثي الفاري التي تسمح النتائج الرئيسية التالية : خاصة المياه قاعدية , مخاطر الملوحة عالية جدا , سيادة الكبريتات و الكلوريدات بسبب بتحلل المتبخرات و تأثير المياه شط الحضنة في الشمال . و ظهور نفوذ هائل من كربونات متأثرة بوجود التركيز العالي للكالسيوم و اقل درجة من المنغنيزيوم . وقد ترك النشاط الزراعي اثار خطيرة علي صحة الانسان ممثلة اساسا على مستوى عال من النترات.

من S.A.R في جميع انحاء منطقة الدراسة تمثل مخاطر منخفضة متوسطة القلوية 100% من العينات التي تم تحليلها . ووفقا للرسم البياني لمياه الري التي تظهر لنا في ريشارد , 73% مياه الري التي تظهر لنا S C31 و 27% في الصيف C4S1

كلمات البحث : الجزائر , بوسعادة , المياه الجوفية , هيدروكيميائية و الري

Résumé

Cette contribution au niveau de la région de Boussaâda - wilaya de M'Sila- durant le mois d'Avril 2017, qui a été centrée sur l'étude des propriétés physico-chimiques des eaux souterraines destinées à l'irrigation, en particulier les eaux de la nappe du tertiaire continentale. Elle a permis de ressortir les constatations principales suivantes : un caractère basique des eaux, un risque de salinité élevé à très élevé. Une dominance des sulfates et des chlorures à cause de la dissolution des évaporites et l'effet des eaux du Chott El Hodna au Nord. Les affleurements des massifs carbonatés influent par des concentrations élevées du calcium et au moindre degré du Magnésium. L'activité agricole a laissé une trace dangereuse pour la santé humaine représentée essentiellement par le taux élevé des nitrates. Le S.A.R dans l'ensemble de secteur d'étude représente un faible danger d'alcalinité à moyen pour 100 % des échantillons analysés. Selon le diagramme de Richards, 73% des eaux d'irrigation apparaissent aux C3 S1 et 27% pour la classe C4 S1.

Mots clés : Algérie, BOU SAADA, Eaux souterraines, Hydrochimie, Irrigation,.

Summary

This contribution at the level of the BOU SAADA – wilaya region of M'Sila – during the month of April 2017, which focused on the study of the physicochemical properties of groundwater intended for irrigation, in particular water of the continental tertiary water table . It revealed the following main findings : a basic character of the waters , a high to very high salinity risk . A dominance of sulphates and chlorides due to the dissolution of evaporites and the effect of the waters of chott El Hodna in the north . the outcrops of the carbonate massifs influence high concentrations of calcium and the least degree of magnesium . Agricultural activity has left a trail that is dangerous to human health , mainly due to high levels of nitrates . S.A.R in the study area set represents a low to moderate alkalinity hazard for 100% of the samples analyzed . According to the Richards diagram , 73% of the irrigation water appears in the C3 S1 and 27% in the C4 S1 class

Keywords : Algeria , BOU SAADA , Groundwater , Hydrochemistry , Irrigation .