

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

**FACULTE : SCIENCES DE LA TERRE**  
**DEPARTEMENT DE GEOLOGIE**  
**Laboratoire des Recherches Géologiques**

**Année : 2021**

## **THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

**DOMAINE : Sciences de la Terre et de l'Univers**  
**FILIERE : Géologie**  
**SPECIALITE : Hydrogéologie**

## **Thème**

**CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES ET  
EVALUATION DES INDICATEURS DE POLLUTION DANS  
LA REGION DE SOUK AHRAS : ETUDE DE CAS DES  
SOURCES DE TAOURA (NORD - EST ALGERIEN)**

Présenté par :

BOUHAFS Fatma

Directeur de thèse :

Pr. LARABA Abdelaziz

### **Jury de soutenance :**

Président : BENHAMZA Moussa

Pr UBM Annaba

### **Examineurs :**

MAJOUR Habiba

MCA UBM Annaba

DERRADJI El Fadel

Pr UBM Annaba

ZENATI Noureddine

Pr Univ Med Chérif Messaadia Souk -Ahras

## Remerciements

Oh mon Dieu Le Clément et Le Miséricordieux, le grand merci Lui revient de m'avoir aidé à élaborer cette thèse de dissertation scientifique.

Je remercie mes très chers parents ; Ma mère signe d'amour, de tendresse, de respect, et de courage.

Mon père pour ses conseils, son encouragement et son soutien moral et financier durant mes études. Ma sœur Nesrine et mon frère Med Haroun.

La réalisation de ce travail n'aurait pu mener à terme sans le support constant de mon directeur de thèse Pr. LARABA A. Je désire lui adresser un merci tout particulier, ses précieux commentaires, et ses conseils pertinents m'ont grandement aidé tout au long des différentes étapes inhérentes au processus de recherche et à l'élaboration de cette thèse.

Je voudrais également remercier les membres de jury, pour avoir bien voulu lire, commenter, et débattre ma thèse.

Je tiens à remercier mes très chères amies pour leur soutien et d'avoir toujours cru en moi.

Mes remerciements vont aussi à ma très chère famille pour leur soutien  
Je remercie toute personne, qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de cette thèse.

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

## Résumé

Les sources de la région de Taoura, jaillissent au niveau d'une structure de forme synclinale. L'accroissement de la demande en eau a entraîné un recours à toutes les ressources mobilisables dans la région. Cependant, le développement des activités anthropiques et l'accroissement des populations dans la région représentent un risque pour les eaux souterraines, ceci nous interpelle à identifier et évaluer les indicateurs de pollution des eaux de sources. Sur la base des résultats analytiques obtenus pour des séries d'échantillonnages, réalisés en deux campagnes (Novembre 2017- Avril 2018), expriment la qualité d'une eau polluée favorable à l'irrigation des terres agricoles. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en période d'Avr 18 de 20,5 à 21,6 °C pour la température ; de 8 à 8,2 pour le pH. Par contre les valeurs élevées de la conductivité électrique de 1390 à 1495  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et la TDS de 1270 à 1500 mg/l sont observables en période de Nov 17, ce qui montre que les eaux de sources sont caractérisées par une minéralisation importante. Les résultats des analyses en composantes principales (ACP) ont montrés une bonne corrélation de la période de Nov 17 avec les paramètres de la minéralisation. En revanche la période d'Avr 18 est fortement corrélée avec les facteurs de pollution. La minéralisation de ces eaux reflète leur circulation dans des formations de nature lithologique calcaires. Ces eaux comportent deux faciès dominants Bicarbonaté Calcique et Chloruré Calcique.

**Mots clés :** Sources, chimisme, pollution, ACP, Taoura.

## **Abstract**

The springs of the Taoura region spring from a syncline shaped structure. All resources in the region were mobilized as a result of increased demand. However, the development of anthropic activities and population growth in the area represents a risk for groundwater, this challenges us to identify and evaluate the pollution indicators of the water sources. Based on analytical results obtained for a series of samplings, carried out in two campaigns (November 2017- April 2018), express the qualities of polluted water favorable for the irrigation of agricultural lands. The highest values are recorded in the Apr 18 period from 20.5 to 21.6 °C for temperature, from 8 to 8.2 for pH. On the other hand, we observed high electrical conductivity values from 1390 to 1495  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and TDS from 1270 to 1500 mg/l in periods of Nov 17, which shows that spring waters are characterized by a significant mineralization. The results of the principal component analysis (PCA) showed a good correlation of the Nov 17 period with the mineralization parameters. However, the Apr 18 period is strongly correlated with pollution factors. The mineralization of these waters reflects their circulation in limestone lithological formations. These waters have two dominant facies: calcium bicarbonate and calcium chloride.

**Keywords:** Sources, chemistry, pollution, PCA, Taoura.

## ملخص

ينابيع منطقة تاورة تتبع من بنية ذات شكل سنكليوالي، أدى الطلب المتزايد على المياه في المنطقة إلى استخدام جميع الموارد التي يمكن تعبئتها في المنطقة. ومع ذلك، فإن تنوع الأنشطة البشرية وزيادة السكان في المنطقة يمثلان خطراً على المياه الجوفية. وهذا يدعونا لتحديد وتقييم مؤشرات تلوث مياه الينابيع. بناءً على النتائج التحليلية التي تم الحصول عليها لسلسلة من سلسلة أخذ العينات التي تم إجراؤها في حملتين (نوفمبر 2017 – افريل 2018) تعبر عن نوعية المياه الملوثة الملائمة لري الأراضي الزراعية. يتم تسجيل أعلى القيم في فترة افريل 18 من 20.5 إلى 21.6 درجة مئوية لدرجة الحرارة من 8 إلى 8.2 للأس الهيدروجيني. من ناحية أخرى يمكن ملاحظة القيم العالية للتوصيل الكهربائي من 1390 إلى 1495 مايكرومتر / سم وTDS من 1270 إلى 1500 مجم / لتر في فترة نوفمبر 17، مما يدل على أن مياه الينابيع تتميز بتمعدن مهم. أظهرت نتائج تحليلات المكونات الرئيسية ارتباطاً جيداً لفترة نوفمبر 17 مع معاملات التمعدن. من ناحية أخرى، ترتبط فترة افريل 18 ارتباطاً وثيقاً بعوامل التلوث. يعكس تمعدن هذه المياه دورانها في التكوينات الصخرية الجيرية. تتميز المياه بسحلتين كيميائيتين رئيسيتين: بيكربونات الكالسيوم وكلوريد الكالسيوم.

**الكلمات المفتاحية:** ينابيع – كيمياء – تلوث – ACP – تاورة

## Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de la région d'étude (Bouhafs, 2019) .....	3
Figure 2. Carte des reliefs de la wilaya de Souk-Ahras (Bouhafs, 2019) .....	5
Figure 3. Carte du réseau hydrographique de la région d'étude (Bouhafs 2019) .....	6
Figure 4. Profil en long de l'oued Medjerda en Algérie et en Tunisie. D'après (Gautier E-F, 1910 in Mebarki, 2005) .....	7
Figure 5. Cadre structural africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine (d'après W. Wildi, 1983). .....	10
Figure 6. Carte géologique de la zone d'étude (D'après David. L., 1956) (Djaba, H 2010).....	17
Figure 7. Colonnes stratigraphiques région de Taoura (David, 1957). .....	18
Figure 8. Log lithostratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes géologiques de M'Daourouch et Taoura au 1/50000.....	19
Figure 9. Coupe géologique extraite de la carte de M'Daourouch au 1/50000.....	20
Figure 10. Carte bioclimatique de l'Est Algérien (Cote, 1998).....	23
Figure 11. Carte des étages bioclimatiques de l'Algérie (ANAT).....	23
Figure 12. Hauteurs annuelles des précipitations (2003/2018) à la station de Souk-Ahras.....	24
Figure 13. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003-2018).....	25
Figure 14. Répartition saisonnière des précipitations (%) à la station de Souk-Ahras (2003-2018) .....	26
Figure 15. Variations du coefficient pluviométrique de la station de Souk-Ahras (2003, 2018).....	27
Figure 16. Températures moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003 - 2018).....	28
Figure 17. Climagramme d'Emberger.....	30
Figure 18. Courbe ombrothermique de la station de Souk-Ahras (2003 - 2018) .....	31
Figure 19. Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Souk-Ahras en % (2009 - 2018).....	32
Figure 20. Bilan d'eau de C.W Thornthwaite de la station de Souk-Ahras (2003 - 2018).....	36
Figure 21. Coupe hydrogéologique de la région de Taoura .....	42
Figure 22. Coupe hydrogéologique du synclinal de la nappe de Taoura. ....	44

Figure 23. Evolution de la population dans la région d'étude .....	50
Figure 24. Besoins en eau futurs des agglomérations de la zone d'étude .....	52
Figure 25. Besoins futurs en eau d'irrigation des surfaces agricoles de la zone d'étude .....	54
Figure 26. Carte de localisation des points de prélèvements des eaux de sources de Taoura.....	56
Figure 27. Valeurs de la température pendant les deux campagnes (Nov-17, Avr-18) .....	57
Figure 28. Variation des valeurs du pH des eaux de sources de Taoura .....	58
Figure 29. Valeurs de la conductivité électrique mesurées dans la zone d'étude.....	59
Figure 30. Evolution de la TDS dans les eaux de sources de Taoura .....	60
Figure 31. Valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux de sources de Taoura.....	61
Figure 32. Concentrations du Calcium dans les eaux de sources de Taoura.....	62
Figure 33. Concentrations du Magnésium dans les eaux de sources de Taoura.....	63
Figure 34. Concentrations du Potassium dans les eaux de sources de Taoura .....	63
Figure 35. Concentrations du Sodium dans les eaux de sources de Taoura .....	64
Figure 36. Concentrations des Chlorures dans les eaux de sources de Taoura .....	65
Figure 37. Teneurs en Bicarbonates dans les eaux de sources de Taoura .....	66
Figure 38. Concentrations des Sulfates dans les eaux de sources de Taoura .....	67
Figure 39. Représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de sources de Taoura (Nov. 2017) .....	68
Figure 40. Représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de sources de Taoura (Avr. 2018).....	69
Figure 41. Concentrations des nitrates dans les eaux de sources de Taoura .....	70
Figure 42. Concentrations des nitrites dans les eaux de sources de Taoura .....	71
Figure 43. Concentrations de l'ammonium dans les eaux de sources de Taoura .....	71
Figure 44. Concentrations en Phosphates des eaux de sources de Taoura .....	72
Figure 45. Variation des concentrations en fer des eaux de sources de Taoura .....	73
Figure 46. Variation des concentrations en Zinc des eaux de sources de Taoura.....	73
Figure 47. Représentation de la qualité minérale des eaux de sources de Taoura (Bouhafs 2019).....	77
Figure 48. Représentation de la qualité par rapport aux paramètres azotés des eaux de sources de Taoura (Bouhafs 2019).....	78

Figure 49. Représentation de la qualité des éléments traces métalliques des eaux de sources de Taoura (Bouhafs 2019).....	79
Figure 50. Représentation graphique des valeurs propres.....	83
Figure 51. Projection des variables et des individus selon le plan F1-F2 .....	84
Figure 52. Représentation graphique des valeurs propres.....	87
Figure 53. Projection des variables et des individus selon le plan F1-F2 .....	88
Figure 54. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Richard) (Novembre 2017) .....	92
Figure 55. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Richard) (Avril 2018) .....	92
Figure 56. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Wilcox) (Novembre 2017) .....	94
Figure 57. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Wilcox) (Avril 2018) .....	94



## Liste des tableaux

Tableau 1. Coordonnées de la station de Souk-Ahras.....	22
Tableau 2. Les précipitations moyennes mensuelles (mm) station de Souk-Ahras (2003-2018) .....	24
Tableau 3. Précipitation moyennes saisonnières à la station de Souk-Ahras (2003-2018).....	25
Tableau 4. Coefficient pluviométrique à la station de Souk-Ahras (2003, 2018) .....	27
Tableau 5. Températures moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003-2018).....	28
Tableau 6. Indice d'aridité annuel de Martonne à la station de Souk-Ahras (2003 – 2018).....	29
Tableau 7. Indice d'aridité d'Emberger à la station de Souk-Ahras (2003 – 2018) ...	30
Tableau 8. Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Souk-Ahras en % (2009 - 2018).....	31
Tableau 9. Bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite pour la station de Souk-Ahras (2003 - 2018) .....	35
Tableau 10. Les valeurs de l'Evapotranspiration réelle estimées par les deux méthodes .....	35
Tableau 11. Caractéristiques hydrogéologiques du synclinal de la Taoura.....	45
Tableau 12. Principaux forages exploités dans la zone d'étude (ABH, DHW S/A)...	48
Tableau 13. Récapitulatif des sources exploitées dans la zone d'étude .....	49
Tableau 14. Récapitulatif des puits exploités dans la zone d'étude (DHW, S/A) .....	49
Tableau 15. Evolution de la population dans la zone d'étude .....	50
Tableau 16. Besoins en eau domestiques actuels dans la zone d'étude .....	51
Tableau 17. Besoins en eau futurs des populations de la zone d'étude.....	52
Tableau 18. Répartition des superficies agricoles (en Ha) au niveau de la zone d'étude .....	53
Tableau 19. Besoins actuels en eau d'irrigation dans la région d'étude .....	53
Tableau 20. Besoins futurs en eau d'irrigation dans la zone d'étude.....	54
Tableau 21. Echelle du Potentiel d'Hydrogène .....	58
Tableau 22. Grille d'évaluation des TDS dans l'eau .....	60
Tableau 23. Grille utilisée pour l'évaluation de l'O <sub>2</sub> des eaux souterraines. (ANRH, 2012).....	61

Tableau 24. Représentation des faciès hydrochimiques des eaux de sources selon les périodes.....	68
Tableau 25. Grille utilisée pour l'évaluation de la qualité minérale des eaux souterraines (ANRH 2012) .....	75
Tableau 26. Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote (ANRH 2012) .....	75
Tableau 27. Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore .....	75
Tableau 28. Evaluation des éléments toxiques et indésirables .....	75
Tableau 29. Matrice de corrélation pour la première campagne Novembre 2017.....	81
Tableau 30. Valeurs propres de la matrice de corrélation et statistiques associées ....	82
Tableau 31. Corrélation des variables avec les axes .....	83
Tableau 32. Matrice de corrélation de la deuxième campagne Avril 2018 .....	86
Tableau 33. Valeurs propres de la matrice de corrélation et statistiques associées ....	87
Tableau 34. Corrélation des variables avec les axes .....	88
Tableau 35. Convenance à l'irrigation des eaux des sources de la région selon la conductivité.....	90
Tableau 36. Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR. ....	93

## **Liste des abréviations**

- A.B.H : Agence des Bassins Hydrographique
- A.D.E : Algérienne Des Eaux
- A.E.P : Alimentation en Eau Potable
- A.N.A.T : Agence Nationale d'Aménagement du Territoire
- A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydriques
- B.N.E.F : Bureau Nationale des Etudes Forestières
- D.H.W : Direction d'Hydraulique de la Wilaya.
- D.P.A.T : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
- D.R.E : Direction des Ressources en Eau
- D.S.A : Direction des Services Agricoles
- IRR : Irrigation
- O.M.S : Organisation Mondiale de la Santé
- O.N.S : Office National des Statistiques
- P.M.H : Petite et Moyenne Hydraulique
- P.N.E : Plan National de l'Eau
- S.A.T : Superficie Agricole Totale.
- S.A.U : Surface Agricole Utilisée.
- STEP: Station d'épuration.
- W.H.O: World Health Organization

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction générale..... 1

## CHAPITRE I : CADRE GENERAL

I.1 Présentation de la région d'étude :..... 3

I.1.1 Situation géographique : ..... 3

I.2 Couvert végétal et occupation du sol : ..... 4

I.3 Morphologie :..... 4

I.4 Réseau hydrographique : ..... 6

I.4.1 L'importance de l'oued Medjerda dans la zone d'étude :..... 7

## CHAPITRE II : CADRE GEOLOGIQUE

Introduction..... 9

II.1 Cadre géologique régional :..... 9

II.1.1 Définition et organisation structurale des grandes unités :..... 9

II.1.1.1 Le domaine interne :..... 9

II.1.1.2 Le domaine des flyschs..... 10

II.1.1.3 Le domaine externe : ..... 11

II.1.2 Synthèse structurale de la chaîne des maghrébides ..... 12

II.1.2.1 La phase finie lutétienne ou phase atlasique (Priabonienne) : ..... 12

II.1.2.2 Les phases miocènes :..... 12

II.1.2.2.1 La phase burdigalienne :..... 12

II.1.2.2.2 La phase tortonienne : ..... 13

II.1.2.2.3 La période post- tectogénique Plio- Quaternaire : ..... 13

II.2 Environnement géologique dans la région de Souk Ahras :..... 13

II.2.1 Description lithostratigraphique des formations allochtones : ..... 14

II.2.1.1 La nappe numidienne :..... 14

II.2.1.2	La nappe tellienne :.....	14
II.2.2	Description lithostratigraphique des formations autochtones : .....	14
II.2.2.1	Le Paléozoïque : .....	14
II.2.2.2	Le Mésozoïque : .....	14
II.2.2.3	Le Cénozoïque :.....	16
II.3	Les structures de l'avant pays atlasique autochtone aux confins algéro-tunisiens : .....	18
	Conclusion.....	21
<b>CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE</b>		
	Introduction .....	22
III.1	Caractéristiques climatiques de la région d'étude :.....	22
III.2	Analyse des facteurs climatiques : .....	23
III.2.1	Les précipitations : .....	24
III.2.1.1	Les variations interannuelles : .....	24
III.2.1.2	Précipitations moyennes mensuelles :.....	24
III.2.1.3	Répartition saisonnière des précipitations :.....	25
III.2.1.3.1	Coefficient pluviométrique (H).....	26
III.2.2	La température : .....	27
III.2.2.1	Températures moyennes mensuelles :.....	28
III.2.3	Détermination des indices climatiques :.....	28
III.2.3.1	Indice d'aridité (A).....	28
III.2.3.2	Indice d'aridité d'Emberger :.....	29
III.2.4	Courbe ombrothermique ( $P = 2T$ ) :.....	30
III.2.5	L'humidité : .....	31
III.3	Notions d'évapotranspiration, lames d'eau et bilans : .....	32
III.3.1	L'évapotranspiration : .....	33
III.3.2	Méthode du bilan d'eau de C.W. Thornthwaite.....	34
III.3.3	Interprétation du bilan hydrique : .....	35
III.3.3.1	Estimation de l'écoulement .....	36
III.3.3.2	Estimation de l'infiltration .....	37
	Conclusion.....	37

## CHAPITRE IV : HYDROGEOLOGIE

Introduction .....	39
IV.1 Les principaux aquifères :.....	40
IV.1.1 L'aquifère du Mio-Pliocène continentale :.....	40
IV.1.2 L'aquifère du Miocène marin :.....	40
IV.1.3 L'aquifère de l'Eocène autochtone :.....	41
IV.1.4 L'aquifère du karst Maestrichtien :.....	41
IV.1.5 L'aquifère du karst Campanien :.....	41
IV.1.6 Les aquifères du Turonien et l'Aptien :.....	41
IV.1.7 L'aquifère profond thermal : .....	41
IV.2 Synclinal de Taoura :.....	41
IV.2.1 La nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre) :.....	41
IV.2.2 La nappe du calcaire Maestrichtiens (nappe captive) :.....	42
Conclusion .....	46

## CHAPITRE V : GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Introduction.....	47
V.1 Estimation des ressources :.....	47
V.1.1 Forages :.....	47
V.1.2 Les sources : .....	49
V.1.3 Les puits :.....	49
V.2 Evolution de la population dans la région d'étude :.....	50
V.2.1 Estimation des besoins en eau des agglomérations :.....	51
V.2.1.1 Estimation des besoins en eau actuels : .....	51
V.2.1.2 Évaluation des besoins futurs en eau potable :.....	51
V.2.2 Besoins en eau pour l'irrigation :.....	52
V.2.2.1 Estimation des besoins futurs des surfaces irriguées :.....	53

## CHAPITRE VI : HYDROCHIMIE

Introduction .....	55
VI.1 Matériels et méthodes :.....	55
VI.2 Résultats et interprétations :.....	57

VI.2.1	Mesures in situ : .....	57
VI.2.1.1	La température T (°C) : .....	57
VI.2.1.2	Le potentiel d'hydrogène pH : .....	57
VI.2.1.3	Conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) : .....	59
VI.2.1.4	Total des sels dissous : .....	60
VI.2.1.5	L'Oxygène dissous (mg/l) : .....	61
VI.2.2	Paramètres chimiques mesurés au laboratoire : .....	61
VI.2.2.1	Les éléments majeurs : .....	62
VI.2.2.1.1	Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) : .....	62
VI.2.2.1.2	Magnésium $\text{Mg}^{2+}$ : .....	62
VI.2.2.1.3	Le potassium $\text{K}^{+}$ : .....	63
VI.2.2.1.4	Le Sodium $\text{Na}^{+}$ : .....	64
VI.2.2.1.5	Les chlorures $\text{Cl}^{-}$ : .....	64
VI.2.2.1.6	Les bicarbonates $\text{HCO}_3^{-}$ : .....	65
VI.2.2.1.7	Les sulfates $\text{SO}_4^{2-}$ : .....	66
VI.2.3	Détermination des faciès chimiques : .....	67
VI.2.4	Les paramètres de pollution : .....	69
VI.2.4.1	Les nitrates $\text{NO}_3^{-}$ : .....	69
VI.2.4.2	Les nitrites $\text{NO}_2^{-}$ : .....	70
VI.2.4.3	L'ammonium $\text{NH}_4^{+}$ : .....	71
VI.2.4.4	Phosphates $\text{PO}_4^{3-}$ : .....	72
VI.2.5	Éléments métalliques en traces : .....	72
VI.2.5.1	Le Fer : .....	72
VI.2.5.2	Le Zinc : .....	73
VI.3	Classification et interprétation de la qualité des eaux souterraines : .....	74
VI.3.1	Interprétation des résultats : .....	75
VI.3.1.1	Qualité minérale : .....	75
VI.3.1.2	Pollution par les nitrates, nitrites, ammonium et phosphates : .....	76
VI.3.1.3	Éléments métalliques en trace : .....	76
VI.4	Analyse en composante principale (ACP) : .....	80

VI.4.1	Première campagne (Novembre 2017) :.....	80
VI.4.1.1	Matrice de corrélation : .....	80
VI.4.1.2	Analyse factorielle : .....	82
VI.4.1.3	Etude des variables :.....	83
VI.4.1.4	Cercles de corrélations et représentation des individus : .....	84
VI.4.2	Deuxième campagne Avril 2018 : .....	85
VI.4.2.1	Matrice de corrélation : .....	85
VI.4.2.2	Analyse factorielle : .....	87
VI.4.2.3	Etude des variables :.....	88
VI.4.2.4	Cercles de corrélation et représentation des individus :.....	88
VI.5	Aptitude des eaux à l'irrigation :.....	90
VI.5.1	Risque de salinité : .....	90
VI.5.2	Le risque de sodicité :.....	91
VI.5.3	L'indice d'adsorption du Sodium (SAR) :.....	91
VI.5.4	Diagramme de Wilcox : .....	93
	Conclusion.....	95
	Conclusion générale.....	96
	Références bibliographiques .....	99





### **Introduction générale**

Le caractère essentiel de l'eau qu'elle soit toujours l'objet d'une attention particulière de la part des humains. Dans le milieu rural de Taoura, les périodes de sécheresse des dernières années furent durement ressenties par les populations. Les eaux de sources captées dans ces zones ont certes soulagé les souffrances des populations locales.

Cependant des décennies après, suite à la croissance démographique qui entraîne une augmentation des besoins en eau et des exploitations agricoles, on s'inquiète de la satisfaction durable de ces besoins en eau autour de ces sources.

La région de Taoura est formée par des formations carbonatées généralement karstifiées, elle présente plusieurs horizons aquifères et renferme dans son sous-sol un potentiel hydrique assez important.

Pour mieux suivre l'évolution de la qualité des eaux de sources de la région de Taoura, leurs compositions physico-chimiques, ainsi que les questions d'ordre environnemental, à savoir la présence de polluants et leurs origines. Une étude de la qualité des eaux souterraines a été réalisée. L'approche hydrochimique engagée repose sur deux campagnes de prélèvements qui ont été effectuées dans le cadre de ce travail, la première a été effectuée dans la période de novembre 2017, et l'autre a été réalisée dans la période d'avril 2018.

Il ressort que ces points d'eaux sont considérés par les utilisateurs comme une ressource à accès libre et exempte de tout contrôle. Les sources d'eaux sont de ce fait la zone de promouvoir tout type d'activités et de demandes en eau. L'irrigation, le maraîchage, l'abreuvement du bétail, les usages domestiques, la construction, etc. sont les multiples sollicitations de la ressource qui génèrent des retombées économiques et sociales considérables pour les localités avoisinantes. Cet état de fait provoque une exploitation anarchique des ouvrages entravant alors leur pérennité et compromettant leur durabilité.

Ainsi, ce manuscrit s'articule en six chapitres :

- Le premier chapitre consacré au cadre général de la région d'étude, caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques.

## INTRODUCTION GENERALE

- Le deuxième chapitre présente un aperçu de la géologie régionale et structurale de la région, basée essentiellement sur la synthèse des travaux antérieurs réalisés dans la zone d'étude.
- Le troisième chapitre a été consacré à l'étude hydroclimatique afin de déterminer les facteurs climatiques qui influent sur les débits instantanés et sur l'alimentation des aquifères.
- Le quatrième chapitre a été dédié à l'étude hydrogéologique pour identifier et présenter les différents ensembles aquifères et localiser les principales zones d'alimentation de l'aquifère.
- Le cinquième chapitre traite les données recueillies pour évaluer les apports en eau au niveau de la zone d'étude en traitant les aspects quantitatifs des ressources en eaux superficielles et souterraines existantes.
- Le sixième chapitre, objet principal de ce travail, a été dédié à l'étude hydrochimique en se basant sur l'interprétation des paramètres physico-chimiques, les paramètres de pollution ainsi que l'analyse en composante principale dans le but de déterminer la qualité des eaux de sources.
- Une conclusion générale a été élaborée comme synthèse de tous les résultats obtenus.

## I.1 Présentation de la région d'étude :

### I.1.1 Situation géographique :

La région étudiée fait partie de la zone orientale du sous bassin versant de la Medjerda situé à l'Est Algérien, elle se situe à l'extrême Nord-Est Algérien : aux confins Algéro-tunisiens. Elle se trouve à 140 km au Sud-Est de la ville d'Annaba et à 200 km à l'Est de Constantine.

Le territoire de la Wilaya de Souk-Ahras constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts : L'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud. La zone de Taoura appartient aux monts de la Medjerda. Elle se trouve entre deux grands Oueds : l'Oued Medjerda au Nord et l'Oued Mellegue au Sud (Figure 1).

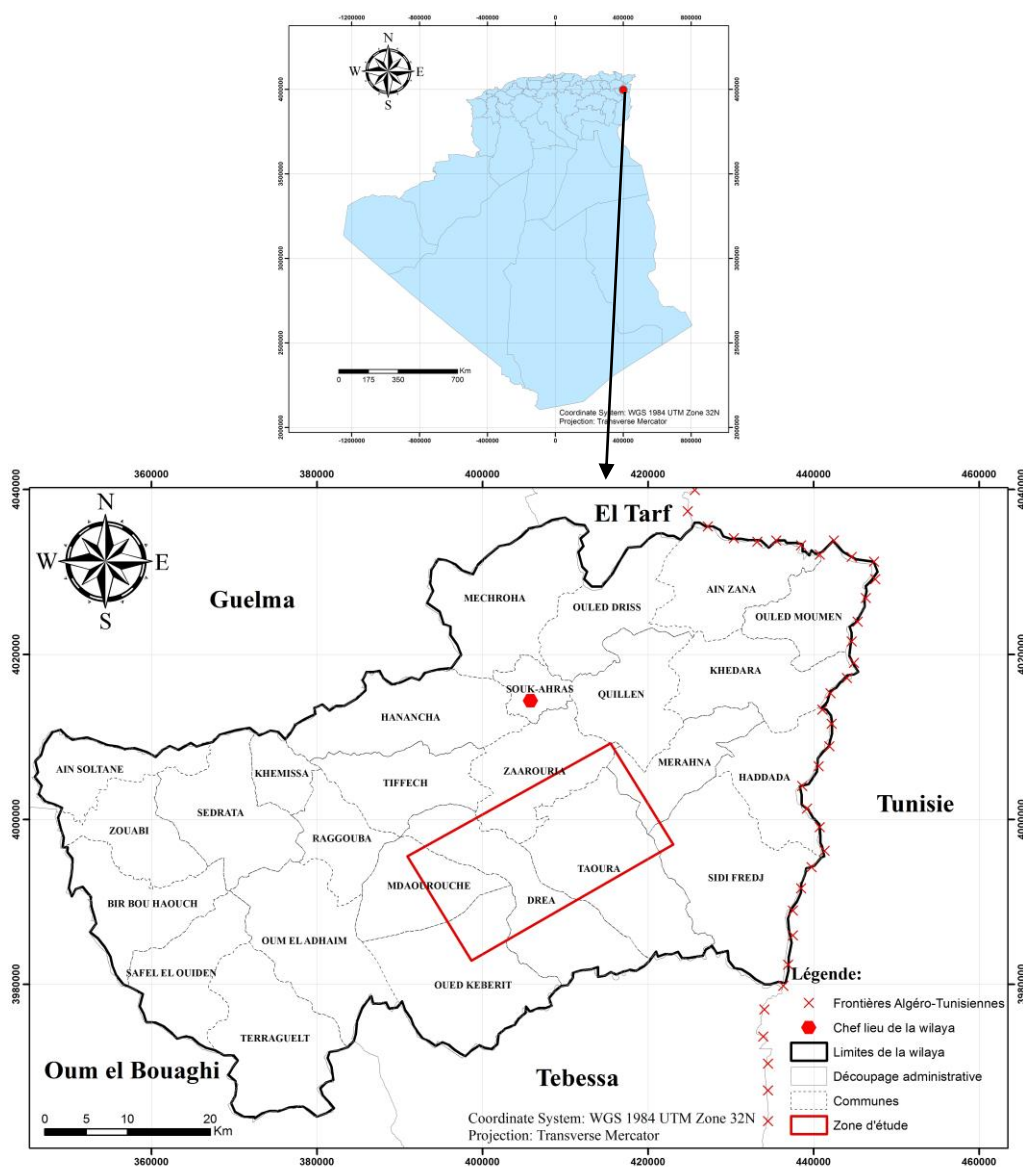


Figure 1. Situation géographique de la région d'étude (Bouhafs, 2019)

### I.2 Couvert végétal et occupation du sol :

Dans la partie septentrionale, les forêts de pins d'Alep, Chêne liège et Eucalyptus dominant, ils constituent un patrimoine forestier intéressant. La wilaya de Souk Ahras renferme une couverture forestière de 114341.03 hectares soit 44.41 % de la superficie totale (Djaba, 2010). Les cultures céréales sont localisées sur les formations marneuses dans la partie médiane de la région d'étude. Au Sud, la végétation change brusquement, les zones caillouteuses et croûtes calcaires sont couverts de diss et de halfa : végétation de type steppique. Au Nord de la région de M'Daourouch se trouvent des pinèdes, sous-bois et maquis (Kriviakine et al.1989). Avec une superficie agricole utilisée de 141871 hectares, qui représente 86 % de la superficie agricole totale de la wilaya, 62% sont occupés par des cultures herbacées (Djaba, 2010), ces cultures se répartissent comme suit : 87% sont des céréales, 10% : cultures fourragères, 2% : maraichages et 1% sont des légumes secs.

La wilaya de Souk Ahras est à vocation agricole. L'essentiel de la population est occupée dans l'agriculture. Dans la zone d'étude, les localités agricoles les plus importantes sont M'Daourouch, Dréa, Zaarouria et Taoura.

### I.3 Morphologie :

La région de Souk Ahras-Taoura appartient à deux grandes régions naturelles : au Nord, les montagnes du Tell représentées par les monts de la Haute Medjerda et au Sud, la terminaison Nord de l'atlas Saharien des confins algéro-tunisiens.

La partie septentrionale est représentée ici par le versant Sud des monts de la Haute Medjerda où culminent des sommets de plus de 1200m d'altitude comme djebel Boubakouch.

Le Nord de l'atlas Saharien est constitué d'une importante chaîne montagneuse de direction Nord- est, Sud- ouest qui s'étend au-delà de la frontière algéro-tunisienne (Figure 2), au sein de laquelle court la rivière de la Medjerda et ses affluents. Les plaines les plus méridionales sont parcourues par les affluents tributaires d'oued Mellègue.

La géomorphologie de l'aire d'étude est très variée on y distingue quatre zones différentes :

- Le Nord de Souk Ahras très accidenté où le Trias a contribué à la formation d'une topographie confuse d'où les grandes lignes sont absentes (Kriviakine et al. 1989), cette zone fait partie exclusivement de l'atlas Tellien.

## CADRE GENERAL

- La chaîne montagneuse de direction Nord-est, Sud -ouest, les anticlinaux, à haute altitude, se répartissent selon deux couloirs ; Zellez (1114 m), Zarouria (1112 m), Ragouba (1129 m), Bourzine (1084 m) et parallèlement au sud les djebels Boussessou (1087 m), Baba Embarek (1089 m), Allahoum (1125 m), et Choucha (998 m). Ces vastes plis constituent la terminaison de l'atlas Saharien aux confins algéro-tunisiens. Ils sont constitués par des carbonates fissurés et karstifiés (lapiez, grottes, gouffres).
- Les anticlinaux sont séparés par des zones de dépression (zone des hautes plaines) structurant les synclinaux de Madaure avec une altitude moyenne de (800 m), M'rahna (600 à 700 m) et le spectaculaire fossé d'effondrement de Taoura.
- La zone la plus méridionale constituée de vastes plaines d'altitudes (400 à 500 m) appartenant purement à l'atlas Saharien, le relief est pratiquement plat, (Figure 2).

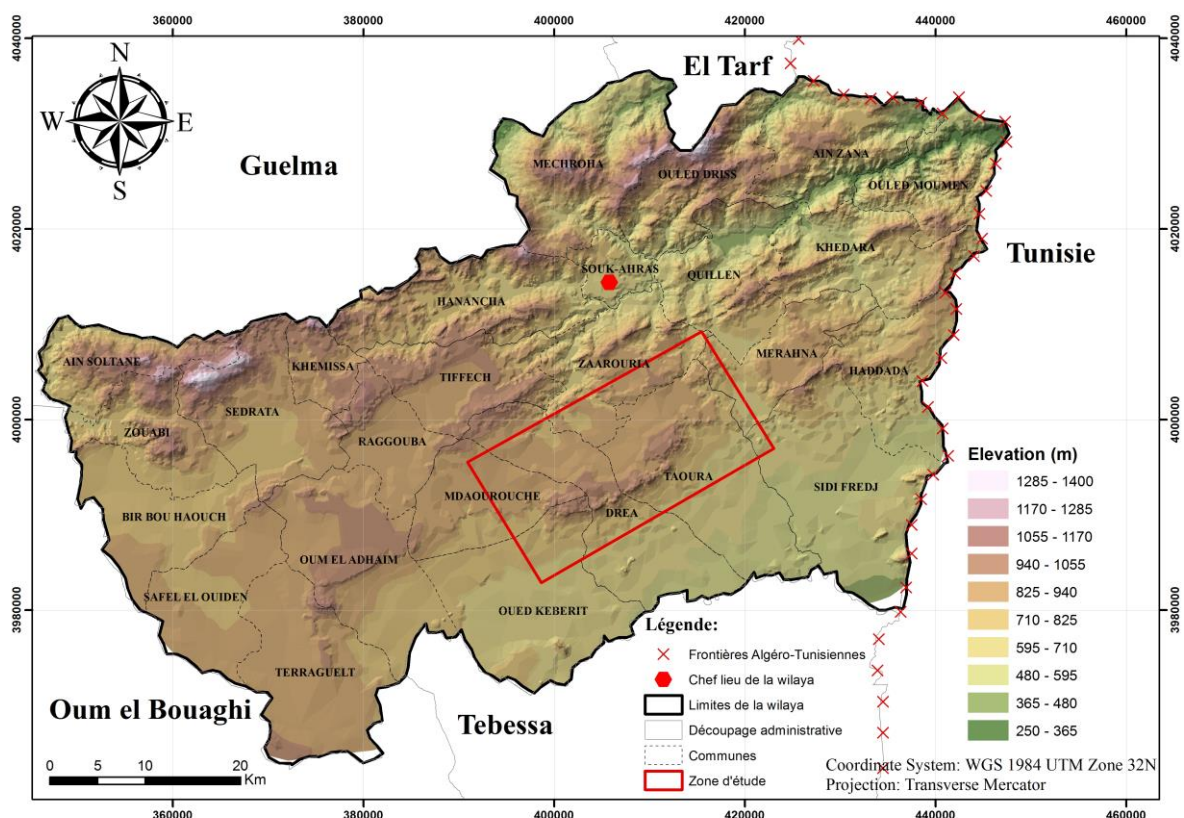


Figure 2. Carte des reliefs de la wilaya de Souk-Ahras (Bouhafs, 2019)



#### I.4 Réseau hydrographique :

La zone de Souk Ahras-Taoura appartient au bassin versant de Medjerda-Mellègue. Le réseau hydrographique est dense au nord du bassin, il est drainé par l'oued Medjerda de longueur 106.16 km en Algérie avec un apport moyen de 139 hm<sup>3</sup>/an (ABH, 2005), il traverse la Tunisie sur près de 300 km et débouche ensuite en mer méditerranée. Plusieurs de ses affluents sont permanents (Figure 3) (oued Hammam près de Taoura de longueurs 30 km, oued El Chouk près de Zarouria avec 12.3 km, oued El Berrich 15 km ainsi que d'autres) ; ils sont soutenus par des sources souterraines.

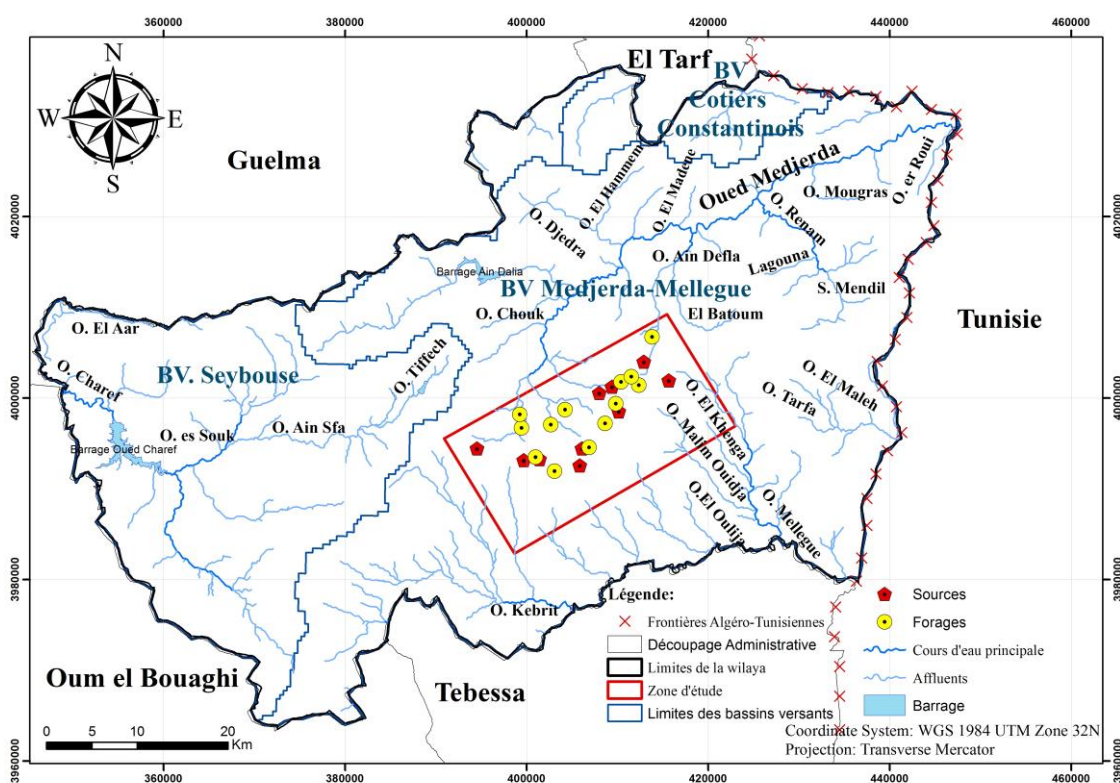


Figure 3. Carte du réseau hydrographique de la région d'étude (Bouhafs 2019)

Notons que l'oued Medjerda draine un potentiel en eau important ; le barrage Ain Dalia à l'Ouest de Souk Ahras bénéficie de 47.5 hm<sup>3</sup>/an (ABH, 2005).

L'étude du profil en long de l'oued Medjerda montre des ruptures de pente :

(BNEF, 1988 in Guasmi, 2005), d'après le Bureau nationale des études forestières :

- La première importante rupture est observée à l'altitude de 800 m (près du Barrage Ain Dalia).

## CADRE GENERAL

- La deuxième est observée à l'altitude 700 m, où la pente est accentuée faisant accélérer l'écoulement en donnant naissance à un régime défavorisant l'infiltration.
- La troisième à l'altitude de 500 m, qui se stabilise et donne l'occasion à l'eau de s'infiltrer (entre les régions de Souk Ahras et Oued Mougras, en Algérie).
- La quatrième à l'altitude de 300 m, c'est la plus importante, car elle s'étend sur une longue distance. (Cette dernière rupture débute à une dizaine de kilomètres avant la frontière Algéro-tunisienne et se poursuit en Tunisie).

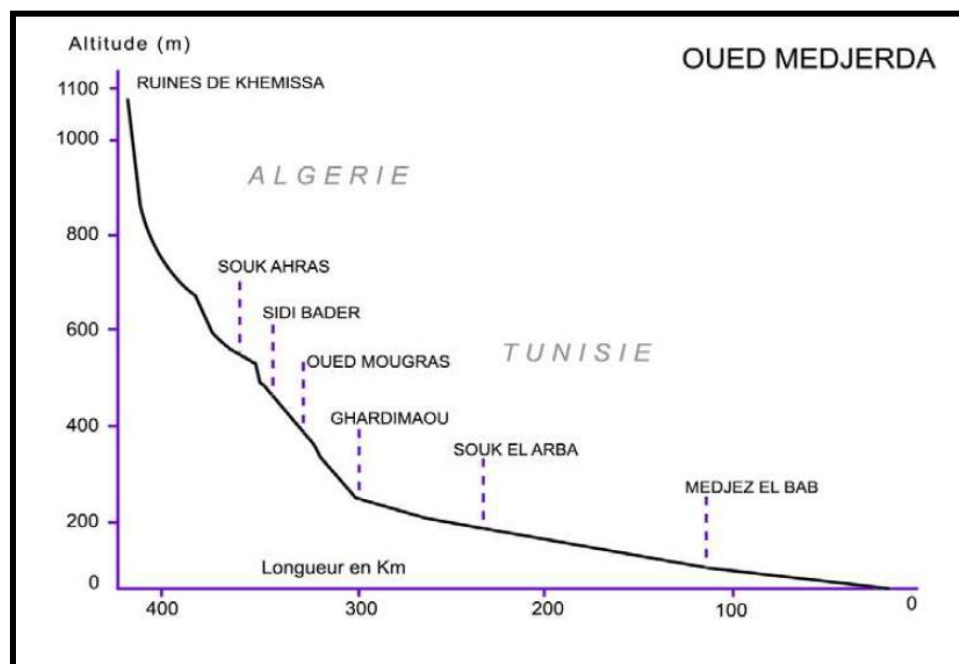


Figure 4. Profil en long de l'oued Medjerda en Algérie et en Tunisie. D'après (Gautier E-F, 1910 in Mebarki, 2005)

### I.4.1 L'importance de l'oued Medjerda dans la zone d'étude :

La partie amont de l'oued Medjerda est utilisée comme source d'alimentation en eau potable et sa partie aval est un milieu récepteur des eaux usées épurées par la STEP (Ville de Souk-Ahras) et des eaux épurées naturellement qui sont utilisées pour irriguer les grands périmètres de Sidi Bader (Ouillen) et Derdoura (Zaarouria).

On peut définir Oued Medjerda comme le poumon de la ville de Souk-Ahras, il joue plusieurs rôles :

- Principale source d'alimentation en eau potable en amont de la ville (Barrage de Ain Dalia).
- Utilisé dans l'industrie et l'agriculture.



## CADRE GENERAL

- Milieu récepteur : Tout les rejets se font dans oued Medjerda soit par la STEP ou directement.
- Bassin qui permet d'améliorer et d'étendre les périmètres d'irrigation par l'utilisation de ses eaux (Zaarouria, Sidi Bader, Sidi Hemissi). ([Rouibia. 2010](#))

### **Introduction**

La géologie régionale consiste en un ensemble de formations structuré au long de l'orogénèse des chaînes tello-rifaines ou maghrébides, lors de l'édifice alpin. En conséquences, dans la région de Souk Ahras, les formations d'âges Mésozoïque et Cénozoïque ont subi les effets des phases tectoniques en succession.

La région de Souk Ahras, comprend au Nord des terrains allochtones composés d'unités du domaine interne, du domaine des flyschs et du domaine externe ; au Sud et à l'Est, jusqu'aux confins Algéro-Tunisiens, affleure un ensemble intensément plissé et fracturé de l'avant pays atlasique.

La zone à l'étude hydrogéologique se situe dans les monts méridionaux de Souk Ahras, aux confins Est Algéro-Tunisiens. (Figure 5)

### **II.1 Cadre géologique régional :**

En contexte régional, une synthèse des travaux de différents auteurs, plus particulièrement [Vila \(1980\)](#) et [Wildi \(1983\)](#), permettra de cadrer les effets de la structuration alpine en Algérie Nord orientale ; le site d'étude étant à l'extrême Est Algérien.

#### **II.1.1 Définition et organisation structurale des grandes unités :**

##### **II.1.1.1 Le domaine interne :**

Le domaine interne comprend le socle et sa couverture sédimentaire, à termes paléozoïques (Ordovicien–Carbonifère), et à niveaux carbonatés mésozoïques et cénozoïques (Trias–Eocène) composant la dorsale kabyle.

Les séries mésozoïques-éocènes ont été désolidarisées de leur substratum plus ou moins métamorphisé et plissées. Les dépôts éocènes supérieurs reposent en discordance sur les premiers chevauchements.

En Algérie orientale, le domaine interne compose les reliefs littoraux bordés par les unités (discontinues) de la dorsale kabyle ayant subi un mouvement Nord-Sud.

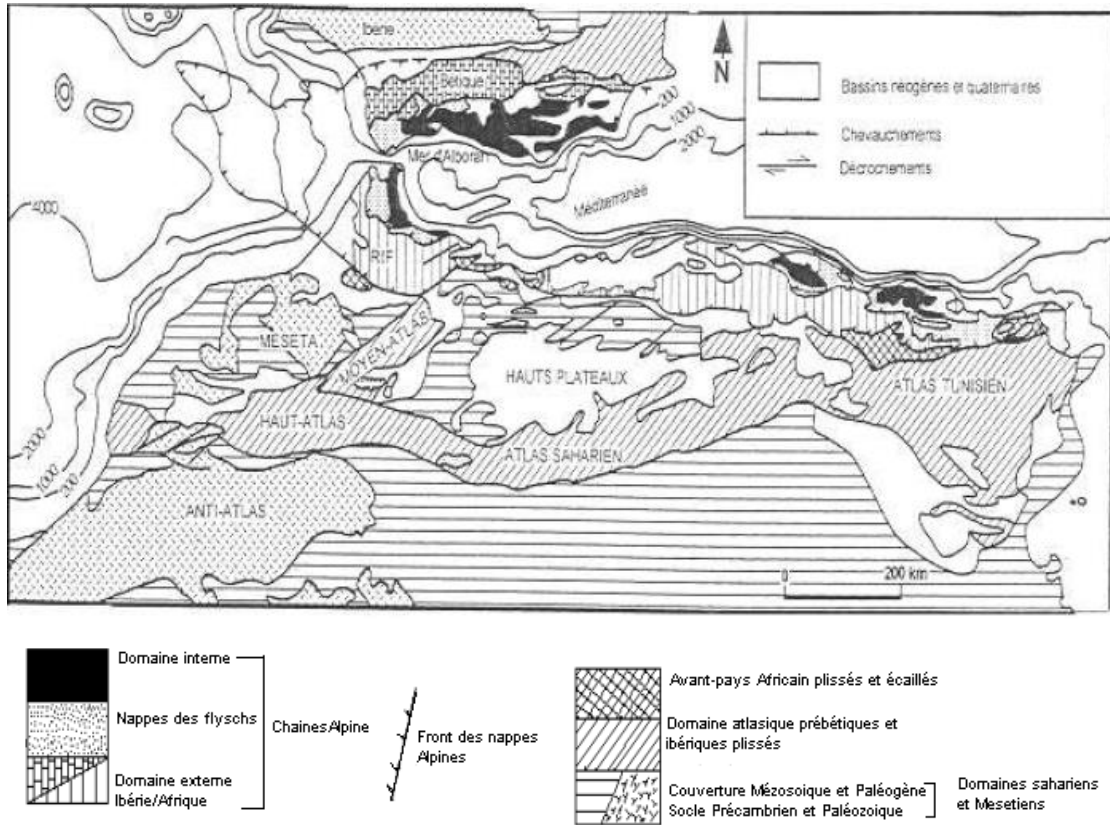


Figure 5. Cadre structural africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine (d'après W. Wildi, 1983).

### II.1.1.2 Le domaine des flyschs

Un vaste sillon à sédimentation turbiditique (Bouillin, 1986), déposée au long du Crétacé inférieur à l'Oligo-Miocène.

- Les flyschs maurétanien et massylien
- Les flyschs maurétanien (Gélard, 1979) et massylien (Raoult, 1964) consistent en des turbidités respectivement, proximales et distales déposées du Crétacé inférieur à l'Eocène. De l'Eocène supérieur à l'Oligocène, un flysch grèsomicacé succède aux flyschs terrigènes de la série maurétanienne.
- Le flyschs numidien

Les séries gréseuses et pélitiques du flysch numidien ont été déposées en discordance en partie sur les flyschs massylien, et plus au Sud. Au cours de la phase compressive du Miocène supérieur et par la suite lors des phases néotectoniques, ces séries, plus ou moins plissées et faillées, se trouvent en position structurale élevée. Les unités numidiennes ont été déplacées soit vers le Nord sur les zones kabyles, soit vers le Sud sur la zone tellienne externe et l'avant pays.

### II.1.1.3 Le domaine externe :

En Algérie orientale, le domaine externe comprend les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone ou parautochtone, et les séries de l'avant pays atlasique autochtone.

- ❖ Les séries telliennes : « *elles ont été découpées par les phases tertiaires en trois grandes entités, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène, et de l'Eocène* » (Wildi, 1983).

On distingue du nord au sud (Vila, 1980) :

- Les unités ultra-telliennes à composition marno-calcaires claires typiques du Crétacé inférieur ;
- Les unités telliennes (au sens strict) à dépôts terrigènes au crétacé inférieur ; du Crétacé supérieur à l'Eocène la sédimentation détritique comprend quelques intercalations carbonatées à affinité néritique ;
- Les unités péni-telliennes désignent des séries présentant du Lias au Sénonien supérieur des alternances de faciès telliens et de faciès néritiques. Les formations éocènes riches en nummulites, constituant la couverture de ces séries, composent les unités méridionales à Nummulites.
- ❖ Les séries de l'avant pays allochtone et parautochtone ont été regroupées en trois grands ensembles : une «organisation sétifienne», une «organisation constantinoise», une «organisation algéro-tunisienne » (Vila, 1980).
- L'organisation constantinoise regroupe les séries néritiques au Nord, et les séries des sellaoua au Sud à sédimentation terrigène. Les séries néritiques, épaisse formation carbonatée mésozoïque (plate-forme), faiblement déplacée, chevauchent les écailles des sellaoua et les unités Sud-sétifiennes. Cet ensemble de formations a été plissé par la phase éocène supérieure.
- L'organisation Sétifienne de plate-forme subsidente, constitue l'ensemble allochtone sud-sétifien. Les unités sont composées de carbonates mésozoïques à intercalations pélagiques à affinité tellienne. À l'Est, les séries sud-sétifiennes s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlasiques. Les déformations sont analogues à celles des séries constantinoises.
- L'organisation algéro-tunisienne regroupe les confins algéro-tunisiens et la Tunisie septentrionale. Elle concerne les avants pays à faciès de sillon plissés

et écaillés. Les structures plissées sont rapportées à la phase éocène supérieure. Les plis de grande courbure sont parfois injectés de diapirs d'évaporites triasiques qui auraient joué de façon discontinue depuis le Barrémien. Les écaillages et les chevauchements se seraient formés au Tortonien.

- ❖ L'avant pays atlastique autochtone comprend « *les monts du Hodna et du Belezma, le Nord des Aurès, les hautes plaines d'Oum El Bouaghi et d'Ain Beida, les monts de Souk Ahras et plus au Sud les Djebels Ouasta, Ouenza, Boukhadra, Mesloula* » (Vila, 1980) injectés de diapirs. L'avant pays se distingue par des séries mésozoïques très épaisses de plate-forme subsidente, à intercalations gréseuses, cependant, entre le Berriasien et l'Albien (Busson, 1972 ; Guiraud, 1973 ; Delfaud, 1974 ; Vila, 1980).

### II.1.2 Synthèse structurale de la chaîne des maghrébides

A la période préectogénique, au Trias succèdent les phases tectoniques tertiaires au cours desquelles les maghrébides ont été structurées.

#### II.1.2.1 La phase finie lutétienne ou phase atlasique (Priabonienne) :

Marque la fin du cycle sédimentaire. Cette phase a débuté dès le trias supérieur par des manifestations tectoniques locales de faible incidence sur la sédimentation (Obert et Leiken, 1974 in Chadi, 2004). Cette phase à caractère compressif est expliquée par la fermeture de la Téthys occidentale lors de la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge Africaine tellienne.

Cette phase est associée à des accidents verticaux de direction NE-SW.

#### II.1.2.2 Les phases miocènes :

Ces phases marquent la fin de l'édifice du tell par une compression généralisée des structures

##### II.1.2.2.1 La phase burdigalienne :

Elle caractérise le début du raccourcissement nord-sud. La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'ouest, pour entrer en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin nord algérien. Les effets tectoniques étant :

- L'avancée de la nappe numidiennne vers le sud et la formation d'olistostomes kabyles dans une dépression septentrionale ;

## CADRE GEOLOGIQUE

- Un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional où s'étaient antérieurement empilées les unités de flyschs sur les nappes telliennes au Priabonien ;
- Des structures plissées au Sud du domaine kabyle.

### **II.1.2.2.2 La phase tortonienne :**

À la fin Miocène inférieur et au début Miocène moyen, des bras de mer envahissent des golfes de la partie septentrionale des chaînes algérienne. Dans les Babors, les premiers sédiments marins post nappes se déposent. Outre cette transgression, il y eut une phase volcanique calco– alcaline et un plutonisme ayant mis en place les intrusions granitiques en grande Kabylie, dans les Babor et en petite Kabylie. Les datations radon métriques y indiquent des âges 12 à 16 MA, correspondant au Langhien-Tortonien basal (Benabbes, 2006).

Au Miocène supérieur basal, la phase tortonienne se poursuit par un vaste raccourcissement nord-sud et l'écrasement des structures par rapprochement des bordures, cette tectonique a eu pour effets des chevauchements vers le sud des unités méridionales, sud-sétifiennes et des écailles des Sellaoua, impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur. En Algérie extrême orientale, cette phase à caractère tangentiel, a provoqué des écaillages et des structures à tête plongeante.

### **II.1.2.2.3 La période post- tectogénique Plio- Quaternaire :**

La période post–tectonique s'étend en fait du Miocène supérieur au Plio–Quaternaire et fait l'objet de l'histoire néotectonique référant à échelle globale aux mouvements des plaques (Ibérie, Afrique) et de l'ouverture de la mer d'Alboran.

Dans le cadre de ce travail on se limitera, à échelle ponctuelle, aux effets, tels que les mouvements compressifs et distensifs et le rejet des grandes structures occasionnant des effondrements.

## **II.2 Environnement géologique dans la région de Souk Ahras :**

Ainsi qu'il a été présenté en introduction, la région de Souk Ahras est fortement tectonisée. Cette région qui se situe aux confins Algéro–tunisiens comprend du Nord au Sud des unités de flyschs numidiens, des unités telliennes, des unités parautochtones et l'autochtone atlasique injecté de diapirs évaporitiques triasiques. Le bassin Taoura se trouve entre les reliefs des flyschs numidiens, bordé au sud par l'autochtone atlasique.

### II.2.1 Description lithostratigraphique des formations allochtones :

#### II.2.1.1 La nappe numidienne :

Elle limite la partie septentrionale du bassin d'étude. Les formations numidiennes comprennent :

- À l'oligocène supérieur-miocène inférieur des grès quartzeux de patine rousse et argile grise ;
- À l'oligocène inférieur et moyen des argiles verdâtres.

#### II.2.1.2 La nappe tellienne :

Elle est très peu présente. Elle se trouve à l'Est de Souk Ahras et au Sud de l'Oued Medjerda. Constituant le Djebel Boukebch.

Elle comprend :

- À l'éocène inférieur et moyen des marnes argileuses noires à rognons calcaires jaunes ;
- L'éocène supérieur est composé de calcaire bitumineux noirs et bruns à globigérines, et des marno-calcaires noirs ;
- Le Paléocène à marnes argileuses noires et à marno-calcaires noirs à patine gris claire affleure au Nord de l'Oued Medjerda.

### II.2.2 Description lithostratigraphique des formations autochtones :

Ces formations constituent la majeure partie des terrains de la région d'étude.

#### II.2.2.1 Le Paléozoïque :

Le Permo-Carbonifère à grès micacés versicolores riche en calamites, et argilites constituent les terrains les plus anciens du secteur Taoura. Son extension est très réduite (01 km<sup>2</sup>), il affleure à 3 km au Sud de la ville de Souk Ahras, aux niveaux de l'Oued Medjerda et de Koudiet Hammouda (Oued Mougras).

#### II.2.2.2 Le Mésozoïque :

- *Le Trias* affleure à la faveur des structures diapiriques de Souk Ahras, de M'Daourouch de Oued Mougras, et de Taoura. La particularité des terrains triasiques, intensément déformés et broyés, est l'hétérogénéité de leur composition. C'est une brèche tectonique, dite « mélange », constituée d'éléments, de blocs calcaires, de grès, de dolomies, le tout cimenté par une matrice grésogypso-argileuse contenant de menus fragmentés de ces mêmes roches.

## CADRE GEOLOGIQUE

- *Le Crétacé inférieur–Cénomanién* Composé de marnes, calcaires et de grès ; l’Aptien affleure à l’extrémité Nord-Est (au Sud de l’Oued Medjerda) du secteur d’étude. Ces terrains constituent les monts Sidi-Ameur et Ras El Guema.
- Des marnes, des siltstones et des calcaires marneux composent l’Albo–Cénomanién. Cette formation affleure à l’extrême Nord-Est près de la frontière au niveau de Koudiet El Hemimib, l’épaisseur du Cénomanién est autour de 900 m.
- *Le Crétacé supérieur (Turonien–Sénonien)*
  - Le Turonien à calcaires et marnes constitue Koudiet Henchir El louz, et Koudiet El Msala à Oued Mougras. Ces formations n’affleurent pas à Souk Ahras et à M’Daourouch ; au Sud de Taoura elles constituent les monts Sraccif Messaouda, Sahaba et Ouasta.
  - Le Sénonien est marno-calcaire
- Dans le Nord-Est, aux confins Algéro–Tunisiens le Coniacien est à composition marneuse, marno-calcaire et calcaire-marneux.
- Sous forme de pointements isolés, affleurent les calcaires et marnes du Santonien inférieur.
- Les Djebles El Oglâ, Baba Embarek, Zellez, Kef El Louz comprennent les formations Santonien supérieur et Campanien inférieur caractérisées par des marnes argileuses à intercalations calcaires.
- Le campanien supérieur est constitué d’un terme inférieur, à calcaires gris clair contenant quelque inter lits de marne d’épaisseur 80 à 100 m. Le terme supérieur d’épaisseur 50 à 70 m, est composé de marnes intercalées dans des bancs calcaires. Le terme inférieur campanien supérieur constitue les reliefs les plus élevés et les plus tirés ; ils affleurent sur les flancs Sud escarpés des Djebles, Boussessou, Oglâ, Baba Embarek. Des pointements isolés s’observent le long des Oueds Hammam, Boudrhis, Guelib Hachem, et apparaissent aux Djebles Serou et Cherif.
- Le Maestrichtien affleure en quelques points isolés, constituant conjointement avec le campanien supérieur les parties les plus hautes et les plus étendues des reliefs en cuesta. Aussi, les sédiments maestrichtiens constituent la ligne de crête des falaises présentant une pente douce.



## CADRE GEOLOGIQUE

Le terme inférieur maestrichtien comprend des calcaires crayeux et des calcaires à rares passées de marnes ; la puissance de cet ensemble atteint 200 à 250 m. Le terme supérieur, d'épaisseur 100 à 140 m, est composé de marnes et de calcaire marneux.

### II.2.2.3 Le Cénozoïque :

- Le paléocène de puissance 80 à 200 m, est marno-calcaire. Il affleure au Sud-Est de M'Daourouch, aux Djebels Sessou, Ain Hallouf, Meharès et Ogla.
- L'Eocène comprend des marnes calcaires et des lumachelles du Priabonien, surmontés de calcaires nummulitiques et de marnes d'âge Yprésien–Lutécien. D'épaisseur modeste (25 à 30 m), ces dépôts affleurent essentiellement au Nord-Est de Taoura.
- Le Miocène dans l'ensemble continental, constitue une puissante série atteignant 700 à 1200 m et occupe des surfaces assez importantes.
- Le Miocène inférieur et moyen comprend des grès, conglomérats, des marnes et des argilites.
- Le Miocène moyen et supérieur contient des dépôts indifférenciés ou hétérogènes, tels que ; marnes, agriles, grès, gravélites, et grès glauconieux.
- Le Pliocène affleure au nord et au Nord-est de la ville de Taoura. Il est constitué d'argiles rouges, grès, poudingue, marnes et calcaires lacustres. Ces dépôts sont surmontés de marnes argileuses, conglomérats, gravélites.
- Des conglomérats intercalés de grès et de roches argileuses ont été déposés au Plio-quadernaire (Villafranchien).

## CADRE GEOLOGIQUE

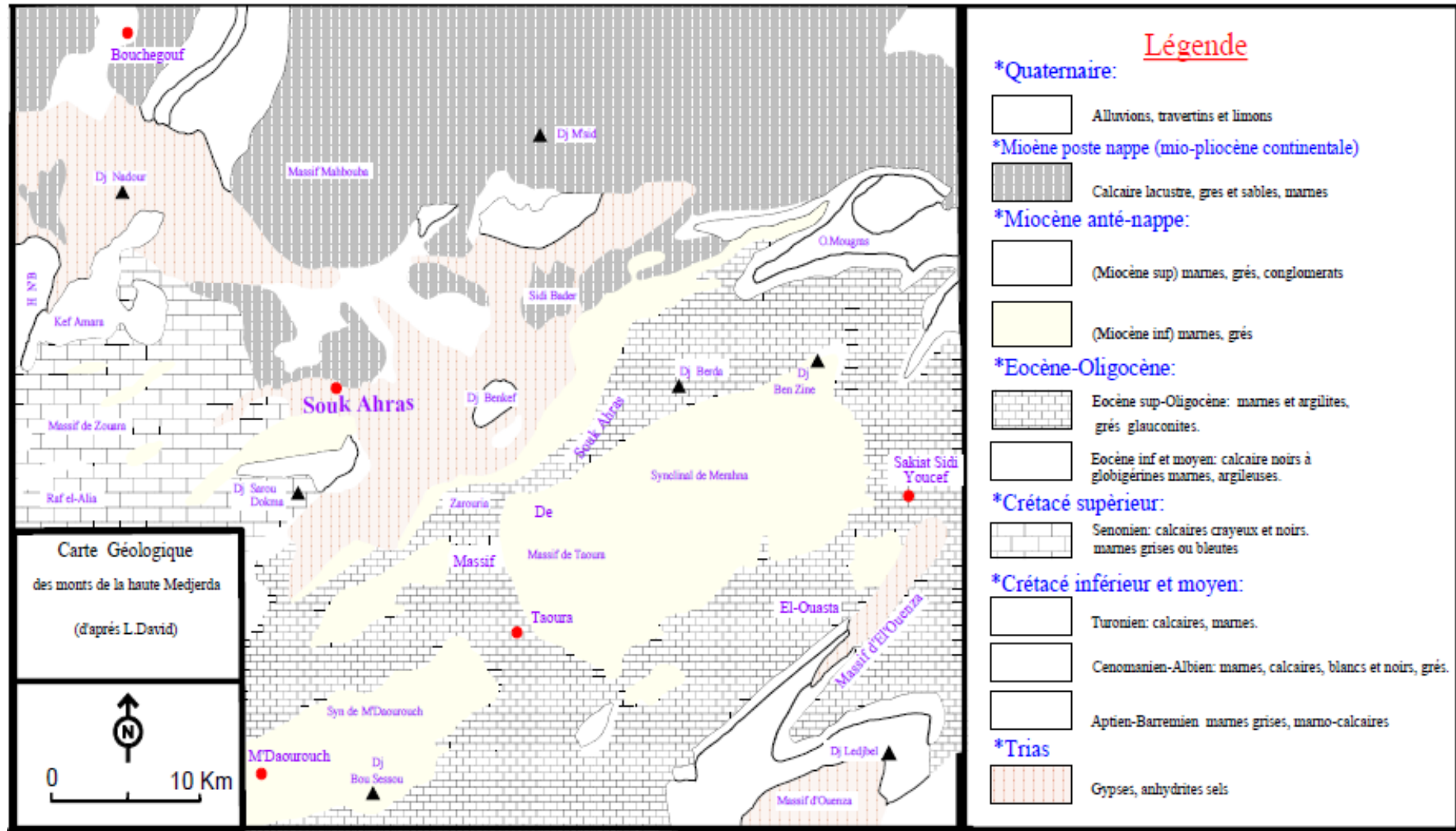


Figure 6. Carte géologique de la zone d'étude (D'après David. L., 1956) (Djaba, H 2010)

### II.3 Les structures de l'avant pays atlasique autochtone aux confins algéro-tunisiens :

Du fait de sa situation structurale dans l'édifice tellien, voire bordure méridionale, l'avant pays atlasique autochtone comprend des plis à grande courbure et des structures cassantes d'envergure variable.

Les éléments tectoniques régionaux étant : le sillon Aurés-Kef (Tunisie) et l'accident majeur Batna–Souk Ahras dont un rameau Nord-Est constitue la faille de Medjerda.

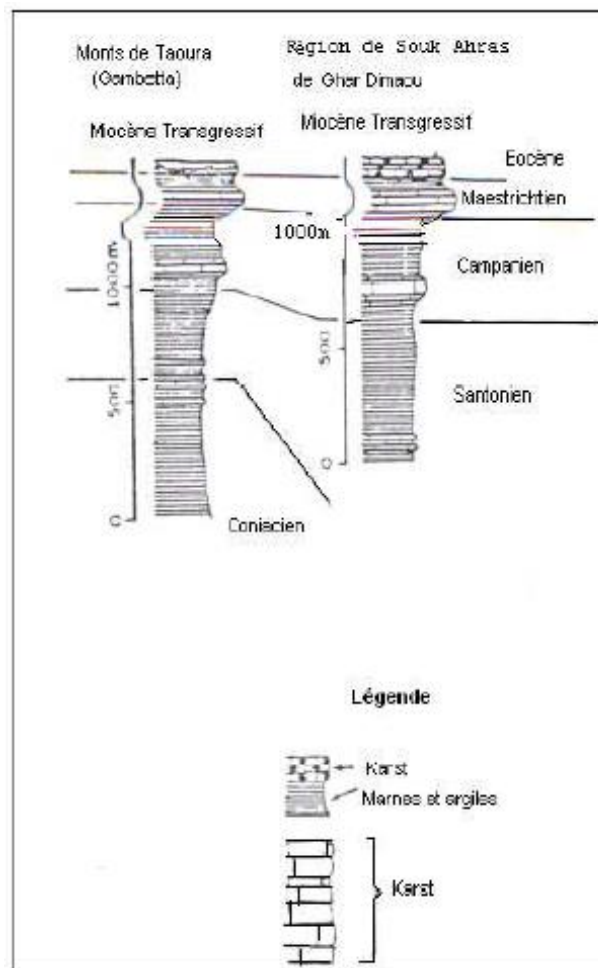


Figure 7. Colonnes stratigraphiques région de Taoura (David, 1957).

## CADRE GEOLOGIQUE

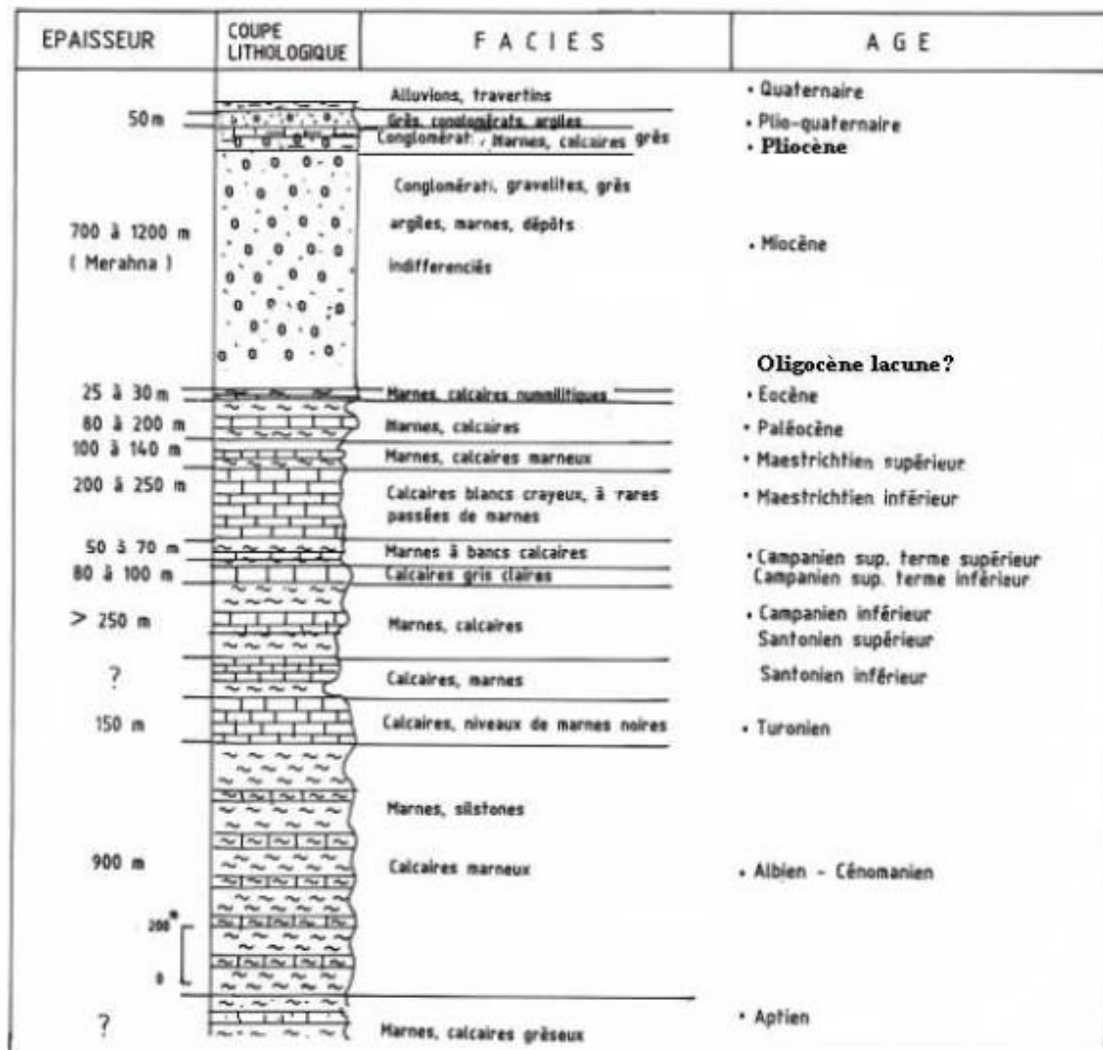


Figure 8. Log lithostratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes géologiques de M'Daourouch et Taoura au 1/50000.

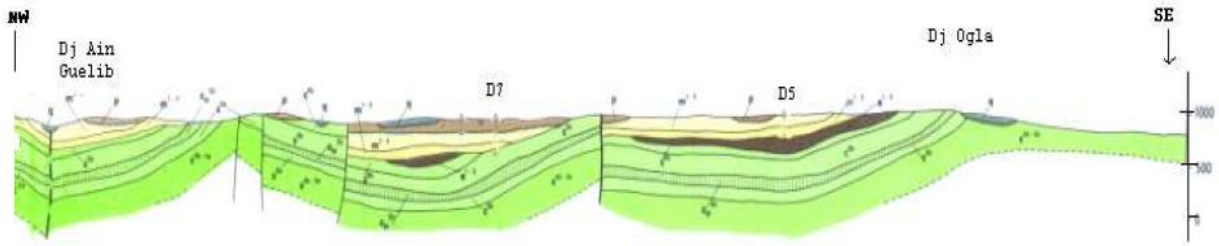
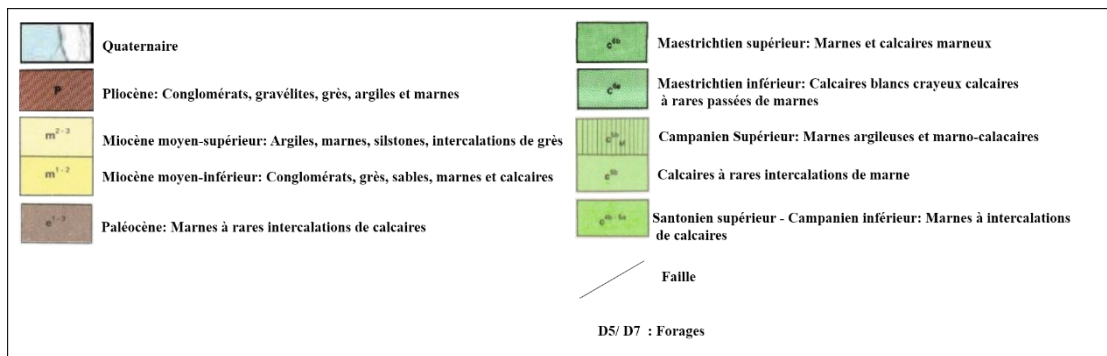


Figure 9. Coupe géologique extraite de la carte de M'Daourouch au 1/50000.

Légende :



La série de plis septentrionaux le long de la ligne Ain Beida –Sakiet Sidi Youcef compose l'une des structures de déformation notable.

Localement, dans le secteur Taoura des structures anticlinales NE–SW de l'ensemble Crétacé- Eocène composent les Djebels, Serser, Serou Dekma, Graouet, Boussessou, Guenguita, Chaoucha etc. Ce sont en général des structures étroites, en crêtes, qui forment des chaînes de montagnes. Au coeur des anticlinaux, à allure asymétrique, à axe de courbure, atteignant 8 à 10 km, affleurent les marnes d'âges Santonien supérieur-Campanien inférieur.

Certaines structures plissées consistent en un relai de petits plis dessinant dans l'ensemble un anticlinal, tel qu'entre les monts Barka-Gridjine- Derbouka. Le synclinal Taoura, site d'étude appartient à cet ensemble tectonisé.

Aux différents épisodes de déformations des terrains mésozoïque et cénozoïque, succédés depuis l'Eocène supérieur, sont liés les structures faillées tel que l'accident Batna-Souk Ahras, les familles de failles NW-SE et NE-SW à rejet de l'ordre de

plusieurs dizaines de mètres. Les failles verticales ont structuré l'ensemble des terrains en effondrements au cours du Plio-quaternaire.

### **Conclusion**

Dans l'ensemble, les structures de l'avant pays sont assez complexes. Par exemple aux approches de la frontière tunisienne, dans la partie méridionale de la région de Souk Ahras, s'individualisent des reliefs composés de plaines synclinales cloîtrées par les anticlinaux, et compartimentées par les failles et les accidents. Cet ensemble de structures constitue globalement de vastes plis assez singuliers.

A échelle régionale, la région de Souk Ahras qui appartient au domaine des hautes plaines, se situe dans l'avant-fosse de la chaîne tello-rifaine. Les terrains mésozoïques carbonatés à intercalations marneuses, d'épaisseurs variables, ont été fortement fracturés et profondément plissés. Les synclinaux constituent ainsi de vastes dépressions remplies de sédiments tertiaires hétérogènes essentiellement de type continental.

Le cadre géologique indique, en contexte hydrogéologique, que le synclinal de la Taoura constituerait une unité hydrogéologique, à aquifères développés dans les carbonates mésozoïques fissurés et dans les formations continentales cénozoïques. Du fait de l'intensité de la fracturation, d'envergures variables, cet ensemble aquifère pourrait présenter un fonctionnement systémique.

## Introduction

La connaissance des paramètres climatiques d'une région est indispensable pour l'évaluation des différents termes du bilan hydrologique. L'alimentation des nappes aquifères se fait en grande partie par les précipitations météoriques. L'étude hydroclimatique est basée sur la détermination notamment des précipitations, les températures, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

Cette étude joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eau, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles.

Dans cette approche hydroclimatique, on s'est basé sur les données climatiques de la station de Souk-Ahras. On note que cette station se trouve juste à la limite Nord de notre zone, précisément à l'exutoire de quelques sources, La base de données mise à notre disposition couvre une période de 16 ans (2003 - 2018), dont les coordonnées sont résumées dans le tableau.

Tableau 1. Coordonnées de la station de Souk-Ahras

Coordonnées Station	Coordonnées (Km)		Altitude Z (m)	Période d'observation
	X	Y		
Souk-Ahras	967,25	342,25	590	2003 - 2018

### III.1 Caractéristiques climatiques de la région d'étude :

L'Algérie est située au sud de la méditerranée, Ce grand territoire se divise en quatre zones climatiques (Figure 10) : i) l'humide à climat méditerranéen au Nord, ii) le subhumide localisé essentiellement dans l'Atlas Tellien, iii) le semi-aride à climat vers l'intérieur du pays et iv) l'aride caractérise le grand Sahara.

La région d'étude fait partie de la première zone, marquée par les risques et les aléas. Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydroclimatique, indispensable à la compréhension des processus d'alimentation et du comportement hydrologique des eaux de surfaces. Ainsi, la variation des paramètres climatiques donne des indications sur l'évolution des concentrations des éléments chimiques, en fonction des saisons, tant au niveau des eaux souterraines qu'au niveau des eaux de surface.



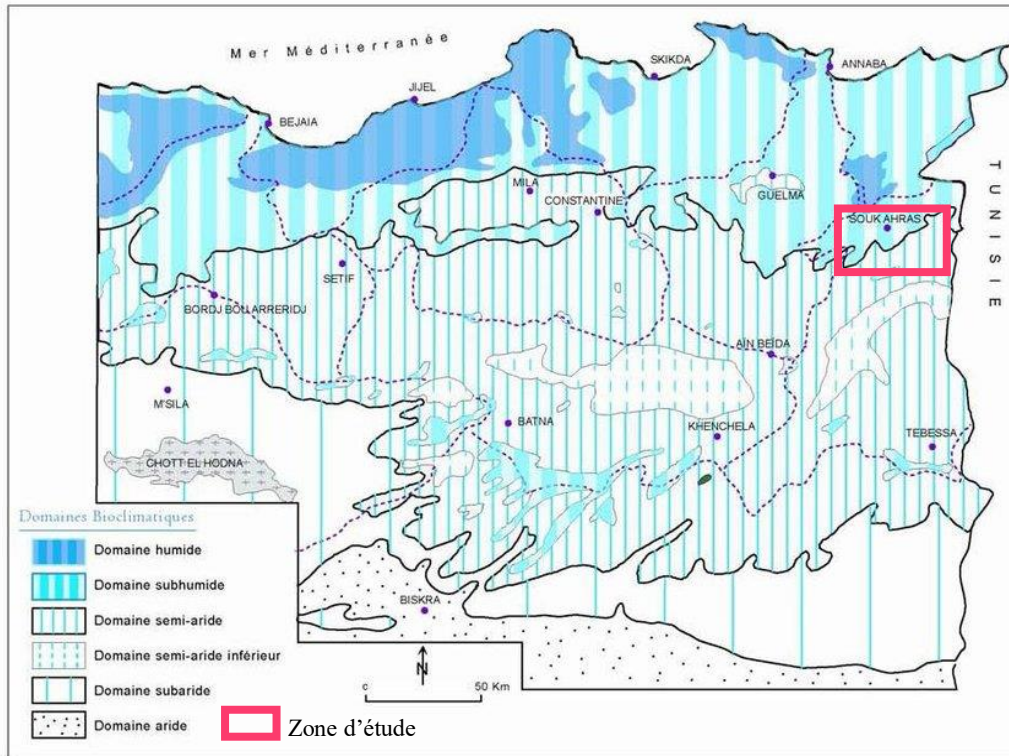


Figure 10. Carte bioclimatique de l'Est Algérien (Cote, 1998)

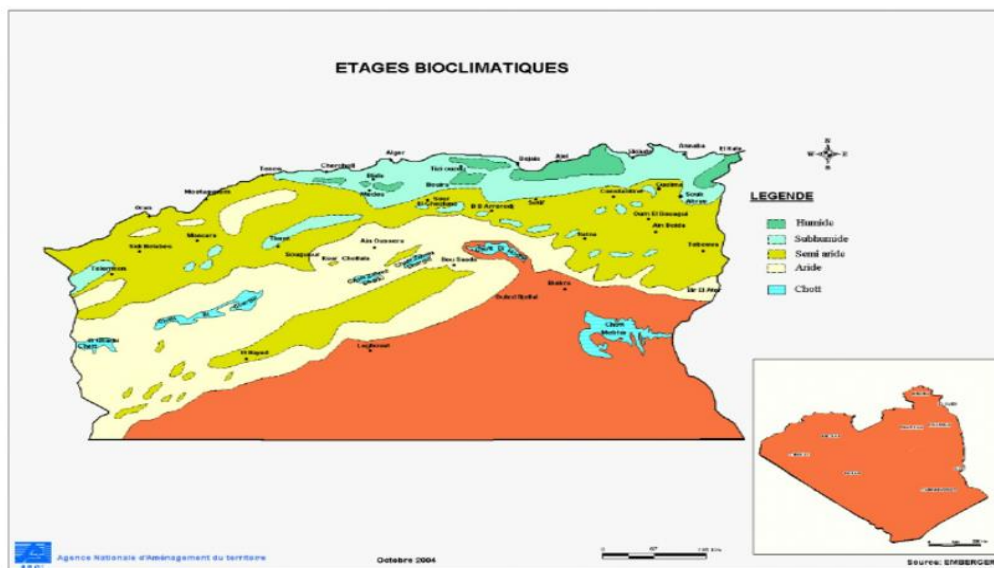


Figure 11. Carte des étages bioclimatiques de l'Algérie (ANAT)

### III.2 Analyse des facteurs climatiques :

Les facteurs climatiques jouent un rôle déterminant dans l'alimentation des nappes souterraines par le biais de l'infiltration ; cette dernière dépend directement du taux des précipitations tombées dans la région.



### III.2.1 Les précipitations :

Les précipitations sont un facteur climatique très important conditionnent les écoulements à régime pluviale notamment le régime des cours d'eau et l'alimentation des systèmes aquifères. La pluviosité augmente avec l'altitude et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

#### III.2.1.1 Les variations interannuelles :

Les hauteurs annuelles des précipitations pour la période considérée varient de 590 mm en 2008 et 1131,3 mm en 2011

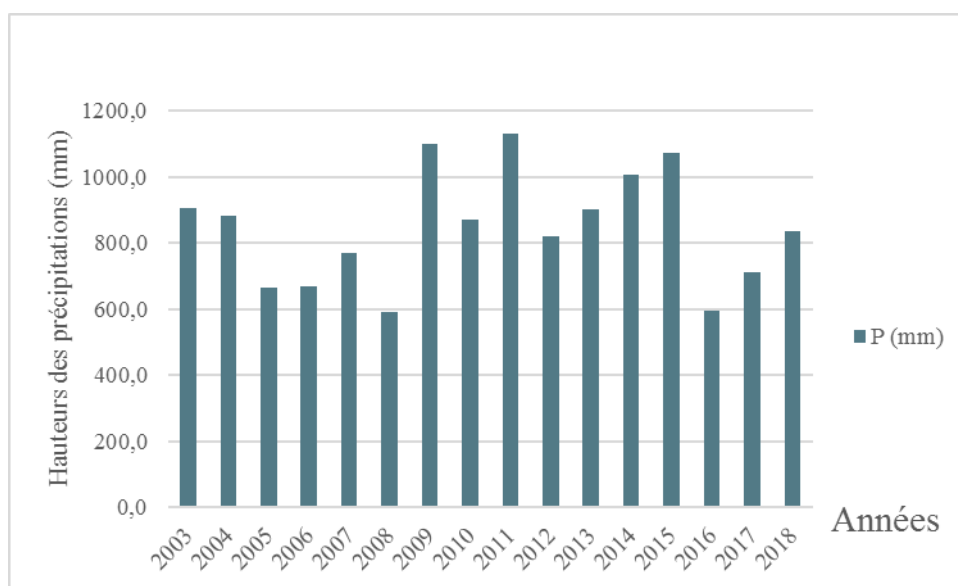


Figure 12. Hauteurs annuelles des précipitations (2003/2018) à la station de Souk-Ahras

#### III.2.1.2 Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles nous permettent de donner un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en se basant sur des calculs de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré pour un nombre d'années quelconques.

Tableau 2. Les précipitations moyennes mensuelles (mm) station de Souk-Ahras (2003-2018)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	38,8	65,2	91,3	128,7	122,6	126,1	97,6	78,0	52,4	21,7	5,7	17,2

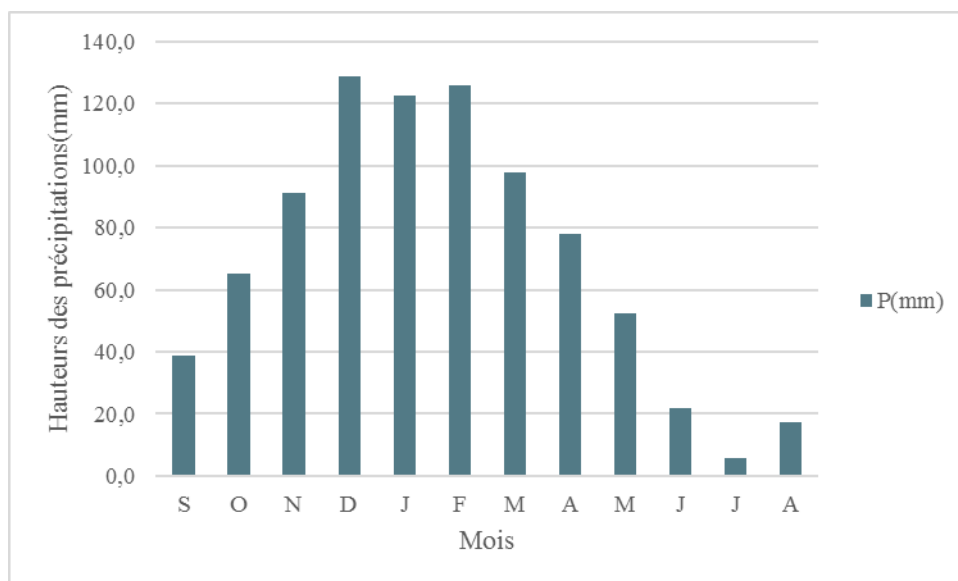


Figure 13. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003-2018)

Les précipitations moyennes mensuelles réalisées pour la station de Souk-Ahras (Figure 13) montrent un accroissement des précipitations allant du mois de Septembre jusqu’au mois de Décembre, au-delà du mois de Février débute la baisse des précipitations qui se poursuit jusqu’au mois d’Aout.

Le maximum des pluies tombe au mois de Décembre avec 128,7 mm, et le minimum tombe au mois de Juillet avec 5,7 mm.

### III.2.1.3 Répartition saisonnière des précipitations :

Tableau 3. Précipitation moyennes saisonnières à la station de Souk-Ahras (2003-2018)

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Année
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	845,4
P (mm)	38,8	65,2	91,3	128,7	122,6	126,1	97,6	78	52,4	21,7	5,7	17,2	
%	23,1			44,64			26,98			5,28			

Le tableau ci-dessus montre que les mois les plus pluvieux sont ; novembre, décembre, janvier, février et mars.

Plus de 67 % des précipitations tombent dans la période de septembre à février, période la plus pluvieuse, avec un maximum de 128,7 mm dans le mois de décembre.

L’interprétation du tableau montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse avec un taux de 44,64 %, ce qui est de l’automne et le printemps le taux est presque

identique avec 23,1 % et 26,98 % respectivement. L'été correspond à la saison sèche avec 5,28 %.

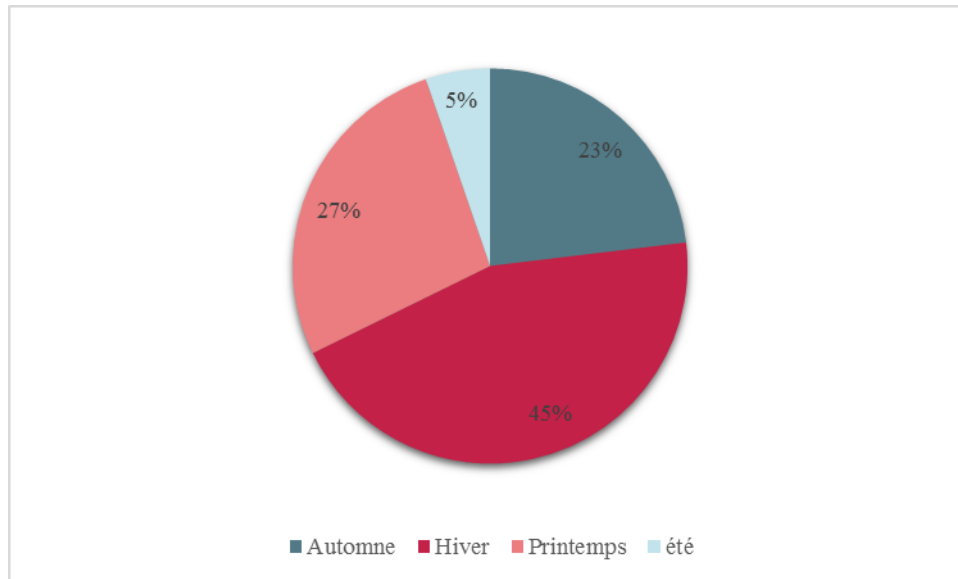


Figure 14. Répartition saisonnière des précipitations (%) à la station de Souk-Ahras (2003-2018)

### III.2.1.3.1 Coefficient pluviométrique (H)

Le coefficient pluviométrique permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire.

- ❖ L'année est d'autant plus excédentaire si  $H > 1$ .
- ❖ Si  $H < 1$ , l'année correspondante est déficitaire.

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

$$H = P / P^-$$

Avec :

H : coefficient pluviométrique ;

P : pluviométrie d'une année en mm ;

$P^-$  : Pluviométrie moyenne en mm.

Le tableau qui suit montre les variations de H au cours des années d'observation :

Tableau 4. Coefficient pluviométrique à la station de Souk-Ahras (2003, 2018)

Années	P(mm)	H	Observations	Années	P(mm)	H	Observations
2003	906,6	1,07	Excédentaire	2011	1131,3	1,32	Excédentaire
2004	881,6	1,04	Excédentaire	2012	820,9	0,96	Déficitaire
2005	664,0	0,78	Déficitaire	2013	900,0	1,05	Excédentaire
2006	668,0	0,78	Déficitaire	2014	1008,0	1,18	Excédentaire
2007	769,0	0,90	Déficitaire	2015	1073,0	1,26	Excédentaire
2008	590,0	0,69	Déficitaire	2016	595,0	0,70	Déficitaire
2009	1099,4	1,29	Excédentaire	2017	712,0	0,83	Déficitaire
2010	872,2	1,02	Excédentaire	2018	835,0	0,98	Déficitaire

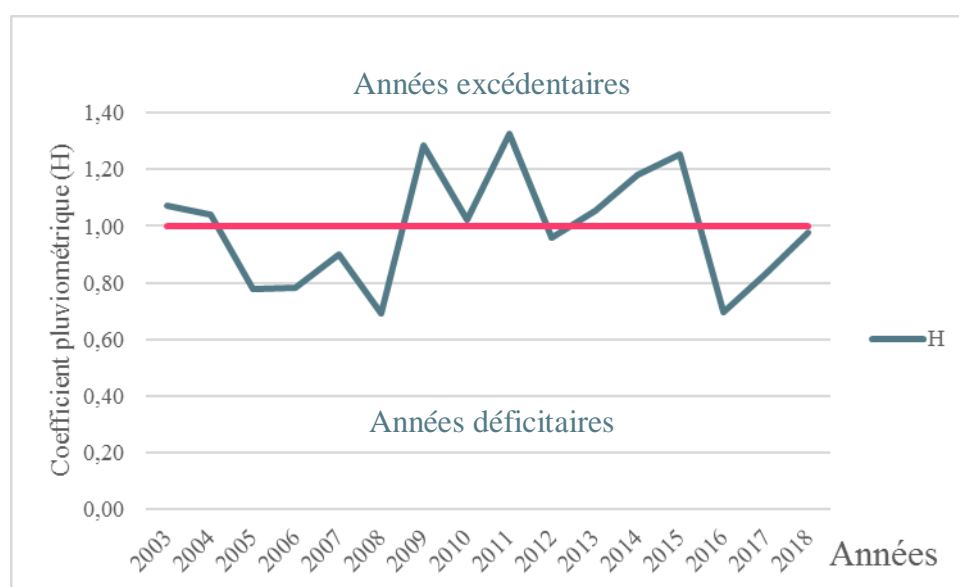


Figure 15. Variations du coefficient pluviométrique de la station de Souk-Ahras (2003, 2018)

Les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues montrent une alternance entre les années excédentaires et celles déficitaires, 8/16 années sont excédentaires et 8/16 sont déficitaires.

### III.2.2 La température :

La température est un facteur important et de grande influence sur le bilan d'eau du fait qu'il conditionne l'évapotranspiration et donc le déficit d'écoulement annuel et

saisonnier, elle dépend de l'altitude, de la distance du littoral et de la topographie (Seltzer, 1946).

### III.2.2.1 Températures moyennes mensuelles :

Tableau 5. Températures moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003-2018)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T (°C)	20,7	18,4	12,5	8,7	8,0	7,7	10,4	13,8	17,3	22,2	26,4	26,1

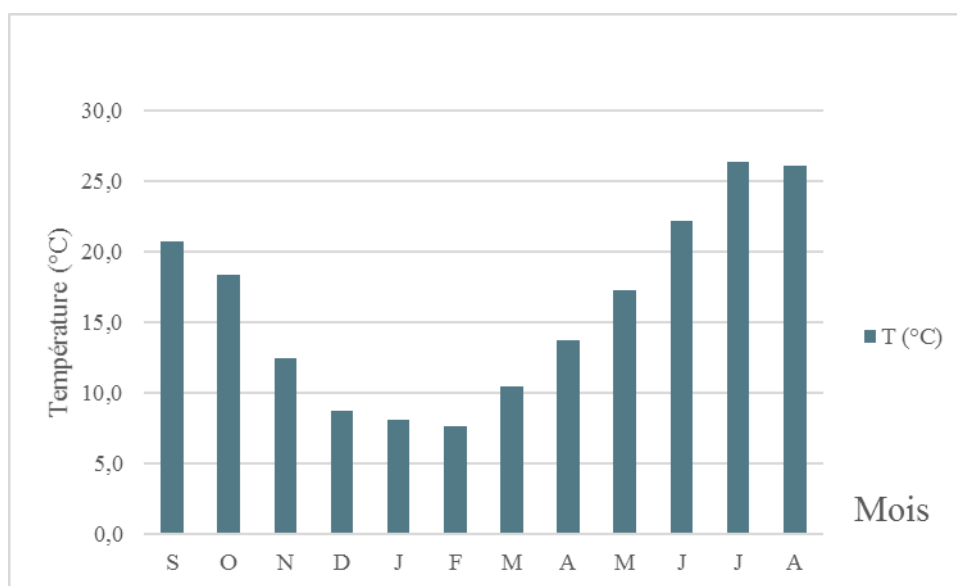


Figure 16. Températures moyennes mensuelles à la station de Souk-Ahras (2003 - 2018)

L'histogramme (Figure 16) montre que les plus faibles valeurs sont mesurées aux mois de Décembre, Janvier et Février où on remarque que le mois le plus froid est celui de février (avec une température de l'ordre de 7,7 °C). Par contre les plus fortes valeurs caractérisent les mois de Juin, Juillet et Aout où on remarque que le mois le plus chaud est juillet (avec une température de l'ordre de 26,4 °C).

### III.2.3 Détermination des indices climatiques :

#### III.2.3.1 Indice d'aridité (A)

Emmanuel DE. MARTONNE (1925) a proposé une formule climatique, appelée indice d'aridité, elle est en fonction de la température (T) et des précipitations (P) comme suit :

$$A = P / (T + 10)$$

Avec :

- A : indice d'aridité annuel ;
- P : précipitation moyenne annuelle en mm ;
- T : température moyenne annuelle en °C

Selon DE. MARTONNE :

- Si A est inférieur à 5 : le climat est hyperaride
- Si A est compris entre 5 et 10 : le climat est très sec
- Si A est compris entre 10 et 20 : le climat est sec
- Si A est compris entre 20 et 30 : le climat est tempéré
- Si A est supérieur à 30 : le climat est humide (l'écoulement est abondant)

Pour les données de la station de Souk-Ahras on a obtenu le résultat suivant :

Tableau 6. Indice d'aridité annuel de Martonne à la station de Souk-Ahras (2003 – 2018)

	P (mm)	T (°C)	A
Station de Souk-Ahras	845,4	16,1	32,39

Pour la période étudiée le résultat est supérieur à 30 ce qui signifie un climat humide.

### III.2.3.2 Indice d'aridité d'Emberger :

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q. Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

- Q 2 : quotient pluviométrique d'Emberger ;
- M : la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (degrés/Kelvin) ;
- m : la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (degrés/Kelvin) ;

## HYDROCLIMATOLOGIE

- P : pluviométrie annuelle en mm
- ( $T^{\circ}k = T^{\circ}C + 273,2$ ).

Tableau 7. Indice d'aridité d'Emberger à la station de Souk-Ahras (2003 – 2018)

	P (mm)	M		m		Q2
		°C	°K	°C	°K	
Station de Souk-Ahras	845,4	26,4	299,6	7,7	280,9	155,76

La représentation graphique de cet indice nous permet de placer la zone de Souk-Ahras dans l'étage bioclimatique humide aux hivers chauds.

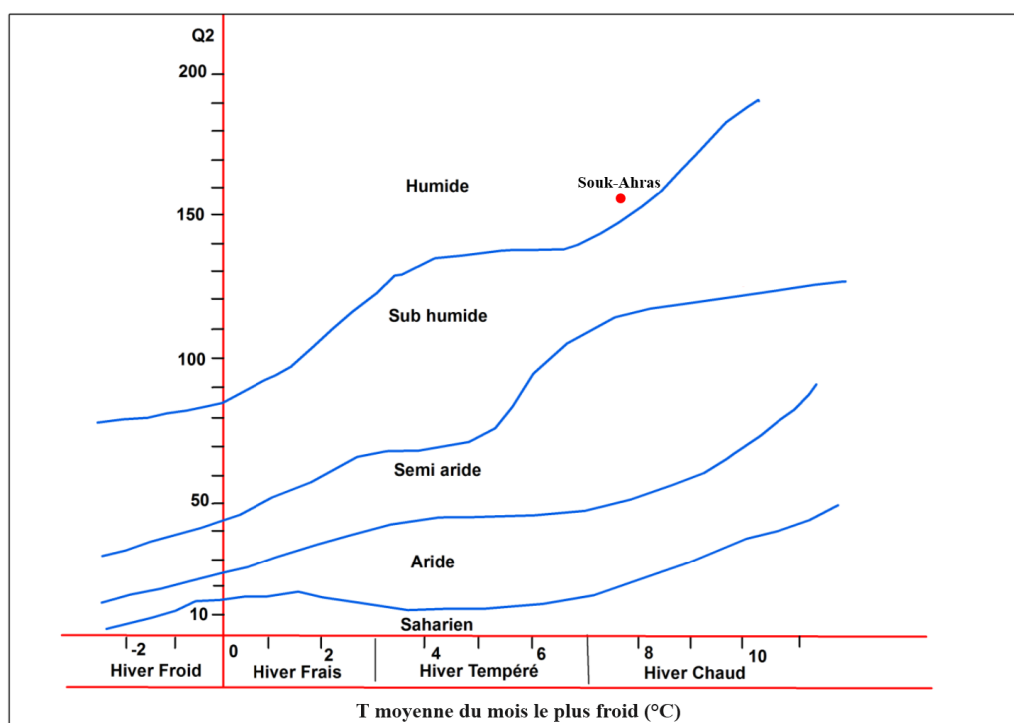


Figure 17. Climagramme d'Emberger

### III.2.4 Courbe ombrothermique ( $P = 2T$ ) :

Le climat se caractérise par une saison humide, cette dernière se distingue par une forte pluviométrie et une baisse de la température, elle s'étend du mois d'octobre avec une précipitation importante qui atteint son maximum pendant le mois de Décembre (128,7 mm) et prend fin au mois de mai.

Pour ce qui est de la saison chaude qui s'étend du mois de mai jusqu'au mois d'octobre, elle est marquée par une forte évaporation provoquée par l'augmentation de la température ( $T > 25^{\circ}C$ ), et la diminution des précipitations ( $P < 6$  mm).

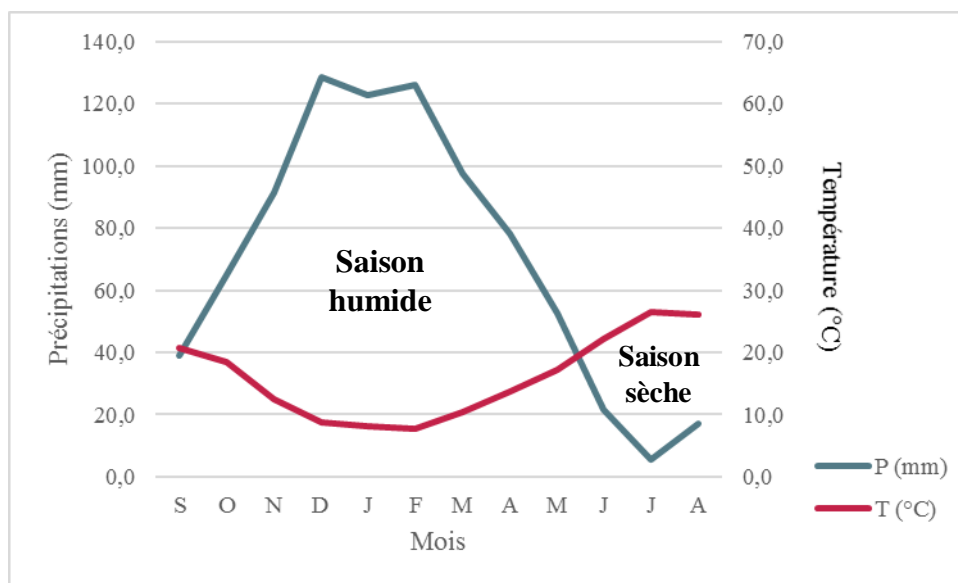


Figure 18. Courbe ombrothermique de la station de Souk-Ahras (2003 - 2018)

### III.2.5 L'humidité :

L'humidité relative à l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée par la tension de la vapeur saturante à la même température. Elle nous permet de donner une idée sur l'état de l'atmosphère s'il est plus ou moins proche de la condensation.

Les valeurs de l'humidité observées à la station de Souk-Ahras sont illustrées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8. Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Souk-Ahras en % (2009 - 2018)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
<b>Moyenne en %</b>	72,32	74,58	76,52	77,15	78,43	74,28	75,48	74,60	74,97	72,93	70,07	71,39	74,39



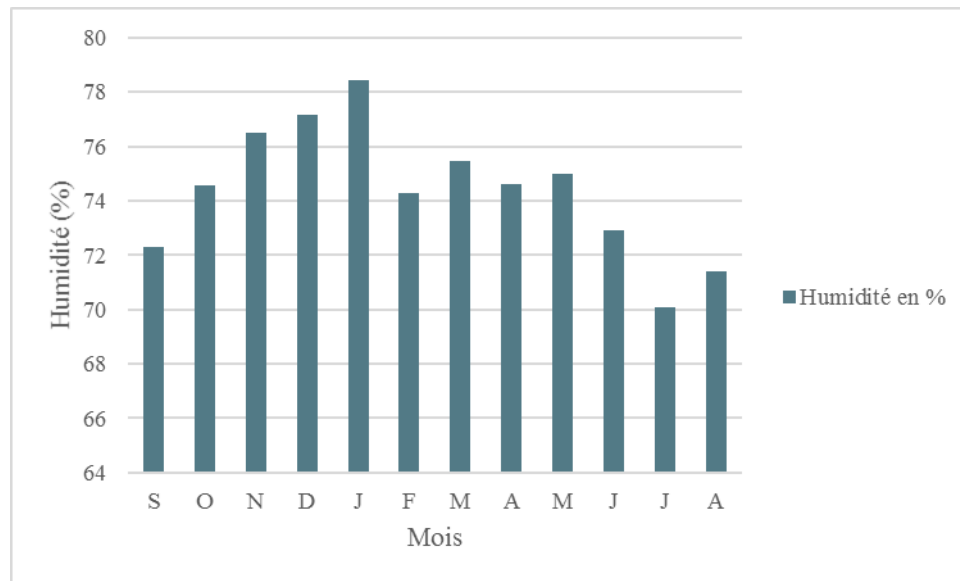


Figure 19. Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air à la station de Souk-Ahras en % (2009 - 2018)

### III.3 Notions d'évapotranspiration, lames d'eau et bilans :

La méthode du bilan d'eau de C.W Thornthwaite est basée sur la notion de réserve facilement utilisable par les plantes notée par la suite RFU. Dans la région d'étude, nous adoptons une RFU= 100 mm vu les conditions climatiques favorables en milieu humide.

Le bilan de Thornthwaite permet d'estimer pour chaque mois :

- ❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP) en mm ;
- ❖ L'évapotranspiration réelle (ETR) en mm ;
- ❖ La réserve facilement utilisable (RFU) en mm (ce terme désigne la quantité d'eau disponible au niveau superficiel du sol) ;
- ❖ L'excédent d'écoulement (EXC) en mm dans le cas où :  $ETP = ETR$  donc la RFU est à son maximum (100 mm) (l'excédent est appelé aussi pluie efficace, le reste des eaux de pluie constitue l'écoulement et l'infiltration) ;
- ❖ Le déficit agricole (DA) en mm, il résulte de la différence entre l'ETP et l'ETR. (Il présente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures pour qu'il n'y ait pas de sécheresse).

### III.3.1 L'évapotranspiration :

**L'évapotranspiration potentielle (ETP)** est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

D'après la formule de Thornthwaite

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \cdot K$$

Dont:

$$a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,5}$$

Avec:

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm ;

T : Température moyenne mensuelle en °C ;

I : Indice thermique annuel

**L'évapotranspiration réelle (ETR)** s'authentifie au déficit d'écoulement et elle se calcule à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux ou plusieurs paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie, la température, l'ensoleillement...etc On appelle évapotranspiration réelle la quantité d'eau, généralement exprimée en mm, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant

Formule de Turc :

$$ETR = P / \left(0,9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{1/2}$$

$$\text{Où : } L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

## HYDROCLIMATOLOGIE

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm ;

P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

T : Température moyenne annuelle en °C ;

L : pouvoir évaporant.

$$L= 911,16$$

$$ETR= 635,64 \text{ mm}$$

### III.3.2 Méthode du bilan d'eau de C.W. Thornthwaite

Le bilan d'eau de Thornthwaite retrace le schéma des échanges et du transfert des eaux à l'intérieur d'une région. Le principe est basé sur deux cas :

$$\text{Cas : } P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$$

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation (un sol saturé, quand il aura absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm), le surplus, représentera l'écoulement superficiel

$$\text{Cas : } P < ETP$$

- On évapore toute la pluie ;
- On prend la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire le pouvoir évaporant ;
- Si la RFU = 0, la quantité DA = ETP – ETR représente le déficit agricole c'est-à-dire la quantité qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Tableau 9. Bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite pour la station de Souk-Ahras (2003 - 2018)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
<b>P (mm)</b>	38,83	65,18	91,26	128,71	122,62	126,11	97,64	78,03	52,41	21,66	5,7	17,22	845,4
<b>T (°C)</b>	20,69	18,38	12,46	8,67	8,03	7,66	10,45	13,75	17,31	22,23	26,41	26,13	16,1
<b>i</b>	8,42	7,05	3,93	2,28	2,04	1,89	3,02	4,56	6,44	9,37	12,14	11,95	73,1
<b>K</b>	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
<b>ETP (mm)</b>	93,68	72,41	33,52	17,22	16,30	14,69	29,92	50,57	81,68	125,04	169,45	155,77	860,26
<b>RFU (100mm)</b>	0	0	57,74	100	100	100	100	100	70,73	0	0	0	/
<b>ETR (mm)</b>	38,83	65,18	33,52	17,22	16,30	14,69	29,92	50,57	81,68	92,39	5,70	17,22	463,22
<b>EXD (mm)</b>	0	0	0	69,23	106,32	111,42	67,72	27,46	0	0	0	0	382,15
<b>DA (mm)</b>	56,67	2,75	0	0	0	0	0	0	0	103,38	176,05	149,3	488,15

### III.3.3 Interprétation du bilan hydrique :

D'après le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite on a pu déduire les conclusions suivantes :

- L'évapotranspiration atteint son maximum au mois de juillet avec une valeur de 169,45 mm, ce qui provoque un déficit agricole nécessitant une irrigation au mois de juillet, aout, septembre et octobre.
- La reconstitution du stock commence au mois de novembre et se poursuit jusqu'au mois de mai où commence l'épuisement du stock

Tableau 10. Les valeurs de l'Evapotranspiration réelle estimées par les deux méthodes

Méthodes utilisées	Thornthwaite	Turc
<b>ETR (mm/an)</b>	463,22	635,64

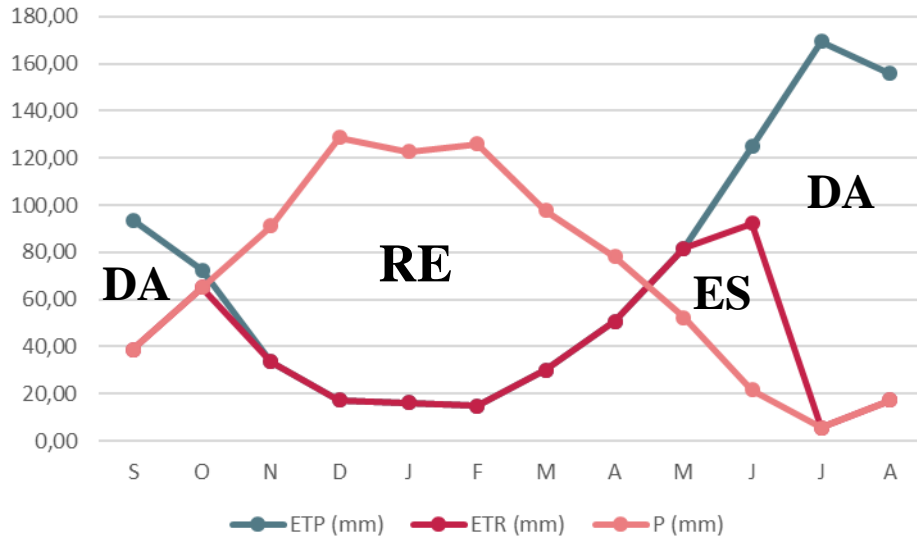


Figure 20. Bilan d'eau de C.W Thornthwaite de la station de Souk-Ahras (2003 - 2018)

DA : Déficit Agricole

RE : Rechargement

ES : Epuisement de Stock

**III.3.3.1 Estimation de l'écoulement**

Pour l'estimation de l'écoulement la formule de Tixeront Berkallof nous donne le résultat suivant :

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

Si :  $P > 600$  mm l'équation devient :

$$R = \frac{P^3}{3}$$

Avec :

R : Ruissellement en m ;

P : Précipitation moyenne annuelle en m ;

ETP : Evapotranspiration potentielle en m/an.

Les résultats sont sur le tableau ci-après :

## HYDROCLIMATOLOGIE

	<b>P (m)</b>	<b>ETP (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>R (%)</b>
<b>Souk-Ahras</b>	0,8454	0,86	0,201	23,77

Le ruissellement représente 23,77 % de la pluie totale.

### III.3.3.2 Estimation de l'infiltration

L'infiltration représente la quantité d'eau qui parvient à l'alimentation effective de la nappe aquifère.

D'après le bilan hydrologique l'infiltration est donnée par :

$$P = ETR + R + I$$

$$D'où : I = P - (ETR + R)$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

ETR : Evapotranspiration réelle en mm ;

I : Infiltration en mm d'eau.

Le résultat des calculs est le suivant :

	<b>P (mm/an)</b>	<b>ETR (mm/an)</b>	<b>R (mm/an)</b>	<b>I (mm/an)</b>	<b>I (%)</b>
<b>Souk-Ahras</b>	845,4	463,22	201,4	180,78	12,87

L'infiltration représente 12,87 % des pluies totales.

## Conclusion

L'étude des données climatiques de la station de Souk-Ahras pour la période de 2003 à 2018 nous a permis d'attribuer à la zone d'étude un climat humide (A= 32,39) caractérisé par deux saisons distinctes :

- L'une humide s'étalant du mois d'octobre jusqu'au début du mois de mai caractérisée par une forte pluviosité qui atteint son maximum au mois de décembre (128,71 mm) et des faibles températures (7,7 °C au mois de février) ;
- L'autre sèche s'étalant du mois de mai jusqu'au mois d'octobre caractérisée par une faible pluviosité et des fortes températures (5,7 mm et 26,41°C au mois de juillet).

## HYDROCLIMATOLOGIE

La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre 845,5 mm et une température moyenne de 16,1 °C. La reconstitution du stock commence en novembre et s'achève en avril. L'épuisement du stock du sol s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

### Introduction

L'étude hydrogéologique consiste à préciser la structure géométrique des aquifères, permettant l'établissement des relations entre la géologie et les eaux souterraines et localiser l'habitat de l'eau dans les diverses formations géologiques (Bekkouche et Benhamza, 2009).

L'exploitation des ressources hydriques des systèmes aquifères se fait par des puits de surfaces, des forages profonds et semi- profonds et par des émergences naturelles (sources). (Rouabhia A., 2006). La plupart des nappes souterraines de la région sont marquées par une augmentation continue de l'exploitation des ressources en eaux.

Les conditions hydrogéologiques de notre zone d'étude sont déterminées par leur structure géologique et tectonique, par la nature du relief et du climat, elles dépendent de l'alternance des zones d'alimentation, de transit, de décharge des horizons aquifères, de la présence des zones de fractures conduisant et filtrant de l'eau et de la présence des eaux thermales à composition chimique variée. (Djebbar. M, 2006)

La zone d'étude est caractérisée par la présence de formations carbonatées (Bousnoubra H.,2002), l'action de l'eau et les mouvements tectoniques intenses qui se sont produits dans cette région, ont accéléré le processus de genèse du karst et le compartimentage observé.

Les aquifères des régions karstiques sont très hétérogènes et particulièrement vulnérables à la contamination en raison de leurs caractéristiques hydrogéologiques, perméabilités en grand, fissures. La composition chimique de l'eau dans un aquifère karstique est liée à de nombreux facteurs tels que l'utilisation des terres, les processus de recharge (les conditions climatiques, la lithologie du réservoir et de la zone d'infiltration, et les conditions d'écoulement / temps de transit dans une matrice fissurée). Elle varie également en fonction de critères spatiaux (en fonction du lieu de prélèvement au sein du système karstique, source), ainsi que selon des critères temporels. En effet, ce sont la plupart du temps les variations de la chimie de l'eau au même point d'observation et selon les conditions hydrologiques qui renseignent sur ce qui se passe dans le système.

Les formations dominantes sont en majeure partie des calcaires maestrichtiens, constituant ainsi la structure synclinale qui est recouverte par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Les calcaires sont fissurés et karstifiés, favorisant



l'accumulation des eaux souterraines. L'examen des colonnes lithostratigraphiques des forages exécutés dans la région couplé à l'interprétation des données géologiques, permet la détermination des différentes nappes souterraines.

La région d'études est caractérisée essentiellement par deux nappes principales superposées comme suit :

- Aquifères superficiels à lithologie variable, captés par des sources, dont le débit extrait avoisine 93 m<sup>3</sup>/s.
- Aquifères profonds captés par les forages, dont le débit extrait avoisine 370 m<sup>3</sup>/s (D.H.W., 2014).

### IV.1 Les principaux aquifères :

Le système aquifère de Souk Ahras -Taoura, développé essentiellement dans l'ensemble parautochtone ou autochtone de l'atlas Saharien, est un système multicouche des sédiments néogènes-paléogènes et des carbonates fracturés créacés (Bouroubi et Djebbar, 2011). La plupart des sources froides et thermales émergent dans la zone faillée entre Madaure et Taoura.

Les structures en horsts des calcaires créacés et éocènes présentant une morphologie karstique (lapiez, dolines, gouffre, grotte...), favorisent l'infiltration des eaux météoriques et les circulations d'eau dans les calcaires. De possibles pertes des affluents de la Medjerda encaissés entre les massifs du secteur sud de Souk Ahras pourraient contribuer aux écoulements des aquifères sénoniens. Les carbonates du Crétacé karstifiés représentent les plus importants aquifères. Ils peuvent contenir des circulations d'eau importantes.

Les principaux aquifères du système hydrogéologique reconnu par sondages électrique et /ou atteints par forages hydrauliques sont les suivants :

#### IV.1.1 L'aquifère du Mio-Pliocène continentale :

Il met à jour quelques sources temporaires dont le débit est faible (< 1 l/s), elles sont en relation directe avec les précipitations (Bouroubi, 2009).

#### IV.1.2 L'aquifère du Miocène marin :

Il se trouve dans les grès fissurés :

- Au niveau du synclinal de Merahna, la majorité des forages sont artésiens avec un faible débit, mais une fois mis en pompage, le niveau dynamique descend

très bas et le débit reste faible, ce qui entraîne souvent l'abondance de l'ouvrage.

- Dans le synclinal de Madaure, quelques sources liées aux failles sont permanentes (Bouroubi, 2012).

### **IV.1.3 L'aquifère de l'Eocène autochtone :**

Il présente quelques sources froides dont le débit est ( $< 2$  l/s), ces émergences se trouvent à grandes altitudes, notamment au niveau des Djebels Serrou et Dekma, elles sont directement influencées par les eaux des précipitations et de la neige.

### **IV.1.4 L'aquifère du karst Maestrichtien :**

Il présente un aquifère très développé dans les calcaires crayeux. Il met à jour plusieurs sources avec un débit ( $\leq 15$  l/s), cet aquifère est exploité par des forages atteignant une profondeur allant de 146 à 350 m.

### **IV.1.5 L'aquifère du karst Campanien :**

Possède plusieurs exutoires à débit variable en fonction des saisons et des années (10 à  $< 5$  l/s), exploité par quelques forages.

### **IV.1.6 Les aquifères du Turonien et l'Aptien :**

Au Sud et Sud-est de Taoura, une dizaine de forages de reconnaissances hydrogéologiques sont abandonnés à cause de la salinité des eaux (Conductivité électrique =  $7.2 \text{ ms. cm}^{-1}$ ). Ils atteignent les aquifères du Turonien et surtout de l'Aptien vers une profondeur ( $< 250$  m). Dans la partie méridionale du bassin d'étude ces formations carbonatées affleurent en surface.

### **IV.1.7 L'aquifère profond thermal :**

Il met à jour des sources thermales qui sourdent toutes à travers des accidents de différentes formations géologiques.

## **IV.2 Synclinal de Taoura :**

Il est formé par la superposition de deux horizons aquifères (Figure 21). L'un superficiel, dit nappe du Mio-Plio-Quaternaire relativement de faible potentialité et l'autre plus profond dont les constituants sont des calcaires du Maestrichtien.

### **IV.2.1 La nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre) :**

Cette nappe est contenue dans des formations hétérogènes telle que marnes, conglomérats, sables, graviers et limons sableuses, ces mêmes formations sont datées du Miocène au Quaternaire. Les ouvrages captant cette nappe sont imparfaits, ainsi

ses extensions (verticale et horizontale), ne peuvent être définies avec exactitude, se traduisant par une méconnaissance de la nappe et de ses potentialités.

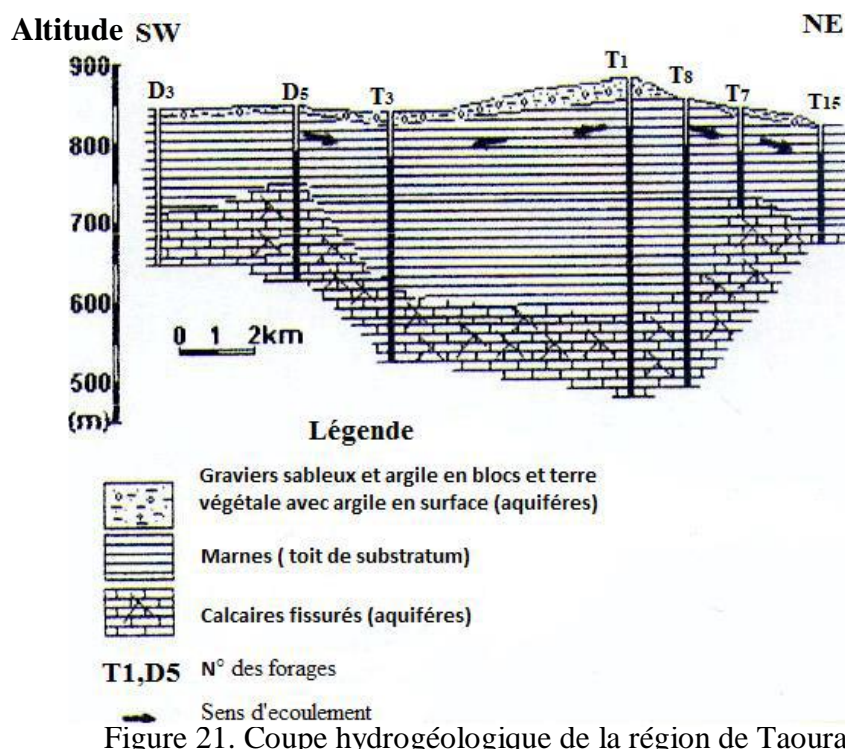


Figure 21. Coupe hydrogéologique de la région de Taoura

La coupe précédente (Figure 21), montre que la partie aquifère est présente au centre du synclinal par contre son épaisseur diminue jusqu'à disparition sur les bordures. Cette nappe est captée par les puits domestiques, son alimentation se fait essentiellement par les précipitations efficaces, son épaisseur varie de 10 à 140 m, nous pensons qu'elle peut atteindre les 200 m de profondeur. (Rouaibia 2018).

### IV.2.2 La nappe du calcaire Maestrichtiens (nappe captive) :

Cette nappe affleure vers les deux flancs du synclinale (Nord et Sud), par le biais de sources et plonge en profondeur sous le remplissage Mio-Plio-Quaternaire, donnant ainsi la forme structurale observée au niveau de la zone. Au cœur de la structure la profondeur peut atteindre les 600 m environ.

L'extension de la nappe est horizontale, elle est subdivisée en deux couches aquifères superposées. Ces dernières sont séparées par une faible couche de marnes. Le sommet de cette nappe est limité par des couches des formations argileuses et marneuses. Par contre, le substratum est de nature marneuse. Notons que cette nappe, est considérée comme le principal réservoir d'eau dans la région, constituée par des marnes et des calcaires fissurés appartenant au Maestrichtien inférieur et au Campanien moyen. Les

## HYDROGEOLOGIE

calcaires du Maestrichtien inférieur sont très fissurés et renferment un aquifère important. Les fissures peuvent avoir des dimensions de cavernes confirmées par le forage "T1" qui a rencontré une caverne à 103 mètres de profondeur au cours de sa réalisation (Friane, 2000).

Les calcaires sont particulièrement présents au centre de la nappe captive de Taoura mais en allant vers le Nord-est, on assiste à un amincissement de l'épaisseur qui aux piémonts des reliefs, elle n'excède pas 110 mètres, (cas du forage T1).

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pris en considération, les dix-sept forages ne captant pas le Maestrichtien, car il a été constaté des pertes totales de boue, indiquant une karstification des calcaires. C'est le cas du forage T1, avec un débit d'exploitation de 100 l/s. Ce débit est dû au fait que l'ouvrage avait atteint une zone noyée (Bouroubi 2009).

Cette indication signifie qu'il s'agirait d'un aquifère épikarstique, ce type d'aquifère se développe particulièrement dans les calcaires crayeux en subsurface (Mangin., 1975 ; Bakalowicz., 1979). Les travaux de (Bouroubi Y., 2009) confirment que La structuration d'âge Maestrichtien inférieur contient plusieurs aquifères épikarstiques.

Cet aquifère s'étend sur tout le synclinal et disparaît au Nord-est vers Merahna sous une épaisse couche de marnes miocènes (400 m). Son substratum n'a jamais été atteint en raison de sa profondeur, supérieure à 400 m. Par contre, son toit est représenté par la formation argilo-calcaire du Maestrichtien supérieur.

Cette nappe offre un débit d'exploitation important pouvant aller jusqu'à 300 l/s, c'est le cas des forages D4, T1 et D3, T2, D7 T3, T7, T6. Cette eau est destinée à l'alimentation en eau potable des villes de Souk-Ahras, Taoura, Merahna, Drea, Zaarouria, Sidi Fredj et Ouillen.

Le contact des marnes du Miocène et des calcaires fissurés, favorise l'apparition des sources, avec un débit global, de l'ordre de 43 l/s, destiné à l'alimentation en eau potable.

Notons que dans la partie effondrée du synclinal au niveau de Merahna, la formation du Maestrichtien plonge sous la couverture miocène à plus de 400 m, ce qui explique l'absence de forages profonds dans cette zone.

Nous rappelons que la superficie des calcaires du Maestrichtien inférieur à l'affleurement est de l'ordre de 57 Km<sup>2</sup>. L'écoulement des eaux souterraines s'effectue généralement du Sud vers le Nord. L'estimation de la capacité hydrique des calcaires fissurés du synclinal de Taoura est de 44 Mm<sup>3</sup>. Les valeurs de la transmissivité, sont

## HYDROGEOLOGIE

élevées, variant entre  $10^{-1}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, ce qui confirme la présence d'une fissuration et karstification de la nappe. Le coefficient d'emménagement est de l'ordre de  $9.10^{-3}$  (Toubal, 1993).

La figure montre que les eaux sont contenues principalement dans les calcaires du Maastrichtien inférieur, avec une puissance de 100 m en moyenne, repose sur une formation marneuse importante et son toit est constitué par des formations marneuses et argileuses.

Donc elles jouent un rôle important pour l'exploitation de leurs eaux et pour l'utilisation dans différents usages. Il s'agit d'un système aquifère multicouche formé par deux principaux niveaux réservoirs :

Le premier niveau constitue le système d'âge Plio- Quaternaire et d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 40 m.

Le deuxième niveau profond, d'âge Maastrichtien inférieur et au Campanien moyen, constitue le réservoir d'eau principal de la région. Son épaisseur devient maximale (150 m à 200 m) au centre du bassin.

Ces deux niveaux sont séparés par des niveaux argileux et marneux en présence de conglomères de calcaires plus ou moins imperméables. Il est influencé par la tectonique qui joue un rôle important dans l'enfouissement des formations et de leur épaissement, de plus en plus vers le centre du bassin.

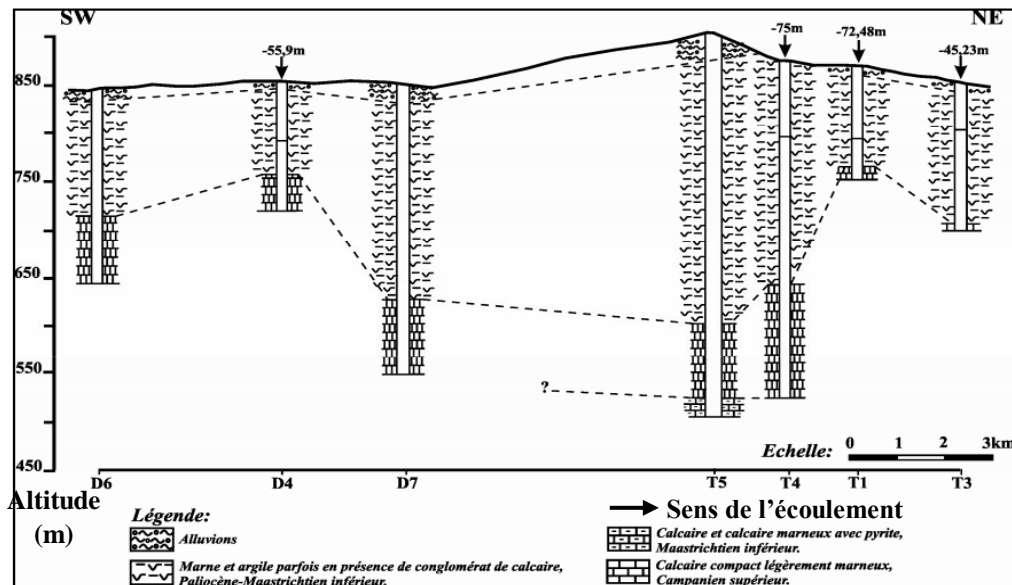


Figure 22. Coupe hydrogéologique du synclinal de la nappe de Taoura.

Tableau 11. Caractéristiques hydrogéologiques du synclinal de la Taoura.

Formation	Lithologie	Epaisseur (m)	Caractéristiques hydrogéologiques
Quaternaire	Alluvions fluviales, galets et blocséboulis. Conglomérats, sable, argiles, calcaires lacustres, travertins.	?	Perméable
Plio- Quaternaire Villafranchien	Grès, conglomérats, argiles, marnes.	50 m	Semi-perméable
Pliocène	Conglomérats, gravélites, grès, argiles et marnes.	700 à 1200 m au niveau de Merahna	Semi-perméable
Miocène			Aquifère Imperméable
- supérieur	- Dépôts indifférenciés, marnes, argiles, grès, gravélites, grès glauconieux.		
- moyen	- Grès, conglomérats, marnes, argilites.		
- inférieur	- Grès, marnes, argilites.		
Eocène	Marnes calcaires, lumachelles	25 à 30 m	Semi-perméable, Calcaires fissurés, karstifiés ?
- Priabonien	Calcaire nummulitiques, marnes		
- Yprésien-Lutétien			
Paléocène	Marnes-calcaires.	80 à 200 m	Imperméable à semi perméable
Crétacé supérieur			
Maestrichtien supérieur	Marnes, calcaires-marneux.	100 à 140 m	Semi-perméable
Maestrichtien inférieur	- Calcaires blancs crayeux, calcaires à rares passées de marnes.	200 à 250 m	Aquifère karstique
- Campanien sup	- Marnes à bancs calcaires	50 à 70 m	Semi-perméable
+ terme supérieur	- Calcaires gris claire, à	80 à 100 m	Aquifère karstique
+ terme inférieur	quelques inter-lits de marne.		
Santonien supérieur-Campanien inférieur	Marnes, calcaires	Dépasse 250 m	Semi-perméable
Santonien inférieur	Calcaires, marnes.	?	Semi-perméable
Coniacien	Marnes, marno-calcaires et Calcairesmarneux.	?	Semi-perméable
Turonien	Calcaires, marnes.	100 à 150 m	Aquifère karstique
Crétacé inférieur			
Terme supérieur	- Marnes, siltstones et calcaires - marneux	900 m	Aquifère karstique thermal
Terme inférieur	- Marnes, calcaires, grès	?	

### **Conclusion**

La zone d'étude est caractérisée par la présence de formations carbonatées, l'action de l'eau et les mouvements tectoniques intenses qui se sont produits dans cette région, ont accéléré le processus de genèse du karst et le compartimentage observé.

Les formations dominantes sont en majeure partie des calcaires maestrichtiens, constituant ainsi la structure synclinale qui est recouverte par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Les calcaires sont fissurés et karstifiés, favorisant l'accumulation des eaux souterraines.

La région d'études est caractérisée essentiellement par deux nappes principales superposées comme suit :

- La nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre)
- La nappe du calcaire Maestrichtiens (nappe captive)

### Introduction

Pour évaluer les apports en eau au niveau de la zone d'étude, il faut traiter les aspects quantitatifs des ressources en eaux superficielles et souterraines existantes.

Au niveau de la région étudiée et malgré les nombreuses ressources, la population reste mal desservie. Nous avons également remarqué que les communes les mieux dotées en alimentation en eau potable sont celles alimentées à partir des ressources karstiques, tel que le groupement urbain et les différentes mechtas de Taoura, Merahna, Zarouria, Drea, Ouillen, Sidi Fredj et environ 20 % de la population du chef-lieu de Souk- Ahras.

Les eaux de la nappe karstique sont également utilisées par le secteur industriel et agricole.

L'exploitation intensive des aquifères karstiques dans le synclinal de Taoura depuis une vingtaine d'années, a provoqué une baisse considérable des niveaux piézométriques. Ce qui pose un problème de disponibilité d'eau dans l'avenir. Cette surexploitation peut entraîner l'apparition d'effondrement des zones karstiques sous l'effet de rupture de voûte. (Rouaibia 2018)

### V.1 Estimation des ressources :

L'estimation des potentialités en eaux souterraines est possible seulement pour la nappe captive de Taoura (formations calcaires du Maestrichtien).

Les forages, les sources et les puits constituent l'ensemble des eaux souterraines, totalisant un débit de 16.78 Hm<sup>3</sup>/an.

#### V.1.1 Forages :

Neuf (09) forages seront raccordés à la station de pompage du synclinal de Taoura : T1, T1Bis, T4 Bis, D'4, T7, T8 et T20 (DRE, 2013).

Les forages T1, T1Bis, T4Bis, T7, T8 et T20 sont localisés dans la limite du champ captant de Taoura, le forage D4 se trouve dans la limite du champ captant de Dréa.

Les forages T1, T1Bis, T4Bis, D'4, T7 et T8 sont opérationnels.

Les villes et les agglomérations qui seront alimentées à partir de la station de pompage sont les suivantes :

- Souk- Ahras ;
- Zarouria ;
- Taoura ;
- Merahna ;



## GESTION DES RESSOURCES EN EAU

- Sebti Boumaref ;
- Seria ;
- Djehifa ;
- Tamatmat ;
- Ouilen.

La région de Taoura caractérisée par des ressources en eau très abondantes. Les caractéristiques de ces ressources varient d'une zone à une autre. Elles dépendent essentiellement des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques (Rouaibia .F.2014).

L'installation d'une station de pompage des eaux souterraines dans la commune de Taoura, s'inscrit dans le programme de l'état à l'appui de la gestion durable des eaux souterraines. Ce projet a été financé par la direction des ressources en eaux, avec une production de débit d'eau d'environ 13000 m<sup>3</sup>/j, en raison de 24h de marche par jour. Cette eau de très bonne qualité donnant la satisfaction de la population bénéficiaire de cette ressource vitale.

Tableau 12. Principaux forages exploités dans la zone d'étude (ABH, DHW S/A)

Nb	Nom du forage	Commune	Nappe	Débit exploité (l/s)	Destination	Qualité de l'eau	Etat actuel
1	T7	Taoura	Taoura	24	AEP	Bonne	Exploité
2	T4Bis	Taoura	Taoura	33	AEP	Bonne	Exploité
3	T8	Taoura	Taoura	25	AEP	Passable	Exploité
4	T15	Taoura	Taoura	4	AEP/IRR	Passable	Exploité
5	T11	Zaarouria	H/Moussa	3	AEP	Moyenne	Exploité
6	D1Bis	Drea	Djelail	4	AEP	Bonne	Exploité
7	D3	Drea	Tadjelte	25	AEP	Bonne	Exploité
8	D4Bis	Drea	O/Boukhil	90	AEP	Moyenne	Exploité
9	D5	Drea	El Oglia	10	AEP	Bonne	Exploité
10	D10	Drea	Drea	8	AEP	Bonne	Exploité
11	D9Bis	Drea	Boussessou	4	AEP	Moyenne	Exploité
12	D8	Drea	Drea	6	AEP	/	/
13	T4	Taoura	Taoura	25	AEP	/	/
14	T1	Taoura	Taoura	50	AEP	/	/
15	T6	Taoura	Taoura	6	AEP	/	/
16	T5	Taoura	Taoura	4	AEP	/	/

### V.1.2 Les sources :

Dix sources étudiées dans notre zone sont destinées essentiellement à l'alimentation en eau potable des agglomérations et l'irrigation des terres agricoles.

Tableau 13. Récapitulatif des sources exploitées dans la zone d'étude

Nb	Dénomination	localisation	Débit l/s
1	Ain Ourida	M'daourouch	0,28
2	Ain Hdjar	M'daourouch	0,29
3	Ain Madaure	M'daourouch	0,37
4	Ain Mahres	Drea	0,28
5	Ain Oгла	Drea	0,38
6	Ain Djemaa	Taoura	0,07
7	Ain Sfisifa	Taoura	0,27
8	Ain Halloufa	Taoura	0,76
9	Ain Trab	Taoura	0,57
10	Ain Tamtmat	Taoura	0,15

### V.1.3 Les puits :

Les 207 puits collectifs et individuels déclarés par la DHW de Souk-Ahras sont estimés à un débit moyen de 0,5 l/s avec un temps moyen de pompage de 4 hr/j, mobilisent un débit de 103,5 l/s.

Tableau 14. Récapitulatif des puits exploités dans la zone d'étude (DHW, S/A)

Nb	Commune	Nb de puits collectifs	Nb de puits individuels	Nb total des puits	Débit exploité (l/s)
1	Taoura	00	22	22	0,5
2	Zaarouria	02	09	11	0,5
3	Drea	26	02	28	0,5
4	M'Daourouch	11	135	146	0,5
Total		39	168	207	103,5

## V.2 Evolution de la population dans la région d'étude :

Pour évaluer l'évolution de la population à des horizons futurs on a appliqué la formule établie par les services des statistiques et de la population (O.N.S) soit :

$$P1 = Pn (1 + a)^n.$$

Avec :

P1 : Population à l'horizon voulu.

Pn : Population à une année de référence.

a : taux d'accroissement global moyen (1.67 % calculé par une formule empirique).

n : nombre d'années qui sépare l'année de référence à l'horizon voulu.

L'évolution de la population se fait à partir d'une population initiale, dans notre cas c'est l'année 2008 :

Tableau 15. Evolution de la population dans la zone d'étude

Nb	Communes	Population par horizon			
		2008	2010	2020	2030
1	M'Daourouch	41201	42589	50260	57380
2	Taoura	18699	19329	22810	26042
3	Zaarouria	12769	13199	15577	17783
4	Drea	6394	6609	7800	8905
Total		79063	81726	94447	110110

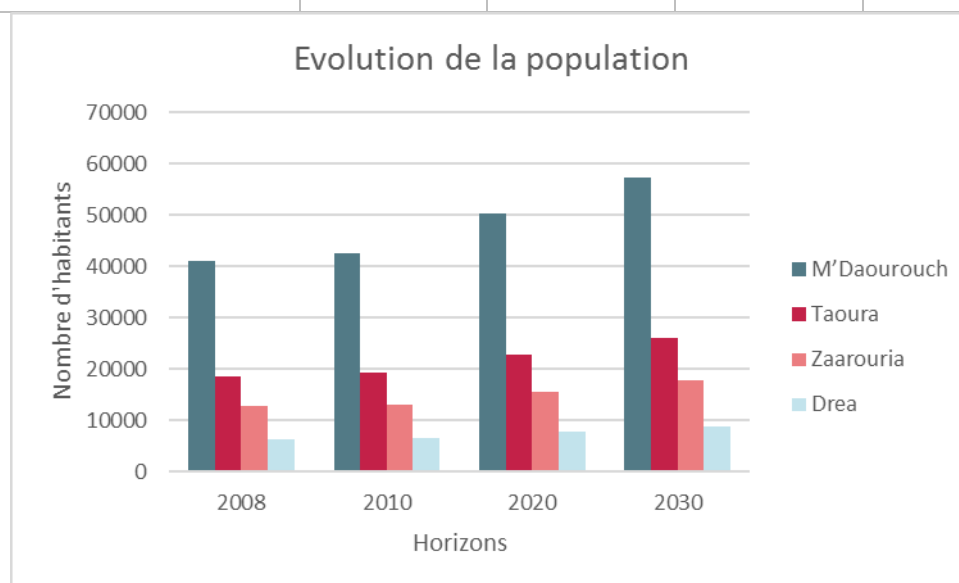


Figure 23. Evolution de la population dans la région d'étude

### V.2.1 Estimation des besoins en eau des agglomérations :

#### V.2.1.1 Estimation des besoins en eau actuels :

L'estimation des besoins en eau actuels des agglomérations est basée essentiellement sur :

- Le nombre d'habitant d'une agglomération existante.
- La dotation journalière, qui est définie comme étant la quantité d'eau moyenne consommée par habitant et par jour, exprimée en (l/j/hab). Cette dotation varie en fonction de la situation géographique, du climat, de la profusion des ressources en eau, de la population...etc.

On peut estimer les besoins en eau de chaque commune par la relation suivante :

$$\text{Besoins en eau (l/j)} = \text{nombre d'habitant} \times \text{la dotation (l/j/hab)}$$

Tableau 16. Besoins en eau domestiques actuels dans la zone d'étude

Nb	Communes	Population	Dotation l/j/hab	Besoins l/j	Besoins m <sup>3</sup> /an	Besoins Hm <sup>3</sup> /an
1	M'Daourouch	41 201	104	4 284 904	1563989,96	1,56
2	Taoura	18 699	104	1 944 696	709814,04	0,71
3	Zaarouria	12 769	80	1 021 520	372854,80	0,37
4	Drea	6394	96	613 824	224045,76	0,22
Total		79 063	/	7 834 944	2870704,56	2,86

D'après les résultats obtenus on observe que les grands besoins sont ceux de la commune de M'Daourouch (1,56 Hm<sup>3</sup>/an) vue le nombre élevé de la population par rapport aux autres communes et avec une dotation journalière qui atteint les 104 l/j/hab.

#### V.2.1.2 Évaluation des besoins futurs en eau potable :

Le calcul des besoins se fait sur la base d'une dotation théorique unitaire de 150 l/j/hab (selon l'ADE de Souk-Ahras). Pour suivre l'évolution des besoins futurs, nous avons pris l'année 2008 comme année de référence pour les calculs qui suivent.

Tableau 17. Besoins en eau futurs des populations de la zone d'étude

Nb	Communes	Pop 2008	Besoins Hm <sup>3</sup> /an	Pop 2010	Besoins Hm <sup>3</sup> /an	Pop 2020	Besoins Hm <sup>3</sup> /an	Pop 2030	Besoins Hm <sup>3</sup> /an
1	M'Daourouch	41201	1,56	42589	2,33	50260	2,75	57380	3,14
2	Taoura	18699	0,71	19329	1,06	22810	1,25	26042	1,43
3	Zaarouria	12769	0,37	13199	0,72	15577	0,85	17783	0,97
4	Drea	6394	0,22	6609	0,36	7800	0,43	8905	0,49
Total		79063	2,86	81726	4,47	94447	5,28	110110	6,03

D'après ces résultats, les besoins en eau augmentent au fur et à mesure de l'augmentation de la population de 2,86 Hm<sup>3</sup>/an en 2008 à 6,03 Hm<sup>3</sup>/an en 2030 ce qui représente plus que le double des besoins actuels.

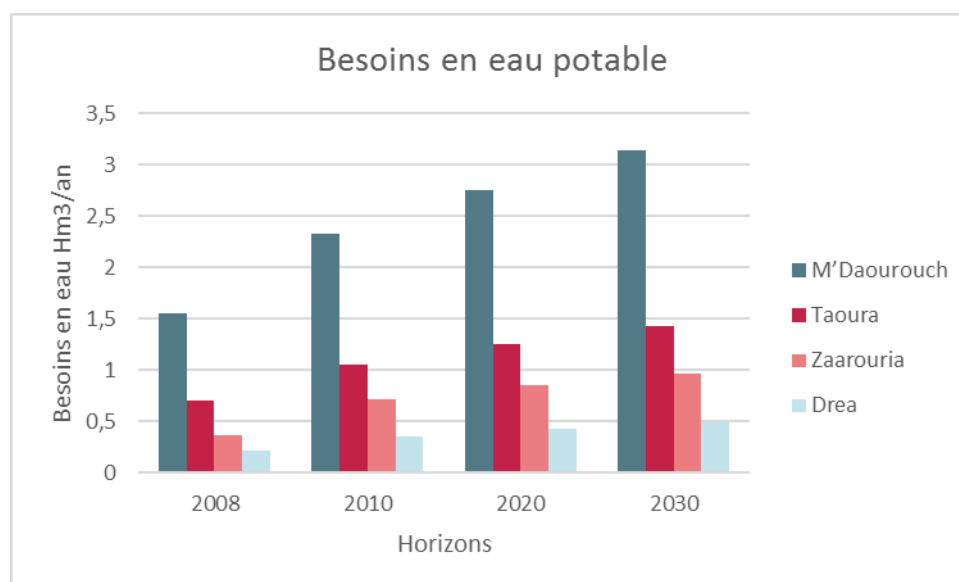


Figure 24. Besoins en eau futurs des agglomérations de la zone d'étude

## V.2.2 Besoins en eau pour l'irrigation :

D'après les données recueillies des services de (D.S.A) et de (D.P.A.T) de Souk-Ahras on peut estimer les quantités d'eau utilisées pour l'irrigation des terres agricoles qui sont réparties dans notre zone d'étude, dont la superficie agricole utile (S.A.U) est de 50 720 Ha soit 86,75 % de la superficie totale (S.A.T) qui est de 55 527 Ha. La superficie totale irriguée ne représente que 582 Ha.

Tableau 18. Répartition des superficies agricoles (en Ha) au niveau de la zone d'étude

Nb	Communes	Sup. Totale	S.A.T	S.A.U	Sup. Irriguée	S.A.T%	S.A.U%
1	M'Daourouch	14 572	12 924	10 775	170	81	83
2	Taoura	25 096	19 338	18 469	102	64	89
3	Zaarouria	10 100	8 560	7 552	210	54	87
4	Drea	20 000	14 705	13 924	100	74	88
Totale		69 768	55 527	50 720	582	68,25	86,75

La détermination des besoins des surfaces irriguées se fait à la base de la dotation théorique moyenne, donnée à partir du service concernée (DSA), dans notre cas la dotation est de 6000 m<sup>3</sup>/Ha/an. Pour une superficie de 528 Ha il est nécessaire de fournir 3,49 Hm<sup>3</sup>/an.

Tableau 19. Besoins actuels en eau d'irrigation dans la région d'étude

Nb	Communes	Sup. irriguée (Ha)	Dotation m <sup>3</sup> /Ha/an	Besoins m <sup>3</sup> /Ha/an
1	M'Daourouch	170	6000	1020000
2	Taoura	102	6000	612000
3	Zaarouria	210	6000	1260000
4	Drea	100	6000	600000
Totale		582	6000	3492000

### V.2.2.1 Estimation des besoins futurs des surfaces irriguées :

La projection de la demande future en eau d'irrigation est envisagée suivant l'évolution de la surface irriguée dans le temps, en se basant sur le taux d'accroissement annuel potentiel pour la PMH, selon le PNE et la dotation théorique moyenne par Ha programmée (6000 m<sup>3</sup>/Ha). Dans notre zone d'intérêt on a remarqué que l'accroissement de la superficie irriguée dans les horizons projetés engendre une augmentation des besoins en eau, dont 3,49 Hm<sup>3</sup>/an en 2008 et 4,4 Hm<sup>3</sup>/an en 2030

Tableau 20. Besoins futurs en eau d'irrigation dans la zone d'étude

Horizons	2008	2015	2020	2025	2030
Superficies (Ha)	582	626,3	662,12	699,17	736,22
Dotation moyenne (m <sup>3</sup> /Ha/an)	6000	6000	6000	6000	6000
Besoins (Hm <sup>3</sup> /an)	3,49	3,76	3,97	4,2	4,4

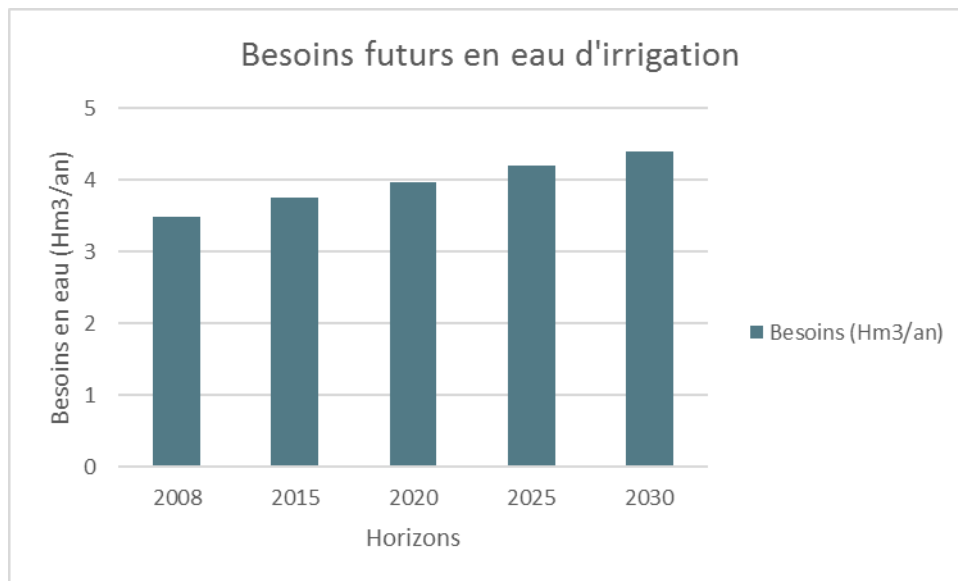


Figure 25. Besoins futurs en eau d'irrigation des surfaces agricoles de la zone d'étude

### Introduction

L'étude chimique de l'eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité pour voir la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages.

Les eaux souterraines, constituent une ressource de qualité généralement meilleure à celle des eaux de surface, grâce à la protection naturelle des couches du sol sus-jacentes et aux pouvoirs filtrant des terrains. Elles permettent des échanges physico-chimiques avec le milieu réservoir en provoquant un retard de la matière polluante par sa destruction ou par sa fixation. Le milieu aquifère et les microorganismes peuvent réagir sur les produits polluants, il s'agit de phénomènes très complexes dont les réactions biologiques sont beaucoup plus efficaces en milieu non saturé. (Bousnoubra. H 2002)

Au niveau de la région de Taoura, l'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population de la région aval du bassin de la Medjerda. Cependant, le manque de suivi de l'évolution de la qualité de cette eau et la méconnaissance des caractéristiques hydrochimiques est à noter.

L'interprétation des analyses a pour but d'identifier le faciès chimique, de mettre en évidence les différents éléments pouvant jouer un rôle primordial dans leur répartition et par conséquent d'établir l'origine des éléments chimiques rencontrés, ainsi l'identification des paramètres polluants et leurs origines.

### VI.1 Matériels et méthodes :

Les données acquises dans le cadre de nos activités de recherche couvrent une période de 12 mois. L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Taoura est basée sur les résultats analytiques obtenus sur une série de 10 sources répertoriées. (Figure 26).

Les prélèvements réalisés sur les sources ont été procédés directement aux griffons. L'échantillonnage de l'eau a été effectué dans des bouteilles de 1 litre en polyéthylène et transporté au laboratoire dans une glacière à basse température (4 ° C). Les paramètres physiques (potentiel d'hydrogène pH, conductivité électrique CE, température T ° et oxygène dissous OD) ont été mesurés in situ à l'aide de dispositifs de terrain tels que le pH-mètre WTW, un conductimètre WTW. La température a été obtenue simultanément avec la mesure du pH, de la CE et de l'oxygène dissous. Les



## Hydrochimie

analyses chimiques ont été effectuées sur les principaux éléments responsables de la minéralisation des eaux, les cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et les anions (chlorures, sulfates et bicarbonates). Les paramètres de l'azote : Les nitrites, les nitrates, l'ammonium et les phosphates.

Analyses des substances toxiques «métaux lourds» tels que : le fer et le zinc.

Deux campagnes de prélèvements (Novembre 2017, Avril 2018), ont été effectuées afin d'étudier la qualité des eaux des sources, l'origine de la minéralisation et son évolution spatio-temporelle durant les deux saisons de l'année.

Les dix sources choisies, sont pérennes, accessibles et couvrent les zones proches de Taoura chef-lieu et les alentours. Les coordonnées, relevées à l'aide d'un GPS de type GARMIN GPS.

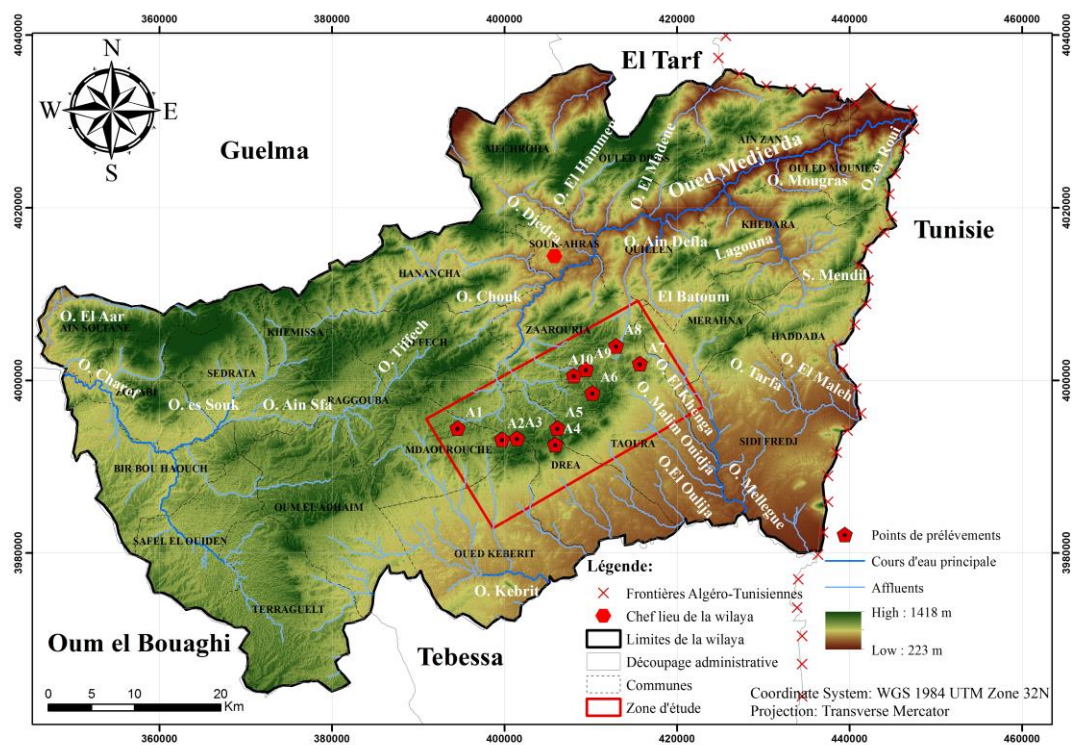


Figure 26. Carte de localisation des points de prélèvements des eaux de sources de Taoura

## VI.2 Résultats et interprétations :

### VI.2.1 Mesures in situ :

#### VI.2.1.1 La température T (°C) :

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique et bactérienne. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Elle est l'une des caractéristiques les plus importantes d'un système aquatique qui affectent les niveaux d'oxygène dissous (Rajendran & Mansiya 2015). Les valeurs de la température oscillent entre 15,1 et 21,6 °C. Les plus basses valeurs marquent la période de novembre avec des minimas de 15 °C (A1, A5, A6). Toutes les valeurs enregistrées ne dépassent pas les normes de potabilité (12 à 25 °C). L'eau fraîche est généralement plus acceptable que l'eau chaude. La température élevée de l'eau augmente la prolifération des micro-organismes et les problèmes liés au goût, l'odeur, la couleur et à la corrosion (WHO 2011). Les dix sources se classent selon la classification de Schoeller de (1962) parmi les sources froides.

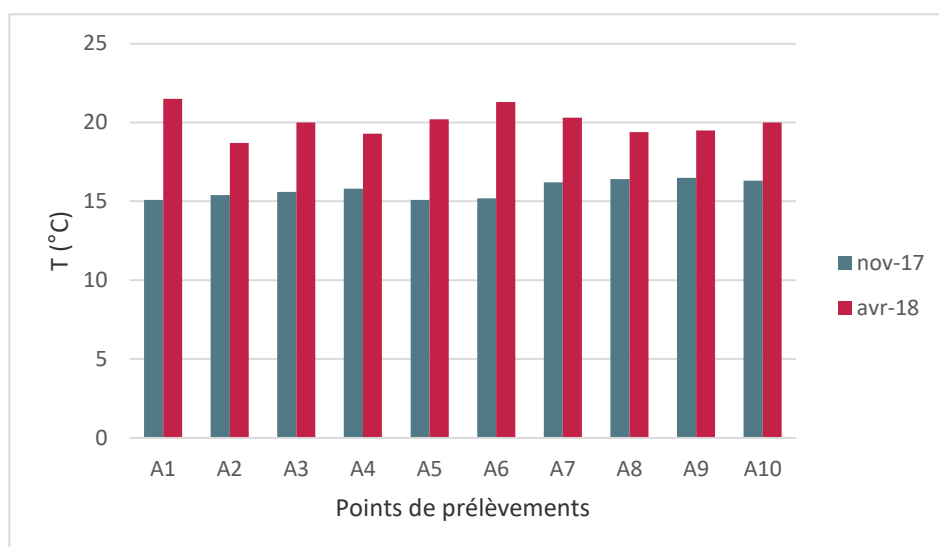


Figure 27. Valeurs de la température pendant les deux campagnes (Nov-17, Avr-18)

#### VI.2.1.2 Le potentiel d'hydrogène pH :

Le pH (potentiel Hydrogène) 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

## Hydrochimie

dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé.

Tableau 21. Echelle du Potentiel d'Hydrogène

pH < 5	-Acidité forte - Présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée, majorité des eaux de surfaces
5,5 < pH < 8	Eaux souterraines
pH > 8	Alcalinité, évaporation intense

Les eaux des sources sont caractérisées par un pH relativement alcalin aussi bien en période de pluie qu'en période sèche, qui varie entre 7,4 et 8,2 avec des écarts faibles. Ceci est probablement lié à, l'ion bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), ( $\text{Ca}^{2+}$ ) Ce qui reflète la présence des roches calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) et des dolomites ( $\text{CaCO}_3 \text{MgCO}_3$ ). Lorsque ces roches sont présentes, le risque d'acidification est faible. Les eaux des sources peuvent être considérées comme acceptables, en se référant aux normes de L'OMS.

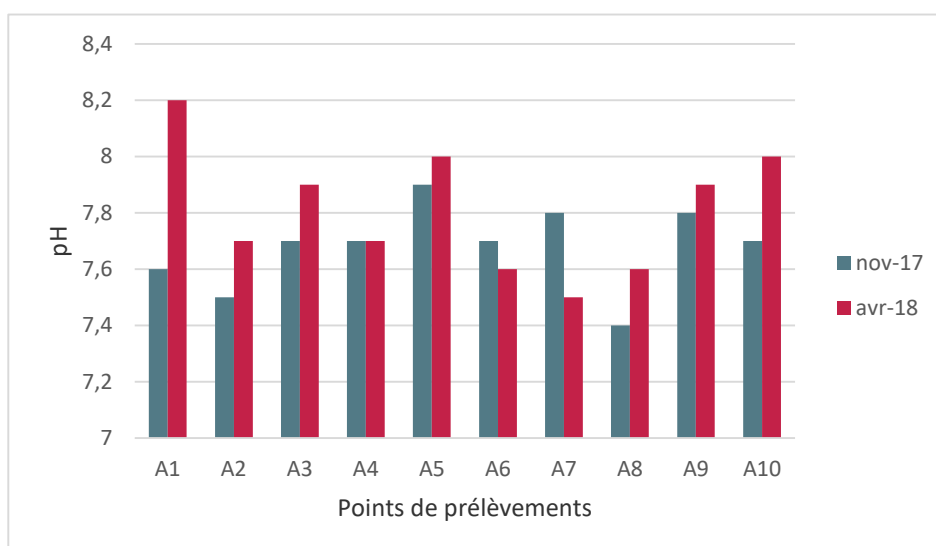


Figure 28. Variation des valeurs du pH des eaux de sources de Taoura

### VI.2.1.3 Conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) :

Les fluctuations globales de la charge chimiques de l'eau peuvent être traduites par la détermination de la conductivité électrique de l'eau qui est une fonction linéaire des ions dissous. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité équivalente à 20 ou 25 °C. Les appareils de mesure utilisés sur le terrain effectuent en général automatiquement cette conversion. La conductivité électrique, est directement liée aux formations traversées dans le bassin hydrogéologique des griffons. Les résultats des mesures ont permis d'observer la variation de la conductivité (Figure 29), montrant que celle-ci varie entre 469 et 1495  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et ceci pendant les deux périodes considérées. Les faibles valeurs sont observées pour (A7) avec une valeur de 469  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , moyennes pour (A4, A5, A9) et fortes valeurs pour les sources (A1, A2, A6), l'origine de cette minéralisation, est attribuée à priori aux teneurs assez élevées en sels minéraux.

Les sources A1, A2 et A6 représentent des valeurs dépassant la norme fixée par l'OMS 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  cela est peut-être dû au lessivage des fertilisants par les eaux d'irrigation vue la vocation agricole de la région.

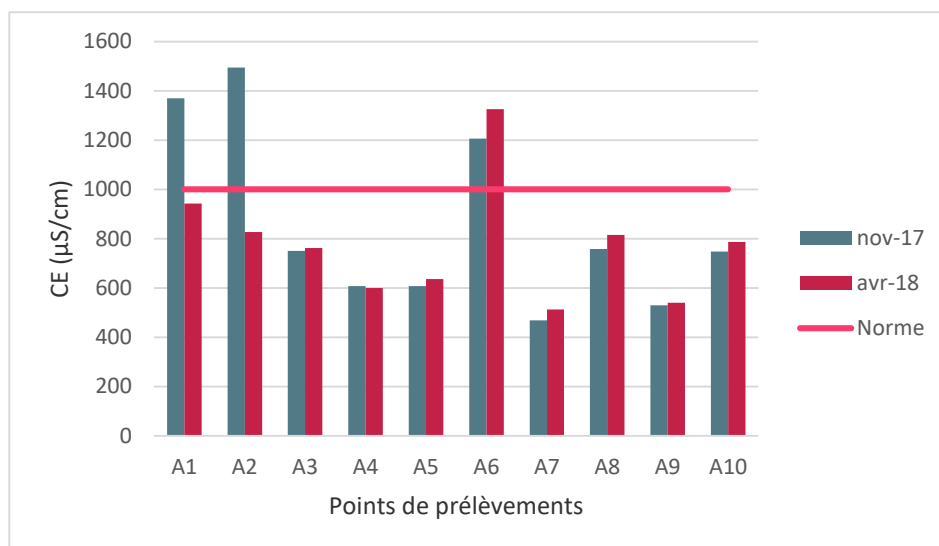


Figure 29. Valeurs de la conductivité électrique mesurées dans la zone d'étude

#### VI.2.1.4 Total des sels dissous :

Le TDS signifie le total des sels dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau.

Le TDS est composé des sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans les eaux incluent le  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  qui sont des cations et  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  qui sont des anions.

Ces minéraux peuvent provenir d'un certain nombre de sources naturelles ainsi que des activités humaines.

Tableau 22. Grille d'évaluation des TDS dans l'eau

TDS (mg/l)	Evaluation	Sites correspondants	
		Avr 18	Nov 17
Moins de 300	Excellent		
300-600	Bien	A5, A7, A9	
600-900	Passable	A3, A4, A8, A10	A3, A4, A5, A7, A9
900-1200	Faible	A1, A2, A6	A8, A10
Plus de 1200	Inacceptable		A1, A2, A6

Les résultats de TDS montrent que les fortes valeurs se localisent aux points A1, A2 et A6 (période de novembre 17) avec des teneurs de 1270, 1510 et 1530 mg/l respectivement. Le reste des points et pour la majorité présente une qualité faible à passable.

Les points A5, A7 et A9 présentent une bonne qualité pendant la période d'Avril 18 variant entre 300 et 600 mg/l

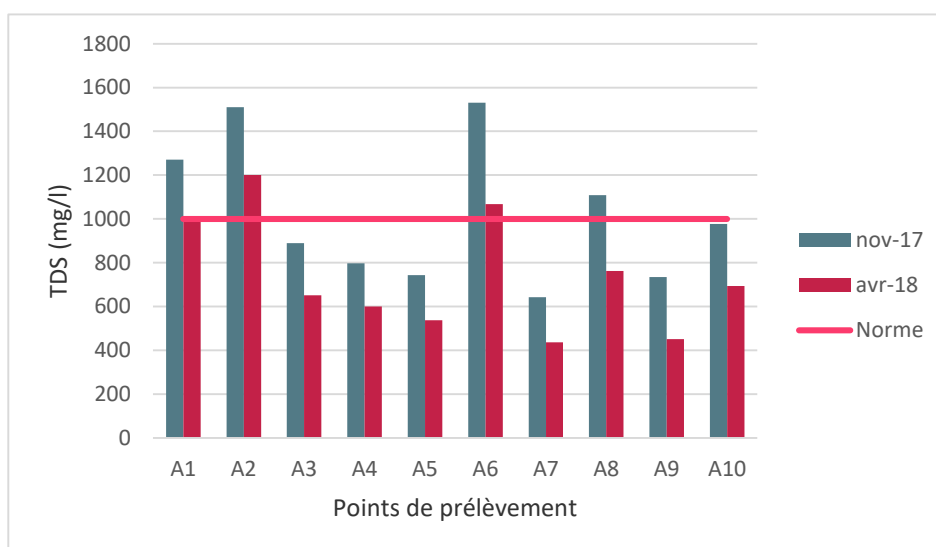


Figure 30. Evolution de la TDS dans les eaux de sources de Taoura

### VI.2.1.5 L'Oxygène dissous (mg/l) :

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O<sub>2</sub> diminue lorsque la température et l'altitude augmentent. Les valeurs de l'oxygène dissous des eaux de sources varient entre 6,86 et 8,99 mg/l. Ces valeurs sont comprises dans l'intervalle 4-18 mg/l, indiquent l'absence de pollution significative.

Tableau 23. Grille utilisée pour l'évaluation de l'O<sub>2</sub> des eaux souterraines. (ANRH, 2012)

Elément	Classe I Bonne	Classe II Moyenne	Classe III Mauvaise	Classe IV Très mauvaise
O <sub>2</sub> (mg/l)	18-4	4 - 2.4	2.4 - 1.2	1.2 - 0

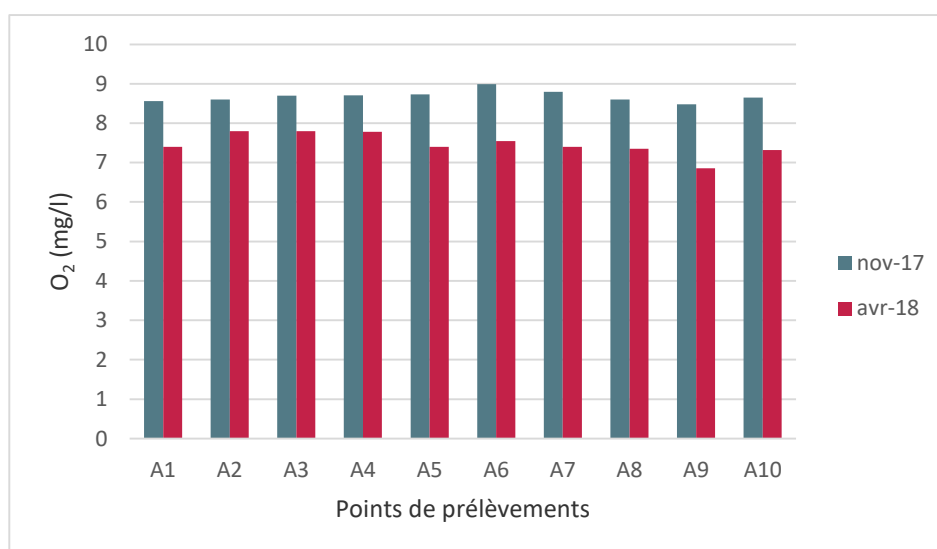


Figure 31. Valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux de sources de Taoura

### VI.2.2 Paramètres chimiques mesurés au laboratoire :

La fiabilité des analyses chimiques est contrôlée à l'aide de la balance ionique (BI) d'après la formule (Schoeller 1962) est la suivante :

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

Les analyses pour lesquelles la BI est supérieure à 6 % ont été éliminées.

### VI.2.2.1 Les éléments majeurs :

#### VI.2.2.1.1 Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) :

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles: Soit la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4$ ).

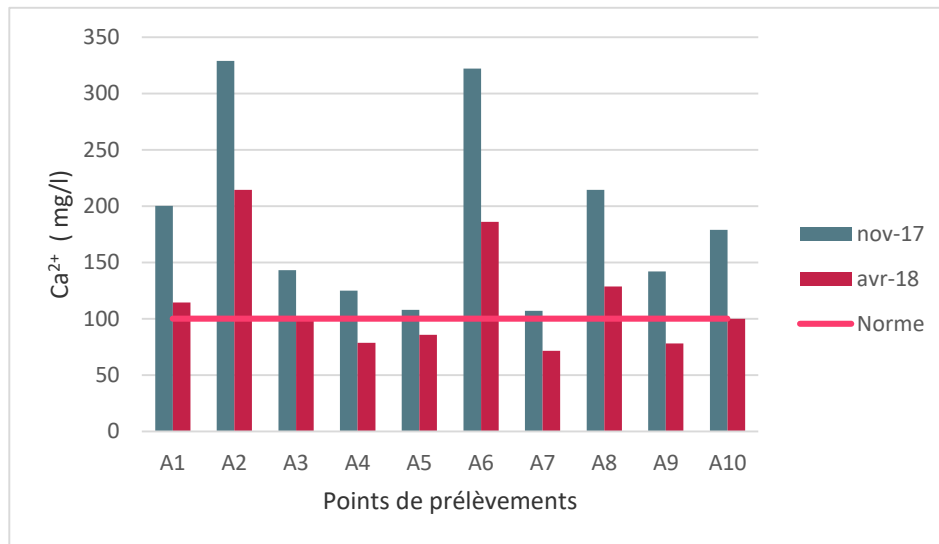


Figure 32. Concentrations du Calcium dans les eaux de sources de Taoura  
Pour la majorité des sources, les teneurs en calcium dépassent largement la norme de 100 mg/l (OMS), avec des valeurs atteignant les 329 mg/l. Cela est dû principalement à la dissolution des formations carbonatées qui représente la nature géologique de la région.

#### VI.2.2.1.2 Magnésium $\text{Mg}^{2+}$ :

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

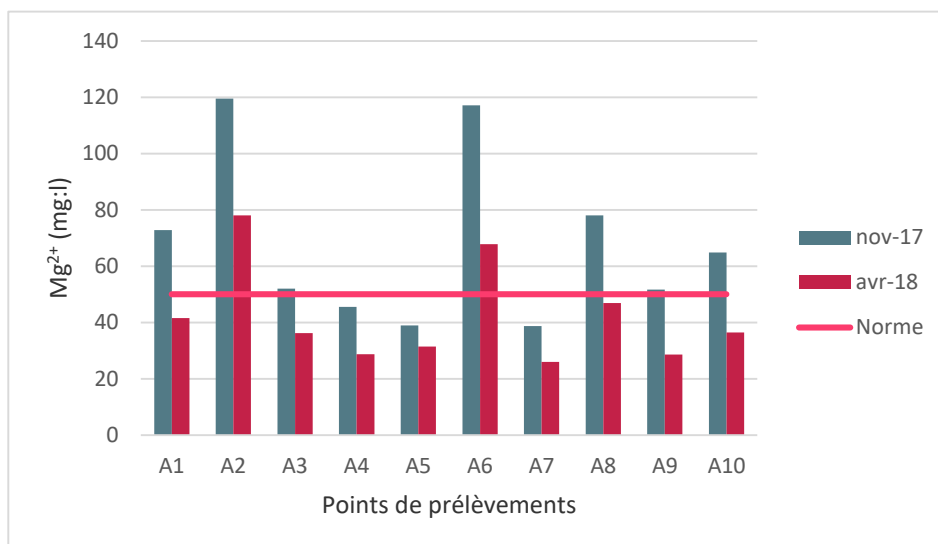


Figure 33. Concentrations du Magnésium dans les eaux de sources de Taoura

Les concentrations en Magnésium sont nettement inférieures à celles du Calcium. Néanmoins des valeurs dépassant la norme (50 mg/l) ont été observées dans plusieurs points atteignant les 119,5 mg/l (Valeur max). La présence de Mg<sup>2+</sup> dans les eaux témoigne de la dissolution de dolomies, de calcaires ou éventuellement de marnes dolomitiques (Muet, 1985).

#### VI.2.2.1.3 Le potassium K<sup>+</sup> :

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK).

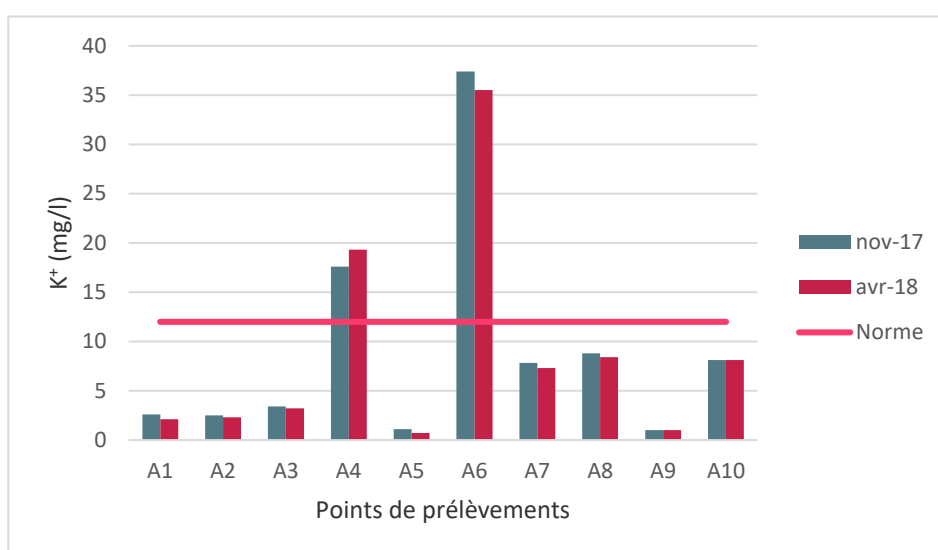


Figure 34. Concentrations du Potassium dans les eaux de sources de Taoura



## Hydrochimie

Les teneurs en Potassium sont d'une manière générale dans les normes (12 mg/l) sauf pour deux sources A4 et A6 où les valeurs ont dépassé la limite avec des valeurs max atteignant 19,3 et 37,4 mg/l respectivement. Les teneurs élevés en potassium des eaux des sources (A4) et (A6) indiquent une mise en solution ou altération des minéraux riches en potassium provenant du Trias de la région, mais les quantités augmentent dans l'eau polluée en raison de l'élimination des eaux usées (Trivedy & Goel 1984).

### VI.2.2.1.4 Le Sodium $\text{Na}^+$ :

Le sodium est un élément dit conservatif car une fois en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine, les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres. (Rodier J, 2009)

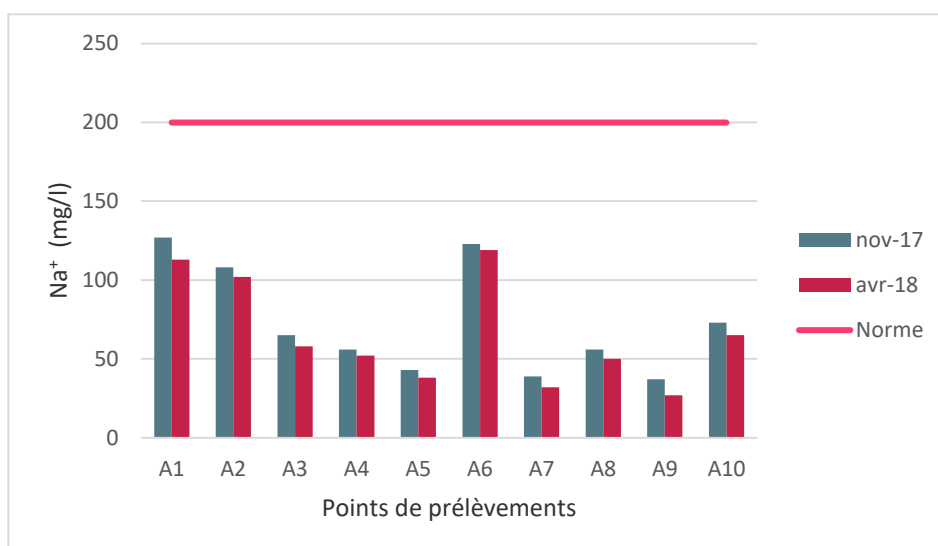


Figure 35. Concentrations du Sodium dans les eaux de sources de Taoura

Les valeurs du Sodium sont relativement faibles dans tous les points oscillant entre 27 et 127 mg/l ce qui reste loin de la norme (200 mg/l).

### VI.2.2.1.5 Les chlorures $\text{Cl}^-$ :

L'origine des chlorures est liée principalement à la dissolution des formations salifères. Ils proviennent aussi de la pollution anthropique et de l'évaporation intense qui provoque l'augmentation des concentrations en ions  $\text{Cl}^-$ , et qui se produit dans les régions où le niveau statique est proche de la surface du sol. Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. (J. Mater, 2014).

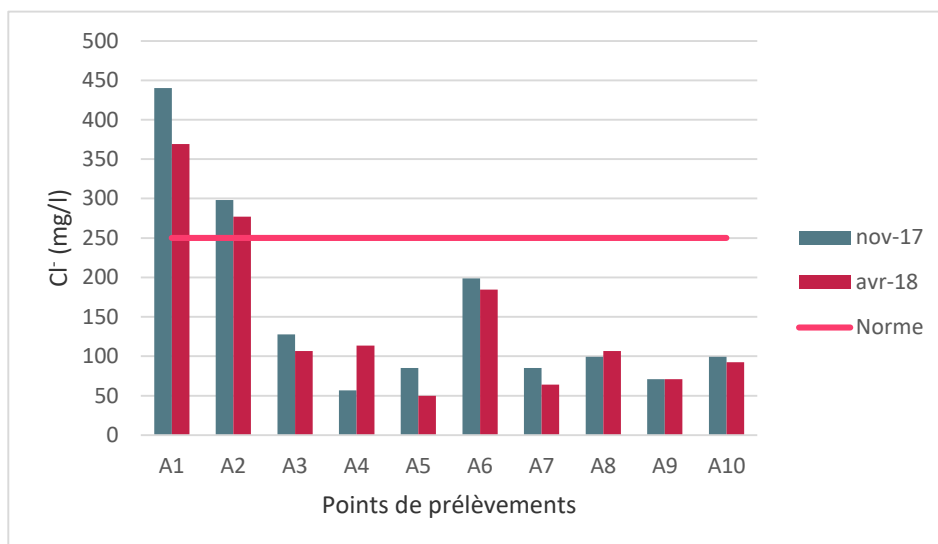
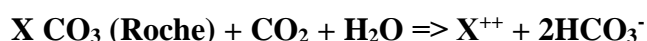


Figure 36. Concentrations des Chlorures dans les eaux de sources de Taoura

La teneur en chlorures dans les eaux de sources prélevées ne dépasse pas la limite souhaitable de 250 mg / l sauf dans les sources (A1, A2), où les augmentations s’observent pendant les deux périodes (Nov 17 et Avr 18). La concentration en chlorure sert d’indicateur de la pollution causée par les eaux usées. Les gens habitués au chlorure supérieur dans l’eau sont soumis à des effets laxatifs (Dahiya & Kaur 1999).

#### VI.2.2.1.6 Les bicarbonates $\text{HCO}_3^-$ :

Les bicarbonates représentent le résultat de l’équilibre physico-chimique entre la roche, l’eau et le gaz carbonique, selon l’équation générale :



Les concentrations en bicarbonates dans les eaux naturelles sont fonction :

- Du pH de l’eau ;
- De la température ;
- De la concentration en  $\text{CO}_2$  dissous ;
- De la nature lithologique.

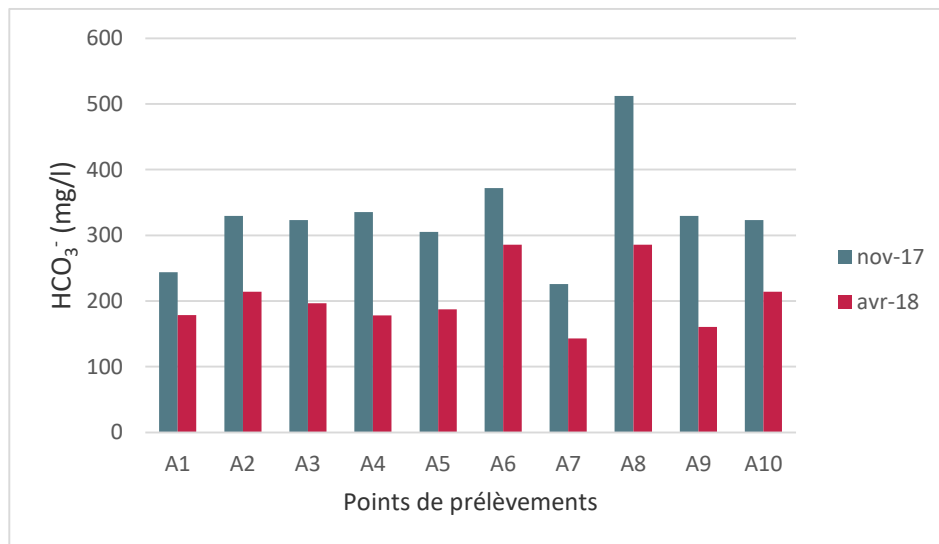


Figure 37. Teneurs en Bicarbonates dans les eaux de sources de Taoura

Les valeurs des Bicarbonates sont assez importantes avec un minimum de 142,8 mg/l et un maximum de 512,4 mg/l. La présence de cet élément en quantité importante montre la présence d'une interaction entre les eaux et les formations calcaires présentes dans la région.

#### VI.2.2.1.7 Les sulfates $\text{SO}_4^{2-}$ :

Les ions du sulfate ne provoquent pas d'effets nocifs particuliers sur les sols ou les plantes ; Toutefois, ils contribuent à augmenter la salinité de la solution du sol (Nag 2014). La teneur en sulfate change de manière significative avec le temps lors de l'infiltration des précipitations et des eaux souterraines. La concentration de sulfate est susceptible de réagir avec les organes humains si la valeur dépasse la limite maximale autorisée de 400 mg / l et de provoquer un effet laxatif sur l'organisme humain avec l'excès de magnésium dans les eaux souterraines (Alam et al. 2012).

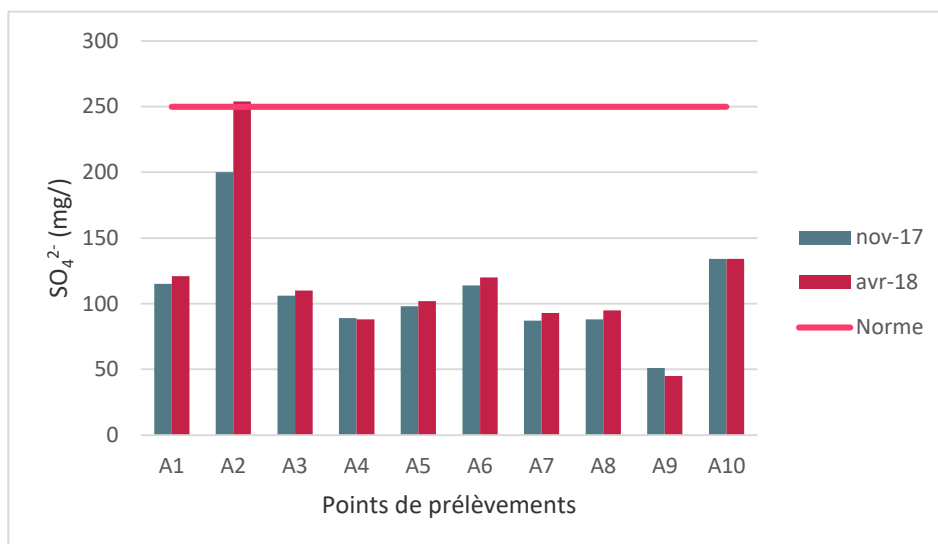


Figure 38. Concentrations des Sulfates dans les eaux de sources de Taoura  
Cependant, les valeurs des sulfates restent dans la limite autorisée par l’OMS (250 mg/l) avec un minimum de 45 mg/l et un maximum de 254 mg/l. La concentration des sulfates dans la source A2 pendant la période d’Avr-18 montre une valeur supérieure à la norme vu probablement au lessivage des terrains calcaires traversées.

### VI.2.3 Détermination des faciès chimiques :

Pour bien identifier les faciès hydrochimiques et pour donner une indication sur les aspects qualitatifs des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats des analyses se révèle un outil incontournable. Pour atteindre cet objectif, les données hydrochimiques ont été traitées en utilisant le diagramme de Piper (Piper 1944) qui permet de représenter les faciès chimiques d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs. (Vayana, 2009).

Les résultats obtenus des différentes campagnes sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 24. Représentation des faciès hydrochimiques des eaux de sources selon les périodes

Campagnes	Faciès chimiques	Nombre de sources	Pourcentage
Nov-2017	Chloruré Calcique	2	20%
	Bicarbonaté Calcique	8	80%
Avr-2018	Chloruré Calcique	3	30%
	Bicarbonaté Calcique	6	60%
	Chloruré Bicarbonaté Calcique	1	10%

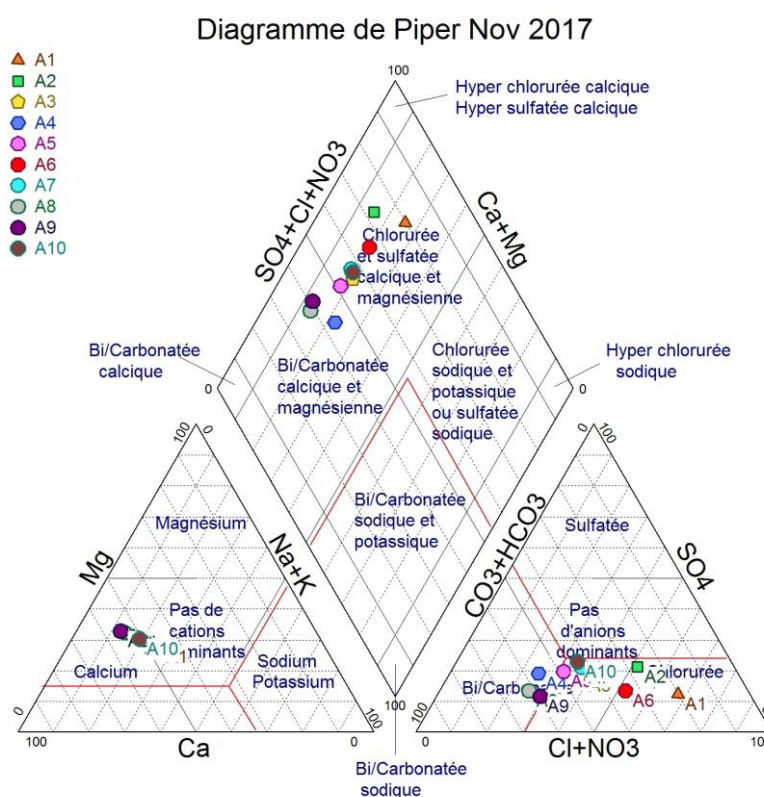


Figure 39. Représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de sources de Taoura (Nov. 2017)

Le diagramme montre que la majorité, 80 % des échantillons de sources prélevés ont un faciès Bicarbonaté Calcique : Sources (A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 et A10), et 20 % des sources ont un faciès Chloruré Calcique : Sources (A1, A2).

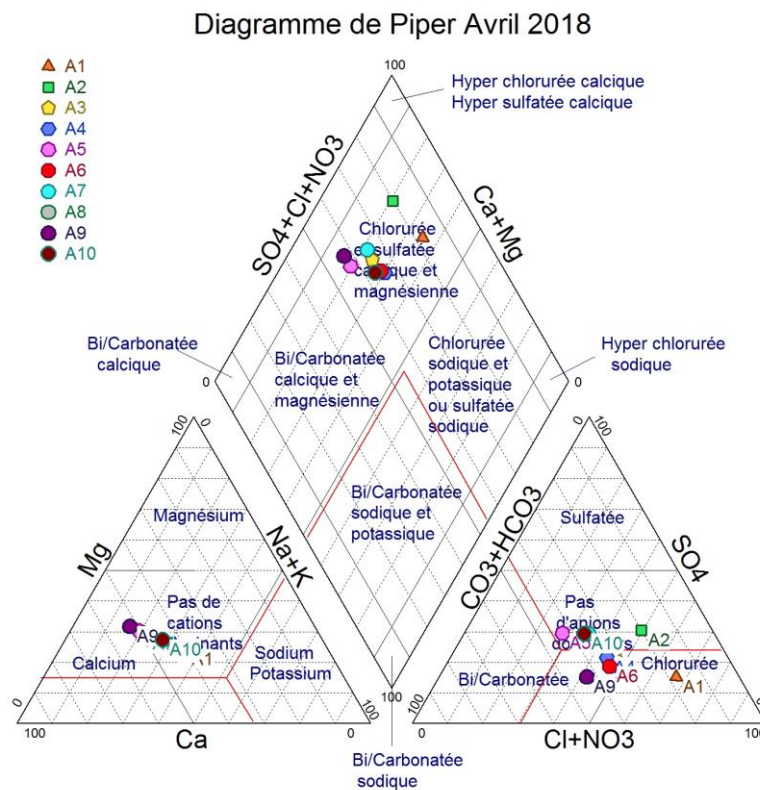


Figure 40. Représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de sources de Taoura (Avr. 2018)

Ce diagramme montre que 60 % des échantillons de sources prélevés ont un faciès Bicarbonaté Calcique : Sources (A3, A5, A7, A8, A9 et A10), 30 % des sources ont un faciès Chloruré Calcique : Sources (A1, A2, A6) et 10 % ont un faciès Chloruré Bicarbonaté Calcique.

L'analyse des deux diagrammes montre une bonne corrélation entre les ions  $HCO_3^-$  et  $Ca^{2+}$  confirme la même origine de ces deux éléments, qui serait la dissolution des formations carbonatées (calcaire) au cours du transit des eaux dans la formation aquifère, ainsi qu'un accroissement de la minéralisation des eaux, démontré par la présence des eaux chlorurées (Avril 2018).

## VI.2.4 Les paramètres de pollution :

### VI.2.4.1 Les nitrates $NO_3^-$ :

La contamination par les nitrates dans l'eau souterraine est l'un des problèmes majeurs dans les études sur la qualité de l'eau (Alam et al. 2012). Ils représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Leur présence dans les eaux

souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques. (Laraba., Benhamza., Khadri, 2013).

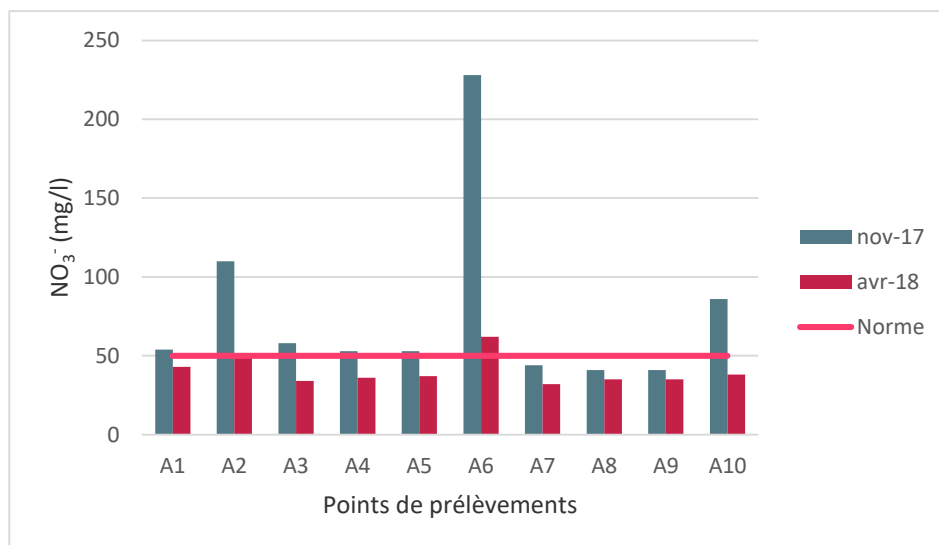


Figure 41. Concentrations des nitrates dans les eaux de sources de Taoura

Les concentrations des nitrates varient pendant les deux périodes, où on constate des valeurs dans les normes pendant la période d'Avr 18 avec des valeurs entre 32 mg/l et 50 mg/l à l'exception du point A6 où la valeur est de 62 mg/l dépassant la limite de 50 mg/l. Pendant la période de Nov 17 les valeurs sont significativement plus supérieures, des valeurs entre 41, 41, 44 mg/l sont enregistrés dans les sources A8, A9 et A7 respectivement restant dans les normes, ce qui est du reste des sources la limite est bien dépassée avec des valeurs entre 53 mg/l (A4 et A5) et 228 mg/l (A6). Les nitrates ne produisent pas de couleur ou d'odeur dans l'eau et peuvent causer le cancer chez les humains lorsqu'ils sont consommés sur une longue période de temps (Alam et al. 2012). La forte concentration de nitrate dans l'eau potable est toxique et provoque le syndrome du bébé bleu (méthémoglobinémie) chez les enfants et les carcinomes gastriques (Comly 1945; Gilly et al. 1984).

### VI.2.4.2 Les nitrites $\text{NO}_2^-$ :

Les nitrites proviennent d'une transformation de l'ammonium par les bactéries. Leur présence est signe d'une pollution d'origine bactériologique et organique.

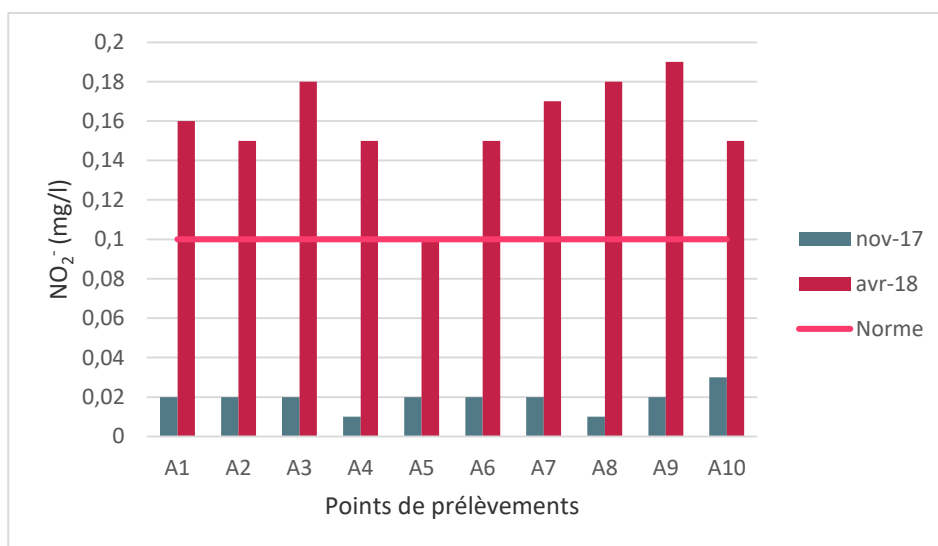


Figure 42. Concentrations des nitrites dans les eaux de sources de Taoura  
 Les valeurs des nitrites varient entre 0,01 et 0,03 mg/l dans la période de Nov 17 ce qui reste dans la norme (0,1 mg/l) par contre les valeurs pendant Avr 18 dépassent la norme et enregistrent des valeurs entre 0,1 et 0,19 mg/l.

#### VI.2.4.3 L'ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup> :

L'ion ammonium est la principale forme de l'azote dans la nature (Derwich et al. 2013 ; Chahboune et al. 2014). Ils proviennent des conditions d'anaérobioses des écosystèmes (Chapman 1996). L'ammonium provient des activités humaines, rejets agricoles (notamment le lisier) ou bien des rejets et déchets industriels.

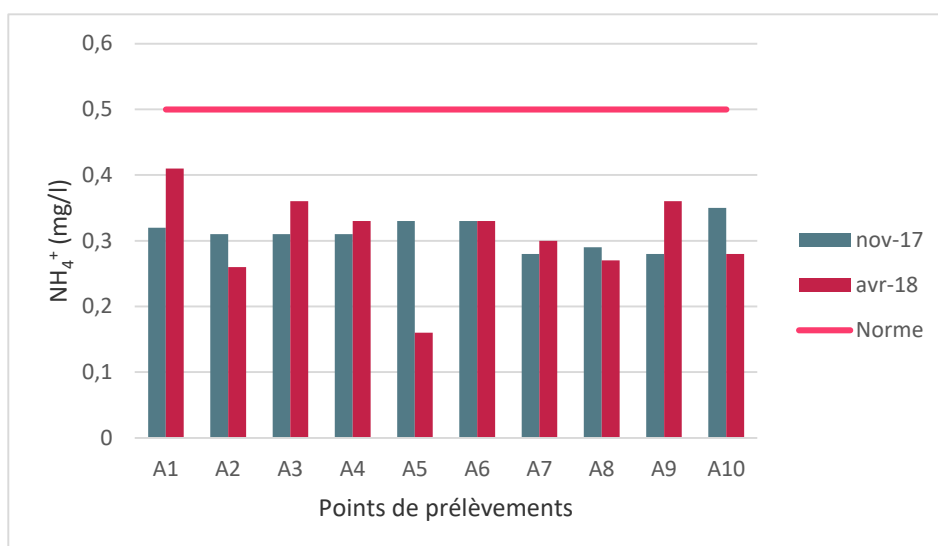


Figure 43. Concentrations de l'ammonium dans les eaux de sources de Taoura  
 Les valeurs de l'ammonium oscillent entre 0,16 et 0,41 mg /l avec une moyenne de 0,31 mg/l ce qui reste en dessous de la norme admissible par l'OMS (0,5 mg/l).



### VI.2.4.4 Phosphates $\text{PO}_4^{3-}$ :

L'origine des phosphates dans les eaux serait liée aux rejets urbains ou à la dissolution des engrais chimiques (NPK).

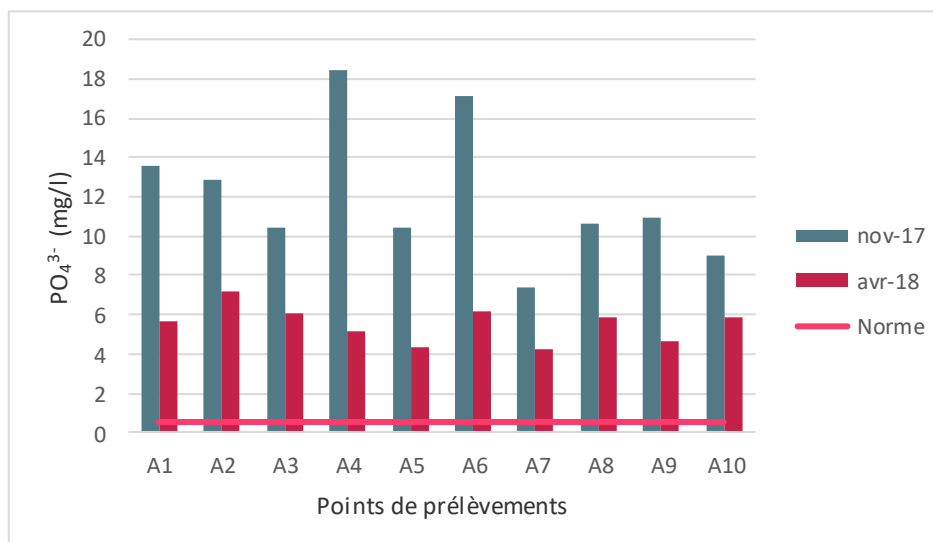


Figure 44. Concentrations en Phosphates des eaux de sources de Taoura

Les résultats d'analyses montrent que les valeurs en phosphates sont supérieures à la norme fixée par l'OMS (0,5 mg/l) dans tous les points échantillonnés avec un minimum de 4,2 mg/l (A7 Avr 2018) et un maximum de 18,4 mg/l (A4 Nov 2017). Suite à la pollution des eaux de la nappe provoquée par les pratiques agricoles dans la zone d'étude (utilisation excessive des phosphates sous forme d'engrais chimiques ou de pesticides).

### VI.2.5 Éléments métalliques en traces :

L'eau souterraine est polluée par des métaux lourds de diverse sources, telles que l'altération chimique des roches et des sols, la décomposition de la matière végétale et animale, les retombées humides et sèches de la matière particulaire atmosphérique et les activités humaines, y compris le rejet de divers effluents domestiques et industriels.

Bien que les métaux lourds comme le fer, le zinc... etc. sont extrêmement essentiels à l'homme, de grandes quantités peuvent provoquer des troubles physiologiques (Alam *et al.* 2012).

#### VI.2.5.1 Le Fer :

La présence du fer dans l'eau peut avoir diverses origines : naturelle par le lessivage des terrains argileux, ou industrielle (métallurgiques, sidérurgiques). (Debieche, 2002)

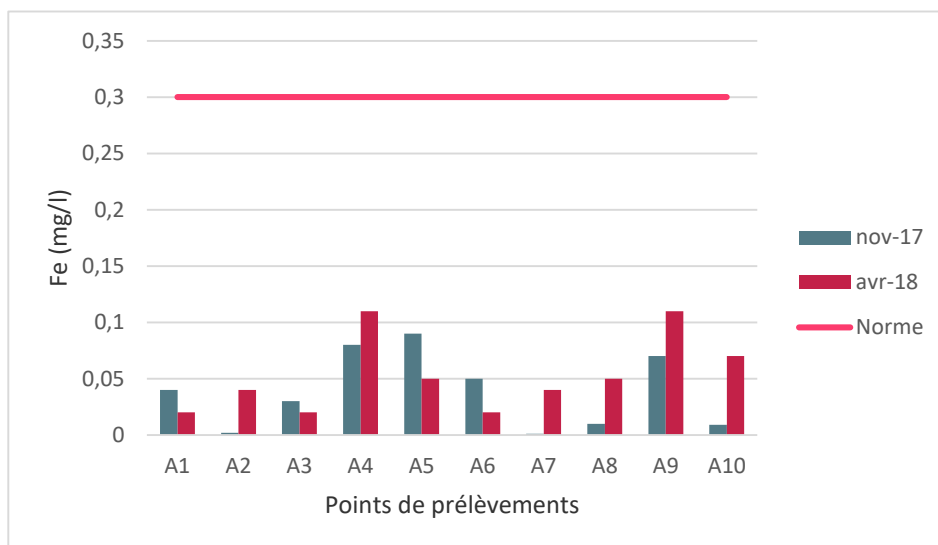


Figure 45. Variation des concentrations en fer des eaux de sources de Taoura  
 Les teneurs en Fer ne dépassent pas la valeur guide admise par l'OMS fixée à 0,3 mg/l dans tous les points étudiés. Les valeurs varient entre 0,001 mg/l et 0,11 mg/l

#### VI.2.5.2 Le Zinc :

Le zinc est un métal très répandu dans le globe. Les apports anthropiques de Zinc dans l'environnement résultent des sources minières industrielles, des épandages agricoles, et des activités urbaines. (Guettaf M., 2015)

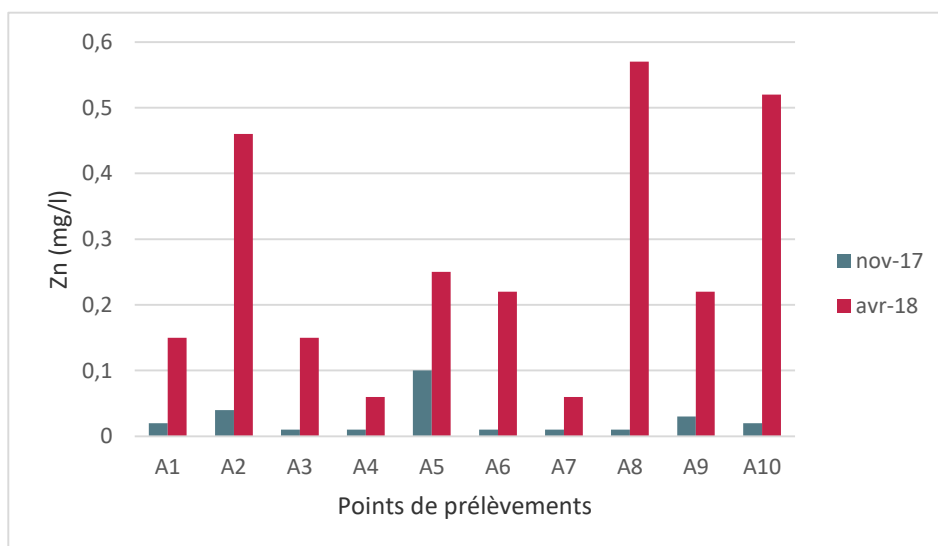


Figure 46. Variation des concentrations en Zinc des eaux de sources de Taoura  
 Les valeurs du Zinc mesurées dans les eaux de sources restent au-dessous de la norme fixée par l'OMS à 5 mg/l et varient entre 0,01 mg/l et 0,57 mg/l.

### **VI.3 Classification et interprétation de la qualité des eaux souterraines :**

La qualité générale de l'eau est appréciée selon quatre classes déterminées à partir d'une grille à double entrée (Classe de qualité et paramètres mesurés). (Nisbet., Verneau., 1970)

L'évaluation de la qualité minérale des eaux est définie en fonction des valeurs de chacun des paramètres considérés et des normes requises :

**Classe I :** Eau de bonne qualité, utilisée sans exigence particulière

**Classe II :** Eau de qualité moyenne, utilisée après un simple traitement

**Classe III :** Eau de mauvaise qualité, ne peut être utilisée qu'après un traitement très poussé

**Classe IV :** Pollution excessive, ne peut être utilisée qu'après traitements spécifiques et très onéreux

Tableau 25. Grille utilisée pour l'évaluation de la qualité minérale des eaux souterraines (ANRH 2012)

Paramètre	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	40-100	100-200	200 – 300	> 300
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	< 30	30 – 100	100 – 150	> 150
Na <sup>+</sup> (mg/l)	10 – 100	100 – 200	200 – 500	> 500
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	10 – 150	150 – 300	300 – 500	> 500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	50 – 200	200 - 300	300 – 400	> 400

Tableau 26. Grille utilisée pour signaler les problèmes de l'azote (ANRH 2012)

Paramètre	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 – 3	> 3
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 3	> 3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	≤ 10	10 - 20	20 - 40	> 40

Tableau 27. Grille utilisée pour signaler les problèmes du phosphore

Forme du Phosphore	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 3	> 3

Tableau 28. Evaluation des éléments toxiques et indésirables

Paramètre	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Fe (mg/l)	0 – 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2
Zn (mg/l)	0	0 – 0,5	0,5 - 1	1

### VI.3.1 Interprétation des résultats :

#### VI.3.1.1 Qualité minérale :

Les résultats obtenus dans les eaux de la région d'étude présentent une bonne qualité sur la majorité des points vis-à-vis le Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, une pollution modérée à notable en ce qui concerne le Mg<sup>2+</sup> et le Cl<sup>-</sup> en quelques points. Cette dernière devient notable à importante pour le Ca<sup>2+</sup>. Ces résultats traduisent les faciès chimiques dominants (Bicarbonaté Calcique, Chloruré Calcique).

### **VI.3.1.2 Pollution par les nitrates, nitrites, ammonium et phosphates :**

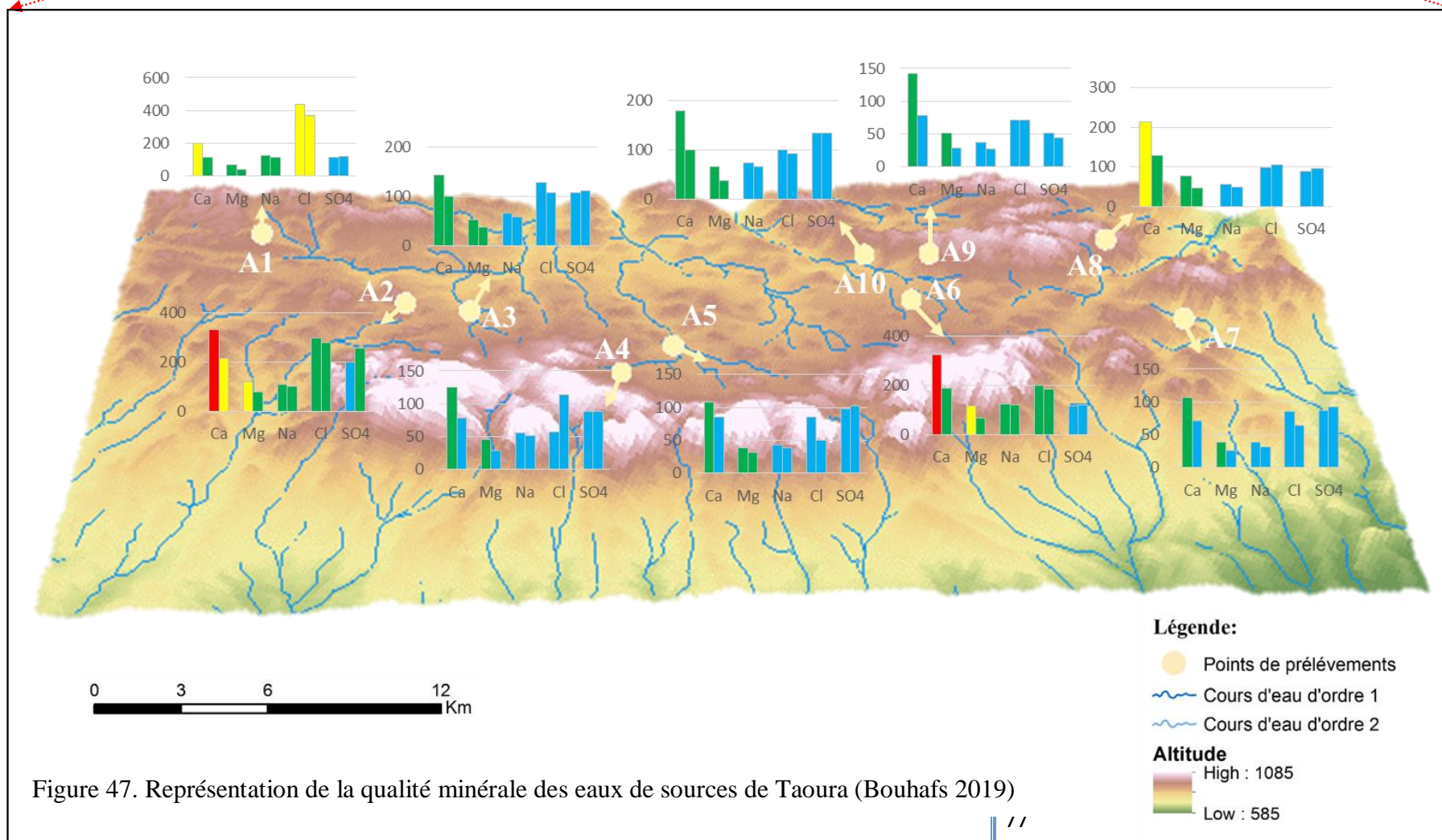
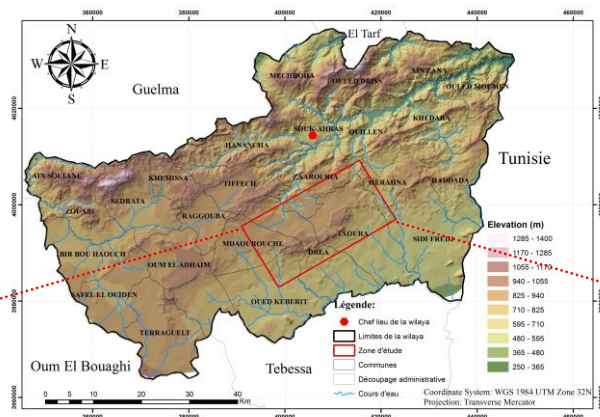
On superposant les résultats des analyses à la grille de qualité, on peut nettement apercevoir les valeurs importantes des nitrates et des phosphates sur tous les points examinés, excédant largement les normes tolérées et affirme que les eaux de sources sont polluées surtout par les pratiques agricoles (épandages des engrais, pesticides..).

### **VI.3.1.3 Éléments métalliques en trace :**

Selon la grille de qualité, les teneurs en Fer dans les eaux restent admissibles. Par contre, le Zinc présente une qualité mauvaise à notable.

Comme nous l'avons mentionné auparavant, le zinc est l'un des résultats des épandages agricoles, ce qui confirme la pollution des eaux par les pratiques agricoles très répandus dans la région ou il peut aussi provenir des rejets urbains.

# HYDROCHIMIE





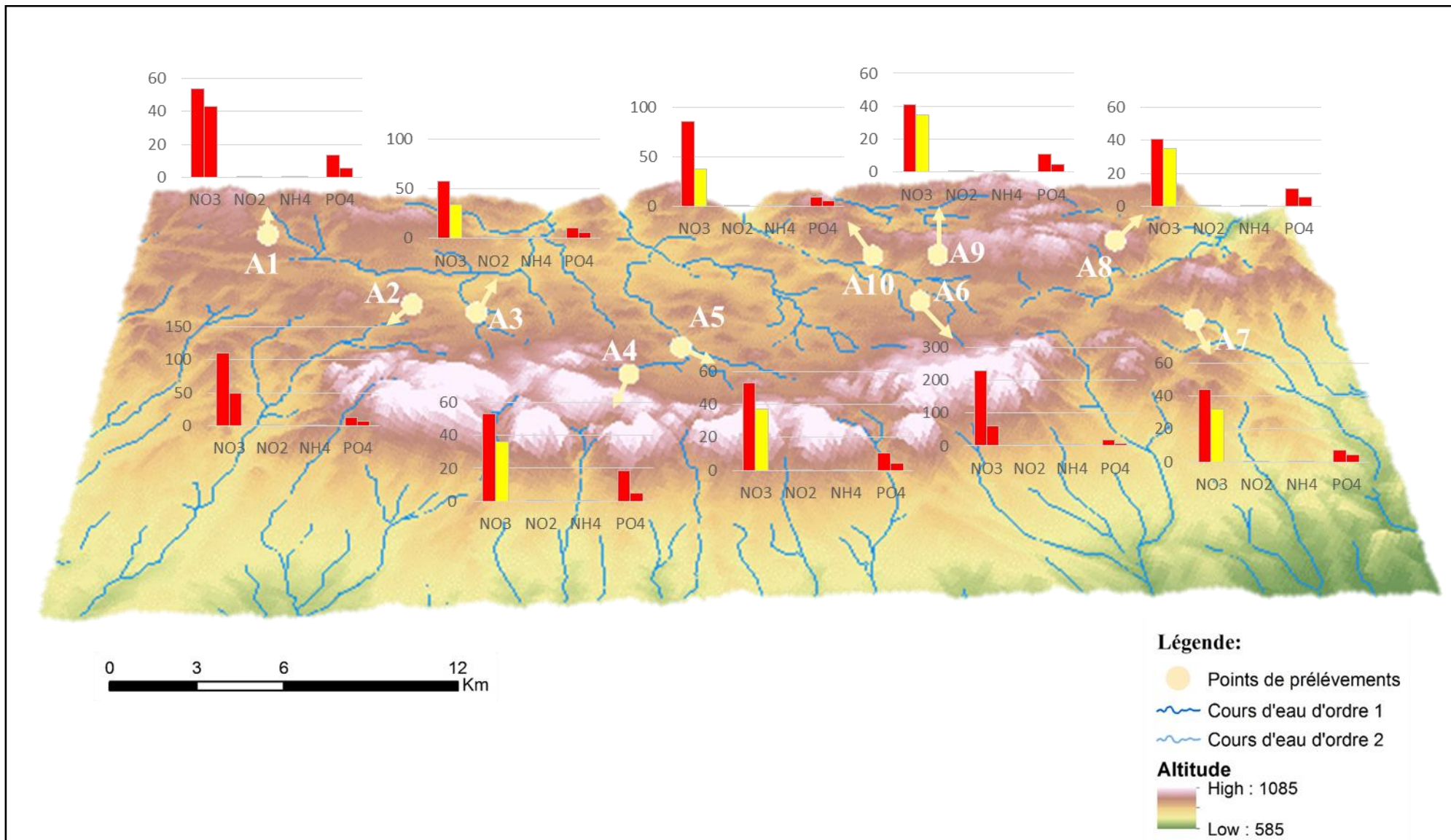


Figure 48. Représentation de la qualité par rapport aux paramètres azotés des eaux de sources de Taoura (Bouhafs 2019)

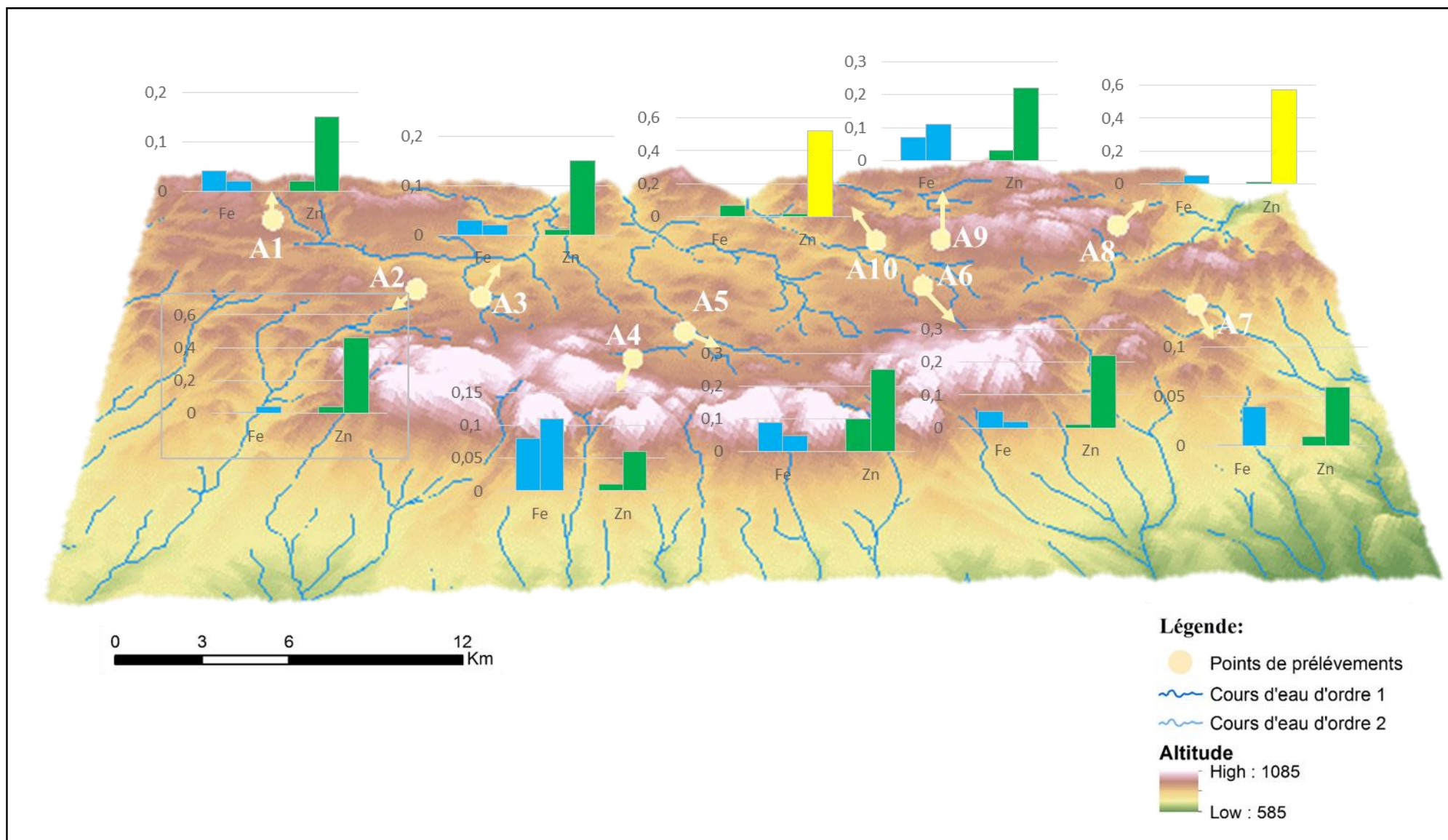


Figure 49. Représentation de la qualité des éléments traces métalliques des eaux de sources de Taoura (Bouhafs 2019)



### VI.4 Analyse en composante principale (ACP) :

L'analyse en composante principale (A.C.P) permet une analyse des relations entre les nombreuses variables donnant ainsi des informations sur l'évolution du chimisme des eaux et la détermination des caractères dominants dans le milieu. Cette méthode est largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques. (Abrid, 2015, Toumi et al 2016).

Pour y procéder, on a utilisé le logiciel STATISTICA 8, afin d'analyser les données statistiques des analyses chimiques par l'interprétation de la matrice de corrélation composée de dix-sept variables de dix points de prélèvements répartis sur la zone d'étude pour les deux campagnes d'échantillonnages.

Les variables retenues dans cette étude sont : la température (T), le pH, la conductivité électrique (CE), l'oxygène dissous ( $O_2$ ), les cations ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ), les anions ( $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), les composés azotés ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  et  $NH_4^+$ ), le phosphate ( $PO_4^{3-}$ ) et les métaux lourds (Fe et Zn).

#### VI.4.1 Première campagne (Novembre 2017) :

##### VI.4.1.1 Matrice de corrélation :

La matrice de corrélation donne une première approximation sur les associations existantes entre les différentes variables, présentant un bon coefficient de corrélation, telles que la conductivité électrique avec  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$  ainsi que les nitrates avec  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$

Les variables bien corrélées entre-elles sont mentionnées en gras, indiquant probablement l'origine commune des éléments considérés ou évoluant de façon similaire.

L'analyse de la matrice de corrélation (Tableau 29) donne le degré de liaison entre les différents paramètres considérés et montre leurs liens respectifs, notamment entre les couples de variables :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  (R) ;  $Na^+$ ,  $Cl^-$  (R) ;  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$  (R) ;  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$

(R) : Cette bonne corrélation entre ces éléments traduit le processus de mise en circulation de ces ions.

Tableau 29. Matrice de corrélation pour la première campagne Novembre 2017

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	CE	pH	O <sub>2</sub>	T (°C)
Ca <sup>2+</sup>	1,000																
Mg <sup>2+</sup>	<b>1,000</b>	1,000															
Na <sup>+</sup>	<b>0,796</b>	<b>0,796</b>	1,000														
K <sup>+</sup>	0,442	0,443	0,380	1,000													
Cl <sup>-</sup>	<b>0,564</b>	<b>0,564</b>	<b>0,862</b>	-0,067	1,000												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,349	0,350	-0,058	0,273	-0,277	1,000											
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0,679</b>	<b>0,677</b>	<b>0,631</b>	-0,021	<b>0,551</b>	-0,068	1,000										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,764</b>	<b>0,763</b>	<b>0,662</b>	<b>0,803</b>	0,253	0,143	0,406	1,000									
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,064	0,061	0,192	-0,162	0,158	-0,491	0,326	0,234	1,000								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,247	0,245	0,479	0,257	0,230	-0,081	0,469	0,463	<b>0,523</b>	1,000							
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,408	0,410	<b>0,507</b>	<b>0,637</b>	0,257	0,168	0,107	0,497	-0,447	0,230	1,000						
Fe <sup>2+</sup>	-0,362	-0,360	-0,211	0,113	-0,231	-0,075	-0,492	-0,041	-0,251	0,124	0,471	1,000					
Zn <sup>2+</sup>	-0,180	-0,182	-0,206	-0,407	-0,050	-0,164	0,103	-0,138	0,182	0,268	-0,188	0,469	1,000				
CE	<b>0,849</b>	<b>0,849</b>	<b>0,942</b>	0,166	<b>0,895</b>	-0,004	<b>0,758</b>	<b>0,545</b>	0,127	0,349	0,415	-0,278	-0,058	1,000			
pH	<b>-0,612</b>	<b>-0,613</b>	-0,446	-0,033	-0,424	<b>-0,597</b>	-0,440	-0,069	0,371	0,106	-0,172	<b>0,573</b>	0,436	<b>-0,557</b>	1,000		
O <sub>2</sub>	0,188	0,187	0,194	<b>0,792</b>	-0,155	-0,046	0,045	<b>0,686</b>	0,030	0,300	0,284	0,054	-0,104	0,008	0,288	1,000	
T (°C)	-0,328	-0,328	<b>-0,630</b>	-0,178	<b>-0,609</b>	0,304	-0,435	-0,427	-0,049	<b>-0,504</b>	-0,461	-0,315	-0,404	<b>-0,615</b>	-0,092	-0,369	1,000

## HYDROCHIMIE

La matrice de corrélation présentée par le tableau exprime les coefficients de corrélation entre les différentes variables, deux à deux.

L'analyse de ce tableau montre que les cations sont bien corrélés avec soit un anion soit deux anions. Ainsi le  $Mg^{2+}$  et le  $Ca^{2+}$  sont bien corrélés les sulfates et les nitrates  $NO_3^-$ , de même il existe une corrélation entre le  $Na^+$  et les chlorures, et les  $NO_3^-$ .

Le potassium  $K^+$  est bien corrélé avec les  $NO_3^-$  et  $PO_4^{3-}$ .

On note aussi de bonnes corrélations entre les différents cations :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ . Au niveau des autres paramètres, la CE est bien corrélée avec les trois (03) cations et les  $NO_3^-$ .

### VI.4.1.2 Analyse factorielle :

Le facteur 1 exprime 39,37 % de la variance totale, le facteur 2 représente 17,56 %. Ces résultats montrent que le facteur 1 représente la plus forte variance par rapport aux autres.

Le plan factoriel (F1-F2) exprime 56,93 % de la variance cumulée. De ce fait la représentation des données dans ce plan rend compte de façon satisfaisante de leur structure.

Tableau 30. Valeurs propres de la matrice de corrélation et statistiques associées

	<b>Valeur propre</b>	<b>% Total - variance</b>	<b>Cumul valeurs propres</b>	<b>Cumulative %</b>
<b>F1</b>	6,693	39,370	6,693	39,370
<b>F2</b>	2,985	17,558	9,678	56,928
<b>F3</b>	2,812	16,543	12,490	73,472
<b>F4</b>	1,779	10,465	14,269	83,937
<b>F5</b>	1,146	6,744	15,416	90,681
<b>F6</b>	0,655	3,854	16,071	94,535
<b>F7</b>	0,537	3,160	16,608	97,694
<b>F8</b>	0,327	1,924	16,935	99,619
<b>F9</b>	0,065	0,381	17,000	100,000

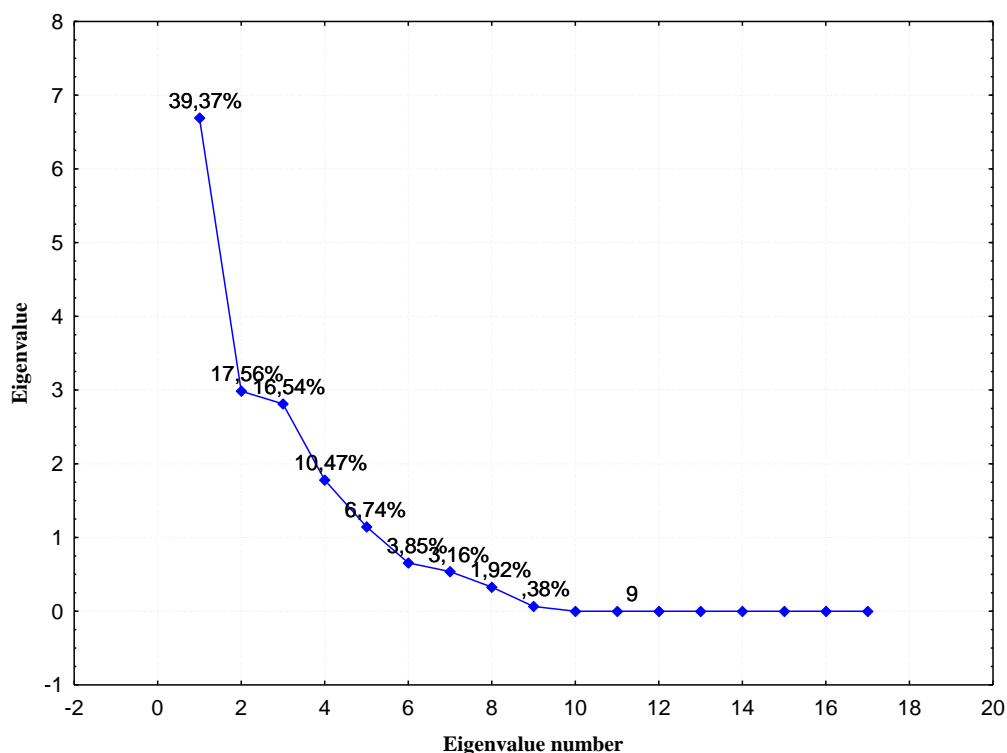


Figure 50. Représentation graphique des valeurs propres

#### VI.4.1.3 Etude des variables :

Pour positionner les variables selon les axes factoriels, une étude de la corrélation de ces deux derniers est indispensable pour leurs positionnements. Les résultats sont illustrés dans le tableau

Tableau 31. Corrélation des variables avec les axes

	F1	F2
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	-0,923	0,220
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-0,923	0,221
<b>Na<sup>+</sup></b>	-0,946	-0,043
<b>K<sup>+</sup></b>	-0,486	-0,319
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0,717	0,100
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,130	0,467
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	-0,733	0,117
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,784	-0,345
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	-0,123	-0,292
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	-0,466	-0,528
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	-0,528	-0,282
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0,270	-0,673
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	0,170	-0,478
<b>CE</b>	-0,930	0,116
<b>pH</b>	0,515	-0,795
<b>O<sub>2</sub></b>	-0,306	-0,565
<b>T</b>	0,581	0,576

**VI.4.1.4 Cercles de corrélations et représentation des individus :**

L'interprétation de la distribution des variables, se fera à l'aide des cercles de corrélations. Ces cercles de rayon  $R = 1$  (sphère dans l'espace), mettent en évidence les liens entre les différentes variables, qui correspondent à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions.

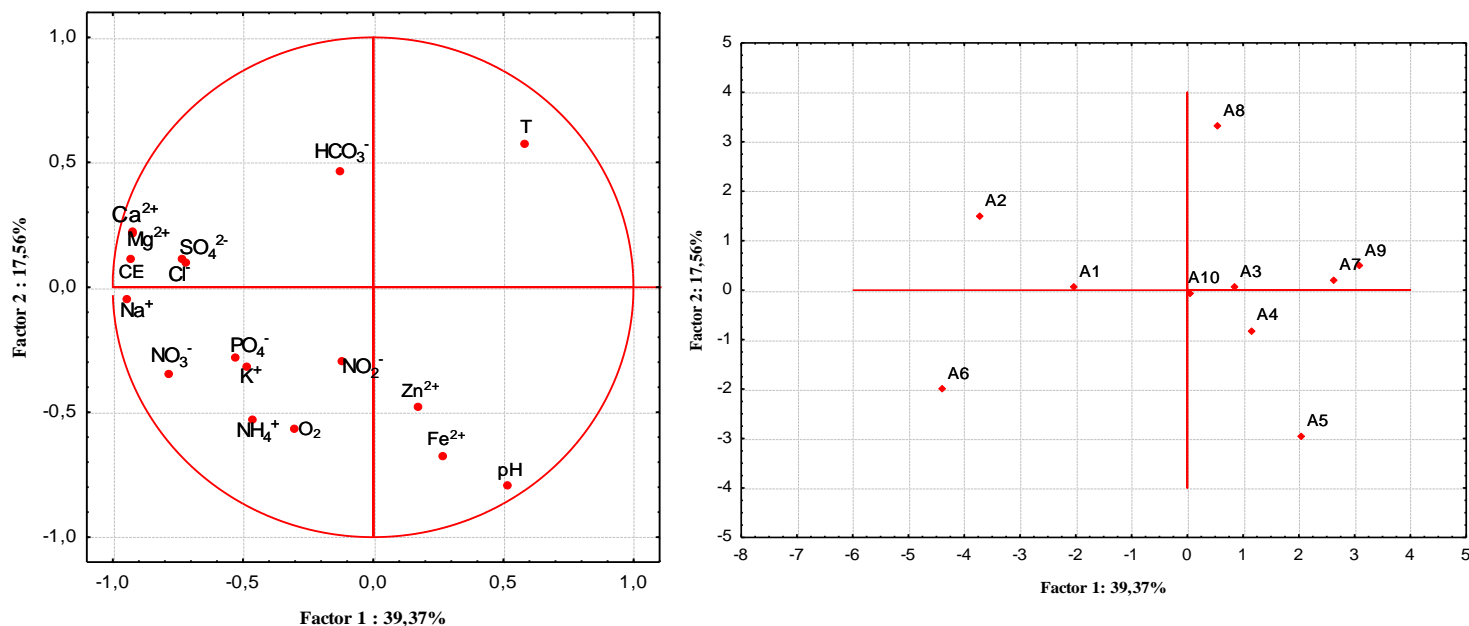


Figure 51. Projection des variables et des individus selon le plan F1-F2

Le cercle de corrélation F1-F2 totalise 56,93 % de la variance cumulée.

Le Facteur F1 représentant 39,37 % de la variance totale montre dans sa partie négative  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , CE et les oppose au pH et à la température expliquant probablement l'influence de ces derniers dans la minéralisation des eaux, de ce fait l'axe F1 regroupe les éléments responsables des facies chimiques des eaux de sources qui sont le Chloruré Calcique et le Bicarbonate Calcique. On peut donc dire que l'axe F1 est un axe de minéralisation.

Le facteur F2 représentant 17,56 % de la variance totale regroupe dans sa partie négative les composés azotés ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ),  $PO_4^{3-}$ , Zn et Fe et les oppose aux  $HCO_3^-$ . On peut donc dire que l'axe F2 est un axe de pollution.

L'axe F1 regroupe les individus A1 et A2 ayant pour facies chimique le chloruré calcique avec des teneurs élevées en chlorures, les opposant aux nuages de points A3, A4, A5, A7, A9, A10 avec un facies bicarbonaté calcique, de ce fait, l'axe F1 est un

axe de minéralisation. L'axe F2 est un axe de pollution car il caractérise les sources avec des teneurs élevées en matières azotées et en éléments traces métalliques.

### **VI.4.2 Deuxième campagne Avril 2018 :**

#### **VI.4.2.1 Matrice de corrélation :**

Pour la deuxième campagne les individus présentant une bonne corrélation sont : la conductivité électrique avec  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$  ainsi que,  $\text{PO}_4^{3-}$  avec  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  et les nitrates avec  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$

Les variables bien corrélées entre-elles sont mentionnées en gras, indiquant probablement l'origine commune des éléments considérés ou évoluant de façon similaire

Tableau 32. Matrice de corrélation de la deuxième campagne Avril 2018

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	CE	pH	O <sub>2</sub>	T (°C)
Ca <sup>2+</sup>	1,000																
Mg <sup>2+</sup>	<b>1,000</b>	1,000															
Na <sup>+</sup>	<b>0,781</b>	<b>0,780</b>	1,000														
K <sup>+</sup>	0,326	0,329	0,408	1,000													
Cl <sup>-</sup>	<b>0,595</b>	<b>0,593</b>	<b>0,858</b>	0,010	1,000												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,650</b>	<b>0,652</b>	0,468	<b>0,546</b>	0,135	1,000											
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0,789</b>	<b>0,787</b>	<b>0,613</b>	-0,073	<b>0,571</b>	0,237	1,000										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,837</b>	<b>0,839</b>	<b>0,853</b>	<b>0,630</b>	<b>0,558</b>	<b>0,574</b>	<b>0,505</b>	1,000									
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0,090	-0,093	-0,137	-0,074	0,010	-0,017	-0,274	-0,250	1,000								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0,073	-0,075	0,309	0,146	0,440	-0,165	-0,239	0,071	<b>0,692</b>	1,000							
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	<b>0,835</b>	<b>0,833</b>	<b>0,738</b>	0,193	<b>0,601</b>	<b>0,603</b>	<b>0,761</b>	<b>0,584</b>	0,128	0,159	1,000						
Fe <sup>2+</sup>	-0,470	-0,466	<b>-0,577</b>	-0,061	-0,459	-0,334	-0,411	-0,415	0,098	-0,037	-0,392	1,000					
Zn <sup>2+</sup>	0,456	0,457	0,124	-0,149	0,030	<b>0,618</b>	0,429	0,129	-0,016	-0,429	<b>0,515</b>	-0,028	1,000				
CE	<b>0,727</b>	<b>0,728</b>	<b>0,867</b>	<b>0,633</b>	<b>0,548</b>	<b>0,756</b>	0,338	<b>0,876</b>	-0,096	0,207	<b>0,636</b>	<b>-0,595</b>	0,215	1,000			
pH	-0,253	-0,253	0,132	<b>-0,501</b>	0,302	-0,303	-0,052	-0,135	-0,232	0,175	-0,043	-0,019	-0,010	-0,021	1,000		
O <sub>2</sub>	0,405	0,401	0,412	0,264	0,292	0,174	<b>0,575</b>	0,265	-0,250	-0,052	<b>0,539</b>	-0,383	-0,134	0,253	-0,233	1,000	
T (°C)	-0,056	-0,056	0,436	0,325	0,313	0,063	-0,255	0,349	-0,144	0,356	-0,163	<b>-0,549</b>	-0,388	<b>0,539</b>	0,318	-0,135	1,000

**VI.4.2.2 Analyse factorielle :**

Le facteur 1 exprime 43,36 % de la variance totale, le facteur 2 représente 16,21 %. Ces résultats montrent que le facteur 1 représente la plus forte variance par rapport aux autres.

Le plan factoriel (F1-F2) exprime 59,57 % de la variance cumulée. De ce fait la représentation des données dans ce plan rend compte de façon satisfaisante de leur structure.

Tableau 33. Valeurs propres de la matrice de corrélation et statistiques associées

	Valeur propre	% Total - variance	Cumul valeurs propres	Cumulative - %
<b>F1</b>	7,370	43,355	7,370	43,355
<b>F2</b>	2,757	16,216	10,127	59,572
<b>F3</b>	2,009	11,819	12,136	71,390
<b>F4</b>	1,745	10,264	13,881	81,655
<b>F5</b>	1,408	8,283	15,289	89,938
<b>F6</b>	0,823	4,843	16,113	94,781
<b>F7</b>	0,582	3,423	16,695	98,204
<b>F8</b>	0,173	1,016	16,867	99,219
<b>F9</b>	0,133	0,781	17,000	100,000

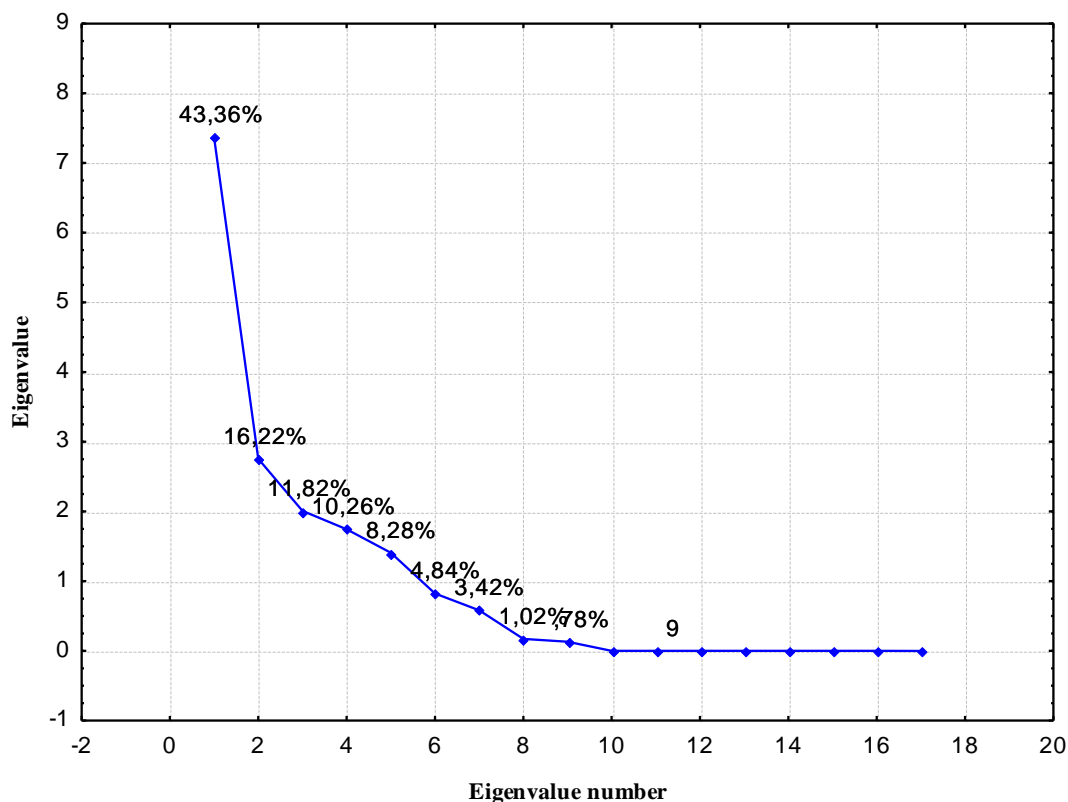


Figure 52. Représentation graphique des valeurs propres



VI.4.2.3 Etude des variables :

Tableau 34. Corrélation des variables avec les axes

	F1	F2
Ca <sup>2+</sup>	0,941	0,237
Mg <sup>2+</sup>	0,940	0,237
Na <sup>+</sup>	0,919	-0,324
K <sup>+</sup>	0,449	-0,239
Cl <sup>-</sup>	0,688	-0,360
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,690	0,225
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,725	0,415
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,880	-0,163
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0,137	-0,190
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,064	-0,742
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,853	0,211
Fe <sup>2+</sup>	-0,601	0,273
Zn <sup>2+</sup>	0,354	0,663
CE	0,879	-0,314
pH	-0,124	-0,353
O <sub>2</sub>	0,490	0,140
T	0,202	-0,846

VI.4.2.4 Cercles de corrélation et représentation des individus :

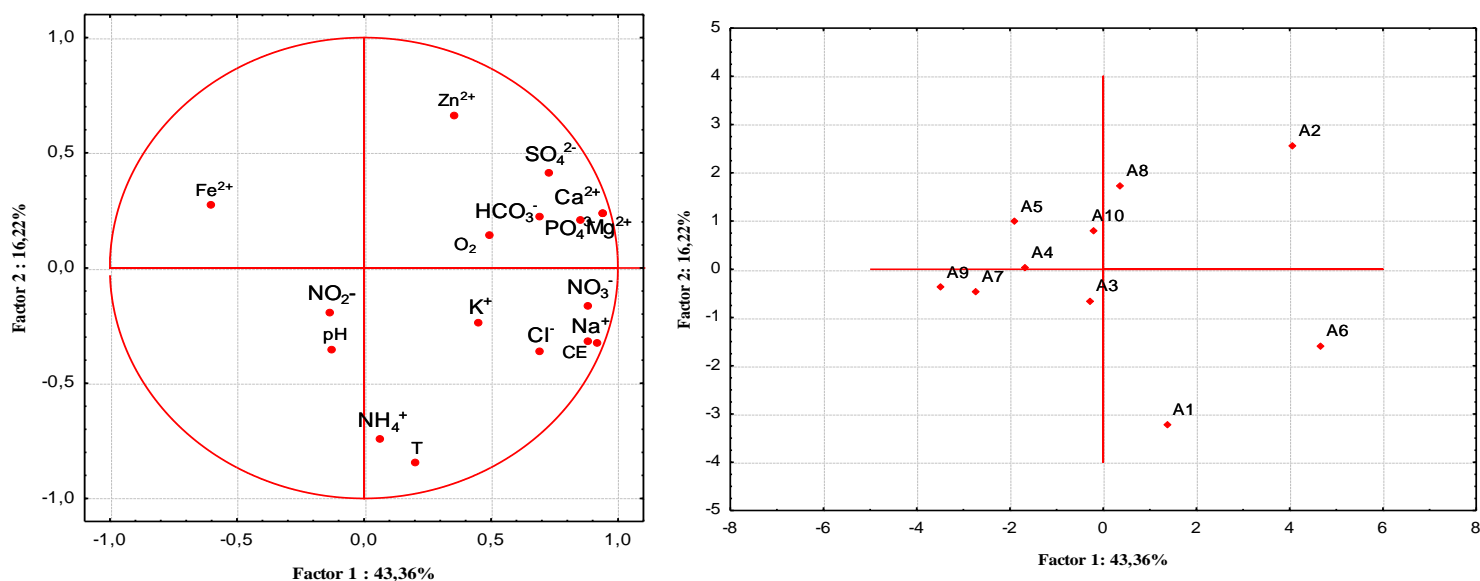


Figure 53. Projection des variables et des individus selon le plan F1-F2

Le cercle de corrélation F1-F2 représente 59,58 % de la variance cumulée,

Le Facteur F1 représentant 43,36 % de la variance totale regroupe dans sa partie positive, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CE. Cet axe regroupe les éléments responsables des facies chimiques des eaux de sources qui sont Chloruré Calcique - Bicarbonaté Calcique et Chloruré Bicarbonaté Calcique.

## HYDROCHIMIE

On peut dire que l'axe F1 est un axe caractérisant la minéralisation, du moment qu'il regroupe tous les éléments responsables de la minéralisation des eaux de sources.

Le Facteur F2 représentant 16,22 % de la variance totale regroupe dans sa partie positive, Fe, Zn,  $\text{PO}_4^{3-}$ , cependant la partie négative est caractérisée par  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ .

L'axe F2 regroupe donc  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  et les oppose aux Fe, Zn,  $\text{PO}_4^{3-}$ , on peut donc dire que c'est un axe représentant les éléments polluants, en raison de la proximité d'un centre d'enfouissement technique (infiltration du lixiviat), ou des rejets domestiques.

L'axe F1 regroupe dans son sens positive les individus A2 et A6 ayant pour faciès le Chlorure Calcique et les oppose au nuage de points A4, A5, A7, A9 avec le faciès Bicarbonate Calcique, on peut donc dire que l'axe F1 est un axe de minéralisation.

L'axe F2 regroupe dans son sens positive A8 et A10 qui représentent des teneurs élevées en Fer et en Zinc et les oppose aux points A1 et A3 qui représentent des teneurs élevées en  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ , cependant l'axe F2 est un axe de pollution

## VI.5 Aptitude des eaux à l'irrigation :

### Introduction

Il est important de connaître la qualité des eaux d'irrigation, de chercher le degré de chaque type de pollution et de diagnostiquer les origines et les sources responsables de ces apports anthropiques. Dans ce qui suit nous allons examiner l'utilisation à des fins agricoles des eaux de la région d'étude et seront développés par les méthodes de Richards et Wilcox.

Il y a quatre critères majeurs à considérer lors de l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation :

- La concentration en sels dissous (risque de salinité)
- La quantité de Sodium dans l'eau comparée d'autres cations (risque de sodicité).
- La concentration des éléments toxiques qui inhibe la croissance des plantes où devient un danger environnemental.
- Le bénéfice nutritionnel résultant de nutriments (nitrates, phosphates et sulfates).

### VI.5.1 Risque de salinité :

Les sels contenus dans les eaux d'irrigation, 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. Pour éviter ce risque, on doit déterminer la valeur de la conductivité et la classer suivant les valeurs seuils suivantes :

- Si la conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  est inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation ;
- Si la conductivité variée entre 700 et 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est légère à modérée ;
- Si la conductivité est supérieure à 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est forte.

Tableau 35. Convenance à l'irrigation des eaux des sources de la région selon la conductivité.

Restriction pour l'irrigation	Conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Pourcentage des échantillons (%)	
		Novembre 2017	Avril 2018
Aucune	< 700	40	40
légère à modéré	700 -3000	60	60
Forte	> 3000	-	-

Les eaux de source de la région d'étude présentent pour 60 % des points une restriction légère à modérée pour les deux périodes d'échantillonnage.

### VI.5.2 Le risque de sodicité :

L'accumulation du sodium sur le complexe adsorbant des sols peut dégrader les propriétés physiques des sols. Leur capacité de drainage donc leur perméabilité, conditionne la productivité des terres irriguées. Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux (Ca, Mg....) dans le complexe adsorbant provoque la défloculation des argiles, une destruction du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles du sol. L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. D'autres part, à proportion égale de sodium et alcalino-terreux dans la solution, la tendance à la sodisation du sol est d'autant plus forte que la concentration en cations totaux dans la solution est plus élevée. Ainsi, le risque de sodisation relatif à une eau d'irrigation est caractérisé par deux paramètres : le SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui rend compte du rapport la concentration en sodium et en alcalino-terreux, et la conductivité de l'eau appliquée (Bousnoubra H 2002).

### VI.5.3 L'indice d'adsorption du Sodium (SAR) :

Le SAR est couramment utilisé comme un indice pour évaluer l'aptitude de l'eau à des fins d'irrigation ( Shaki & Adeloje 2006).

Définit par l'équation suivante :

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

Où Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> étant exprimés en méq/l, peut être ajusté pour mieux tenir compte du calcium susceptible de demeurer sur le sol après une irrigation. L'US Salinity Laboratory a proposé un diagramme qui, à partir des valeurs du SAR et de la conductivité, classe les eaux d'irrigation en fonction des risques de sodisation et de salinité.

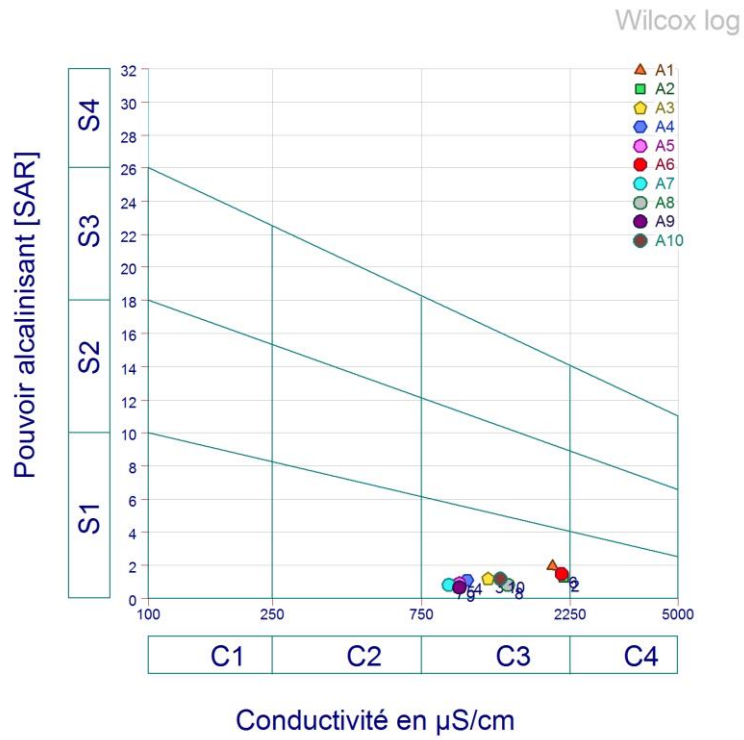


Figure 54. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Richard) (Novembre 2017)

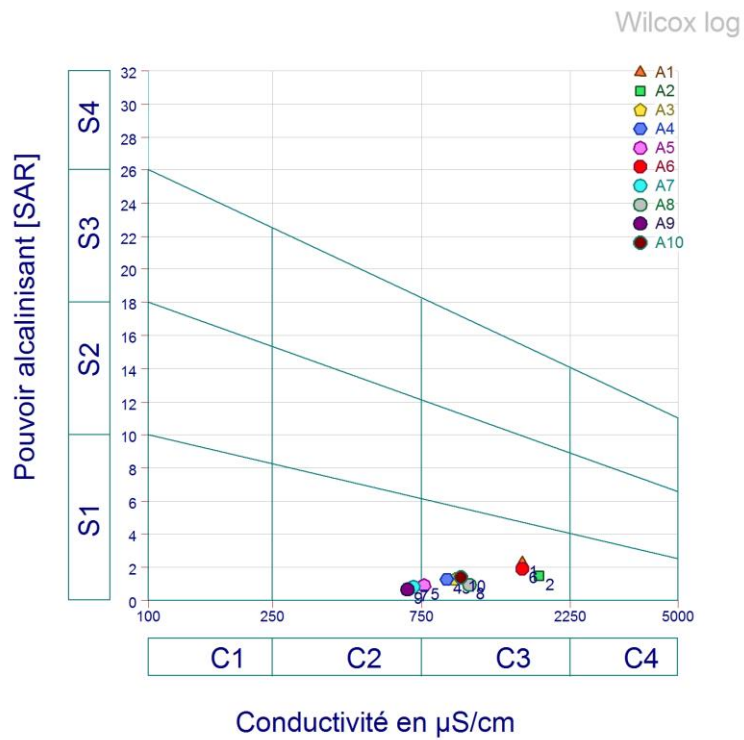


Figure 55. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Richard) (Avril 2018)

Tableau 36. Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR.

Degrés	Qualité	Classe	Etat d'utilisation	Sources	
				Nov 17	Avr 18
1	Excellente	C1 – S1	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols	-	-
2	Bonne	C2 – S1	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles	-	A7, A9
3	Admissible	C3 – S1, S2, S3	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainées	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A8, A10
4	Médiocre	C4 – S1, S2	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité	-	-
5	Inapte	C5 – S1, S2, S3, S4	Inutilisable	-	-

#### VI.5.4 Diagramme de Wilcox :

Le diagramme de Wilcox est basé sur la formule dite pourcentage de sodium (Na %) est calculé en utilisant l'équation suivante, où toutes les concentrations sont exprimées en meq / l :

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

## HYDROCHIMIE

La classification de Wilcox est fondée sur la combinaison de la teneur en sodium dans l'eau et la conductivité électrique, généralement connu en %, cette classification définit cinq classes : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.

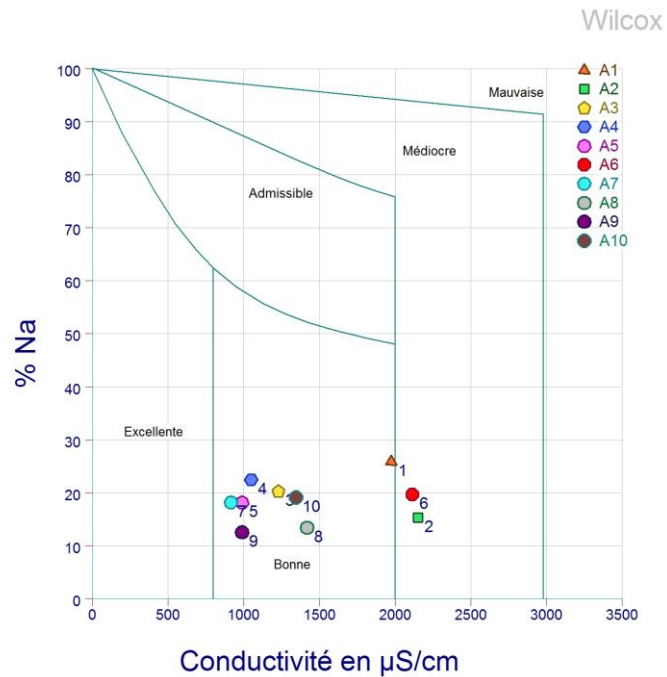


Figure 56. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Wilcox) (Novembre 2017)

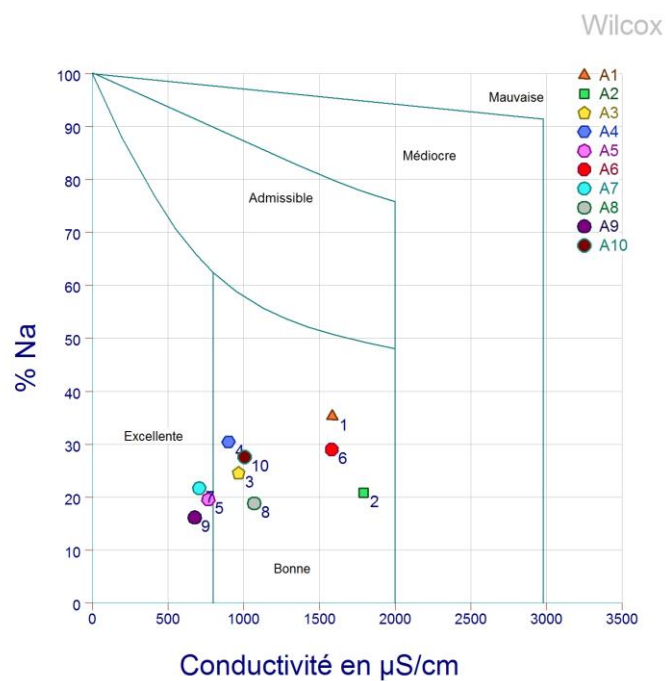


Figure 57. Aptitude des eaux de sources à l'irrigation (Diagramme de Wilcox) (Avril 2018)

## HYDROCHIMIE

D'après les résultats obtenus des diagrammes de Wilcox on distingue que la majorité des points ont une qualité bonne à excellente sauf pour les points A2 et A6 pendant la période de Nov 17 où la qualité se détériore et devient médiocre.

### Conclusion

L'étude hydrochimique établie sur deux périodes (Nov-17 et Avr-18) des eaux de sources de Taoura nous a emmenés aux conclusions suivantes :

- Les eaux de sources se caractérisent par deux principaux faciès chimiques : le Bicarbonaté Calcique et le Chloruré Calcique. La bonne corrélation entre les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  confirme la même origine de ces deux éléments, qui serait la dissolution des formations carbonatées (calcaire) au cours du transit des eaux dans la formation aquifère.
- L'évolution des paramètres physico-chimiques des deux campagnes a permis de distinguer des différences existantes entre la campagne de Nov 17 qui se caractérise par une élévation des valeurs des phosphates, des nitrates des valeurs de TDS, de la Conductivité électriques CE, alors que, durant la campagne d'Avr 18 se sont les nitrites, les phosphates charges minérales et organiques qui sont les plus remarquables.
- Les résultats obtenus par les grilles de la qualité des eaux montrent que la majorité des points ont une bonne qualité minérale par contre les résultats des nutriments excèdent largement les normes affirmant que les eaux de sources sont fortement polluées surtout par les pratiques agricoles.
- Les normes utilisées pour signaler les problèmes des éléments en traces métalliques indiquent que le Fer et le Zinc dans les eaux se caractérisent par une qualité bonne à mauvaise. Confirmant la pollution agricole ou urbaine.
- L'analyse en composante principale a pu individualiser les éléments responsables de la forte minéralisation et aussi la contamination agricole. Les résultats obtenus dans l'A.C.P sont en étroite corrélation avec les objectifs escomptés à travers cette étude.
- Les études sur l'aptitude des eaux à l'irrigation ont révélées que les eaux de sources sont admissibles.



### **Conclusion générale**

Située dans la wilaya de Souk-Ahras, la région de Taoura fait partie de la zone orientale du sous-bassin de la Medjerda à l'est de l'Algérie. Elle appartient aux monts de la Medjerda et se trouve entre deux grands Oueds : l'Oued Medjerda au Nord et l'Oued Mellegue au Sud.

Le cadre géologique indique que les formations dominantes sont majoritairement des calcaires maastrichtiens, constituant la structure synclinale, qui est recouverte par des formations de l'âge Mio-Plio-Quaternaire. Les calcaires sont fissurés et karstifiés, favorisant l'accumulation des eaux souterraines.

L'étude des données climatiques de la station de Souk-Ahras pour la période de 2003 à 2018 nous a permis d'attribuer à la zone d'étude un climat humide caractérisé par deux saisons distinctes : l'une humide s'étalant du mois d'octobre jusqu'au début du mois de mai caractérisée par une forte pluviosité et des faibles températures et l'autre sèche s'étalant du mois de mai jusqu'au mois d'octobre caractérisée par une faible pluviosité et des fortes températures.

La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre 845,5 mm et une température moyenne de 16,1 °C. La reconstitution du stock commence en novembre et s'achève en avril. L'épuisement du stock du sol s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

La région d'études est caractérisée essentiellement par deux nappes principales superposées comme suit : la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre) et la nappe du calcaire Maastrichtiens (nappe captive).

Les analyses de la qualité des eaux de sources de Taoura révèlent une minéralisation importante de ces eaux vue les valeurs élevées de la conductivité électrique (1495  $\mu\text{S/cm}$ ), TDS (1500 mg/l).

La minéralisation de ces eaux reflète deux faciès dominants Bicarbonaté Calcique et Chloruré Calcique. La bonne corrélation entre les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  confirme la même origine de ces deux éléments, qui serait la dissolution des formations carbonatées (calcaire) au cours du transit des eaux dans la formation aquifère.

## CONCLUSION GENERALE

Les teneurs élevées en nitrates (228 mg/l) et phosphates (18,4 mg/l) pourraient être dues aux eaux d'infiltrations superficielles de l'irrigation et l'utilisation des engrais chimiques, ce qui révèle une pollution organique.

Les dix sources se classent selon la classification de Schoeller de (1962) parmi les sources froides, avec par un pH relativement alcalin ceci est lié à la présence des roches calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) et des dolomies ( $\text{CaCO}_3 \text{ MgCO}_3$ ), donc le risque d'acidification est faible.

Les résultats de TDS montrent que les fortes valeurs se localisent aux points A1, A2, A6 (période de Nov 17).

Les résultats obtenus par les grilles de la qualité des eaux montrent que la majorité des points ont une bonne qualité minérale par contre les résultats des nutriments excèdent largement les normes affirmant que les eaux de sources sont fortement polluées surtout par les pratiques agricoles.

L'interprétation des résultats des analyses montre que les eaux de source sont contaminées par des nutriments tels que des composés azotés (nitrates en Nov 17 : 228 mg/l, nitrites en Avr 18 : 0,19 mg/l) et Les teneurs en phosphates sont très fortes pour les deux saisons, en raison de l'utilisation excessive d'engrais. Du point de vue qualitatif, les eaux des sources présentent une qualité moyenne à mauvaise, pouvant être expliquée par des concentrations élevées en nitrites, nitrates et phosphates pouvant engendrer des problèmes de santé publique.

Les études sur l'aptitude des eaux à l'irrigation ont révélées que les eaux de sources sont admissibles.

Les normes utilisées pour signaler les problèmes des éléments en traces métalliques indiquent que le Fer et le Zinc dans les eaux se caractérisent par une qualité bonne à mauvaise. Confirmant la pollution agricole ou urbaine.

L'analyse en composante principale (ACP) a pu identifier les éléments responsables de la forte minéralisation et aussi la contamination agricole. Cette pollution pose un risque pour la santé des populations rurales dispersées dans cette région. En raison du développement rural et de la demande croissante en eau potable dans cette zone, un contrôle efficace de la pollution et une gestion durable des ressources en eau sont nécessaires pour surmonter les problèmes de qualité de l'eau. Autrement dit, il est

## CONCLUSION GENERALE

impératif d'effectuer un suivi régulier pour mieux comprendre l'origine des phénomènes et pour protéger ces agglomérations suburbaines et rurales qui, dans la plupart des cas, continuent à utiliser l'eau des sources sans soin.

### Références bibliographiques

1. A.B.H – C.S.M (2005), Les cahiers de l'agence, Agence de Bassin Hydrographique Constantinois – Seybouse – Mellegue, Le bassin versant de la Medjerda – Mellegue. Journal N°9, 28p.
2. Abbasi T., Abbasi, Shahid A., (2012). Water quality indices. Elsevier.
3. Abrid D, (2015), Caractérisation physico-chimique, minéralogique et géochimique des sédiments de retenue du barrage Sidi Chahed et des sols du bassin versant de l'oued Mikkés, Thèse de Doctorat, Université Moulaya Ismail, Maroc, 233p.
4. Alam M, Rais S and Aslan M, (2012), Hydrochemical investigation and quality assessment of groundwater in rural areas of Delhi, India, *Environmental Earth Sciences* 66 (1), 97 – 110.
5. Amharref M. and Bernoussi A. S. (2007). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. *Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9.*
6. Athmani A.S., (2011). Evaluation de la qualité des eaux de surface cas du bassin versant Oued Medjerda. Souk-Ahras. Thèse magistère en Environnement, Centre universitaire de Souk-Ahras, pp 126.16 pages.
7. Baaouagh, A. (2010). Les argiles de la région de Souk-Ahras : Identification, caractérisation, cartographie et impact sur l'environnement. Mémoire de magistère, Université Badji Makhtar Annaba- Algérie, 130p.
8. Bakalowicz M., 1975. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doct. Etat. Sci. Nat. Univ. P et M. Curie, Paris VIe, p. 269.
9. Bakalwicz M, (2002), Hydrogéologie karstique, cours DEA H.H.G.G. Université Paris – 6, Caractéristiques et concepts, méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, 278p.
10. Bekkouch Med Fouzi, (2009), Caractéristiques des sources thermales de la région d'Azzaba, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.
11. Benabbas, C. (2006). Evolution Mio-Plio- Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie Nord orientale : Apport de la photogéologie et analyse morpho structurale. Thèse de doctorat Université de Constantine. 255p.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

12. Benhamza M, Laraba A, Landry A. (2018). Contamination by Selected Trace Elements in Groundwater of Azzaba District in Northeast of Algeria. *Springer International Publishing AG 2018. Pp. 553-554.*
13. Benouara N, Laraba A, Hachemi Rachedi L. (2016). Assessment of groundwater quality of Seraidi in northeast of Algeria using NSF-WQI. *Water Science and Technology, Vol 16 issue 4, p1132-1137.*
14. Bliefert C. a. P., R. (2001). Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets., 477.
15. Bouillin, J- P. (1986). Le bassin maghrébin une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. Fr., (8), t. II, n° 4, p. 547-558.*
16. Bouroubi Y, (2017) Caractérisation et fonctionnement du système géothermique de la région Souk Ahras-Taoura par l'approche géochimique et isotopique (Algérie extrême Nord oriental), Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine I Algérie.
17. Bouroubi, Y. (2009). Etude hydrogéologique du synclinal de la Taoura : Fonctionnement et évaluations des ressources en eaux souterraines. Magistère, Université Mentouri Constantine I Algérie, 182p.
18. Bousnoubra H, (2002), Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N – E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective ; vulnérabilité et protection), Thèse de Doctorat d'état, 159p.
19. Caetano Bicalho, C., (2010). Hydrochemical characterization of transfers in karst aquifers by natural and anthropogenic tracers. Example of a Mediterranean karst system, the Lez karst aquifer (Southern France). Thesis 133p. Univ. Montpellier.
20. CCME (2001). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. CCME water quality index 1.0, User's Manual, Winnipeg.
21. Chadi M., (2004). Cadre géologique et structural des séries crétaées néritiques du constantinois (Est- Algérien). Thèse de doctorat. pp17-37.
22. Chahboune M, Chahlaoui A, Zaid A, Mehanned S and Ben Moussa A, (2014). Monitoring of the water's quality of Moulouya River : main tributary of Hassan II Dam (Province of Midelt, Morocco). *Moroccan Journal of Chemistry 2 (5) , Mor.J.Chem 2N°5 (2014) 427-433.*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

23. Chaoui W., (2007). Impacts de la pollution organique et chimique des eaux de l'Oued Maleh sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (Guelma). Mémoire de Magister en Hydrogéologie, IST, Université Badji mokhtar Annaba, Algérie.
24. Chapman D.V, (1996), Water quality assessments: a guide of the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.
25. Comly H.H, (1945), Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *Journal of the American Medical Association* 129 (2), 112 – 6.
26. D.H.W, (2014), Inventaire des différentes ressources en eau existantes, rapport 12p.
27. Dahiya S and Kaur A, (1999), Assessment of physic-chemical characteristics of underground water in rural area of Tosham sub-division Bhiwani district, Haryana, *Journal of Environment and Pollution* 6 (4), 281 – 8.
28. David L. (1956). Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie. 304p.
29. Debieche T.H, (2002), Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielles), Application à la base plaine de la Seybouse Nord – Est Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie et environnement, Université de Besançon, France.
30. Derron, M-H. (2004). Géochimie des eaux de sources et interaction eau-roche dans les Alpes. QUANTERRA Short Course 18p.
31. Derwich E, Benaabidate L, Zian A, Sadki O and Belghity D, (2013), Caractérisation physic-chimique des eaux de la nappe alluviale du Haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès, *Larhyss Journal*.
32. Djaba H, (2010), Ressources en eau et perspectives de gestion intégrée dans le bassin versant de Medjerda (Souk-Ahras, Nord-Est d'Algérie) Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie 150p.
33. Djebbar M, (2006), Le système karstique hydrothermal constantinois (Algérie nord orientale) : structure et fonctionnement. *Acte 8<sup>ème</sup> colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, AISH, UNESCO, Neuchâtel* pp 89 – 92.
34. Dörfliger, N., Crochet, P., Guerrin, R., Jozja, N., Marsaud, B., Mondain, P-H., Muet, Ph., Plaignes, V. (2010). Guide méthodologique : Les outils de l'hydrogéologie karstique de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. *Rapport, BRGM. P 70-71.*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

35. EL Achheb, A., Mania, J., & Mudry, J. (2003). Mécanismes d'acquisitions de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc Occidental) Approche par des traceurs hydro-géochimiques. *IGME. Madrid 2003. ISBN. 84-7840-470-8.*
36. EL-Hakim M., (2005), Les aquifères karstiques dans l'anti-Liban. Thèse de doctorat. 212 p.
37. Friane F, (2000), Ressources et approvisionnement en eau dans la région de Souk-Ahras (Essai de Thèse), Mémoire d'ingénieur en hydrogéologie, UBMA, 82p.
38. Gélard, J-P. (1969). Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif de Chellala : le flysch maurétanien (Grande Kabylie, Algérie). *Bul. Soc, Géo ; France (7) XI.p. 676 - 686.*
39. Gilly G, Corrao G and Favilli S, (1984), Concentrations of nitrates in drinking water and incidence of gastric carcinomas, First descriptive study of the Piemonte region, Italy, *Sci Total Environ 34, 35 – 7.*
40. Glynn P. D., Plummer, L Niel, (2005). Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeology Journal 13(1), 263-87.*
41. Guasmi I, (2005), Dégradation de la qualité de l'eau dans le bassin versant de l'Oued Medjerda. Mémoire de Magister, UBMA, 88p.
42. Guettaf M, (2015), Caractéristiques hydrochimiques et évaluation des indicateurs de pollution dans l'environnement : Cas de l'oued Seybouse et ses affluents dans le sous bassin de Guelma (Nord – Est Algérien). Thèse de Doctorat en sciences biologiques, Université 8 mai 45 Guelma.
43. Guiraud, R. (1973). Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Doctorat en Sciences, Nice, 270 p.
44. Halimi, F. (2008). Etude géologique et géostatistique du gisement de Fer de Châabet El Ballout Souk Ahras- (N-E algérien). Mémoire de magister. Université Badji Mokhtar Annaba Algérie. 110p.
45. IFEN (2006). Les pesticides dans les eaux, bilan des données 2003 et 2004. Institut Français de l'Environnement
46. Joshi D. M., Kumar A. and Agrawal N. (2009). Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar District. *Rasayan J Chem 2(2), 285-92.*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

47. Journal of Materials and Environmental Science, (2014).
48. Kriviakine B, Kovalenko M, Vnouchkov V (1989), Notices des cartes géologiques au 1/50000 de Souk-Ahras, Oued Mougras, Taoura et M'Daourouch.
49. Malcuit, E. (2012). Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond. Thèse université de Bordeaux 3. 456p.
50. Mangin A, (1975), Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Dijon, 601p.
51. Mebarki A, (2005), Hydrologie des bassins de l'Est Algérien, ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine I, 360p.
52. Merhi M. (2008). Etude de l'impact de l'exposition à des mélanges de pesticides à faibles doses : caractérisation des effets sur des lignées cellulaires humaines et sur le système hématopoïétique murin.
53. Mrad. D., (2009), Détection et prise en compte d'éventuels Impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques, Cas de la région de Souk-Ahras. Mémoire de magister, Université de Souk-Ahras, 114p.
54. Muet P, (1985), Structure, fonctionnement et évolution des deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (19), Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Toulouse.
55. Nag S, (2014), Evaluation of hydrochemical parameters and quality assessment of the groundwater in Gangajalghati Block, Bankura district, west Bengal, India, *Arabian Journal for Science and Engineering* 39 (7), 5715 – 27.
56. Nisbet M et Verneaux J, (1970), Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques, *Annales de limnologie*, t.6, fasc 2, 1970, p 161 – 190.
57. Parizot M., Laporte, P., Joseph, B., (2008). Contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Guyane conformément à la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : saison des pluies 2008 Rapport final BRGM, RP-56890-FR.
58. Prakash K. and Somashekar R. (2006). Groundwater quality- Assessment on Anekal Taluk, Bangalore Urban district, India. *Journal of Environmental Biology* 27(4), 633-7.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

59. Rajankar P. N., Tambekar D. H. and Wate S. R. (2011). Groundwater quality and water quality index at Bhandara District. *Environmental Monitoring and assessment* 179(1-4), 619-25.
60. Rajendran A and Mansiya C, (2015), Physico-chemical analysis of groundwater samples of coastal areas of south Chennai in the post – Tsunami scenario, Ecotoxicology and environmental safety.
61. Raju N. J., Ram P. and Dey S. (2009). Groundwater quality in the lower Varuna river basin, Varanasi district, Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India* 73(2), 178-92.
62. Rao N. S. (2006). Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur District, Andhra Pradesh, India. *Environmental geology* 49(3), 413-29.
63. Raoult, J- F. (1969). Nouvelles données sur les flyschs du Nord du Kef Sidi Dris et dans la zone du Col des Oliviers (Nord du Constantinois, Algérie) *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. XI, p 516-543.
64. Rodier J et al, (2009), L'analyse de l'eau, 9ème édition, DUNOD (éditeur), Paris, France, 1579.
65. Rouabhia A, Baali F, Kherici N et Djabri L (2004), Vulnérabilité et impact des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiad, *Revue vecteur environnement*, volume 37 N°3
66. Rouaibia F, (2018), Caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la partie aval d'Oued Medjerda, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 150p.
67. Schilling K. E. and Wolter C. F. (2007). A GIS-based groundwater travel time model to evaluate stream nitrate concentration reductions from land use change. *Environmental geology* 53(2), 433-43.
68. Seltzer P., (1946). Le climat de l'Algérie. Imp. La typo litho et J. Carbonel, algiers.
69. Shaki A and Adeloye A, (2006), Evaluation of quantity and quality of irrigation water at Gadowa irrigation project in Murzuq basin, southwest Libya, *Agricultural water management* 84 (1), 193 – 201.
70. Singh K. P., Malik A., Mohan D. and Sinha S. (2004). Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study. *Water research* 38(18), 3980-92.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

71. Sundaray S. K., Nayak, Binod Bihari., Bhatta, Dinabandhu, (2009).  
Environmental studies on river water quality with reference to suitability for agricultural purposes: Mahanadi river estuarine system, India—a case study.  
*Environmental Monitoring and assessment* 155(1-4), 227-43.
72. Toubal A.W, (1993), Etude du forage T1 dans le synclinal de Taoura, Mémoire d'ingénieur I.S.T, UBMA.
73. Toumi A, Reggam A, Alayat H, Houhamdi M, (2016), Caractérisation physico-chimique des eaux de l'écosystème lacustre : cas du Lac des Oiseaux (Extrême NE- Algérien), *J Mater. Environ, Sci* 7 (1) 139 – 147 .
74. Trivedy R and Goel P, (1984), Chemical and biological methods for water pollution studies, Environmental publications.
75. Tyagi S., Sharma B., Singh P. and Dobhal R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources* 1(3), 34-8.
76. Vayana D, (2009), Etudes de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges, Ile de la Réunion, Mémoire de Master 1 en géosphère, Université de la Réunion.
77. Vila, J- M. (1980). La chaîne d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens- thèse pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences. 586p.
78. W.H.O, (2011), Guidelines for drinking – water quality, 230p.
79. WHO (2013). WHO (1993) Guidelines for Drinking Water Quality Vol. 1, recommendations. In, Geneva.
80. Wildi, W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn.géog. Phys.*, (24), 3, p 201-297.