

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministry of Higher Education and Scientific Research
ABBES LAGHROUR University Khenchela
Faculty of Natural and Life Sciences
Department of Ecology and Environment



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم البيئة والمحيط

THESE

Présentée en vue de l'obtention de Diplôme de
DOCTORAT LMD en Ecologie et Environnement.

Option : Eau, Environnement et Energies Renouvelables.

Par

Hanane OULDAMMAR

Intitulée

**Délimitation de biseau salé dans le bassin
versant de Gareat El Tarf**

Soutenue le	11-03-2021	Devant le jury composé de
Président	Abdelhamid KHABTANE	MCA, Université de Khenchela
Rapporteur	Belgacem HOUHA	Professeur, Université de Khenchela
Examineur	Kenza KADI	Professeur, Université de Khenchela
Examineur	Layachi GOUAIDIA	Professeur, université de Tébessa
Examineur	Lassaad GHRIEB	Docteur, université de Guelma

Année universitaire 2020-2021

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mon très cher mari Saber : tes sacrifices, ton soutien moral et matériel m'ont permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle. Merci d'être toujours à mes côtés, par ta présence

A Mes chers enfants Anes et Ritel, Je vous dis : que Dieu vous bénisse.

A ma chère sœur Sara, mes frères : Imad et Oussama pour leur affection, encouragement et soutien moral.

A mes grands-parents

A toute la famille

Remerciements

Au moment où je termine ma thèse, je souhaite adresser un message à toutes les personnes de mon entourage qui m'ont soutenu tout au long de ce travail.

*Je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur **HOUHA Belgacem**, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'encadrer ce travail avec patience et confiance. Je dois lui remercier ainsi pour son soutien scientifique et moral malgré ses occupations scientifiques et administratives.*

*J'adresse mes vifs remerciements aux **membres du jury** qui ont bien voulu accepter d'évaluer et juger ce travail. Ce n'est qu'avec leurs critiques que ce manuscrit s'est amélioré.*

*Je dois remercier vivement **Dr. BOULAABAIZ Mahrez** pour son aide que je ne peux jamais oublier, **Dr Dib Dounia** pour l'intérêt qu'elle m'a porté à mes questions et problématiques ainsi que leur soutien.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude et mes remerciements à mon amie Melle **OUALDJAOUI Mounia**, Doctorante à l'université de Khenchela pour son aide*

*Je tiens à remercier **M.khalout Youssef** direction des forêts de khenchela*

*Ma vive gratitude et mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants de biologie pour leur amitié, aides précieuses et leur soutien moral ainsi que je tiens à remercier également **mes collègues doctorants et docteurs** de l'université de Khenchela pour leur sympathie*

RESUME

Le bassin versant de Garaet El Tarf sur lequel est axée notre étude chevauche entre deux wilayas ; Oum el Bouaghi et Khenchela (NE Algérien). Cette zone est caractérisée par son climat semi-aride et ses formations sédimentaires très hétérogènes. La nappe des eaux souterraines est composée de la superposition de deux nappes ; la nappe superficielle de mio-plioquaternaire et la nappe profonde de crétacé. Le couplage entre les outils géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques dans l'étude des eaux souterraines dans le sous bassin de Garaat el Tarf, nous a permis de déterminer l'origine des phénomènes de salinisation et minéralisation de ladite localité. Les résultats issus de ces analyses ont été traités à l'aide des techniques hydrochimiques (diagramme de Piper) et à l'aide de l'analyse statistique multi variée dont l'Analyse en Composantes Principales (ACP). En amont du bassin et près des affleurements calcaires les eaux sont bicarbonatées calciques, dans le remplissage mio-plio-quaternaire ; le faciès est sulfaté calcique, pour finalement devenir chloruré sodique aux confins de la sebkha. L'interaction eau-roche est le facteur responsable de la minéralisation des eaux. Le traçage chimique par le strontium, laisse supposer que la dissolution des évaporites et l'échange sebkha-eaux souterraines contribuent à la salinité des eaux de la plaine de Garaat-el-Tarf.

Mots-clés : Biseau salé, Garaat el Tarf, eaux souterraines, minéralisation, salinité.

ABSTRACT

The watershed of Garaet El Tarf on which our study is based overlaps between two cities; Oum el Bouaghi and Khenchela (NE Algerian). This area is characterized by semi-arid climate and very heterogeneous sedimentary formations. The underground water is composed of a superposition of two groundwater; the mio-plioquaternary surface layer and the deep Cretaceous layer. The coupling between geological, hydrogeological and hydrogeochemical tools in the study of groundwater in the Garaat-el-Tarf plain, allowed us to determine the origin of the phenomenon of salinization and mineralization of the said locality. The results from these analyzes were processed using hydrochemical techniques (piper diagram) and using multivariate statistical analysis including Principal Component Analysis (PCA). Upstream of the basin and near the limestone outcrops, the waters are calcium bicarbonated, in the mio-plio-quaternary filling, the facies is calcium sulphate, to finally become sodium chloride on the borders of the sebkha. The water-rock interaction is the factor responsible for the mineralization of water. The chemical tracing by strontium suggests that the dissolution of evaporites and the sebkha-groundwater exchange contribute to the salinity of the waters of the Garaat-el-Tarf plain.

Keywords: Salted bevel, Garaat el Tarf, groundwater, mineralization, salinity.

ملخص

يقع الحوض المائي لـ قرعة الطرف – موقع الدراسة - على امتداد ولايتي أم البواقي وخنشلة (شمال شرق الجزائر). تتميز هذه المنطقة بمناخ شبه جاف الذي أدى الى تكوين تشكيلات رسوبية غير متجانسة. -المياه الجوفية تتكون من طبقتين الأولى سطحية تعود الى العصر الرباعي (ميوبليوكواترنار) والثانية عميقة تعود الى عصر الطباشيري (الكريتاسي).

ان دراسة نوعية المياه الجوفية لمنطقة قرعة الطرف اعتمدت على التقنيات الجيولوجية، الهيدروجيولوجية والهيدروكيميائية والتي سمحت لنا بتحديد أصل ظاهرتي الملوحة والتمعدن. النتائج المحصل عليها عولجت بالتقنيات الهيدروكيميائية (مخطط بيير) وبالتحليل الاحصائي المتعدد المتغيرات.

في أعلى الحوض وبالقرب من نتوءات الحجر الجيري تكون المياه مشبعة بكاربونات الكالسيوم ثم تتحول الى مياه مشبعة بكبريتات الكالسيوم على مستوى الميوبليوكواترنار لتصبح أخيرا مياه مشبعة بكلوريد الصوديوم بالقرب من السبخة. التفاعل بين الماء والصخور هو العامل المسؤول عن التركيبة المعدنية للمياه. الدراسة بالسترونشيوم جعلتنا نفترض أن تحلل المتبخرات والتبادل بين السبخة والمياه الجوفية ساهمتا في ملوحة المياه الجوفية على مستوى الحوض.

الكلمات المفتاحية: الشط المملح – قرعة الطرف -المياه الجوفية-التمعدن –الملوحة.

Liste des abréviations et des paramètres

- ACP : Analyse en Composantes Principales
- AFP : Analyse factorielle principale
- ANRH : Agence National des Ressources Hydrauliques.
- AWC : Capacité de rétention maximale en eau
- C.G.G : Compagnie Générale de Géophysique
- CE : Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
- DA : Déficit agricole (mm)
- Dd : Densité de drainage
- DHKH : Direction Hydraulique de khanchela.
- DHOB : Direction Hydraulique d'Oum El Bouaghi.
- DSA : Direction des services agricoles
- DSP : Direction de la santé et de la population
- Ds : Dénivelée spécifique
- ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)
- ETR : Evapotranspiration Réelle (mm)
- H_{moy} : Altitude moyenne
- ICWE : Conférence internationale sur l'eau et l'environnement
- IDM : Indice d'aridité de De Martonne
- IDW : Inverses des distances
- i.e.b : Indice d'échange de base
- Ig : l'indice de pente global
- Ir : l'indice de pente de Roche
- K_G : Indice de compacité de Gravelius
- MNT : Model numérique de terrain
- P : Précipitations (mm)
- pH : Potentiel d'Hydrogène
- Q2 : Quotient pluviométrique

RFU : Réserve Facilement Utilisable (mm)

S.A.R : Sodium Adsorption Ratio.

SAT : Superficie Agricole Totale.

SAU : Superficie Agricole Utile.

SIG : système d informatique géographique

T : Température (°C)

Liste des figures

Figure.1 : Carte de situation géographique du sous bassin de Garaat el tarf	4
Figure.2 : Courbe hypsométrique du sous bassin de Garaat el tarf	6
Figure.3 : carte hypsométrique du sous bassin de Garaat el tarf	7
Figure.4. Carte des pentes du sous bassin de Garaat el tarf	9
Figure.5. carte de réseau hydrographique du sous bassin de Garaat el tarf	12
Figure.6 : Carte schématique de la géologie du sous bassin de Garaat el tarf	21
Figure.7 : Carte de situation des coupes hydrogéologiques du sous bassin de Garaat el tarf	23
Figure.8 : Coupe hydrogéologique I-I	24
Figure.9 : Coupe hydrogéologique II-II	25
Figure. 10 : Carte piézométrique du sous bassin de Garaat el tarf	27
Figure.11 : Précipitations mensuelles moyennes (1995à 2015).	30
Figure.12 : Variations inter-annuelles des précipitations	31
Figure.13 : variations mensuelles de la température (1995-2015)	33
Figure.14. Variations mensuelles de l'humidité relative moyenne de l'air en %	35
Figure.15. Diagrammes Ombrothermiques (1995-2015).	37
Figure.16. Localisation des stations étudiées sur le climagramme d'Emberger	39
Figure.17. Evolution mensuelle de l'évapotranspiration potentielle calculée selon la méthode d'estimation de Thornthwait.	41
Figure.18. Bilan hydrique moyen de la période 1995-2015	44
Figure.19 : Inventaire des points de prélèvement (octobre 2014)	47
Figure.20. : Valeurs des pH des eaux souterraines (octobre 2014)	49
Figure. 21 : Valeurs des températures des eaux souterraines (octobre 2014)	50
Figure.22 : Valeurs de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines dans (octobre 2014)	51
Figure.23 : Distribution spatiale des conductivités ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	52
Figure.24 : Corrélation entre la somme des cations et la somme des anions (Octobre 2014).	53
Figure.25 : Distribution spatial de calcium (mg/l)	54
Figure.26 : Distribution spatial de magnésium (mg/l)	55
Figure.27 : Distribution spatial de sodium (mg/l)	56
Figure.28 : Distribution spatial de chlorure (mg/l)	57
Figure.29 : Distribution spatiale de sulfate (mg/l)	58

Figure.30 : Distribution spatial de bicarbonate (mg/l)	59
Figure.31 : Distribution spatial de nitrate (mg/l)	60
Figure.32 : Diagramme de Piper montrant la composition chimique des eaux souterraines	61
Figure.33 : Représentation des faciès chimique en pourcentage	62
Figure. 34 : Classification de Schoeller- Berkaloff	63
Figure.35: Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques.	64
Figure.36 : Relation entre Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} SO_4^{2-} en fonction de Cl^- des eaux souterraines et l'eau de pluie- eau de mer.	66
Figure. 37: Rapport caractéristique $r\text{Na}^+ / r\text{Cl}^-$	67
Figure.38 : Rapport caractéristique $r\text{Mg}^{2+} / r\text{Ca}^{2+}$	68
Figure.39 : Rapport caractéristique $r\text{Ca}^{2+} / r\text{SO}_4^{2-}$	69
Figure.40 : Distribution spatiale du rapport Sr/Ca ‰	70
Figure.41 : Histogramme des teneurs du rapport Sr/Ca ‰ des eaux souterraines	70
Figure.42 : Evolution spatiale des indices de saturation des minéraux carbonatés	72
Figure.43 : Evolution spatiale des indices de saturation des minéraux évaporitique	72
Figure.44 : représentation graphique de l'indice d'échange de base	73
Figure.45 : Représentation de $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	74
Figure.46 : Rapport caractéristique $r\text{HCO}_3^- / r(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de la CE	74
Figure.47 : Rapport $r\text{Cl}^- / r\text{SO}_4^{2-}$ en fonction de la conductivité électrique	75
Figure.48 : Représentation des tracés dans le sous bassin de Garaat el Tarf	77
Figure.49 : Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé I-I	78
Figure.50 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé I-I	78
Figure.51 : Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé II-II	79
Figure.52 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé II-II	79
Figure.53 : Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé III-III	80

Figure.54 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé III-III	80
Figure. 55 : Limite approximative de l'intrusion saline dans le sous bassin de Garaat el Tarf.	81
Figure.56 : Plan factoriel F1 - F2.	85
Figure.57 : Plan factoriel F1 -F2.	85
Figure.58 : distribution spatial de cuivre (mg/l)	86
Figure.59 : distribution spatial de zinc (mg/l)	87
Figure.60 : distribution spatial de fer (mg/l)	88
Figure.61 : Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR	90
Figure.62 : Représentation des eaux d'irrigation par la Méthode de Richard	92
Figure.63 : Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode wilcox	93
Figure. 64 : Représentation des eaux d'irrigation par méthode de wilcox	94
Figure. 65 : la méthode DRASTIC, ses paramètres et leur poids.	96
Figure 66 : Étapes d'élaboration de la carte finale de vulnérabilité.	97
Figure. 67 : Profondeur de la nappe.	99
Figure. 68 : Recharge nette de la nappe	100
Figure. 69 : Lithologie de l'aquifère.	101
Figure. 70 : Texture du sol.	102
Figure.71 : Topographie (pente)	103
Figure. 72 : Impact de la zone non saturée.	104
Figure. 73 : Perméabilité.	105
Figure. 74 : Vulnérabilité à la pollution.	106
Figure. 75 : Distribution spatiale des nitrates (en mg/l)	107

Liste des tableaux

Tableau.1 : Tranches d'altitudes et superficies	7
Tableau.2 : Tranches d'altitudes et superficies partielles	8
Tableau.3 : Classification du relief selon Ds et Ig	10
Tableau.4. Paramètres morphométriques des sous bassin versant	10
Tableau.5 : Densité de la population par commune en 2017	13
Tableau.6 : Répartition générale des terres en 2017	14
Tableau.7 : Effectifs des animaux gros bétails en 2017	14
Tableau 8 : Résumé de la colonne lithostratigraphique du sous bassin versant	26
Tableau.9: Nomenclature des stations	29
Tableau.10 : Pluviométrie mensuelle enregistré (1995-2015).	29
Tableau.11 : Températures mensuelles enregistrés à la station d'El-Hamma (1995- 2015).	32
Tableau.12 : Températures mensuelles enregistrés à la station d'Oum El-Bouaghi (1995-2015)	32
Tableau.13. Valeurs de l'humidité relative moyenne mensuelle à la station d'El- Hamma (1995-2015).	34
Tableau.14. Valeurs de l'humidité relative moyenne mensuelle à la station d'Oum El-Bouaghi (1995-2015)	34
Tableau.15. Indice d'aridité de De Martonne	36
Tableau.16. Calcul des termes du bilan hydrique de la station d'El Hamma	43
Tableau.17 Calcul des termes du bilan hydrique de la station d'Oum el Bouaghi	43
Tableau.18 : Sommaire statistique des paramètres mesurés in situ	48
Tableau.19 : Concentrations caractéristiques des éléments majeurs	52
Tableau.20 : Critères d'identification de l'origine de la salinité (YELLE, 2003).	75
Tableau.21 : Classification des échantillons selon les critères proposés par Yelle, 2003.	76
Tableau.22 : Matrice de corrélation entre les paramètres mesurés	83
Tableau.23 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R	91
Tableau.24 : Type, sources des données et mode de traitement de chaque paramètre.	97
Tableau.25 : Poids et cote du paramètre de Pente.	103

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre-I- cadre physique de la région d'étude	
1. Introduction	3
2. Situation géographique	3
3. Les caractéristiques morphométriques.....	4
3.1. Surface et périmètre.....	4
3.2. Les caractéristiques de forme	4
3.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K_G).....	4
3.2.2. Le rectangle équivalent	5
3.3. Courbe hypsométrique et Altitudes.....	5
3.3.1. Altitude moyenne du bassin.....	6
3.3.2. L'altitude médiane.....	7
3.4. Les indices de pentes.....	8
3.4.1. Indice de pente de Roche Ip.....	8
3.4.2. L'indice de pente global I_g	9
3.4.3. Dénivelée spécifique D_s	10
4. Caractéristiques du réseau hydrographique.....	11
4.1. Densité de drainage (D_d).....	12
5. Couvert végétale.....	13
6. Contexte socio-économique.....	13
6.1. La population.....	13
6.2. Le contexte économique.....	14
Chapitre –II- cadre géologique et hydrogéologique	
Geologie	15
1. Introduction.....	15
2. Cadre général.....	15
2.1. La série stratigraphique.....	15
2.2. Lithostratigraphie du sous bassin.....	15
2.2.1. Trias.....	16
2.2.2. Crétacé.....	16

Chapitre-III- cadre hydro climatologique

1. Introduction.....	29
2. Analyse des paramètres climatologiques.....	29
2.1. Précipitation.....	29
2.2. Température de l'air.....	32
2.3. L'humidité relative de l'Air.....	34
3. Les indices climatiques et caractérisation du climat.....	35
3.1. Indice d'aridité de De Martonne (IDM).....	36
3.2. Indice Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1952).....	36
3.3. Quotient pluviothermique d'Emberger (1932).....	38
4. Estimation de l'évapotranspiration et calcul du bilan hydrique.....	40
4.1. Evapotranspiration.....	40
4.2. Bilan hydrique de Thornthwaite.....	42
4.3. Ruissellement superficiel.....	45
4.4. Infiltration	45
5. Synthèse des résultats de l'étude climatique.....	45

Chapitre –IV- cadre hydrochimique

1. Introduction.....	46
2. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse.....	46
3. Résultats et discussion.....	48
3.1. Paramètres physiques <i>in situ</i>	48
3.1.1. Potentiel d'Hydrogène (pH).....	48
3.1.2. Températures.....	49
3.1.3. Conductivité électrique(CE)	50
3.2. Etude analytique des éléments chimiques.....	52
3.2.1. calcul de la balance ionique	53
3.2.2. Les	57

cations.....	
3.2.2.1. Calcium (Ca^{2+}).....	54
3.2.2.2. Magnésium (Mg^{2+}).....	55
3.2.2.3. Sodium (Na^+).....	56
3.2.3. Les anions.....	57
3.2.3.1. Chlorure (Cl^-).....	57
3.2.3.2. Sulfate (SO_4^{2-}).....	58
3.2.3.3. Bicarbonates (HCO_3^-).....	59
3.2.3.4. Nitrates (NO_3^-).....	60
3.3. Représentation graphique des faciès hydrochimiques	61
3.3.1. Représentation de Piper	61
3.3.2. Diagramme de Schoeller– Berkaloff.....	62
3.4. Faciès caractéristiques	64
3.5. Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure.....	65
3.6. Etude des rapports caractéristiques.....	67
3.6.1. Le rapport caractéristique $r \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	67
3.6.2. Le rapport caractéristique $r \text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{+2}$	68
3.6.3. Le rapport caractéristique $r \text{Ca}^{2+}/r\text{SO}_4^{2-}$	68
3.7. Etude du strontium (Sr^{+2})	69
3.8. Indice de saturation.....	71
3.9. Indice d'échange de base (i.e.b).....	73
3.10. Etude du biseau salée.....	74
3.10.1. Origine de la salinité.....	74
3.10.2. Détermination de la salinité par les rapports caractéristiques	74
3.10.3. L'influence de Sebkha (Garaet El Tarf).....	77
3.10.3.1. Tracé I-I.....	77
3.10.3.2. Tracé II-II.....	79
3.10.3.3. Tracé III-III.....	80
3.11. Analyse statistique.....	81
3.11.1. Analyse factoriel	82
3.11.2. Matrice des corrélations	82

3.11.3. Représentation en composante principale (ACP).....	84
3.12. Les métaux	85
3.12.1. Le cuivre (Cu).....	85
3.12.2. Le zinc (Zn).....	87
3.12.3. Le fer (Fe)	88
3.13. Aptitude des eaux a l'irrigation.....	89
3.13.1. Risque de sodicité et de salinité :(Méthode de Richard).....	89
3.13.2. Influence de la sodicité et la salinité sur la perméabilité du sol :(Méthode de WILCOX).....	92
Chapitre –V- Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines a la pollution	
1. Introduction	95
1.1. Objet des cartes de vulnérabilité.....	95
2. Méthodologie.....	96
3. Application de la méthode DRASTIC.....	98
3.1.1. Profondeur de la nappe (D).....	98
3.1.2. La recharge efficace (R)	99
3.1.3. La Nature de la zone saturée (A) : Lithologie de l'aquifère	101
3.1.4. La Texture du Sol (S).....	102
3.1.5. La topographie, Pente (T).....	103
3.1.6. Impacte de la zone non saturée (I).....	104
3.1.7. La Perméabilité (C).....	105
4. Indice de Vulnérabilité.....	106
5. Validation des cartes de vulnérabilité.....	107
6. Conclusion	108
Conclusion générale.....	109

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

L'eau est menacée par une consommation en nette augmentation et une pollution accrue, la situation mondiale des ressources en eau est devenue critique. Plus d'un milliard de personnes dans le monde n'a pas accès à l'eau potable et près de deux milliards et demi, soit le tiers de la population mondiale, seront confrontés à une pénurie d'eau d'ici 2025 (4th World Water Forum, 2006). La déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable (ICWE, 1992), faisant état des problèmes liés à l'eau, a permis la création du forum mondial de l'eau associant institutions privées, organisations régionales et non gouvernementales et pouvoirs publics à l'effort d'évaluation et de suivi de la gestion des ressources en eau.

Une gestion efficace des ressources en eau doit intégrer toutes les composantes du cycle hydrologique. L'une de ces composantes, les eaux souterraines, a longtemps été négligée dans cette gestion alors qu'elle représente 95 % de l'eau douce de la planète (Morris et al, 2003). Ressource cachée, l'amenuisement et la dégradation de sa qualité ne sont pas facilement perçus. Les eaux souterraines viennent généralement en complément des eaux de surface facilement accessibles. Les études relatives aux conséquences du réchauffement climatique laissent entrevoir une incertitude croissante sur la disponibilité des ressources en eau de surface d'où un intérêt croissant pour les eaux souterraines. On estime à près de deux milliards des personnes dépendant directement des eaux souterraines et 40 % de la production alimentaire mondiale provient de l'irrigation par les eaux souterraines (Morris et al, 2003). Dès lors, la gestion des ressources en eaux souterraines doit être une priorité.

En Algérie les ressources en eau se font de plus en plus rares et de qualité médiocre dans les zones de l'Atlas saharien ou le bassin de Garaat El Tarf fait partie sévit à un climat semi-aride avec des vents chauds et secs (sirocco) en provenance du Sahara. L'aridité du climat, les périodes de sécheresse successives, l'irrégularité des précipitations et l'activité anthropique sont des facteurs qui ont réduit la quantité et la qualité des eaux souterraines du bassin.

La plaine Garaat-el-Tarf se chevauche entre la wilaya de Khenchela et la wilaya d'Oum El Bouaghi au nord-est de l'Algérie. Une région semi-aride où se pose le problème de la salinité des eaux souterraines. Elle est le siège d'une activité agricole intense, l'essentiel des besoins en eau provient et continuera de provenir des eaux souterraines (Houha, 1996). Le but de ce travail est de mieux comprendre le comportement physico-chimique et hydrogéochimique des eaux souterraines afin de comprendre le mécanisme de

minéralisation, l'origine de la salinité, et d'essayer de délimiter le biseau salé entre Garaat el Tarf et les eaux souterraines.

Le manuscrit de thèse s'articule autour de cinq chapitres précédés par une introduction qui décrit la problématique du sujet, les objectifs visés dans cette étude et les approches méthodologiques utilisées pour mener à bon port cette étude.

- Le chapitre I présente le contexte physique et la situation géographique de la zone d'étude.
- Le chapitre II expose les caractéristiques des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone en s'appuyant principalement sur la synthèse des études géologiques.
- Le chapitre III est consacré aux caractéristiques climatiques telles que les précipitations et les températures.
- Le chapitre IV est consacré à l'étude hydrogéologique et à la vulnérabilité des eaux souterraines en utilisant la méthode DRASTIC
- Le chapitre V étudie la chimie des eaux souterraines, les différents processus géochimiques gouvernant la minéralisation des différents faciès d'eau rencontrés et l'origine des eaux de l'aquifère et délimitation du biseau salée en utilisant les rapports caractéristiques et méthodes statistiques.

Enfin, l'ensemble de ces différents résultats issus des différents chapitres constitue la synthèse qui fera l'objet de la conclusion générale à laquelle seront associées des perspectives.

CHAPITRE I

Cadre physique de région d'étude

1. Introduction

La dénomination des sous bassins des hauts plateaux constantinois adoptée par l'Agence nationale des ressources hydriques est suggestive de l'endoréisme caractérisant ces hydrosystèmes. Le sous bassin versant de Garaat el Tarf, couvrant une superficie de 2400 km² renferme la plus grande dépression lacustre d'origine tectonique et climatique (Benazzouz, 1986) qui constitue l'exutoire des eaux de ruissellement (Garaat el Tarf). Le sous bassin est situé au contact du Tell et des Aurès c'est une zone de transition entre la montagne (petits massifs montagneux isolés), il s'allonge du Nord au pied du versant Sud de djebel Sidi R'Ghis (1635 m d'altitude) et djebel Tarf sous forme de collines constituées par des dépôts colluviaux qui descendent en pente atténuée vers la dépression. Le sud du sous bassin, au pied des contreforts du massif de l'Aurès, est dominé à l'Ouest par le mont de Ras Sardhoun à 1263 m (Dib, 2018).

2. Situation géographique

La zone d'étude fait partie au sous bassin versant de Garaat el Tarf (Fig.1). Elle couvre une superficie de 1378 km². Plusieurs agglomérations y siègent, à savoir Baghai, Kais, El-Hamma, Khenchela et M'toussa. Les limites géographiques de la zone d'étude sont présentées comme suit : Nord dépression endoréique (Garaet), à l'Est : oued Nini, massif Djebel Bou tokhma et Tafrennt, au Sud la ligne de crête des djebels Feraoun, Aurès et à l'Ouest Oued Gueiss.

L'existence de nappes souterraines importantes (nappes phréatiques, nappes profondes...), de massifs réservoirs aquifères (massifs calcaires) et d'oueds sont à l'origine d'un potentiel important en eau plus ou moins vulnérable aux changements climatiques et à l'action anthropique.

Les sols des hautes plaines, limoneux et de bonne structure, conviennent bien dans l'ensemble à l'irrigation, si l'on exclut les bas-fonds argileux et les sols squelettiques des piémonts. Néanmoins, l'agriculture des hautes plaines reste à 98 % une agriculture sèche. L'irrigation se présente uniquement sous forme de taches ponctuelles et diffuses (Bord, 1981).

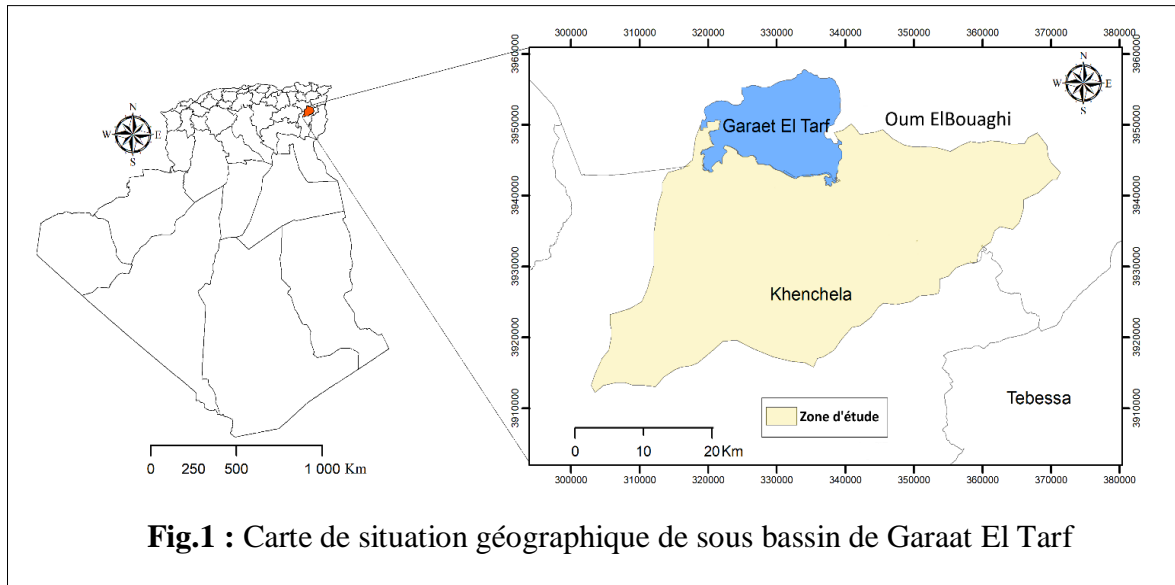


Fig.1 : Carte de situation géographique de sous bassin de Garaet El Tarf

3. Les caractéristiques morphométriques

3.1. Surface et périmètre

Ces deux paramètres sont déterminés dans un environnement SIG (Arc Gis 10.3) (ESRI, 2014). La surface est de 1378 km^2 et le périmètre est de 224 km .

3.2. Les caractéristiques de forme

3.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K_G)

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée. Cette caractéristique est donnée par l'indice de Gravelius, qui a été proposé en 1914, le coefficient de compacité "compactness coefficient" est défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle d'une même surface.

$$K_G = 0.28 P / (\sqrt{A})$$

$$K_G = 1.69$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant (km^2) ;

P : périmètre du bassin versant (km).

L'indice de compacité de Gravelius a ainsi été évalué à $K_G = 1,69 > 1$.

Le bassin versant est donc de forme allongée, et peut-être assimilé à une surface rectangulaire de même superficie. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin.

3.2.2. Le rectangle équivalent

Encore appelé rectangle de Gravélius, il correspond à une transformation purement géométrique d'un bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les dimensions du rectangle équivalent sont la longueur et la largeur données par les équations suivantes :

$$L = [(K_G \sqrt{A}) / 1.12] [1 + (\sqrt{1 - (1.12 / K_G)^2})] = 98 \text{ km}$$

$$l = [(K_G \sqrt{A}) / 1.12] [1 - (\sqrt{1 - (1.12 / K_G)^2})] = 14 \text{ km}$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravélius ;

A : surface du bassin versant (km^2) ;

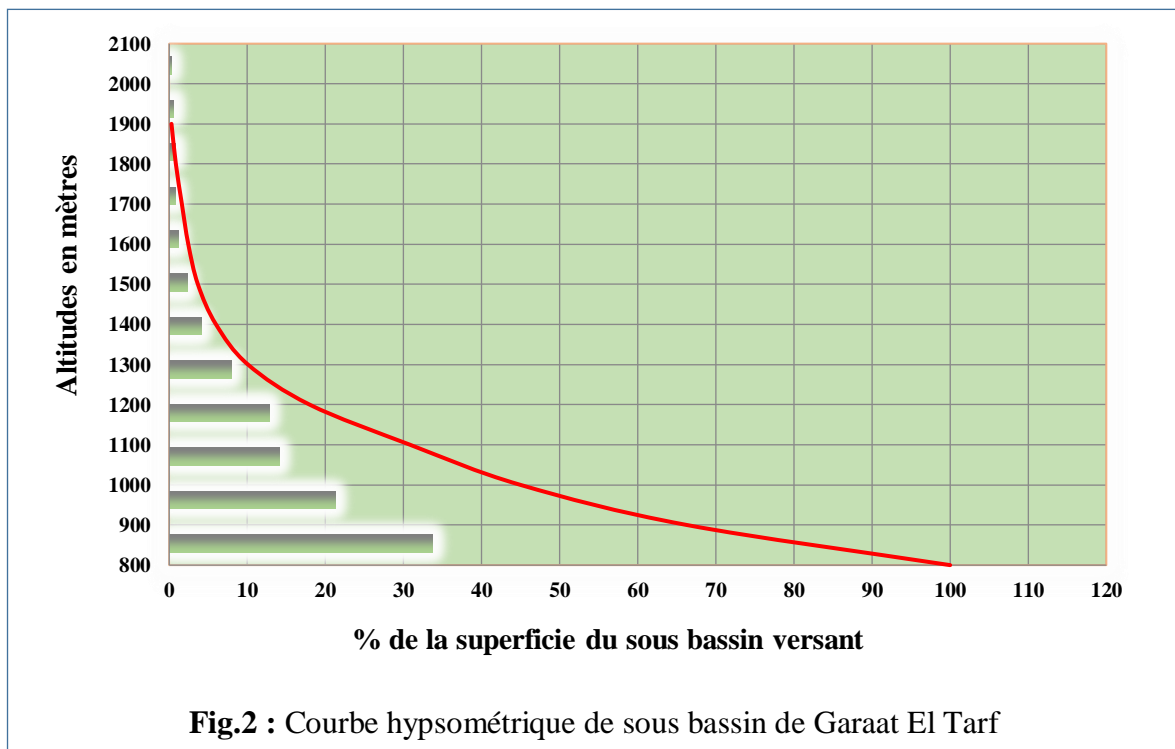
P : périmètre du bassin versant (km).

Ainsi, la longueur équivalente $L = 98 \text{ km}$ et la largeur équivalente $l = 14 \text{ km}$.

3.3. Courbe hypsométrique et Altitudes

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du sous bassin. La figure (Fig.2) représente la répartition de la surface du sous bassin versant en fonction de son altitude. Bien que la répartition des altitudes ne soit pas totalement identique d'un bassin à l'autre. La courbe hypsométrique individualise de façon générale en trois secteurs bien distincts au niveau du sous bassin.

- La partie en périphérie occupe une faible portion ; elle représente 10,07 % de la surface totale et regroupe les montagnes dont les altitudes varient entre 1300 et 2100 m ;
- La plaine qui représente les zones de piémonts qui sont sujets d'une érosion intense, cela occupe 20,77 % de la surface totale ;
- Garaet el Tarf et les espaces limitrophes présentent les plaines dont l'altitude comprise entre 824 et 1100 m est une superficie importante de 69,17 %.



Les altitudes d'un bassin versant (Fig.3) modifient la vitesse de l'eau dans les drains et en modifiant les profils en long des cours d'eau, confèrent au bassin un écoulement plus ou moins torrentiel.

Les altitudes maximale et minimale sont obtenues directement à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin (2071 m) tandis que l'altitude minimale est considérée comme le point le plus bas (824 m).

3.3.1. Altitude moyenne du bassin

Déduite directement de la courbe hypsométrique selon la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = (\sum (A_i * h_i) / A) = 1039,12 \text{ m}$$

A_i : superficie partielle (km^2) de la tranche d'altitude (Tableau.1).

X_i : centre de la classe d'altitude (m).

A : superficie du bassin (km^2).

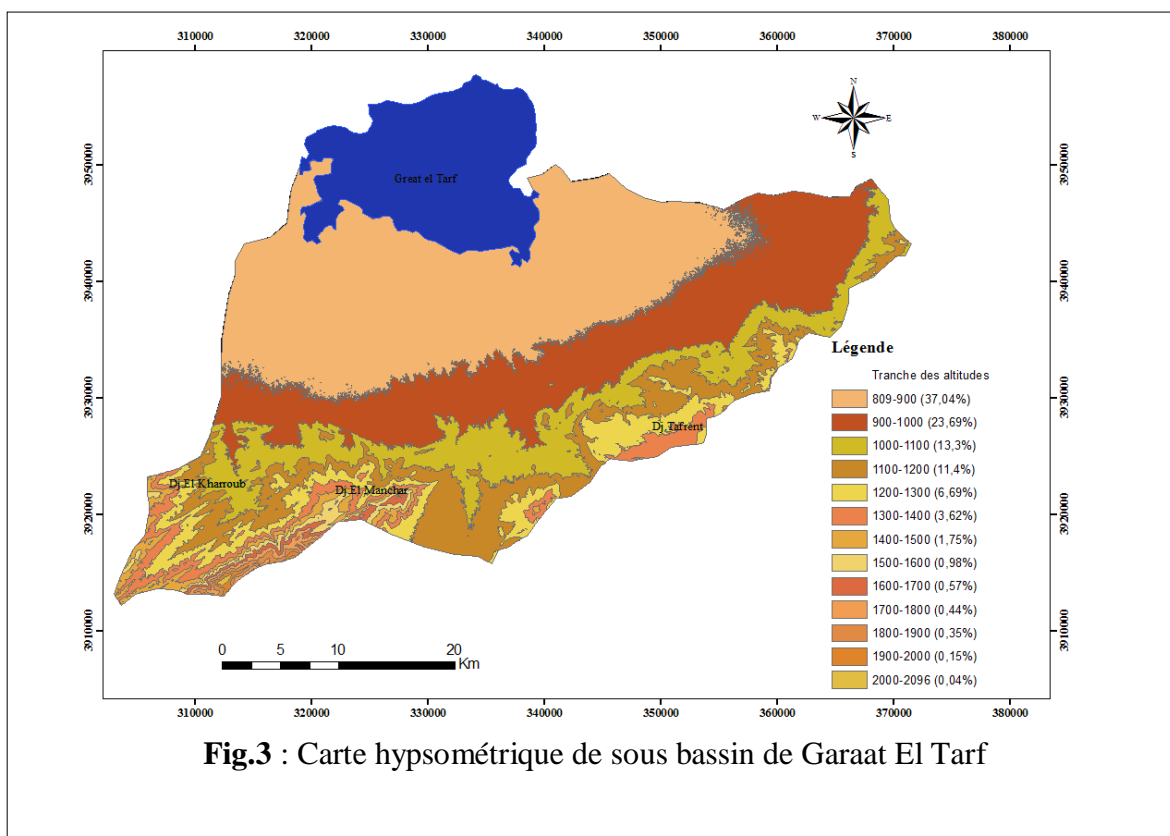
L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

Tableau.1 : Tranches d'altitudes et superficies

Altitude	Superficie partielle %	Superficie cumulée %	Superficie partielle (Km ²)
824-900	33,71	100,00	464,51
900-1000	21,31	66,29	293,61
1000-1100	14,14	44,98	194,81
1100-1200	12,86	30,85	177,21
1200-1300	7,91	17,99	109,00
1300-1400	4,08	10,08	56,27
1400-1500	2,33	5,99	32,08
1500-1600	1,22	3,67	16,87
1600-1700	0,82	2,44	11,34
1700-1800	0,77	1,62	10,66
1800-1900	0,56	0,85	7,69
1900-2000	0,24	0,29	3,32
2000-2071	0,05	0,05	0,64

3.3.2. L'altitude médiane

Elle est déduite à partir de la courbe hypsométrique (Fig.2), l'altitude médiane correspond à 50 % de la superficie, elle est de 1000 m.

**Fig.3** : Carte hypsométrique de sous bassin de Garaat El Tarf

3.4. Les indices de pente

Le relief joue un rôle primordial dans l'aptitude au ruissellement des terrains. Il peut être quantifié à l'aide de quelques indices dont l'objectif est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications.

3.4.1. Indice de pente de Roche (**Ir**)

Le calcul de l'indice de pente de Roche (**Ir**) nécessite préalablement le calcul du largeur et longueur du rectangle équivalent ainsi que l'établissement de la courbe hypsométrique. **Ir** est exprimé par la moyenne de la racine carrée des pentes, mesurées sur le rectangle équivalent et pondérées par les surfaces (Tableau.2).

$$Ir = 1/\sqrt{L} \sum \sqrt{b_i} * (a_i - a_{i-1})$$

L : longueur du rectangle équivalent (m) ;

b_i : fraction de surface comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} (%) ;

a_i et a_{i-1} : différence entre les courbes de niveaux i et $i-1$ (m).

Ir = 0.81%.

Tableau.2 : Tranches d'altitudes et superficies partielles

Tranches d'altitude (m)	Superficie partielle % b_i	Différence de côtes $a_i - a_{i-1}$	$b_i * (a_i - a_{i-1})$	$\sqrt{b_i} (a_i - a_{i-1})$
824-900	33,71	24	809,04	28,44
900-1000	21,31	100	2131	46,16
1000-1100	14,14	100	1414	37,60
1100-1200	12,86	100	1286	35,86
1200-1300	7,91	100	791	28,12
1300-1400	4,08	100	408	20,20
1400-1500	2,33	100	233	15,26
1500-1600	1,22	100	122	11,05
1600-1700	0,82	100	82	9,06
1700-1800	0,77	100	77	8,77
1800-1900	0,56	100	56	7,48
1900-2000	0,24	100	24	4,90
2000-2071	0,05	71	3,55	1,88

3.4.2.L'indice de pente global (Ig)

Obtenu par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

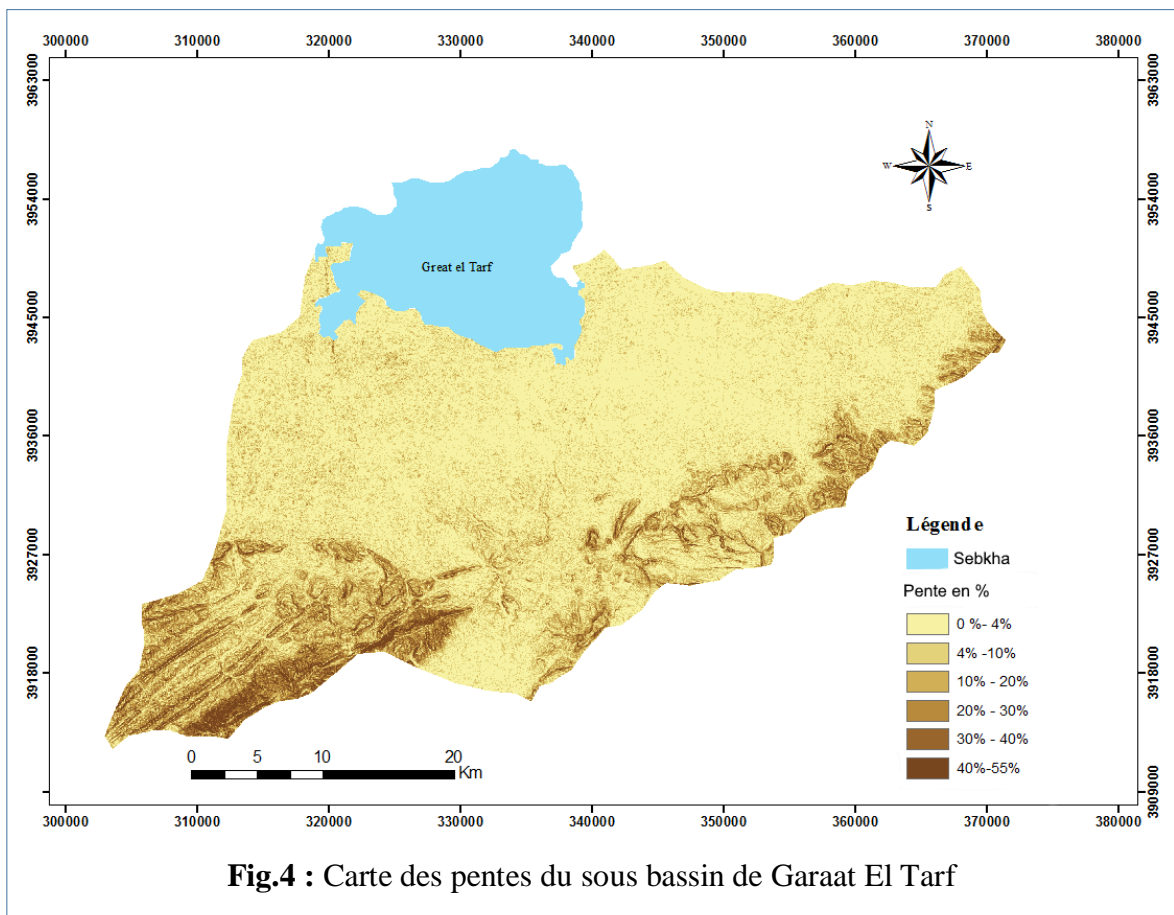
D : étant la dénivelée simple (m) : h 5 % - h 95 %, définie sur la courbe hypsométrique ;

L : étant la longueur du rectangle équivalent.

$I_g = 0.005\%$.

L'indice de pente global (Ig) est estimé à 0.005%., cela implique que le relief du sous bassin est très faible.

La forme de la courbe hypsométrique du sous bassin indique qu'il est en équilibre (bassin mature).



3.4.3.Dénivelée spécifique (Ds)

Produit de l'indice de pente global (Ig) par la racine carrée de la superficie du bassin (S). On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de Ds :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{Ll} = D \sqrt{\frac{l}{L}}$$

$$D_s = 189.3 \text{ m}$$

Tableau.3 : Classification du relief selon D_s et I_g

Classification du relief selon D_s		Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM	
$D_s < 10\text{m}$	Relief très faible	$I_g < 0.2\%$	Relief très faible
$10\text{m} < D_s < 25\text{m}$	Relief faible	$0.2\% < I_g < 0.5\%$	Relief faible
$25\text{m} < D_s < 50\text{m}$	Relief assez faible	$0.5\% < I_g < 1\%$	Relief assez faible
$50\text{m} < D_s < 100\text{m}$	Relief modéré	$1\% < I_g < 2\%$	Relief modéré
$100\text{m} < D_s < 250\text{m}$	Relief assez fort	$2\% < I_g < 5\%$	Relief assez fort
$250\text{m} < D_s < 500\text{m}$	Relief fort	$5\% < I_g < 10\%$	Relief fort
$D_s > 500\text{m}$	Relief très fort	$I_g > 10\%$	Relief très fort

La dénivelé spécifique du bassin étudié est $100\text{m} < D_s < 250\text{m}$ se trouve dans la classe R5 relief assez fort d'où l'influence bien prononcée des massifs montagneux.

La valeur D_s , traduit bien l'importance du volume Montagneux et la forte incision du relief.

Tableau 4. Paramètres morphométriques des sous bassin versant

Paramètres	Superficie (Km^2)	Périmètre (km)	kg	Longueur L (km)	Largeur l (km)	Altitude max(m)	Altitude min (m)	Ir (%)	I_g (%)	D_s m
BV	1378	224	1.69	98	14	2071	824	0.81	0.051	18.93

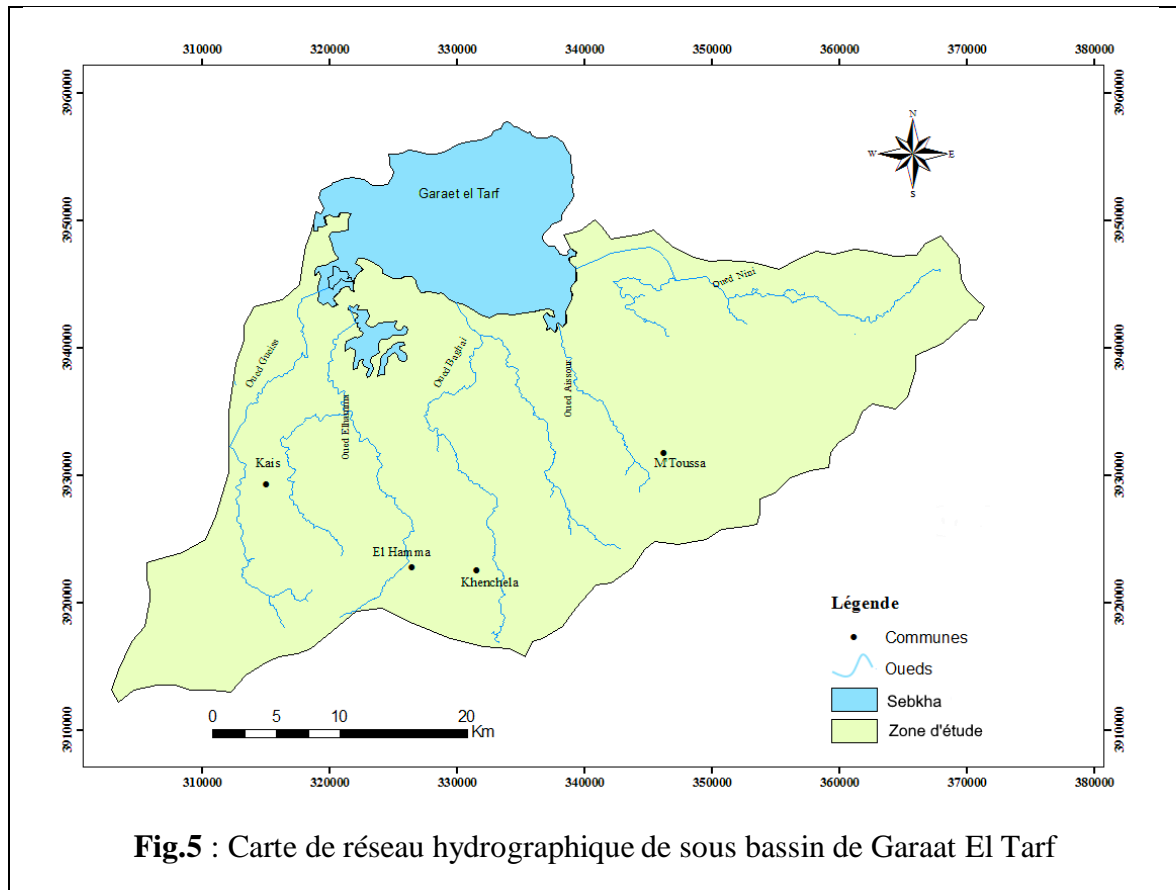
4. Caractéristiques du réseau hydrographique

La structure du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques (Bouanani, 2004). La forme et la densité de ce dernier représentent les deux caractéristiques importantes d'un bassin versant. Sa différenciation est due à plusieurs facteurs dont les plus importants sont : la géologie, le climat, la pente du terrain et la présence ou l'absence d'agglomérations.

Les principaux oueds de notre zone d'étude sont :

- Oued Gueiss : C'est un oued permanent qui ouvre un long couloir dans l'Aurès ; il dérive du djebel Noughiss et se jette dans Garaet El Tarf sous le nom d'oued Marouf ;
- Oued El Hammam : Oued El Hammam découle du Kef El Biod (1815 m) par une étroite vallée sous le nom d'Oued El Kissane, prend le nom d'oued El Hamma et débouche dans la plaine et termine son parcours dans les chotts ;
- Oued Baghai : Oued Baghai prend source à djebel Chellalaia, montagne isolée au sud-est de Khenchela après avoir servi traverse la route Khenchela-Zoui-Tébessa, arrose la plaine de Khenchela, Ksar Baghai et va se jeter dans la Garaet El Tarf ; il reçoit à gauche de petits affluents alimentés par des sources et qui sourdent du djebel Chabor (1216 m) ;
- Oued Aimer et Oued Nini ces oueds prennent sources successivement des massifs de djebel Chettaia (1455 m), Djebel Knif (1224 m) 1291 et se déversent à Garaet El Tarf.

La carte du réseau hydrographique de notre zone d'étude(Fig.5). a été générée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) dont les dimensions des cellules sont de 20 m X 20 m en utilisant la classification de Strehler (1957).



4.1. Densité de drainage (Dd)

La densité de drainage (Dd) est un concept fondamental dans l'analyse hydrologique qui est définie comme le rapport de la longueur du réseau hydrographique par la superficie du bassin versant. La densité de drainage est contrôlée par la perméabilité des sols, érodabilité des surfaces des matériaux, la végétation, la pente et le temps. Le système de drainage développé dans notre zone d'étude est strictement dépendant de la pente.

$$Dd = \frac{L}{A} = 0.28 \text{ km/km}^2$$

L : longueur totale curvimètre (km) des cours d'eau permanents et temporaires.

A : superficie du bassin (km²).

La densité de drainage est très faible ce qui indique que le réseau hydrographique de la zone d'étude ne constitue pas un facteur de risque de point de vue inondations lors des pluies torrentielles.

5. Couvert végétal

La végétation ne trouve pas des conditions favorables (lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau...), pour sa croissance, la couverture végétale est xérophile (adaptée à l'aridité), seules les plantes steppiques comme le Diss (*Ampelodesma mauritanica*). En revanche, les cultures de blé dur (*Triticum durum*), blé tendre (*Triticum aestivum*) et de l'orge (*Hordum vulgare*) peuvent se faire sans irrigation sur ces vastes hauts plains.

La zone d'étude dispose en altitude de belles forêts constituées essentiellement par de pin d'Alpe, genévriers, ifs, à partir de 1500 m des forêts de cèdres. Tout autour de la Sebkhha subsiste une végétation herbacée composée essentiellement d'Armoise blanche (*Artemisia herba-alba*).

6. Contexte socio-économique

6.1. La population

La zone d'étude est partagée entre 05 communes appartenant à la wilaya de Khenchela (Khenchela, El Hamma, Kais, Baghai, et M'Toussa).

Les communes sont de dimensions très hétérogènes et peuvent être très étendues (Tableau.5). On peut fréquemment trouver une ou plusieurs agglomérations dans une même commune ou, inversement, plusieurs communes dans une même agglomération. Ce déséquilibre dans la répartition de la population s'explique en grande partie par les conditions naturelles ainsi que par les mouvements de populations qui se sont poursuivis à la faveur du développement axé sur l'urbanisation et la constitution de pôles industriels autour des grandes agglomérations.

Tableau.5 : Densité de la population par commune en 2017 (DSP, 2017).

Communes	Surface (km ²)	Population (hab)	Densité (hab/km ²)
Khenchela	32	135450	4232,81
El-Hamma	168	14650	87,20
Baghai	136	8070	59,33
M'toussa	118	7100	60,16
Kais	56	41870	47,67

6.2. Le contexte économique

L'agriculture constitue la principale activité au niveau de la zone d'étude (Tableau.6) ; le taux de la SAU 83,48 % de la SAT.

Le taux de terre labourable est estimé 75,29 % et le taux de terre des cultures permanentes est estimé 8,18 %.

Tableau.6 : Répartition générale des terres (DSA, 2017).

Commune	Terres labourables (ha)	Terre des cultures permanentes (ha)	Surface agricole utiles (S.A.U) (ha)	Surface agricole totale (S.A.T) (ha)
Baghai	10112	1402	11514	13164
Kais	2758.5	475.5	3234	4106
El-Hamma	8844	991	9835	13023
M'toussa	9744	552	10296	11488
Khenchela	0	0	0	0
Totale	31458.5	3420.5	34879	41781

L'activité agricole est prédominée par l'élevage des animaux gros bétails, les ovins, les bovins et les caprins (Tableau.7).

Tableau.7 : Effectifs des animaux gros bétails (DSA, 2017).

Commune	Cheptel bovin (tête)	Cheptel ovin (tête)	Cheptel caprin (tête)
Baghai	2646	27071	2454
Kais	600	4664	544
El-Hamma	3132	18383	1908
M'toussa	1030	23166	680
Khenchela	0	0	0
Totale	7408	73284	5586

CHAPITRE II

Cadre géologique et hydrogéologique

I. Géologie

1. Introduction

La nature géologique des roches ou lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Le type d'affleurement a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire. Elle permet aussi d'identifier les différents niveaux stratigraphiques susceptibles d'être aquifères.

Les caractéristiques géologiques du bassin de Garaet El Tarf conditionnent les écoulements des eaux souterraines et des eaux superficielles, ainsi que la géométrie des niveaux aquifères. Les grands traits géologiques de la région ont été basés surtout sur les travaux de Laffitte. (1939 a).

2. Cadre général

Le bassin de Garaet El Tarf appartient au domaine des hauts plateaux, et se dispose à la jonction entre celui-ci et la terminaison septentrionale du massif des Aurès.

La structure actuelle de l'Algérie du Nord résulte de l'évolution tertiaire et quaternaire du bassin Maghrébin. Les mouvements alpins ont permis l'individualisation de nombreux domaines, qui se différencient par l'ampleur de la déformation caractérisant chacun d'eux. Ces domaines dans l'Est algérien sont du nord vers le sud :

- Le domaine kabyle
- Le domaine des flyschs
- Le domaine tellien
- Le domaine atlasique
- La plateforme saharienne

Entre ces différents domaines existent des bassins de transition dont le mieux représenté est le bassin des sellaouas qui par la nature de ses formations géologiques fait la transition entre les bassins paléogéographiques du tell et de l'atlas saharien.

1.1. La série stratigraphique

D'après les études antérieurement réalisées par plusieurs géologues dans la région : Laffitte, (1939 b) ; Herkat, (1982), Marmi, (1995) et Guiraud, (1973), l'inventaire stratigraphique dressé a révélé que les séries les plus anciennes affleurant dans le secteur sont attribuées au Trias. Les dépôts les plus récents sont d'âge Quaternaire.

1.2. Litho-stratigraphie du sous bassin

La litho-stratigraphie a été tirée pour l'essentiel, de notice explicative de carte géologique Nord-est de l'Algérie au 1/ 500 000.

1.2.1. Trias

Une masse chaotique qui affleure toujours en position anormale, on le trouve sous forme de pointements ou de dômes très localisés dans les flancs des grands plis (Ghandriche, 1991). Les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela, où il isole le Miocène du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large et, sur Djebels El Krouma et Knif en contact anormal avec l'albien, le Cénomaniens et le Sénonien. La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet : une formation évaporitique épaisse, en particulier sous forme d'amalgame intensément replissé, représente les indices les plus sûrs de la présence du trias. Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux (Laffitte, 1939 et Vila, 1977).

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Krouma, mais cela tient, non pas un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anté-miocène, il a disparu depuis longtemps (Laffite, 1939).

Des argilites bariolées de teintes vives (violette et rouges, rarement jaunâtres à verdâtres) ; associées à du gypse fibreux et du sel. Constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement, des passées calcaire dolomitiques, de couleur grise bleutée à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques passées marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques (Marmi, 1995).

1.2.2. Crétacé

Les formations crétacées affleurent largement dans la région d'étude et ses environs formant l'ossature de la région. Il correspond à une bande grossièrement orientée SW-NE, formée essentiellement de calcaire et de marnes (Fig.6).

Laffitte a subdivisé le Crétacé en deux ensembles distincts, sur la base de critères faciologique :

- Crétacé inférieur : (Aptien et Albien), correspond à une unité lithologique d'importance régionale. Il affleure à l'anticlinal de Khenchela, On le rencontre sur l'axe de Djebel Bouarif, Fedjoudj.
- Crétacé supérieur : (Cénomaniens, Turonien, Coniacien, Santonien, Campanien et Maestrichtien).

1.2.2.1. Crétacé inférieur

1.2.2.1.1. Aptien

Il est caractérisé par deux ensembles lithologiques distincts (Marmi, 1995) :

- Ensemble inférieur marneux, il est à noter que les affleurements marneux de l'Aptien inférieur au Sidi Reghiss sont caractérisés par la présence des Ammonites. L'Aptien marneux est représenté par environ 100 m de marnes gris noir à débris schisteux et à minces intercalations de marnocalcaire gris à cassure noire.

- Ensemble supérieur calcaireux à Céphalopodes, à Orbitolines

Ces couches forment l'essentiel de la masse calcaire du Djebel Sidi Reghis et du Djebel Tarf. Au Djebel Sidi Reghis la série est épaisse d'environ 250 à 300 m. Au niveau de la coupe géologique prise à Djebel El-Krouma, nous avons la succession suivante de bas en haut :

Marnes gypseuses

Calcaires sombres en bancs métriques, alternant avec des marnes beiges

Son épaisseur dépasse les cinquantaines de mètres.

1.2.2.1.2. Albien

L'Albien de l'Aurès, et de Djebel el Krouma est caractérisé par une alternance marnogréseuse à la base et au sommet associée à des calcaires à Ammonite, des dolomies et des biosparites.

L'Albien entoure régulièrement l'anticlinal de Khenchela en formant une ceinture plus ou moins continue au-dessous de l'Aptien.

Ces caractères impliquent des mouvements d'affaissement du fait du dépôt d'une sédimentation épaisse (300m) dans un fond ne dépassant pas 200m.

1.2.2.2. Crétacé supérieur

Au point de vue répartition géographique, le Crétacé supérieur affleure sur une grande aire dans le massif Aurèsien (Marmi, 1995).

1.2.2.2.1. Cénomaniens inférieur

Il est essentiellement calcaire marneux. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massif mais peu épais, qui s'intercalent dans des marnes gris-bleu ou beiges, avec une épaisseur variable peut atteindre 500 à 600 m.

1.2.2.2.2. Turonien

Le Turonien occupe de grandes surfaces dans les Aurès. Il est à noter que les faciès du Cénomaniens et du Turonien sont très comparables (Marmi, 1995). Il est à dominante

marneuse avec des niveaux de calcaires marneux en plaquettes bitumineuses. La base de cet ensemble est constituée par quelques mètres de marno-calcaire blanchâtres en plaquettes fines à cassure noirâtre. Au-dessus 200 m de marnes grises ou noires montrant des intercalations de marno-calcaire blanchâtres.

1.2.2.2.3. Coniacien

Au Djebel Knif, sous la discordance des formations brèchiques Santoniennes le coniacien est formé à la base par 90 m d'alternances de marnes beiges ou grises et de calcaire gris au-dessus au Djebel Bardo (Ain Beida) des talwegs isolés montrent sur une centaine de mètres, des formations composées essentiellement de marnes grises alternant avec des calcaires noduleux beiges.

1.2.2.2.4. Santonien

Visible aux alentours du Djebel Knif. Il correspond à 250 m de marnes gris bleutées avec à la base et au sommet des marno-calcaires en bancs décimétriques riches en débris d'inocérames, il repose en discordance sur les argiles varicolores du trias et sur le Coniacien.

Ces formations santoniennes contiennent des algues et des débris de rudistes ainsi que des fragments d'hippuritides, à la base des formations récifales contiennent une microfaune pélagique.

1.2.2.2.5. Campanien

Le Campanien est très bien visible aux environs des Djebels Chettaia et Knif et dans le synclinal du Djebel Aurès.

Au Djebel Aurès le Campanien formé de marnes gypseuses à intercalations de calcaires légèrement phosphatés. L'épaisseur de cet étage est de 170m.

Au djebel Knif, on retrouve à la base du Campanien une séquence calcaire de 12 m d'épaisseur. Ce sont des calcaires crayeux en bancs décimétriques à élément triasique remaniés (argiles varicolores). Au-dessus, des marnes noires ne dépassent pas 80 m d'épaisseur.

1.2.2.2.6. Maestrichtien

1.2.2.2.6.1. Maestrichtien inférieur à dominante marneuse

Ce sont des formations atteignant une épaisseur estimable à 40 m. Représenté par des alternances de marnes de teint gris-beige à débris de mollusque et de calcaires massifs, beige en bancs décimétriques à débris de lamellibranches, d'échinides et de brachiopodes, inocérames régularis.

1.2.2.2.6.2. Maestrichtien supérieur (calcaire a Inocerames)

Ce sont des formations calcaireuse, massives blanchâtres, granuleuses, en bancs décimétriques à centimétriques avec une stratification oblique auprès du Djebel Knif, la cassure des calcaires est un peu plus sombre de teinte grise, bleue, au contraire au Djebel Bardo et Djebel Boutoukhma, les formations d'une centaine de mètres, ce sont des bancs de calcaires marneux métriques à plurimétriques avec une cassure blanchâtre passé noduleuses et à rognons de silex.

Ces formations contiennent des fragments d'Inocérames. L'épaisseur de ces formations ne dépasse pas les 95 m.

1.2.3. Éocène

1.2.3.1. Montien

Formation d'une épaisseur de 70 m, présentant des marnes gris verdâtre en concordance sur le maestrichtien.

1.2.3.2. Yprésien et Thanetien

Ces formations sont d'une épaisseur approximative à 85 m, présentent une séquence marneuse gris beige à la base et une séquence carbonatée au sommet. Les roches sont bitumineuses, elles contiennent des silex, des petits nodules phosphatés.

1.2.4. Miocène

Du point de vue lithologique, la série miocène est composée de miocène inférieur et miocène supérieur.

1.2.4.1. Miocène inférieur

1.2.4.1.1. Aquitano-Burdigalien

C'est le terme basal correspond à une formation continentale rouge, formée de conglomérats, d'argiles rouges, de poudingues à gros éléments arrondis de calcaires, d'argiles silteuses rouges et de rares marnes. Épais de 60m à 80m environ.

1.2.4.1.2. Langhien-Serravalien

C'est le terme moyen, correspond à une formation marine à niveaux biomicritiques et gréseux. Cet ensemble complexe et discordant est visible au sud de djebel Knif et à l'Est de Djebel Chettaâ ou il repose directement en transgression sur le Trias et surtout au Nord du Kef Tifkressa et du Ras Serdoun. Ce paquet est de 36m d'épaisseur en moyenne.

1.2.4.2. Miocène supérieur

1.2.4.2.1. Tortonien gréseux blanc

Cette formation est composée de grés blancs grossiers en bancs plurimétriques, à abondance de dragée de quartz (diamètre allant jusqu'à 2cm).

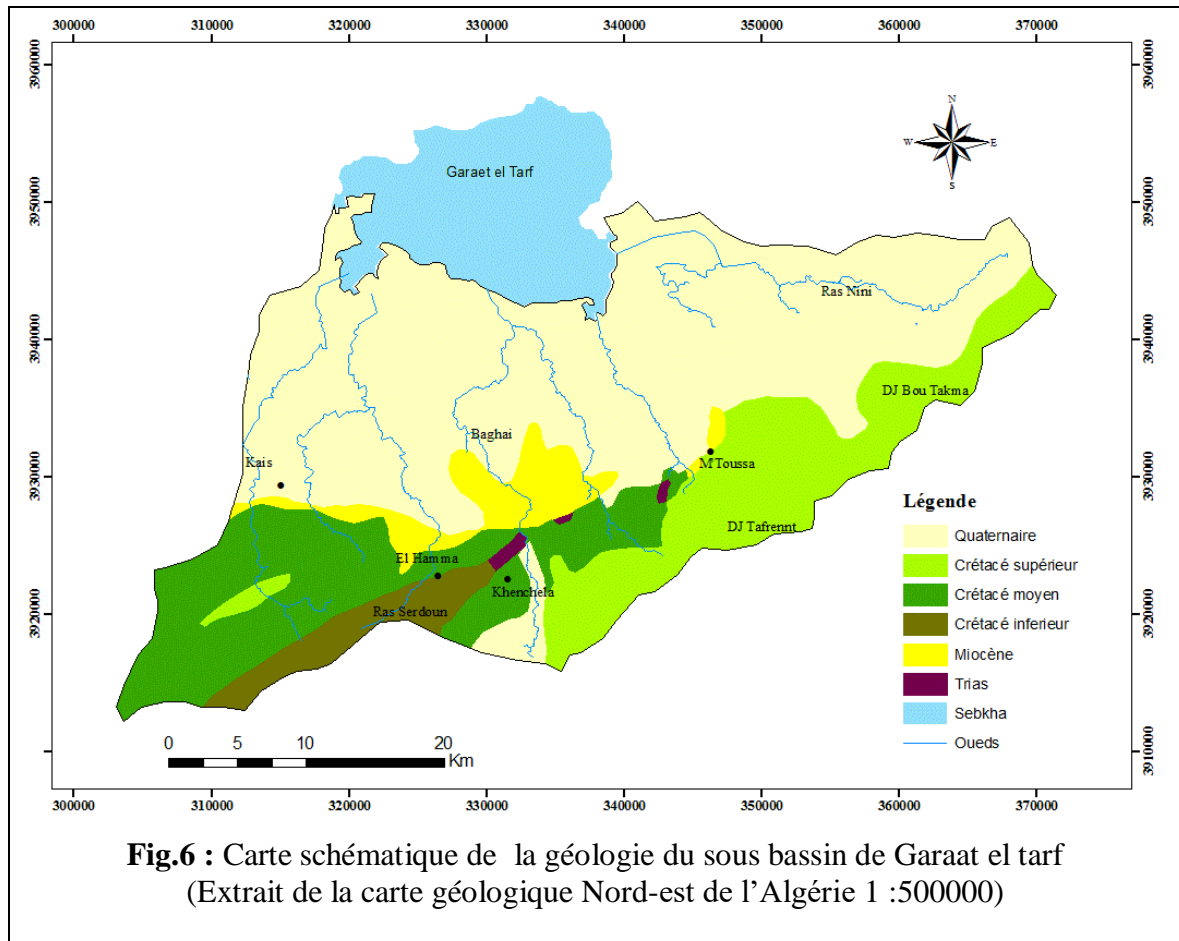
1.2.4.2.2. Tortonien supérieur continental

Argiles silteuses beiges et rouges, grés, cette formation affleure aux alentours de Baghai.

1.2.5. Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont la couverture blanche dans la région d'étude (Fig. 6). Ces formations sont d'origine continentale et occupent d'importantes surfaces. Ils se sont développés essentiellement dans les parties bordant les massifs montagneux. On y rencontre des éboulis à blocs, éboulements et glacis polygéniques. Dans les zones basses telles les vallées et les sebkhas. Si l'épaisseur générale ne dépasse pas la moyenne des quelques mètres, le quaternaire est connu sous différents aspects en fonction du lieu de gisement de la formation (Villa, 1977).

- Formations dunaires : elles sont localisées à la périphérie des chotts. Elles correspondent à l'agrégation de poussières, de sables fins et de petits débris. Elles sont généralement ravinées ou fixées par une maigre végétation herbacée.
- Sols salés : se rencontrent aux alentours des chotts sous forme de vastes espaces plats surélevés exceptionnellement inondés. S'y développent des croûtes de sels épisodiques. Ce sont d'anciens sols hydro morphes salés.
- Alluvions récentes ce sont des limons, des graviers et des galets roulés constituant les alluvions actuelles (lits majeurs des oueds) ou récentes.
- Sebkha (Garaet El Tarf).



II. Hydrogéologie

1. Introduction

L'étude hydrogéologique est prépondérante à la compréhension des processus d'alimentation des aquifères d'une part, et la reconnaissance des sens d'écoulement d'autre part. Plusieurs études sont réalisées dans le bassin de Garaat El Tarf parmi lesquelles l'étude géophysique élaborée par la société française C.G.G (1970) (Compagnie Générale de Géophysique), sur les deux principales plaines dont dispose le sous bassin : la plaine de R'mila (600 sondages électriques) et de F'kirina (525 sondages électriques). Plusieurs piézomètres et forages ont été réalisés par l'ANRH afin de mieux connaître la lithologie et la géométrie des différents dépôts à intérêt hydrogéologique. L'identification du système aquifère nous aide à mieux comprendre la vulnérabilité de la nappe aux différents polluants.

2. Identification du système aquifère

L'identification du système aquifère nécessite l'établissement des coupes hydrogéologiques afin de représenter toutes les couches traversées par les forages (Fig.7), et de connaître la géométrie de l'aquifère (Boulabaize, 2017). Les coupes hydrogéologiques sont basées sur la colonne litho stratigraphique des forages existant dans la zone d'étude.

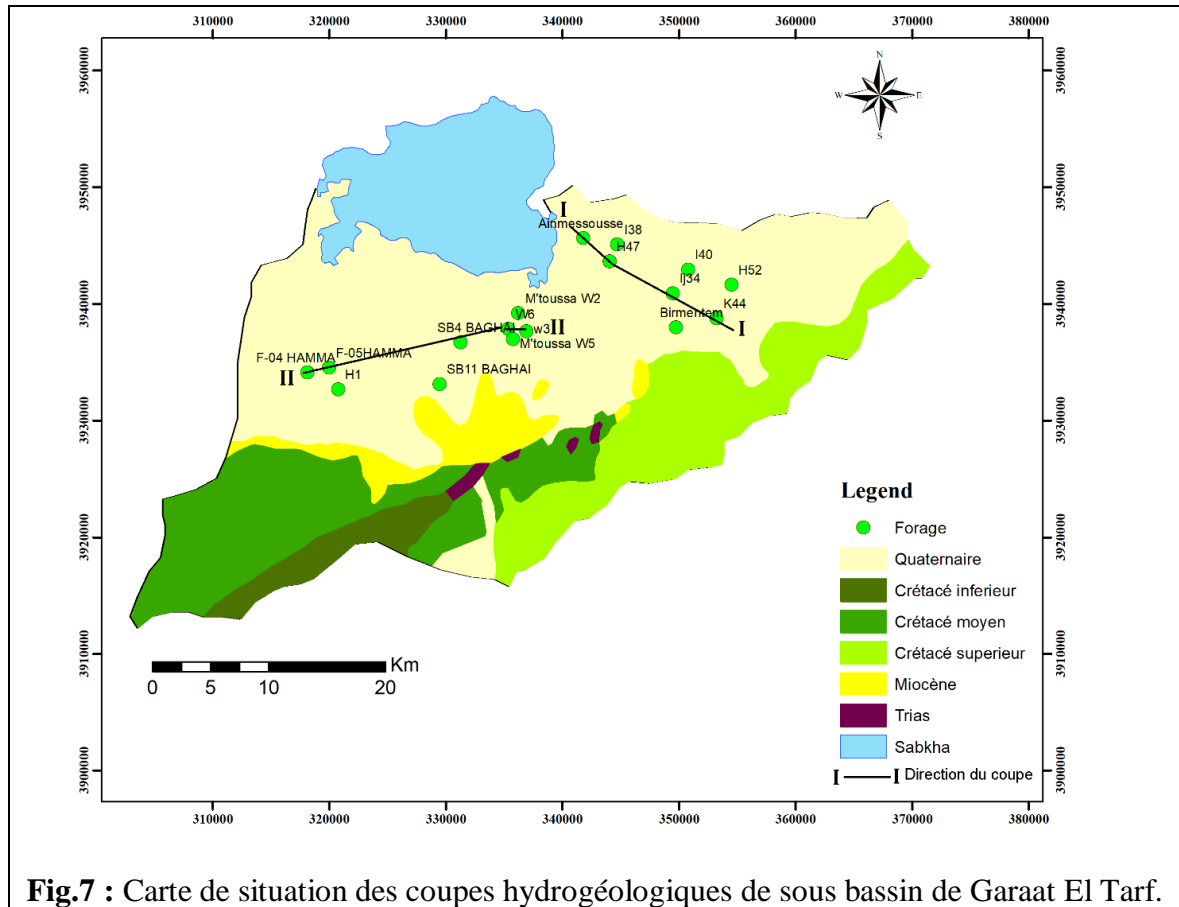
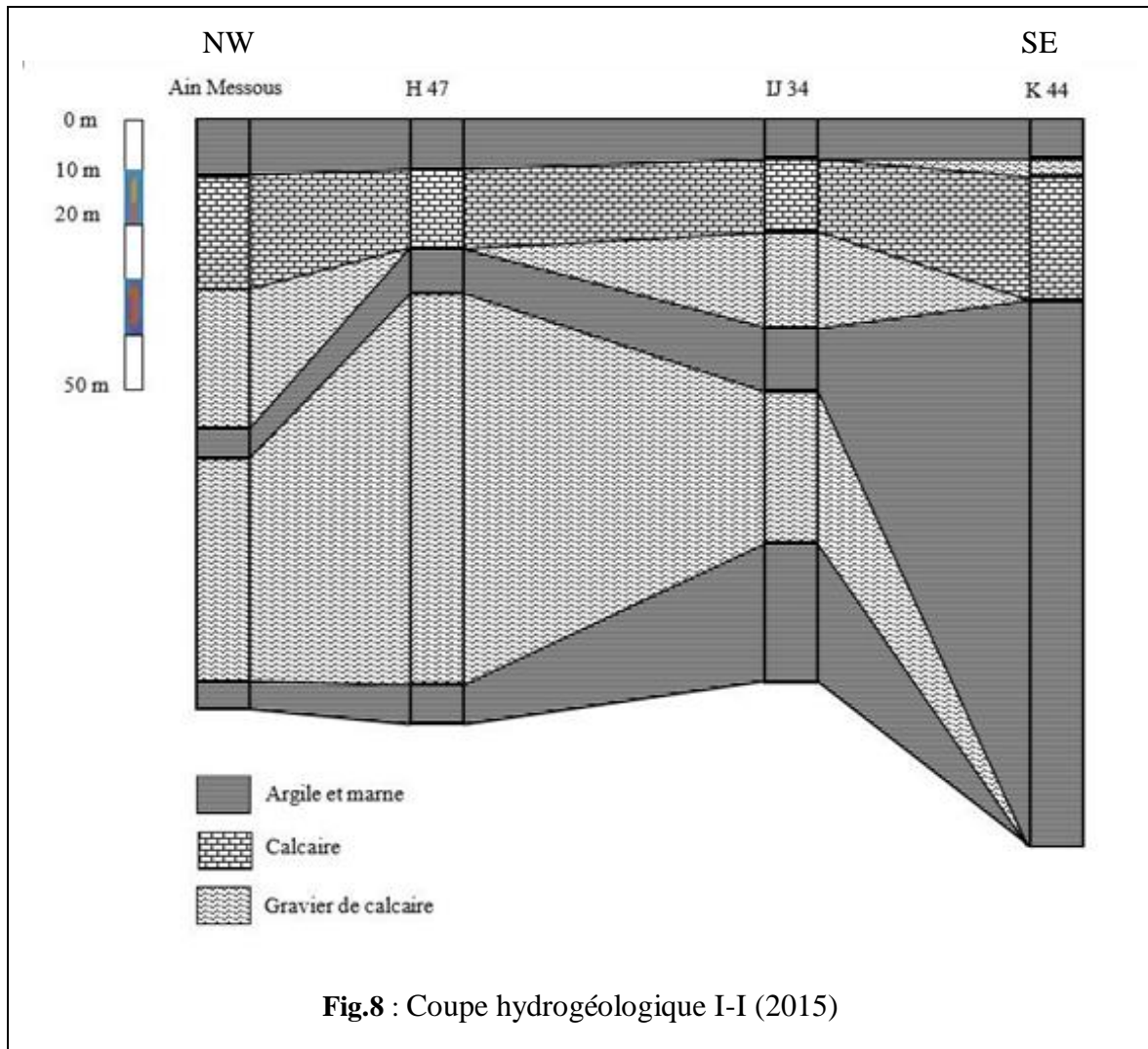


Fig.7 : Carte de situation des coupes hydrogéologiques de sous bassin de Garaat El Tarf.

2.1. Coupe hydrogéologique I-I

Cette coupe est orientée NW-SE traversant les forages Ain Messous, H47, IJ34 et K44. Cette coupe (Fig.8) montre que le système aquifère est composé de deux nappes superposées séparées par une couche d'argile. La nappe superficielle est composée essentiellement par des calcaires d'épaisseur d'environ 20 m surmonté par un toit argileux ce qui lui donne le caractère captif.

La nappe profonde est formée par des graviers de calcaire d'épaisseur moyenne de 50 m qui diminue en allant vers le sud est au profit des argiles. Le substratum de la nappe est essentiellement limoneux argileux.



2.2. Coupe hydrogéologique II-II

Cette coupe est orientée ENE-WSW traversant les forages F04, F05, SB4, W6, et W3 (Fig.9).

L'aquifère traversée par les forages montre l'existence de deux nappes superposées composées par une alternance des argiles et de calcaire. La nappe superficielle est captive d'une épaisseur varie entre 10 et 100 m. la nappe profonde est composée de gravier, de calcaire et d'une épaisseur qui varie entre 10 à 30 m. Le substratum de la nappe est essentiellement limoneux argileux.

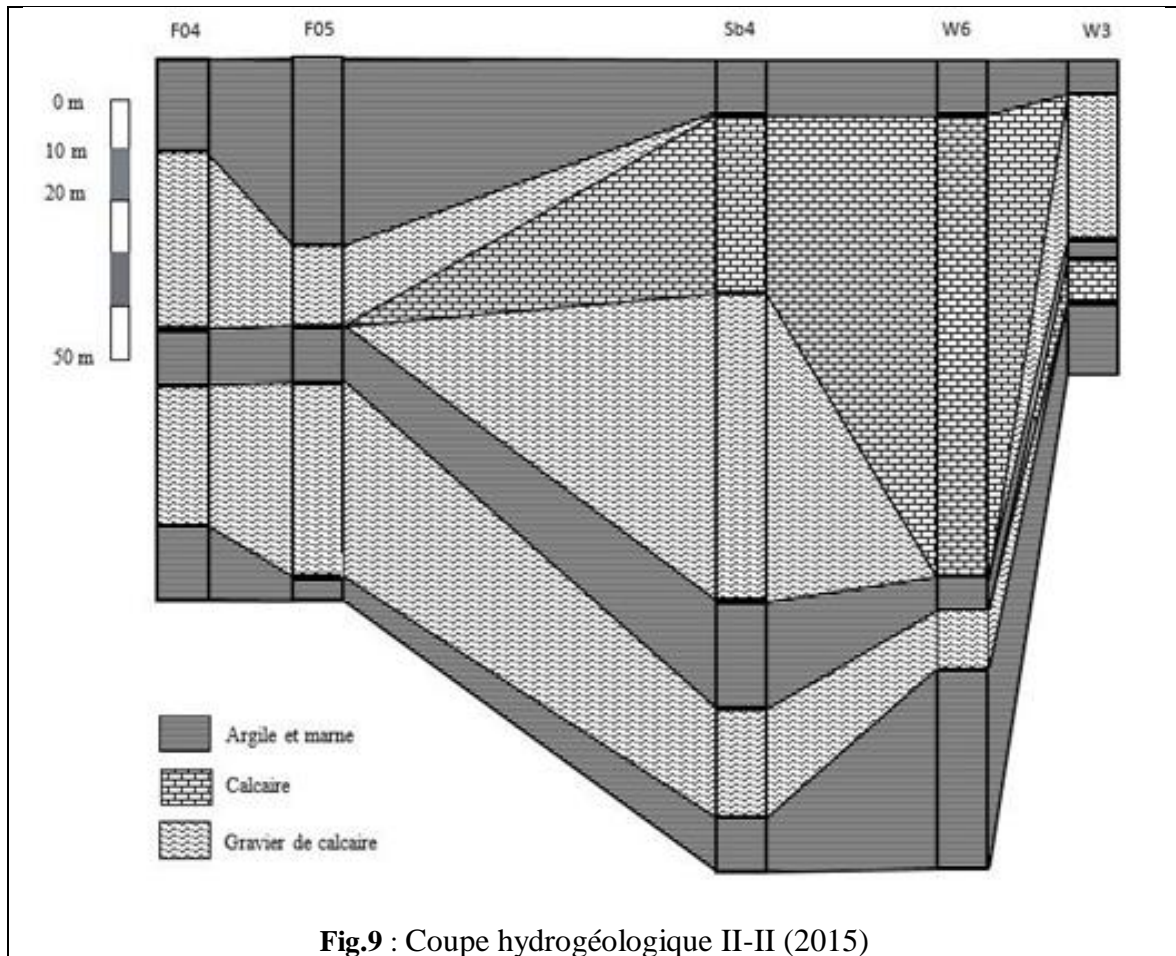



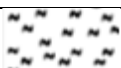
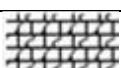
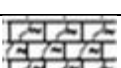
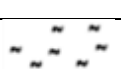
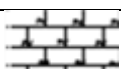
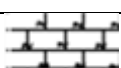
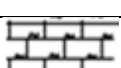


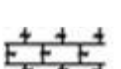
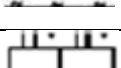
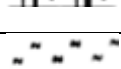


Fig.9 : Coupe hydrogéologique II-II (2015)

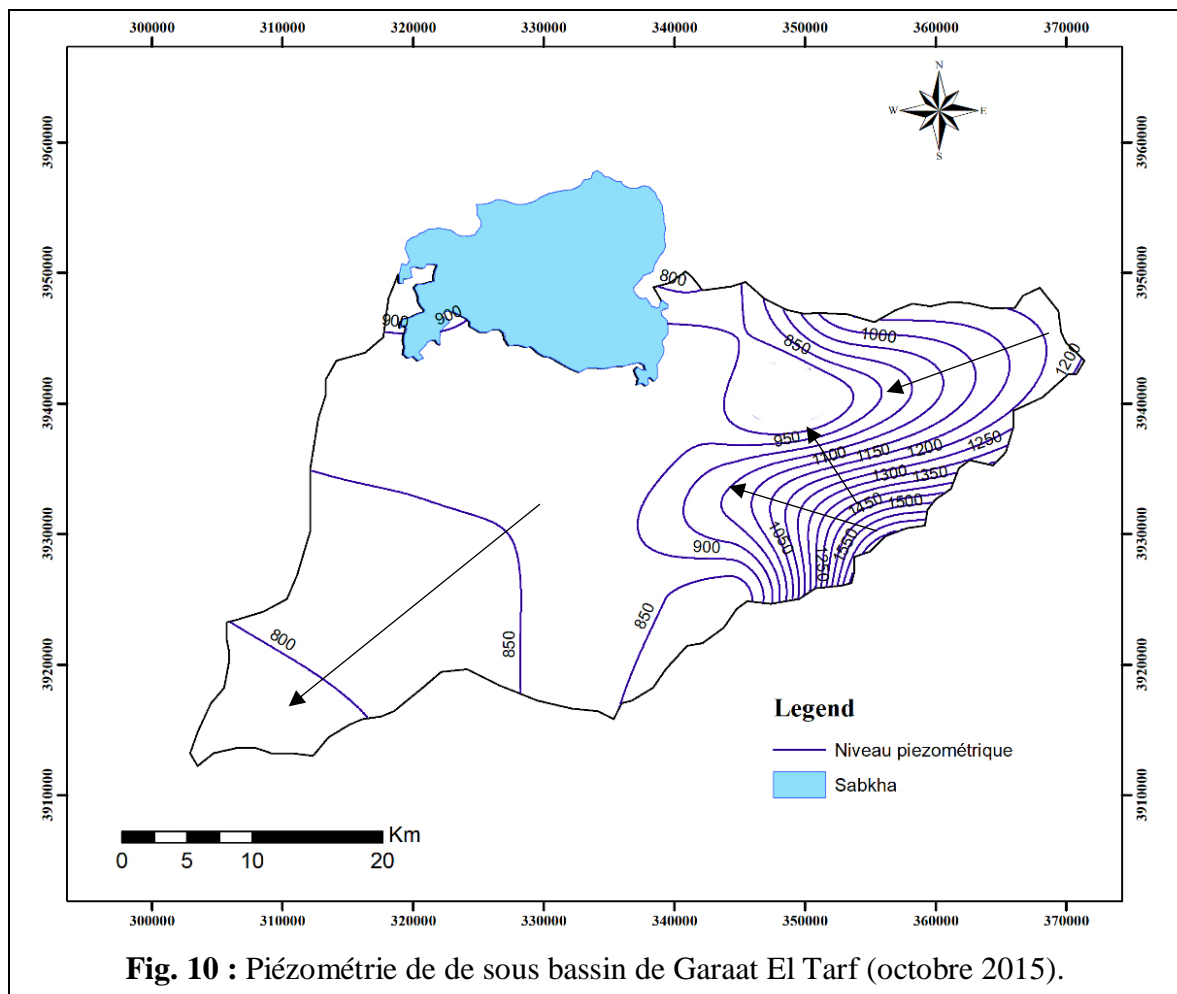
L'interprétation des données de forages nous a permis de connaître l'épaisseur et la nature de remplissage du système aquifère. Dans l'ensemble ce système aquifère est composé par la superposition de deux nappes. La nappe superficielle est captive d'une épaisseur de 20 m en moyenne formée par des calcaires de crétacé. La nappe profonde d'une épaisseur allant de 5 jusqu'au 100 m aussi formée par des calcaires et gravier de calcaires de crétacé. Les deux nappes sont séparées par une couche d'argile qui lui donne le caractère artésienne ce qui est observé au niveau de forage (H47).

Tableau.8 : Résumé de la colonne lithostratigraphique du sous-bassin versant (Dali, 2009)

Ere	Système et sous système	Etage et sous étage	Lithologie	Epaisseur (m)	Lithologie	Hydrogéologie	Type de réservoir	
Quaternaire	Quaternaire	récent	Limons et graviers	2-30		Perméable	Réservoir du mio-quaternaire	
		ancien	Galets, graviers et sable	20-50		Perméable		
Tertiaire	Miocène	sup	Tortonien sup	150		Perméable	Réservoir du mio-quaternaire	
		inf	Langhien serravalien	63		Perméable		
Secondaire	Crétacé	sup	Maestrichtien sup	150		Semi-perméable	Substratum	
			Campanien	Marne et calcaire	92			Semi-perméable
			Santonien	Marne	250			Imperméable
			Coniacien	Marne et calcaire	150			Semi-perméable
			Turonien Moy et sup	Marne et calcaire	50			Imperméable
			Turonien basal	Marno – calcaire à cassure	200			Imperméable
		moy	Cénomaniens inf	Marne	500-600		Imperméable	Réservoir de l'Albien
			Albien	Marne et calcaire	80		Semi-perméable	
		inf	Aptien sup	Calcaire à orbitoline	50		Imperméable	Substratum
			Aptien inf	Marne	100		Imperméable	
		Trias	Dolomie, gypse, marne	30		Imperméable		

3. Piézométrie

La carte piézométrique a pour but de représenter la configuration de l'aquifère et de schématiser la fonction conduite du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère, elle traduit la morphologie de la surface d'eau de la nappe à une époque déterminée. La carte piézométrique réalisée (Fig.10) est basée sur les données des forages (niveau statique).



La carte piézométrique obtenue a permis de déterminer le sens d'écoulement, les principales zones de circulation des eaux souterraines, et l'alimentation de la nappe. La figure (10) décrit deux secteurs principaux :

- Secteur Est : le sens de l'écoulement est de direction NE-SE et SE-NW. Les courbes hydro-isohypses sont relativement rapprochées ce qui traduit par un fort écoulement vers Sebka.
- Secteur Ouest : le sens d'écoulement est de direction NE-SE, les courbes hydro isohypses sont espacées ce qui est traduit par le faible écoulement.

III. Conclusion

La lithologie est singulièrement marquée par d'importants affleurements triasiques, des formations calcaires résultant du Quaternaire et du Mæstrichtien supérieur et de conglomérat du Miocène. Le sol, constitué par des limons et des argiles, est déstabilisé par la présence de sel qui disperse ses éléments de sorte qu'il perd totalement sa structure initiale pour donner des structures à faible perméabilité.

La sebkha n'est recouverte qu'épisodiquement, après des périodes pluvieuses, par une faible tranche d'eau (quelques mètres au maximum dans les secteurs les plus déprimés) qui subsiste quelques semaines ou quelques mois. Dès l'assèchement de la cuvette, les sédiments fraîchement déposés sont emportés par le vent (phénomène de déflation) ou recouverts par une mince pellicule saline résultant de l'évaporation des eaux superficielles ou souterraine

La zone d'étude est occupée en surface par un matériau alluvionnaire hétérogène formé d'argile, gravier, et sable.

Le substratum constituant l'assise imperméable, est représenté par des calcaires des Maestrichtien supérieur. Mais il existe une zone où ces calcaires sont érodés et remplacés par des marnes de Maestrichtien inférieur.

La nappe se rapproche de la surface au fur et à mesure que l'on se rapproche du Sebkh.

L'analyse de la carte piézométrique montre que la direction principale de l'écoulement se fait globalement des affleurements calcaires vers la Sebkh (Garaet Et Tarf) selon trois directions NE-SE et SE-NW et NE-SE. Toutes les eaux de la nappe drainent vers la Sebkh qui constitue un exutoire naturel.

CHAPITRE III

Cadre Hydroclimatologique

1. Introduction

L'étude hydroclimatique est basée sur les données des précipitations, des températures, des vents, de l'humidité.... Elle permet de définir le bilan hydrologique en se basant sur l'évapotranspiration réelle, le ruissellement et l'infiltration qui participe à l'alimentation et au renouvellement des aquifères.

Pour cette étude, les coordonnées des stations concernées sont présentées dans le tableau(9).

Tableau.9 : Nomenclature des stations.

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
El-Hamma	35°27'59''N	7°05'45''E	981	1995-2015
Oum-EL-Bouaghi	35°51'35''N	7°08'01''E	887	1995-2015

2. Analyse des paramètres climatologiques

2.1. Précipitation

La précipitation est la totalité de la lame d'eau quantifiée par la pluviométrie. Elle est d'origines diverses : pluie, neige, grêle...etc

Les données pluviométriques (Tableau.10) montrent que la moyenne annuelle est environ de 483,20mm (station de El-Hamma), le mois le moins pluvieux est Juillet avec 16,10mm cependant, les quantités les plus élevées sont observées au mois de Septembre avec 59,5mm. Alors que la moyenne annuelle est de 412,80mm (station d'Oum el Bouaghi) avec des petites quantités au mois de juillet (9,4mm) et le mois le plus pluvieux est Mai (52,2mm) (Fig.11).

Tableau.10 : Pluviométrie mensuelle enregistré (1995-2015).

P (mm)	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Jui	Juit	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Station El- Hamma	47,30	32,30	44,50	45,30	57,30	31,30	16,10	36,90	59,50	36,30	37,90	38,50
Station Oum- EL- Bouaghi	44,9	27,5	36,1	39,8	52,2	24,3	9,4	25,3	44,1	25,9	36,5	46,8

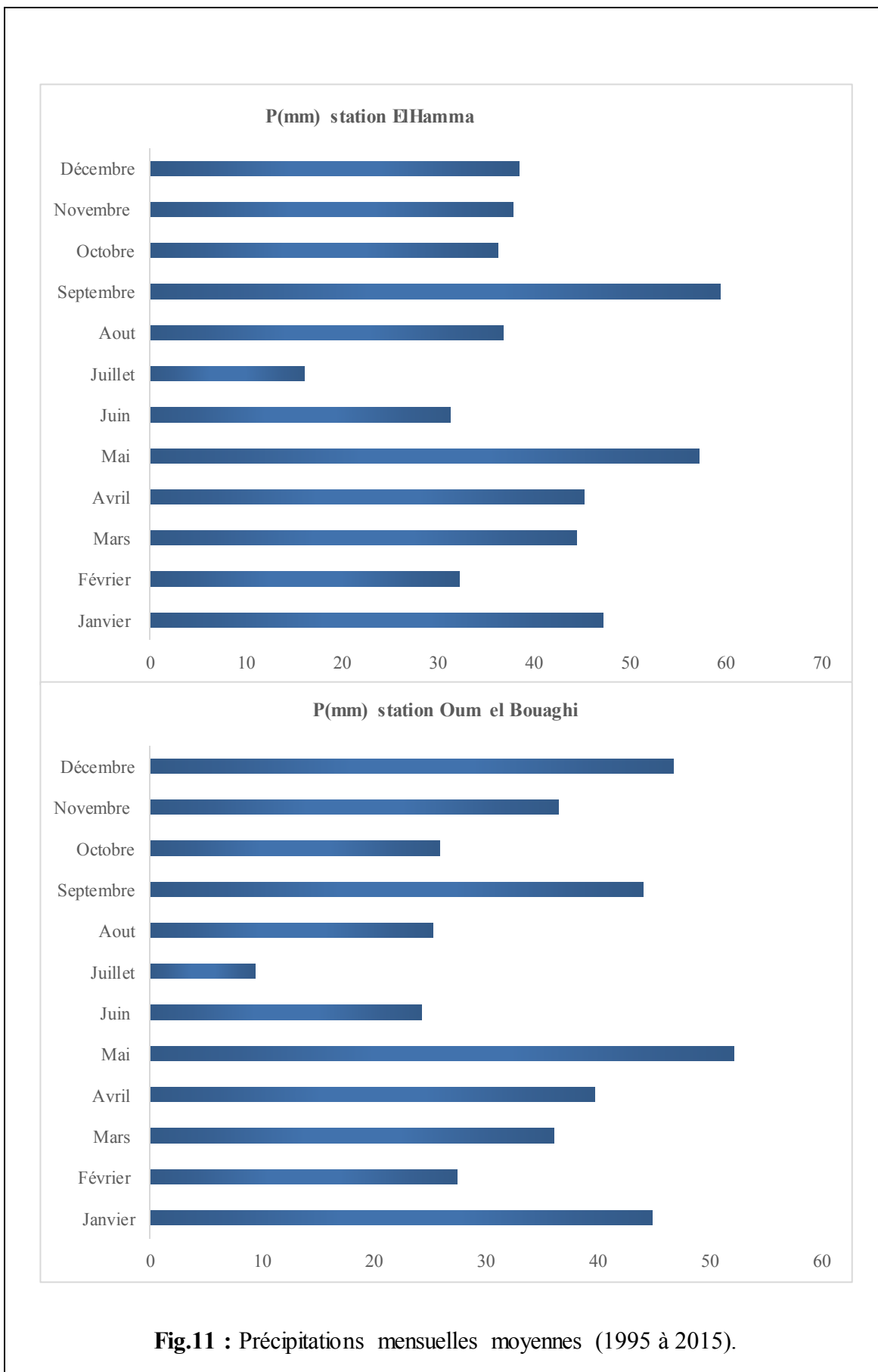


Fig.11 : Précipitations mensuelles moyennes (1995 à 2015).

La figure (12) caractérise l'évolution de la pluviométrie annuelle de la station d'Oum el Bouaghi en mm et montre des valeurs très fluctuantes, un maximum de 665mm a été enregistré en 2004 tandis que le minimum de la série d'observations descend jusqu'à 239mm en 2005. La station d'El-Hamma représente les mêmes fluctuations avec un quart moins important par rapport à la moyenne avec un minimum de 311,9 mm observé durant l'année 2000 et un maximum de 626,3mm enregistré en 2011. Ces variations entre les deux stations sont dues à leur localisation géographique (altitude) et leur exposition.

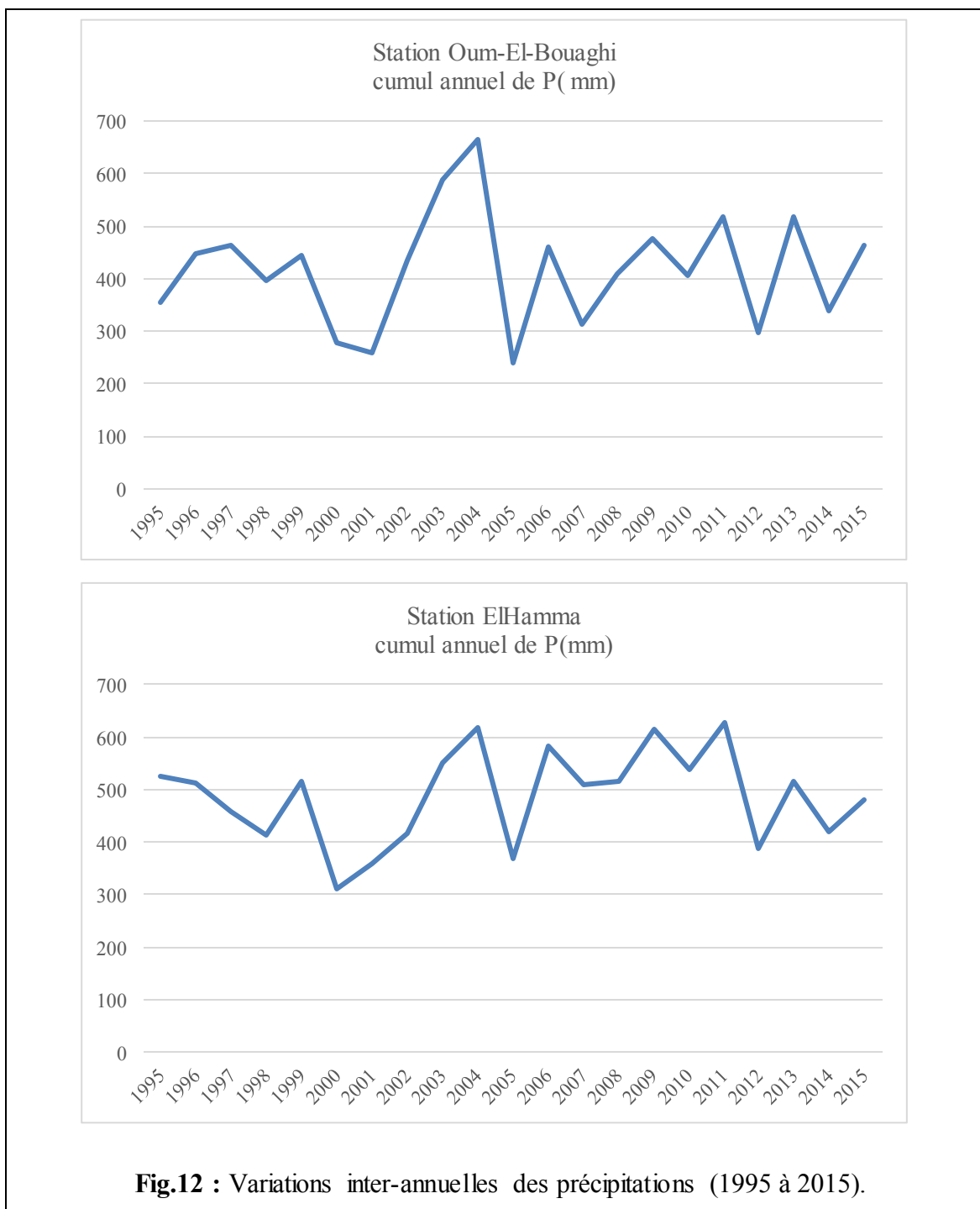


Fig.12 : Variations inter-annuelles des précipitations (1995 à 2015).

2.2. Température de l'air

La température de l'air est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique. Elle conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration.

- Le tableau (11) montre que la température moyenne de l'été est de 26,82C° et celle de l'hiver est de 6,61C°. Les températures atteignent le maximum au mois de Juillet avec 34,77C° et le minimum au mois de janvier avec 2,01C° ;

- Le tableau(12) montre que la température moyenne de l'été est de 26,19C° et celle de l'hiver est de 6,56C°.Les températures atteignent le maximum au mois de Juillet avec 34,71C° et le minimum au mois de janvier avec 1,45C° ;

- Les écarts de température (amplitude) augmentent de l'Hiver (Décembre à Février) à l'été (Juin à Aout) ;

- En général, la température de l'air connaît de grandes fluctuations d'une année à une autre et d'un mois à un autre. La moyenne annuelle de températures moyenne se situe aux alentours de 15°C (Fig.13).

Tableau.11 : Températures mensuelles enregistrées à la station d'El-Hamma (1995-2015).

T°C	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Jui	Juit	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T min	2,01	2,26	4,79	7,59	11,46	15,82	18,87	18,50	15,37	11,24	6,44	3,10
T max	11,20	12,01	15,90	19,73	25,01	30,59	34,77	32,99	27,59	22,28	16,00	12,03
T moy	6,61	7,14	10,35	13,66	18,24	23,21	26,82	25,75	21,48	16,76	11,22	7,57

Tableau.12 : Températures mensuelles enregistrées à la station d'Oum El-Bouaghi (1995-2015).

T°C	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Jui	Juit	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T min	1,45	1,72	3,97	6,66	10,78	14,99	17,67	17,77	14,59	10,8	5,48	2,78
T max	11,67	12,94	16,1	19,3	24,86	30,89	34,71	33,93	28,6	23,7	16,81	11,65
T moy	6,56	7,33	10,03	12,98	17,82	22,94	26,19	25,85	21,59	17,25	11,14	7,215

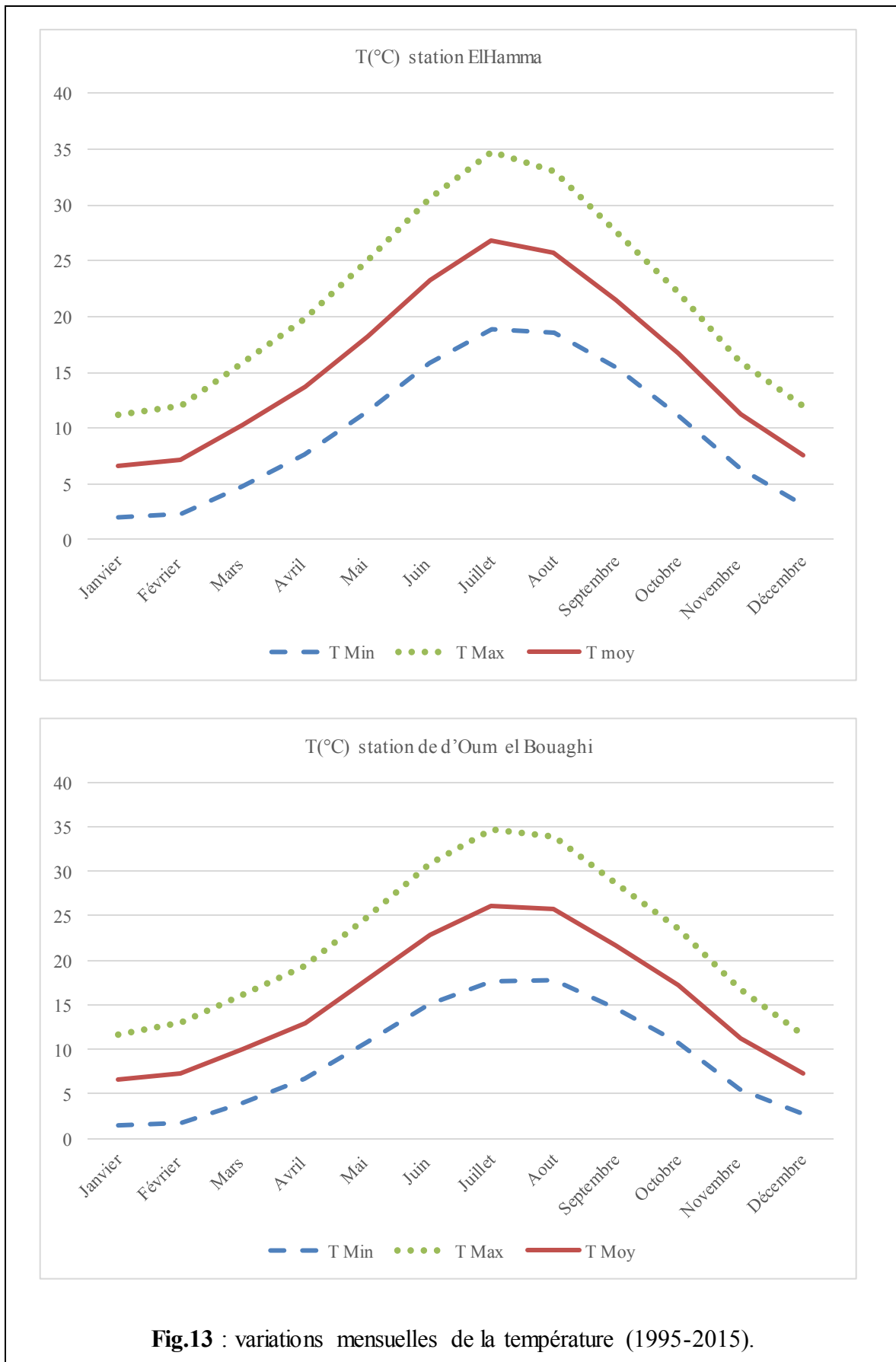


Fig.13 : variations mensuelles de la température (1995-2015).

2.3. L'humidité relative de l'Air

Le rapport de la tension de la vapeur d'eau (e), réellement observé à un instant, à la tension maximum de la vapeur d'eau (ew), correspondant à la température de l'air et à la pression atmosphérique au même moment, représente l'humidité relative (U) ou degré hygrométrique de l'air (Dib,2018).

L'humidité relative compare donc la quantité d'eau présente dans l'air à la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air à une température donnée. D'une façon générale, on considère qu'un air est sec quand son humidité relative est inférieure à 35% et qu'il est humide quand celle-ci est supérieure à 70%.

Tableau .13 : Valeurs de l'humidité relative moyenne mensuelle à la station d'El-Hamma (1995-2015).

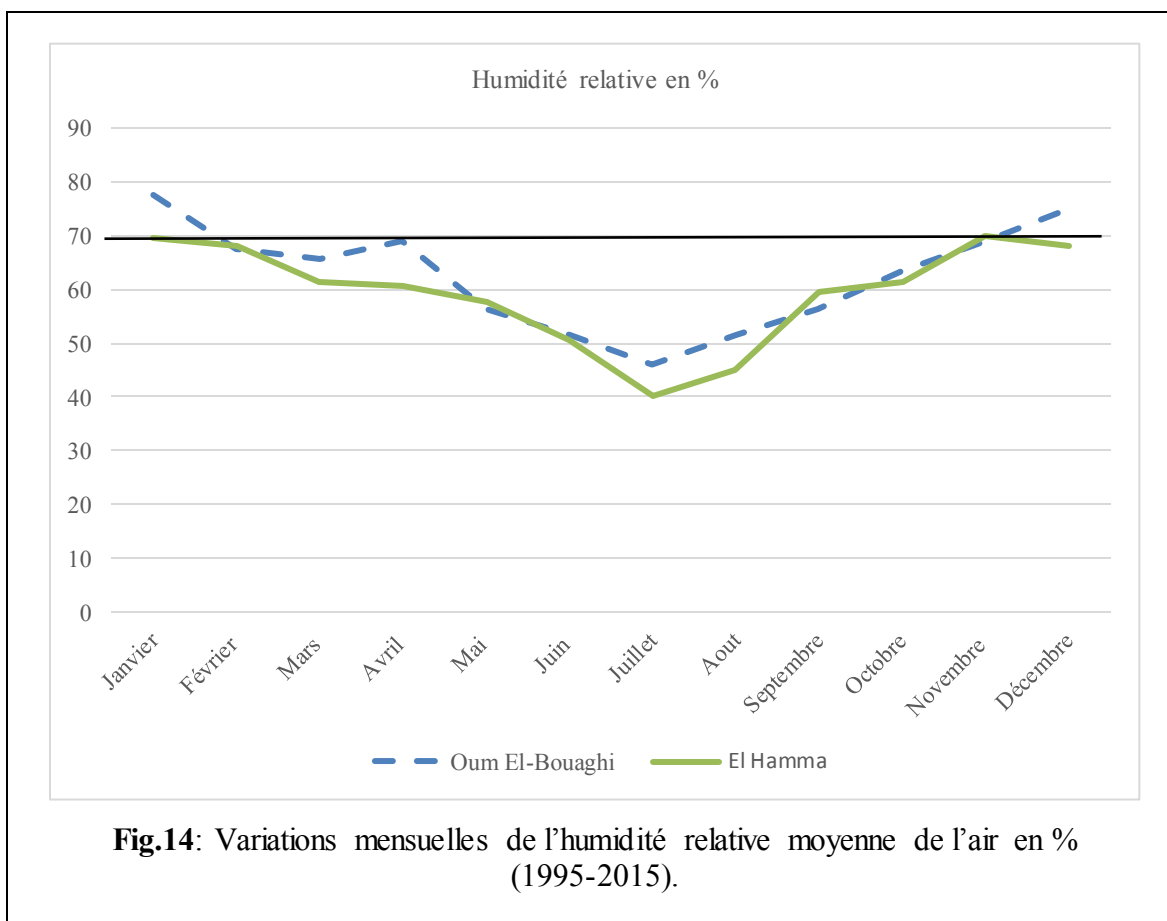
Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Jui	Juit	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Min	63	60	50	50	44	38	30	34	50	49	58	57
Max	76	76	73	71	71	63	50	56	69	74	82	79
Moy	70	68	62	61	58	51	40	45	60	62	70	68

Tableau .14 : Valeurs de l'humidité relative moyenne mensuelle à la station d'Oum El-Bouaghi (1995-2015).

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Jui	Juit	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Min	69	50	50	53	40	37	33	38	36	48	55	65
Max	86	85	81	85	73	66	59	65	77	79	83	85
Moy	78	68	66	69	57	52	46	52	57	64	69	75

Le tableau (13) montre que les humidités relatives moyennes mensuelles oscillent entre 40% (Juillet) et 70% (Janvier, Novembre).

Le tableau (14) montre que les moyennes d'humidités relatives mensuelles varient entre 46% (juillet) et 78% (Janvier).



L'humidité relative est généralement supérieure à 30 % et varie relativement beaucoup au cours de l'année. Cependant, on enregistre des valeurs plus élevées en moyenne dans la partie Nord du sous bassin par rapport à la partie Sud. Cela a été constaté après le calcul de la moyenne interannuelle (62% à Oum el Bouaghi et 59% à El-Hamma) sur la même période des deux stations (1995-2015). En général, Les variations mensuelles de l'humidité relative (Fig.14) est restée déficitaire (inférieure à 70 %).

3. Les indices climatiques et caractérisation du climat

En raison de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et de la nécessité de description synthétique, de classement et de comparaison des types de climat et de végétation à travers le monde, de nombreux auteurs ont proposé diverses formules, indices et expressions graphiques, tenant compte d'un nombre plus ou moins élevé de facteurs (Lebourgeois et al , 2010).

Ils ont été tout d'abord utilisés pour classer et cartographier les climats selon leur aridité par les hydrologues et les géomorphologues (Köppen, Lang, De Martonne, Rubner, Gaussen et Bagnouls, Walter et Lieth, Moral...) puis par les botanistes et écologues (Emberger, Thornthwaite...) (Dib.2018).

3.1. Indice d'aridité de De Martonne (IDM)

Du fait de sa simplicité, cet indice a été très largement utilisé par les géographes. Il a des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et des valeurs d'autant plus faibles que le climat est plus sec. De Martonne (1926) a ainsi proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice qui sont données dans le tableau (15) (Guyot, 1999). Il a été ajouté 10 aux moyennes thermométriques pour éviter les valeurs négatives de l'indice.

La formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles :

$$A = P / T + 10$$

Tableau.15 : Indice d'aridité de De Martonne

Valeur de l'indice	Type de climat
$A < 5$	Hyper aride
$5 < A < 10$	Aride
$10 < A < 20$	Semi-aride.
$20 < A < 30$	Semi-humide
$A > 30$	Humide (écoulement abondant).

Station de El-Hamma, la moyenne des précipitations interannuelles (P) est : 483,20 mm, la température annuelle moyenne (T) est : 16°C soit $A = 18,58$.

Station Oum El-Bouaghi, la moyenne des précipitations interannuelles (P) est : 412,20 mm, la température annuelle moyenne (T) est : 15,58°C soit $A = 16,14$.

Le climat du sous bassin est du type semi-aride avec une tendance steppique.

3.2. Indice Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

La combinaison de deux facteurs, température et précipitations, est très importante dans la mesure où elle permet de mettre en évidence les mois secs. C'est d'ailleurs un des paramètres marquant le climat des zones semi-arides.

Un mois sec se définit, selon Bagnouls et Gaussen (1952), comme celui ayant un total des précipitations, en millimètres, égal ou inférieur au double de la température moyenne en °C ($P \leq 2T$). Une saison sèche est celle formée de plusieurs mois secs consécutifs.



Fig .15 : Diagrammes Ombrothermiques (1995-2015)

Les diagrammes ombrothermiques des deux stations (Fig.15) selon les données de précipitations et de températures de la période 1995-2015 mettent clairement en évidence la période sèche qui s'étale sur les mois de Juin- Juillet et Aout. Le mois d'octobre est ainsi considéré comme mois sec au niveau de la station d'Oum el Bouaghi ce qui élargit sa période sèche.

Ces représentations ne sont que des moyennes et masquent totalement les variations Interannuelles qui peuvent être localement fortes.

3.3. Quotient pluviothermique d'Emberger

Il est destiné à caractériser le climat méditerranéen et ses nuances. En effet, Emberger (1955) a remarqué que dans les régions méditerranéennes, l'amplitude thermique annuelle est un facteur important de la répartition de la végétation (Guyot, 1999). On a utilisé la forme simplifiée de Stewart dans le calcul du quotient.

$$Q_2 = 3.43 * P / (M - m)$$

M : moyenne des maximas du mois le plus chaud en degrés Celsius

m : moyenne des minimas du mois le plus froid en degrés Celsius

P : cumul pluviométrique annuel, en millimètres

Un climat méditerranéen est d'autant moins sec que le quotient est grand. Il est également très important de noter que, à quotient équivalent, celui-ci a une valeur écologique différente selon les valeurs des températures minimales qui y interviennent. La valeur m est une différentielle très importante. Elle est un seuil biologique. D'une manière générale, elle exprime assez bien le degré et la durée de la période critique des gelées, car plus m'est bas, plus celles-ci sont sévères.

L'interprétation du quotient nécessite l'emploi d'un abaque qui combine Q_2 avec m ce qui permettra de placer une station dans l'une des classes de climat méditerranéen(Fig.16).

On peut dire que les différentes méthodes utilisées montrent que la région d'étude est caractérisée par une période sèche qui débute du mois de Mai et s'étale jusqu'au mois de octobre ce qui lui donne un climat semi-aride et le met sous l'influence d'un régime méditerranéen en hiver et saharien en été.

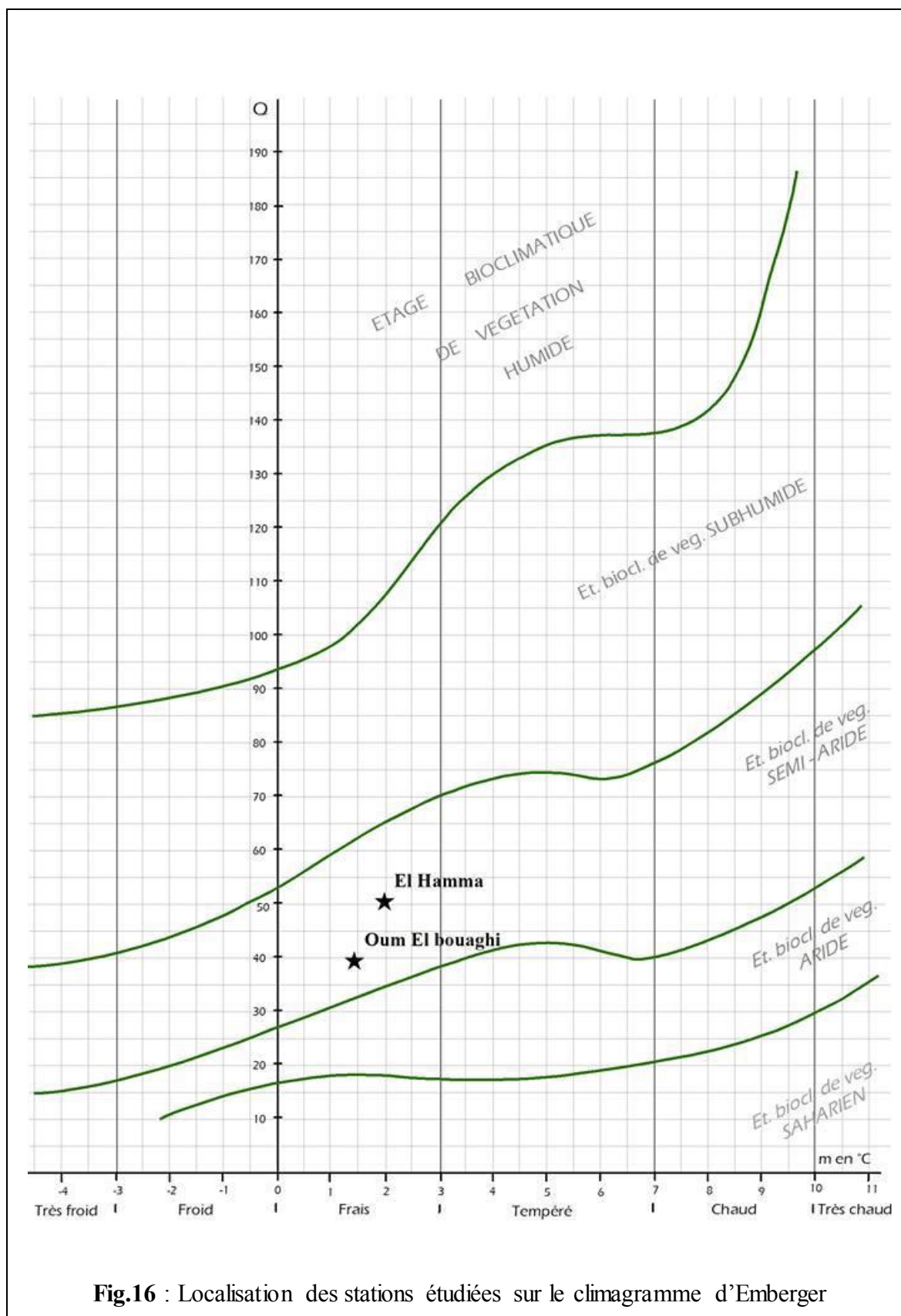


Fig.16 : Localisation des stations étudiées sur le climagramme d'Emberger

4. Estimation de l'évapotranspiration et calcul du bilan hydrique

4.1. Evapotranspiration :

Le terme le plus important du bilan hydrologique, après les précipitations, est l'évapotranspiration. L'évapotranspiration en milieu semi-aride représente une composante majoritaire du cycle hydrologique (Hernandez et al, 2000). (Pilgrim et al. 1988, *in* El Tayeb El Saddig, 1993), rapportent que l'évapotranspiration recycle 80% des précipitations en milieu semi-aride et 95% en région aride. L'évaporation du sol nu a souvent un poids supérieur à la transpiration des plantes du fait de la large portion de sol nu et d'une couverture végétale souvent discontinue et peu abondante (Houha, 2007). L'évapotranspiration joue donc un rôle majeur et ne peut pas être négligée sous ce type de climat. Ce paramètre climatique peut être mesuré directement sur le terrain à l'aide d'appareils (évaporomètre, bacs d'évaporation) ou calculé par des formules empiriques (Turc, Thornthwait, Coutagne...).

La méthode la plus couramment utilisée pour évaluer l'évapotranspiration est celle de Thornthwaite (1948) pour l'ETP.

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

T : température moyenne mensuelle en °C

I : indice thermique annuel, somme des 12 indices mensuels

$$I = \sum I_j = (T_j/5) \cdot 1.514$$

a : fonction complexe de l'indice I

$$a : 0,018 (I) + 0,492$$

F : terme correctif fonction de la durée théorique de l'insolation variant avec la latitude et la saison

La partie colorée indique les périodes de déficits d'évapotranspiration.

Le cycle saisonnier est le même à Oum El Bouaghi et El Hamma. En saison sèche, l'air sec et les températures élevées accélèrent l'évapotranspiration. Au cours de la saison pluvieuse les données d'évapotranspiration diminuent considérablement pour atteindre leur niveau le plus bas (39 mm en moyenne) au moment de l'hiver où l'ennuage-ment et les hauteurs de pluie atteignent leur maximum (Fig.17).

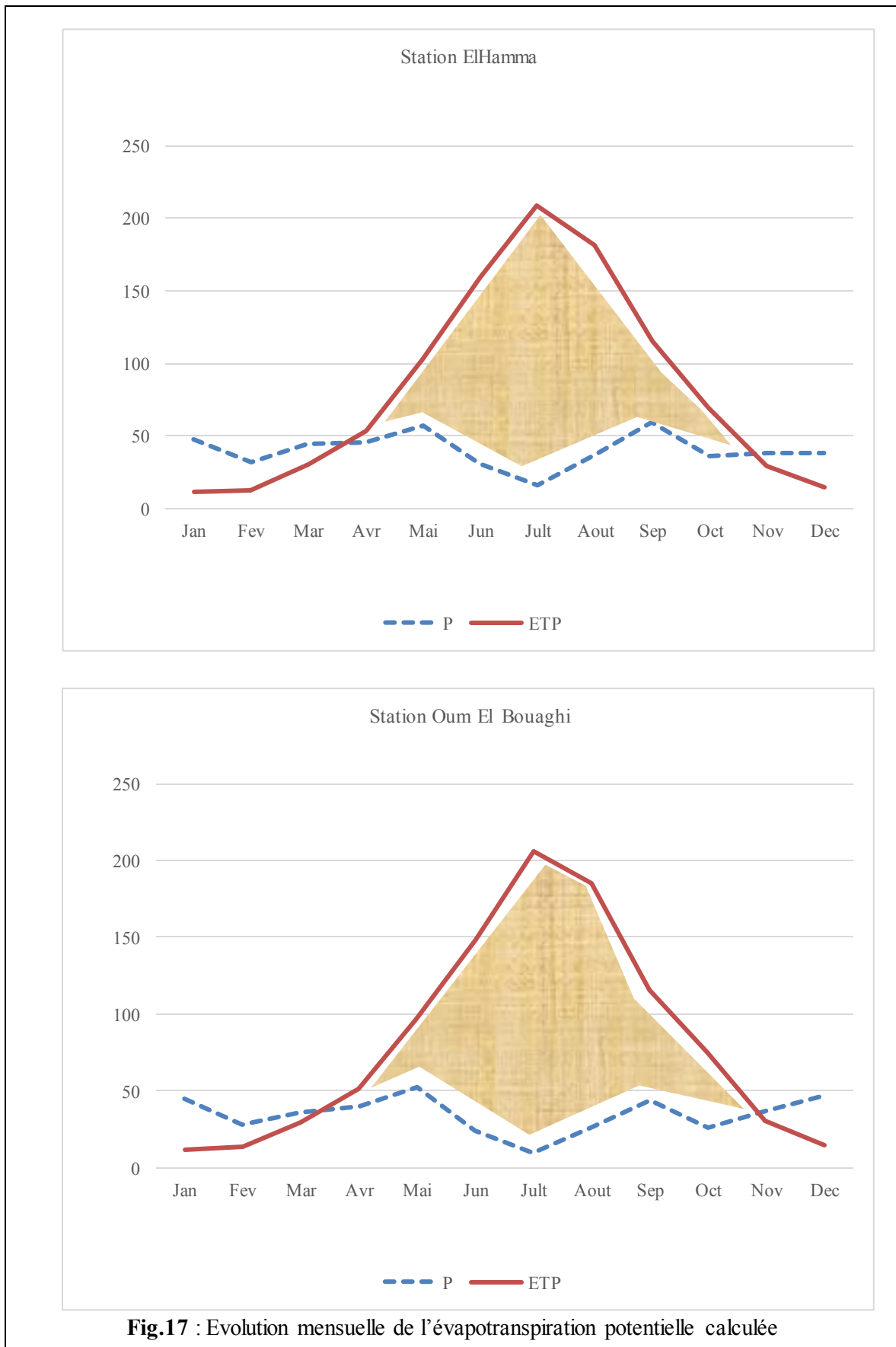


Fig.17 : Evolution mensuelle de l'évapotranspiration potentielle calculée

4.2. Bilan hydrique de Thornthwaite

La détermination de l'ETR est en fonction de l'ETP et de la quantité d'eau disponible (Pluie + RFU)

- Si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (50 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui prendra soit une forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit la forme de ruissellement (Fig.14).
- Si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$ (du mois précédent), jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation (Fig.18).

Dans une première étape, connaissant les pluies et les températures mensuelles moyennes au niveau des deux stations. Il devient alors possible de calculer l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwait.

Les termes des bilans d'eau se prêtent à être calculés.

Nous allons calculer ici le bilan hydrique sur la période 1995 à 2015 à partir des données des deux stations. La capacité de rétention maximale en eau est de 50 mm (=AWC). A chaque pas, il faut comparer P, ETP.

Le tableau ci-dessous représente les variations mensuelles des termes du bilan.

Tableau.16 : Calcul des termes du bilan hydrique de la station d'El Hamma (1995-2015)

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Totale
P mm	47,3	32,3	44,5	45,3	57,3	31,3	16,1	36,9	59,5	36,3	37,9	38,5	483,2
ETPc	11,3	12,5	30,5	54	102,5	158,9	209,1	181,6	115	69	29,7	14,3	988,4
P-ETP	36	19,8	14	-8,7	-45,3	-127,6	-193	-144,7	-55,5	-32,7	8,2	24,2	/
ETR	11,3	12,5	30,5	45,3	57,3	31,3	16,1	36,9	59,5	36,3	29,7	14,3	381
RFU50	36	50	50	0	0	0	0	0	0	0	8,2	32,4	/
DA	0	0	0	8,7	45,2	127,6	193	144,7	55,5	32,7	0	0	607,4
Ex	36	19,8	14	0	0	0	0	0	0	0	8,2	24,2	102,2

Vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX = 381 + 102,2 = 483,2$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 381 + 607,4 = 988,4$$

Tableau.17 : Calcul des termes du bilan hydrique de la station d'Oum el Bouaghi

station	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Tot
P mm	44,9	27,5	36,1	39,8	52,2	24,3	9,4	25,3	44,1	25,9	36,5	46,8	412,8
ETPc mm	11,2	13,3	29,6	51,5	97,1	148	205,6	185,4	115,6	74,8	29,9	13,9	975,9
P-ETP	33,7	14,2	6,5	-11,7	-44,9	-123,7	-196,2	-160,1	-71,5	-48,9	6,6	32,9	/
ETR	11,2	13,3	29,6	39,8	52,2	24,3	9,4	25,3	44,1	25,9	29,9	13,9	318,9
RFU 50	50	50	50	38,3	0	0	0	0	0	0	6,6	39,5	/
DA	0	0	0	11,7	44,9	123,7	196,2	160,1	71,5	48,9	0	0	657
Ex	33,7	14,2	6,5	0	0	0	0	0	0	0	6,6	32,9	93,9

Vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX = 318,9 + 93,9 = 412,8$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 318,9 + 657 = 975,9$$

On peut s'en rendre compte en examinant les tableaux 16 et 17, qui comparent les deux stations sur une même période (1995-2015), l'évolution moyenne de la réserve en eau du sol. La période déficitaire s'étale sur une longue période et nécessite une irrigation en cas de présence de culture. L'automne est relativement sec ce qui implique une plus grande précocité de déficit hydrique. La recharge se fait à partir du mois de novembre jusqu'au mois de mars où les températures basses diminuent l'évapotranspiration (Fig.18).

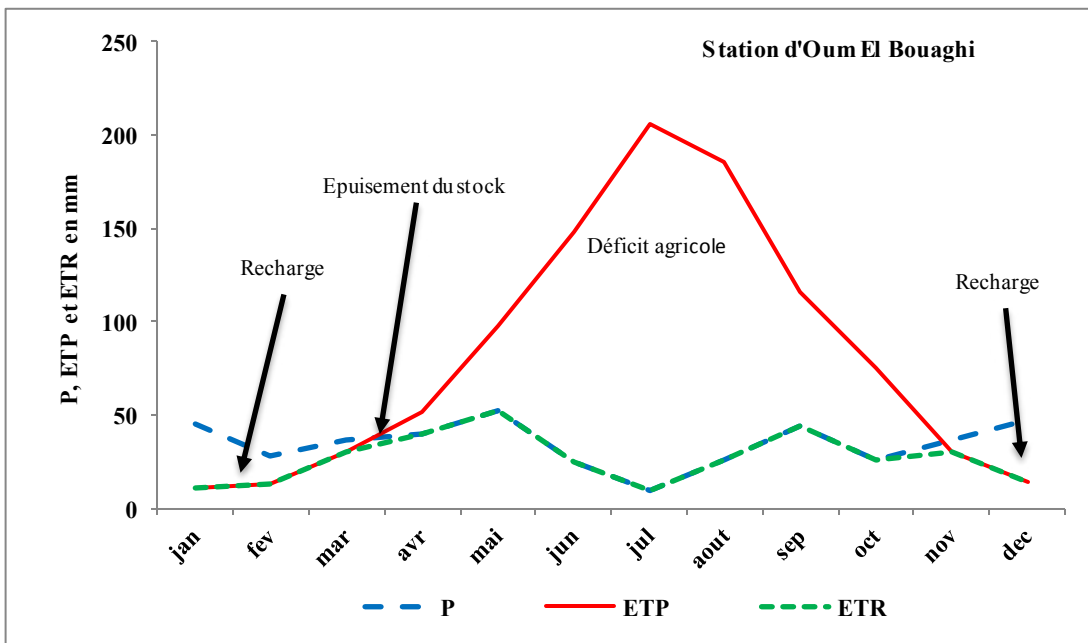
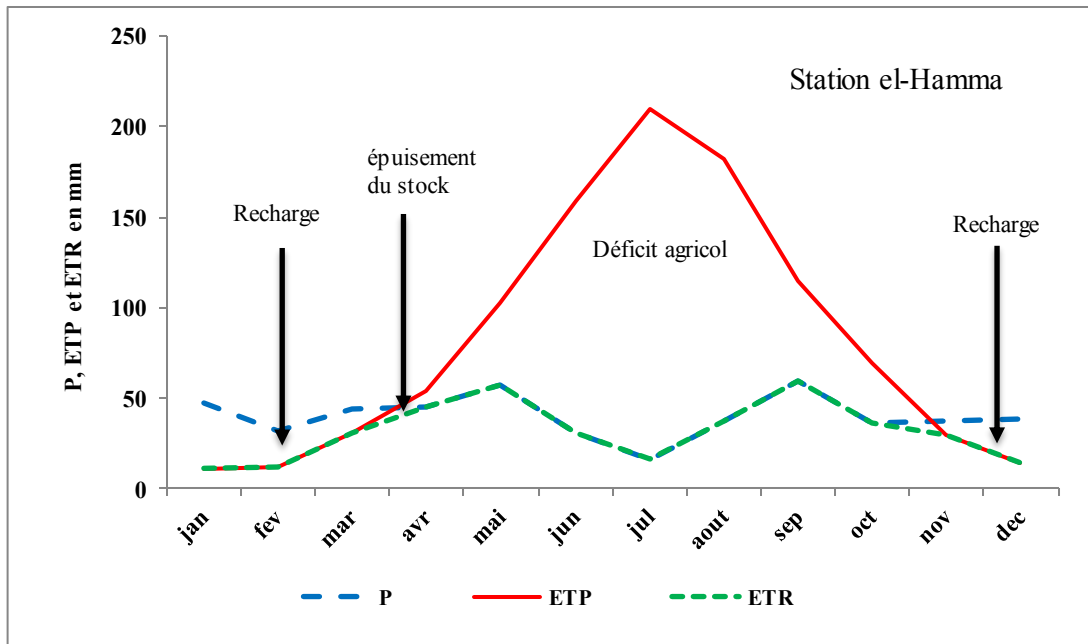


Fig.18 : Bilan hydrique moyen de la période 1995-2015

4.3. Ruissellement superficiel

Il est estimé à partir de la formule de Tixeront-Berkaloff qui est la suivante :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2$$

On a: $P=412.8\text{mm}$, $ETP=975.97\text{mm}$ \longrightarrow $R=24.61\text{ mm}$ (station oum elbouaghi)

$P=483.2\text{mm}$, $ETP=988.4\text{mm}$ \longrightarrow $R=38.49\text{mm}$ (station el Hamma)

4.4. Infiltration

Est le passage de l'eau à travers la surface du sol, il est exprimé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \quad \Longrightarrow \quad I = P - (ETR + R)$$

Donc : $I = 69.29\text{mm}$, (station Oum el Bouaghi)

$I = 63.71\text{mm}$, (station el Hamma)

5. Synthèse des résultats de l'étude climatique

Cette étude a permis de caractériser les principales manifestations climatiques dans le sous bassin (étage bioclimatique semi-aride). Les régimes pluviométriques mensuels sont presque constants, les mois les plus arrosés coïncident avec la période de recharge où les eaux s'infiltrent ou ruissellent pour atteindre les chotts et la Garaet.

L'analyse des données des deux stations météorologiques révèle que la station d'El-Hamma est plus arrosée. Ces variabilités dans l'espace se rapportent aux paramètres orographiques et géographiques.

Les températures moyennes annuelles restent aux alentours de 15°C . La saison humide s'étale sur 6 à 7 mois mais la recharge efficace des nappes souterraines ne se fait que sur 5 mois. La durée et l'intensité de la saison sèche déterminent la durée du déficit agricole qui s'étale sur 7 mois.

CHAPITRE IV

Cadre hydrochimique

1. Introduction

L'étude de la chimie des eaux souterraines apporte une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifères. C'est-à-dire dans les échanges possibles entre l'eau et la roche, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition des éléments chimiques par la dissolution et l'altération des minéraux du réservoir. Elle permet aussi de suivre l'évolution spatiale des différents éléments dissous et d'estimer leur origine et d'apprécier la qualité des eaux vis-à-vis de la potabilité et à l'irrigation.

C'est dans ce but que ce chapitre a été consacré, où on a utilisé certain nombre de diagrammes avec les différentes cartes qui ont été tracés pour l'ensemble des éléments chimiques. Une analyse statistique a été effectuée aussi sur les principaux paramètres caractérisant le chimisme des eaux de l'aquifère.

2. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse

Pour cette étude, la distribution spatiale des forages n'a pas été régulière vu aux certaines difficultés de terrains et d'échantillonnage. (Présence ou non de propriétaire, route inaccessible après les pluies, diamètre réduit des forages, forage sec...etc.)(Fig.19).

Les analyses physico-chimiques concernées par la présente étude sont celles relatives aux éléments majeurs suivants : pH, CE, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃ et Sr. Les éléments en trace métallique suivants sont également considérés : Zn, Cu et Fe. Trois paramètres physico-chimiques sont mesurés *in situ*, immédiatement après prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un multiparamètre de type "Consort C931, version 2.4".

Les échantillons d'eau prélevés sont conservés dans des bouteilles en PEhd rincées au préalable trois fois avec l'eau à prélever, et acidifiés à pH 2 avec de l'acide nitrique (HNO₃)

Les ions majeurs Calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), bicarbonates (HCO₃⁻), chlorures (Cl⁻) ont été dosés par la méthode volumétrique. Les nitrates (NO₃⁻) et les sulfates (SO₄²⁻) par spectrophotométrie UV de type Jenway. Le sodium (Na⁺) et le potassium (K⁺) ont été dosés par un spectromètre à flammes de type Jenway.

Les éléments en trace Zn, Fe, Cu et Sr, ont été dosés par spectrophotomètre à absorption atomique de type Perkins Elmer.

Les paramètres mesurés concernent 45 échantillons d'eaux souterraines pendant la période d'octobre 2014.

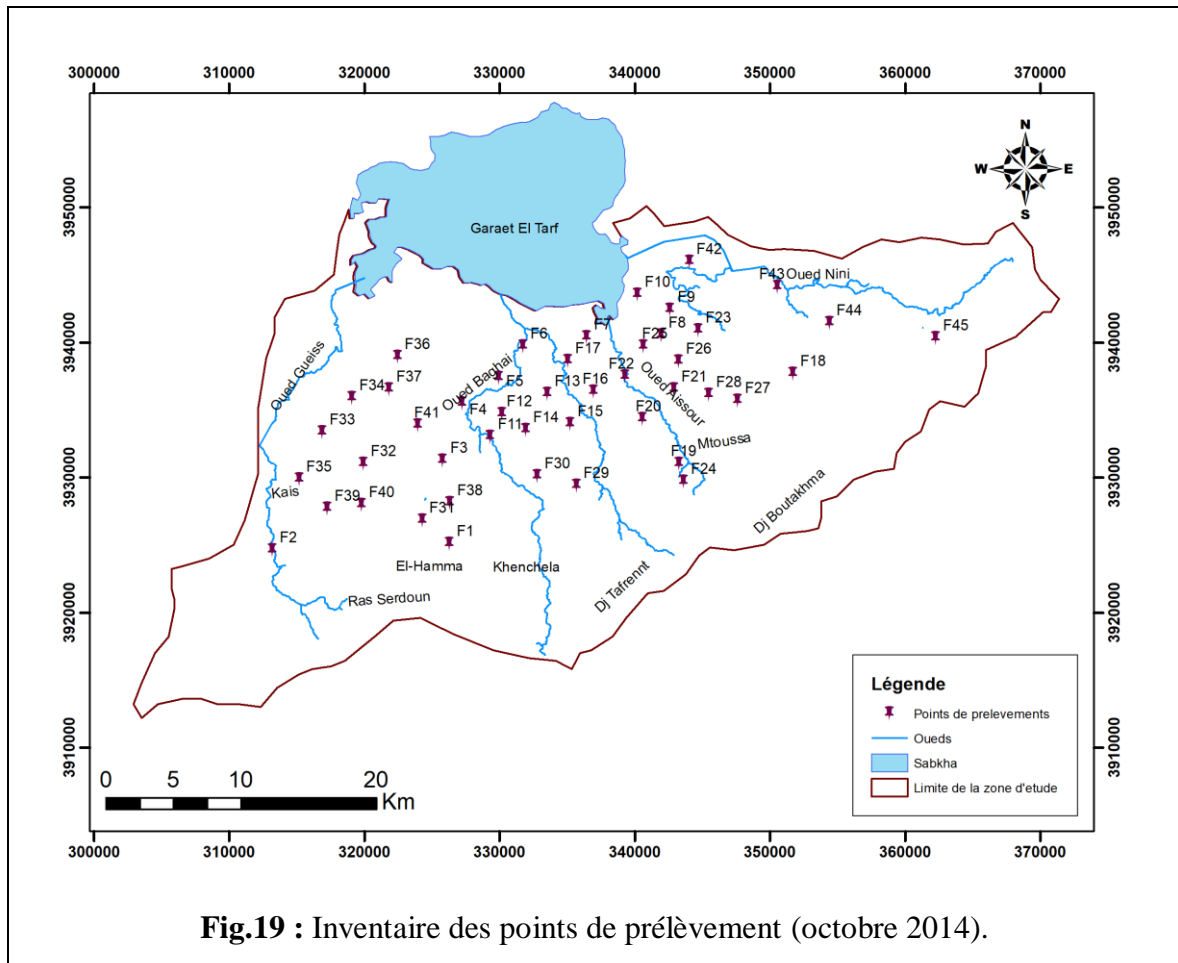


Fig.19 : Inventaire des points de prélèvement (octobre 2014).

3. Résultats et discussion

3.1. Paramètres physiques in situ

Le tableau(18) présente les valeurs minimales et maximales de potentiel hydrogènes et conductivité électrique

Tableau. 18 : Sommaire statistique des paramètres mesurés in situ

	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Min	6,61	580
Max	7,38	3720
Moy	7,17	1617,778
Écart type	0,22	738,952

3.1.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H^+ dans l'eau. Cette mesure est très importante car la valeur du pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. En général le pH est lié à la nature des terrains traversés et la nature lithologique du réservoir.

Dans 73,33 % des échantillons le pH mesuré montre un caractère légèrement basique qui varie entre 7,1 et 7,5. Pour le reste des échantillons (26,66 %) le pH des eaux souterraines mesuré varie entre 6,5 et 6,90 (Fig.20).

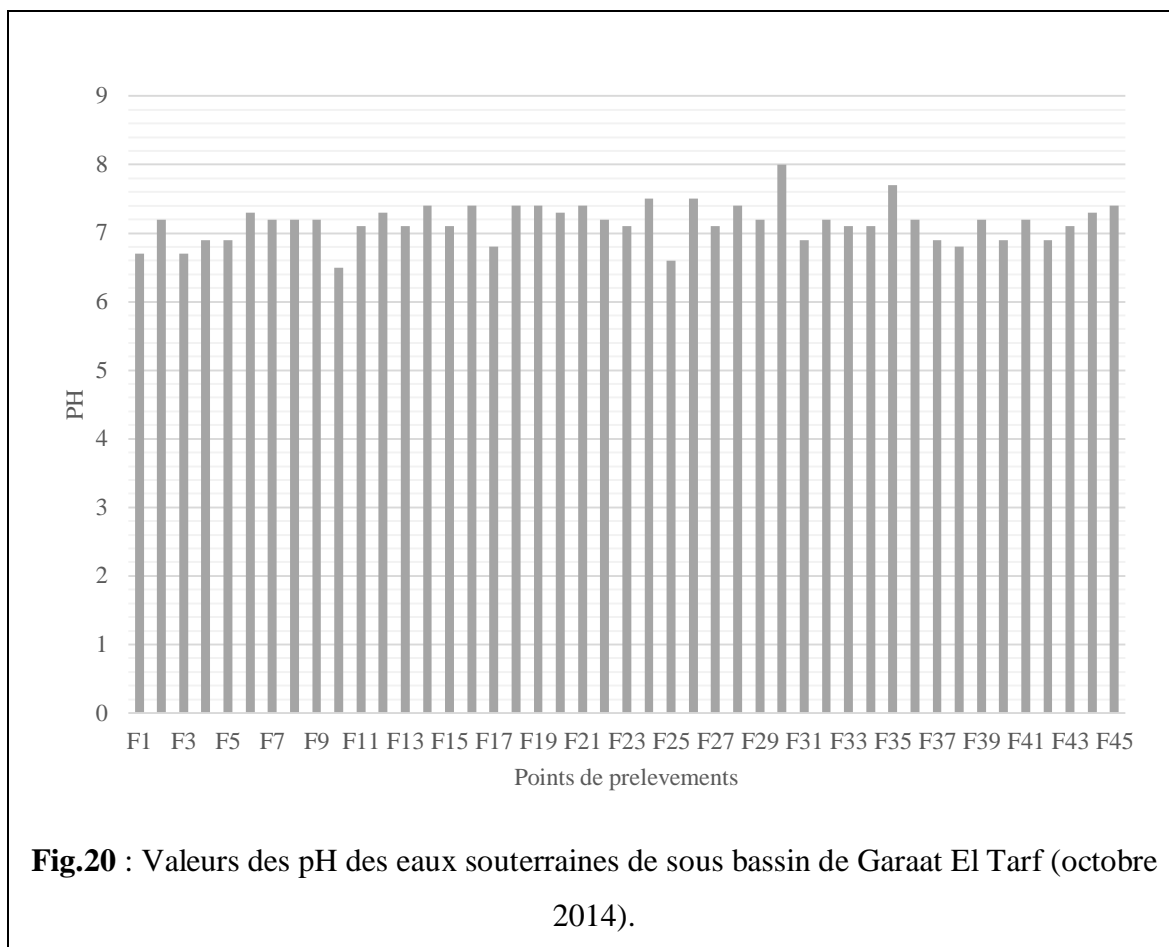


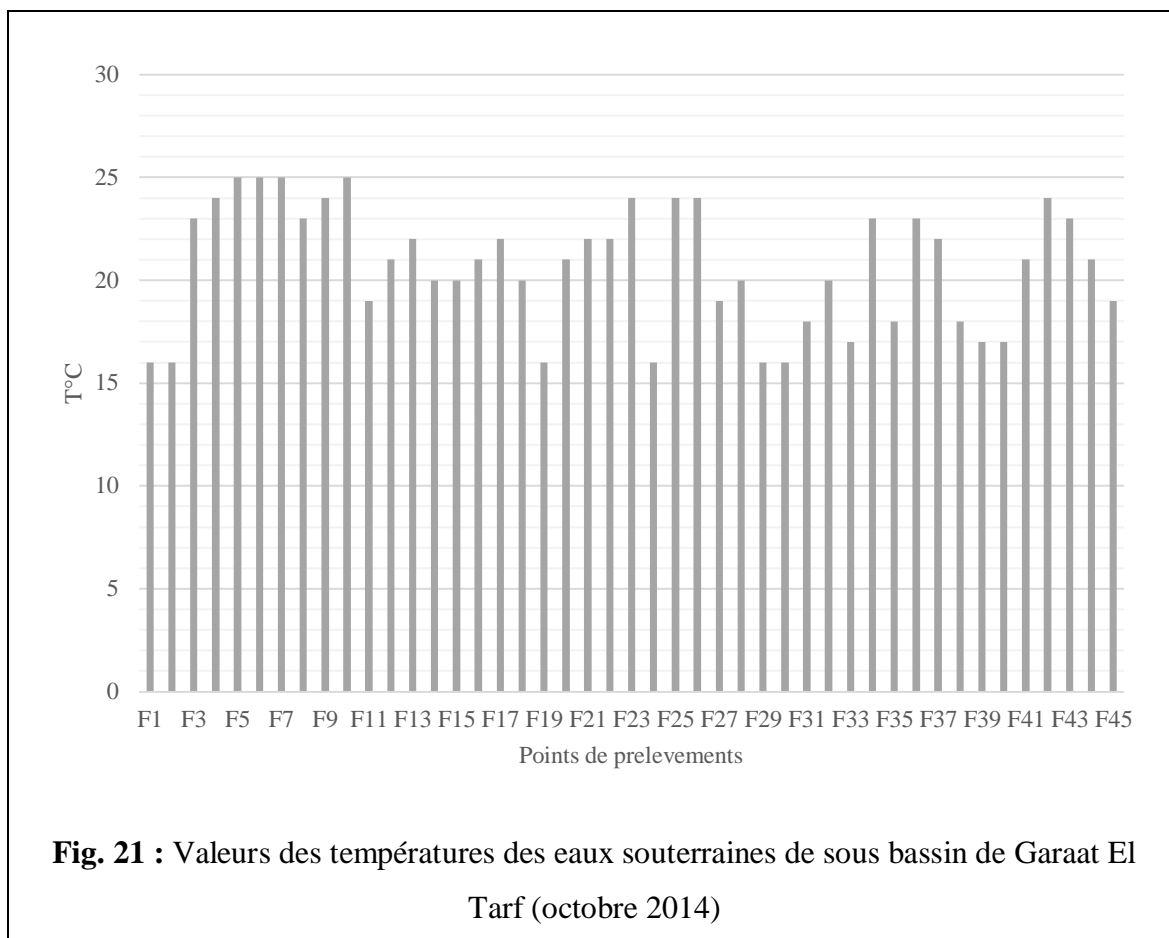
Fig.20 : Valeurs des pH des eaux souterraines de sous bassin de Garaat El Tarf (octobre 2014).

3.1.2. Températures (T°C)

Les températures mesurées in situ sur les eaux souterraines de l'aquifère du Quaternaire sont assez homogènes et varient entre 16° et 25°C avec une moyenne de 20,7°C. Ces valeurs semblent être régies par le gradient géothermique qui augmente en moyenne de 1°C tous les 30m de profondeur.

D'autres facteurs secondaires peuvent intervenir par leur action pour augmenter la température comme les réactions physico-chimiques exothermiques telles que l'oxydation et la réduction.

De même, ces valeurs reflètent celle de la température de l'air ambiant dont la moyenne est de 18,8°C dans le secteur d'étude (Fig.21).

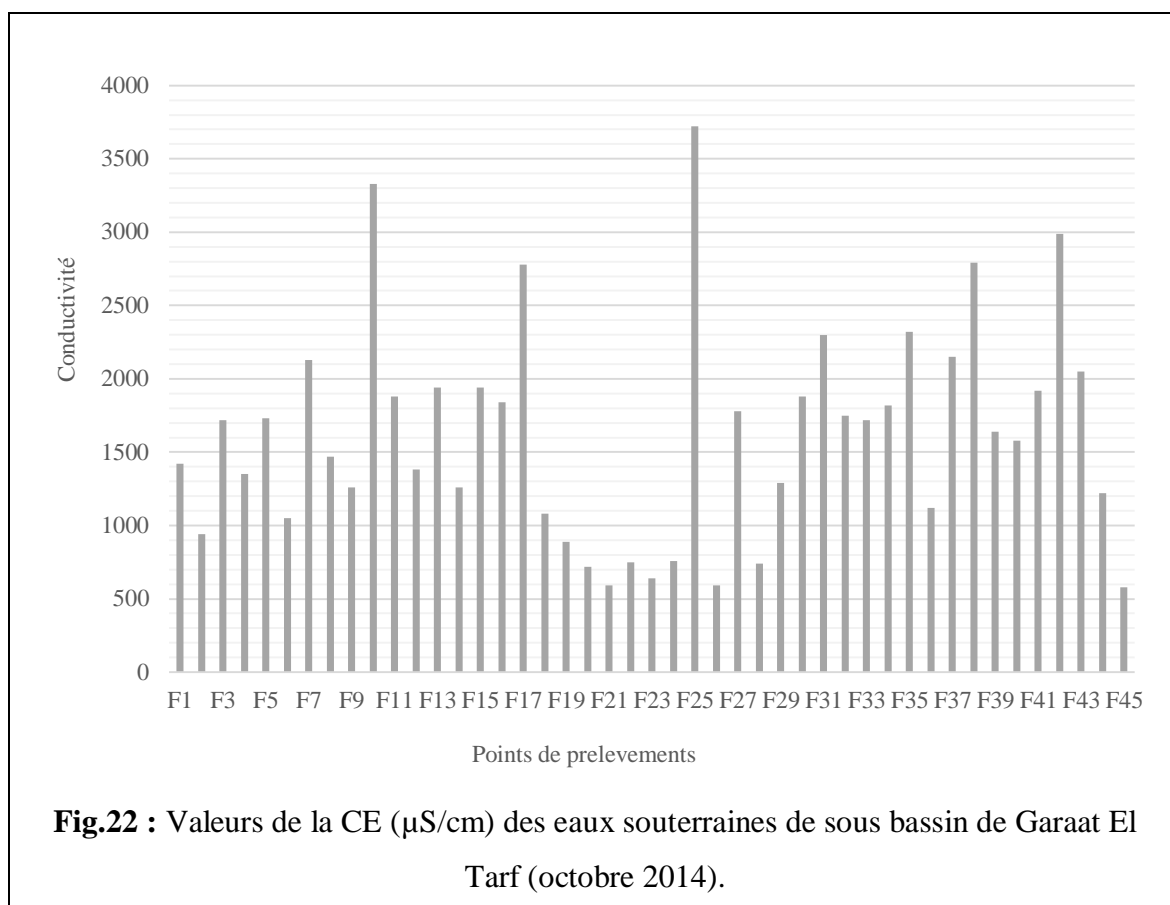


3.1.3. La Conductivité électrique(CE)

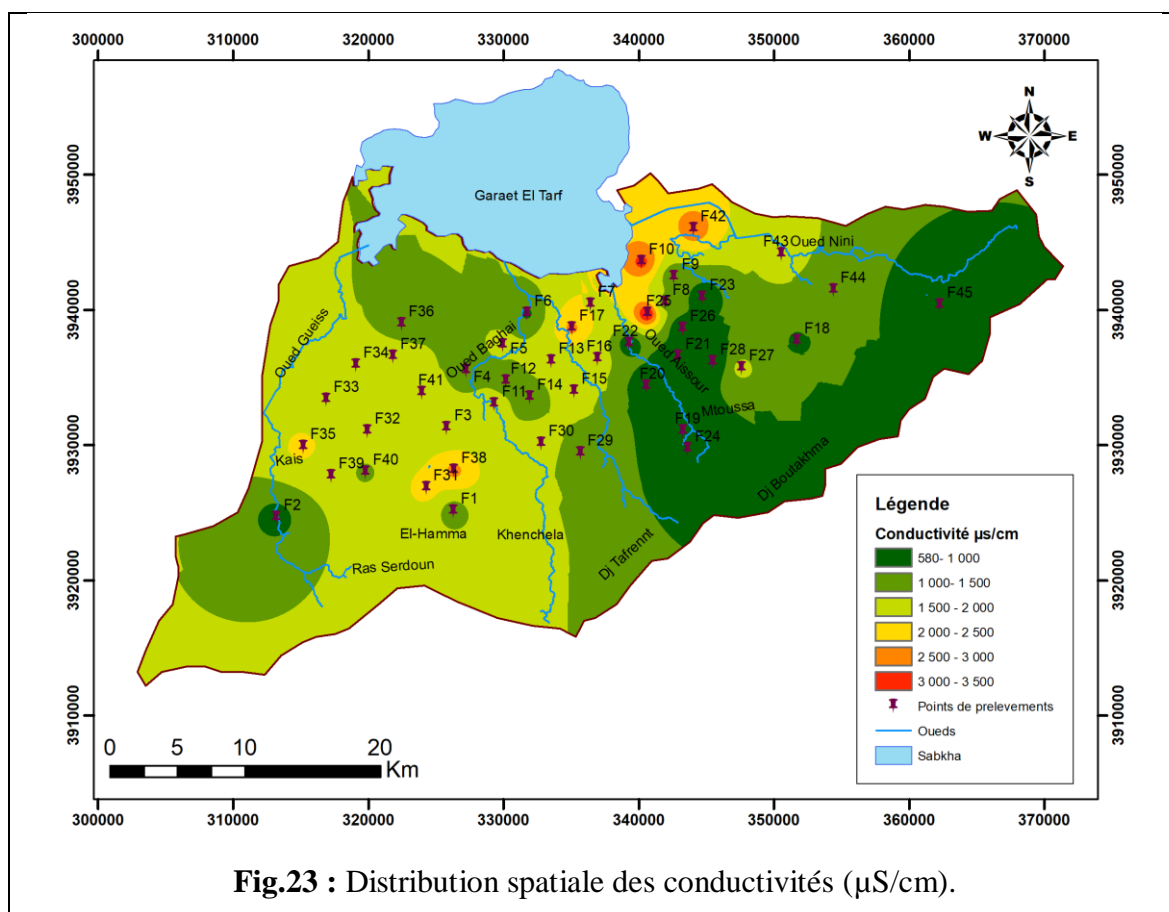
Les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines sont exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Traduisant la capacité d'une eau (solution aqueuse) à conduire le courant électrique, la conductivité électrique est directement liée à la force ionique qui découle des formations traversées par cette eau dans le bassin hydrogéologique ainsi qu'à son temps de séjour dans le réservoir. Elle donne ainsi une bonne appréciation sur la minéralisation globale de cette eau. En effet, une eau est d'autant plus conductrice qu'elle est plus minéralisée.

Les conductivités électriques des eaux souterraines mesurées de notre région d'étude présentent une grande amplitude de variation. Elles varient entre 580 et 3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 1617,78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.22, Tableau.20).



La distribution spatiale des conductivités électriques (Fig.23) montre une importante variation qui peut avoir une cause aussi bien anthropique (pollution de l'eau souterraine) que naturelle (dilution par les eaux météoriques, infiltration d'eau de surface peu minéralisée, etc). Les valeurs minimales sont enregistrées à l'est du bassin au niveau du forage F45 avec 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs maximales sont enregistrées au niveau des forages F25, F10 et F42 avec des valeurs de 3720, 3330 et 2990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement situés au sud est de sebkha , qu'on traduit probablement par l'échange hydraulique entre cours d'eaux fortement minéralisés (intrusion saline) et les eaux souterraines. 11,11% des échantillons dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux (> 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).



3.2. Etude analytique des éléments chimiques

Le tableau(19) montre les concentrations minimales et maximales des éléments majeurs

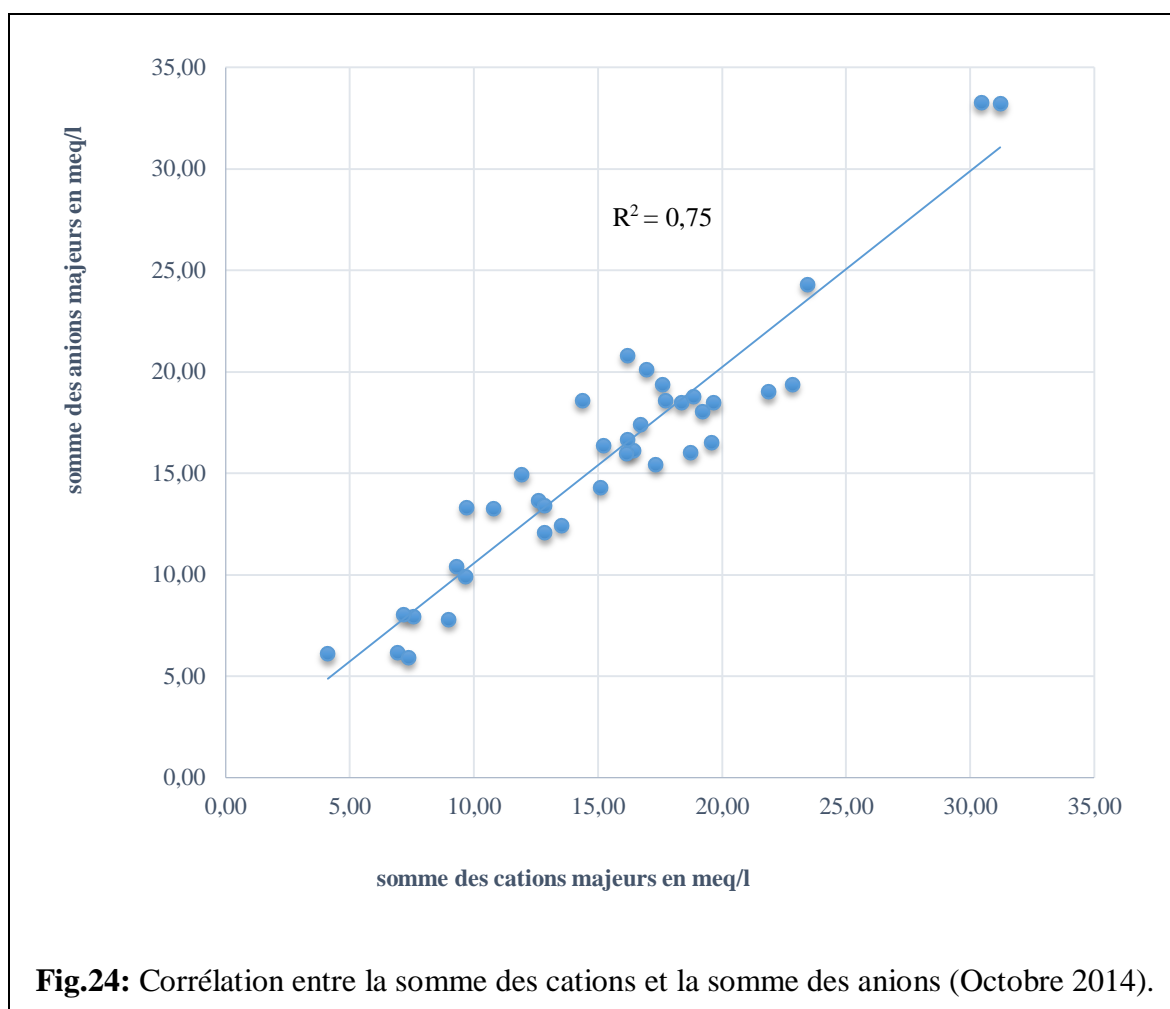
Tableau. 19 : Concentrations caractéristiques des éléments majeurs.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca ²⁺ mg/l	48,100	480,960	161,428	81,501
Mg ²⁺ mg/l	9,600	177,120	44,496	32,606
Na ⁺ mg/l	20,470	343,970	92,342	59,452
HCO ₃ ⁻ mg/l	164,700	445,300	283,587	61,948
Cl ⁻ mg/l	35,500	527,250	217,712	135,740
SO ₄ ²⁻ mg/l	20,000	740,000	229,244	145,407
NO ₃ ⁻ mg/l	0,800	96,000	33,278	24,206

3.2.1. Calcul de la balance ionique

Sachant qu'une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative que lorsque la balance ionique est inférieure à 10%, les balances ioniques ont été systématiquement vérifiées pour l'ensemble des échantillons analysés.

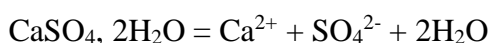
La corrélation entre la somme des cations et celle des anions (Fig.24) montre une évolution de la droite linéaire ; le coefficient de corrélation est proche de 1 ce qui permet de juger le modèle comme bon. Les analyses sont donc dans l'ensemble acceptables, cependant le test de la balance ionique reste obligatoire pour pouvoir éliminer les mauvaises analyses.



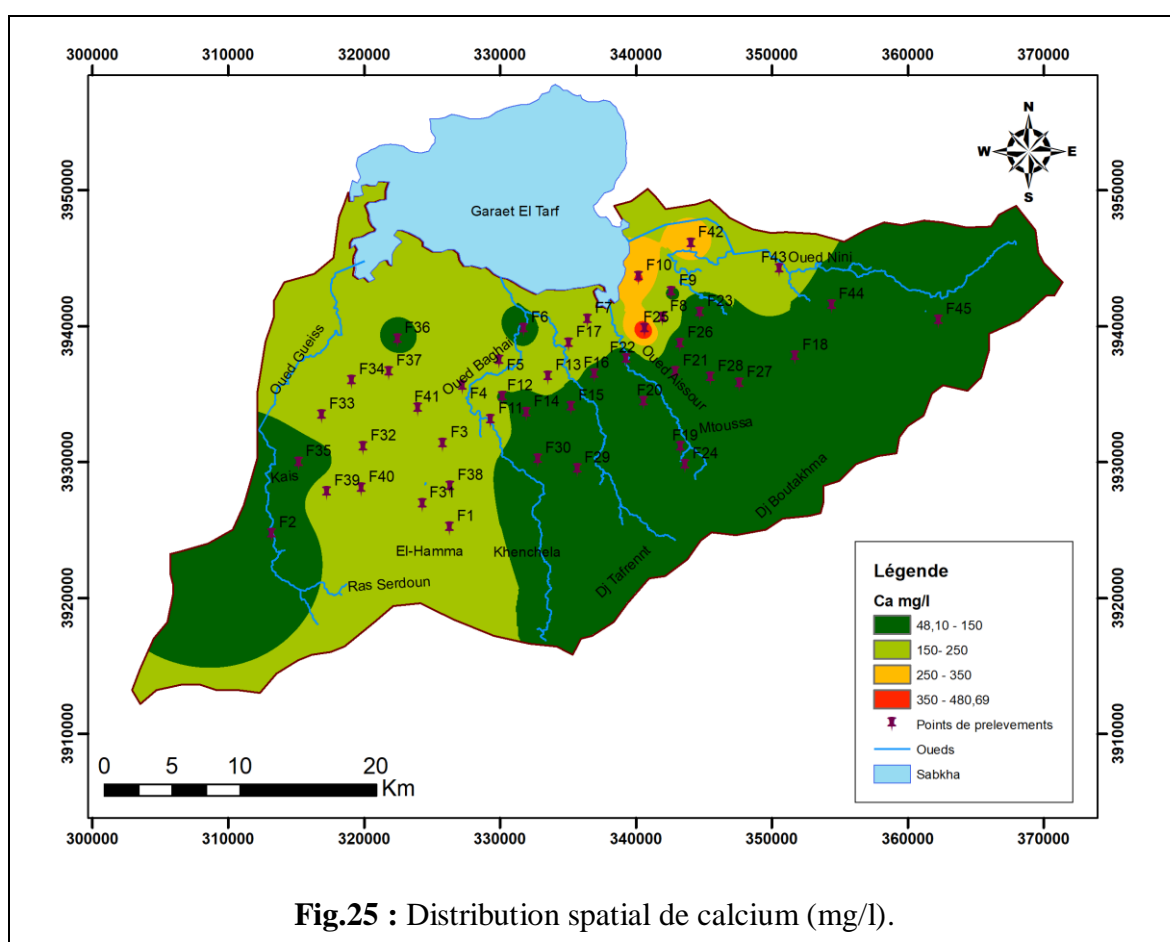
3.2.2. Les cations

3.2.2.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium, élément principal de la dureté de l'eau, est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (calcite, dolomite et aragonite). (Drever, 1997). Le calcium fait partie de quelques minéraux évaporitiques à savoir le gypse et l'anhydrite (Hem, 1985).



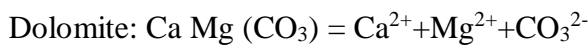
La carte de distribution spatiale en calcium (Fig.25) montre que les fortes valeurs se localisent au sud-est de Sebka.



Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F25, F10 et F42 dont les concentrations sont respectivement 480,96 ; 380,76 et 304 ; 61mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F45, F30 et F20 dont les concentrations sont respectivement 48,1 ; 52,11 et 60,12mg/l.

3.2.2.2. Magnésium (Mg²⁺)

Le Magnésium provient principalement de la dissolution des dolomies, des calcaires et marnes dolomitiques. Il est faiblement présent dans les eaux de pluie en général. La présence du magnésium, dont la cinétique d'acquisition chimique est lente, caractérise des eaux qui ont séjourné longtemps dans les blocs capacitifs donc à transit lent



La carte de distribution spatiale en magnésium (Fig. 26) montre que les fortes valeurs se localisent au sud-est de sebkha

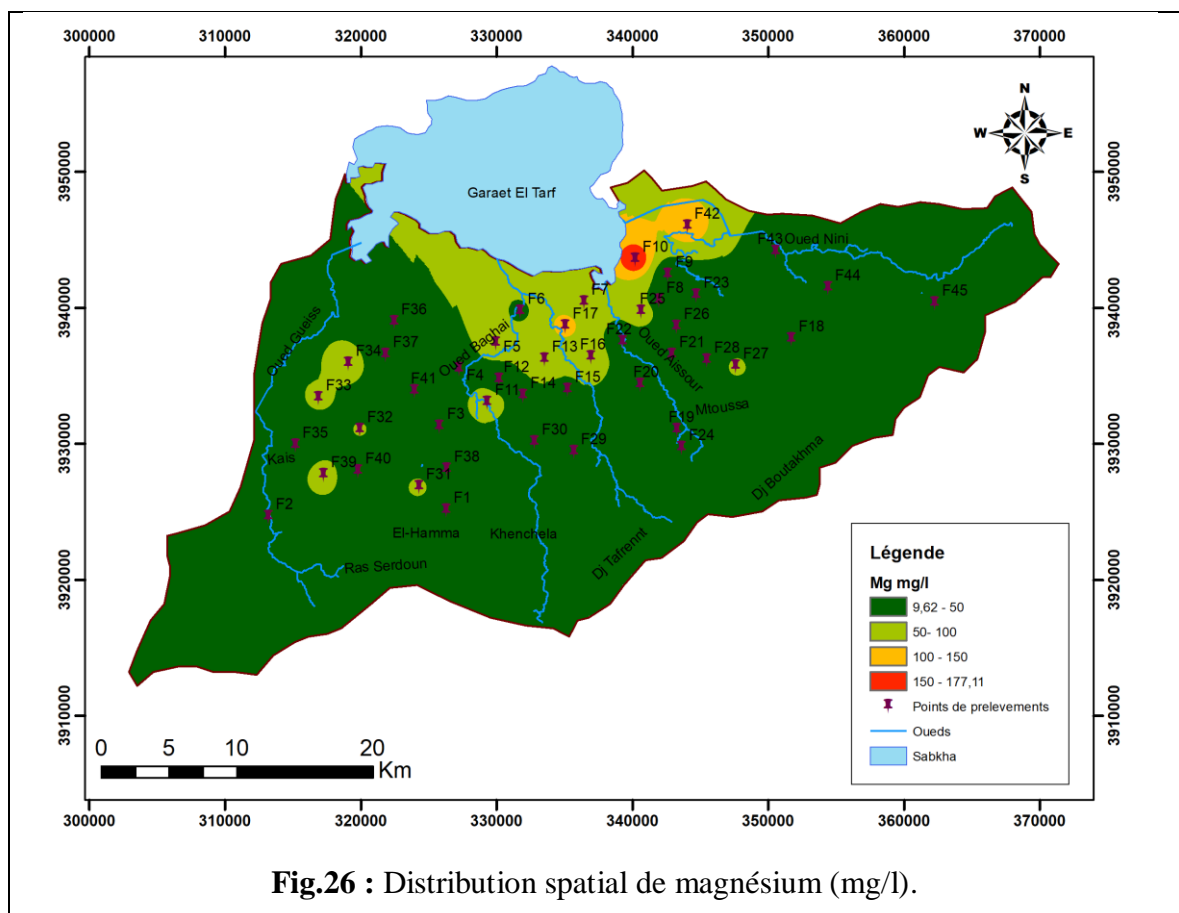


Fig.26 : Distribution spatiale de magnésium (mg/l).

Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F10, F42 et F17 dont les concentrations sont respectivement 177,12 ; 122,04 et 112.44 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F21, F9, F19 dont les concentrations sont respectivement 9,6 ; 12 et 14,40mg/l.

3.2.2.3. Sodium (Na^+)

Les teneurs élevées en sodium dans l'eau proviennent de la dissolution des terrains salés. Il peut aussi provenir de l'activité anthropique, tels que le salage des routes. En agriculture, il constitue, à des doses acceptables, associé aux autres éléments alcalins et alcalino-terreux, un élément de maintien de la perméabilité des sols (Brinis, 2011).

La carte de distribution spatiale en sodium (Fig.27) montre que les fortes valeurs se localisent au sud-est de sebkha et sud-ouest du bassin.

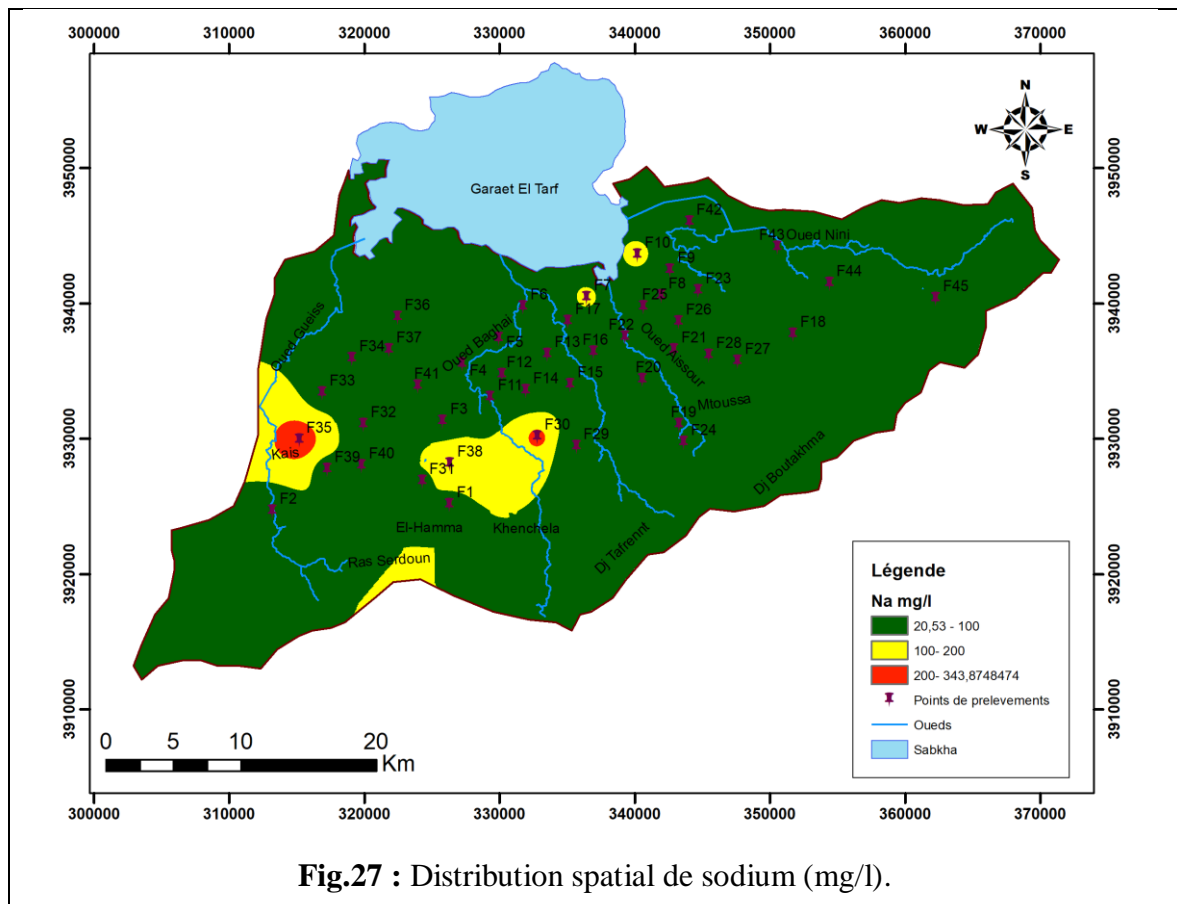


Fig.27 : Distribution spatiale de sodium (mg/l).

Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F35, F30 et F38 dont les concentrations sont respectivement 343,97 ; 263,24 et 210,34 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F29, F26 et F18 dont les concentrations sont respectivement 20,47 ; 26,45 et 29,21mg/l.

3.2.3. Les anions

3.2.3.1. Chlorure (Cl⁻)

Les chlorures rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines, proviennent de la dissolution et lessivage des terrains salifères.

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution.

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines :

- Les argiles sableuses gypsifères du Mio-Plio-Quaternaire qui couvrent la totalité de la plaine ;
- Les dépôts évaporitiques ;
- Le déversement des eaux usées dans la plaine ;

La carte de distribution spatiale en chlorure (Fig.28) montre que les fortes valeurs se localisent dans la partie nord, nord-est et sud-ouest du bassin (à la bordure de sebkha, oueds).

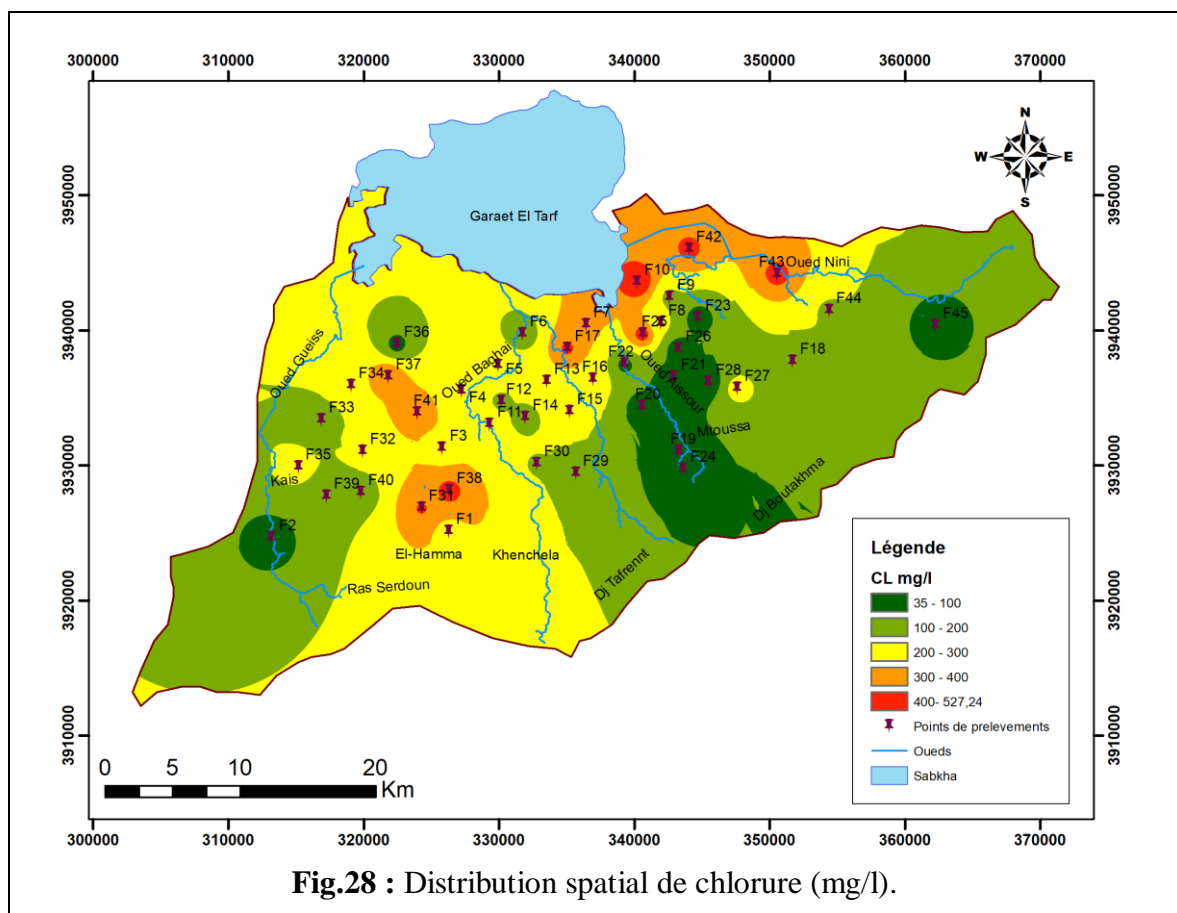


Fig.28 : Distribution spatiale de chlorure (mg/l).

Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F10, F25 et F38 dont les concentrations sont respectivement 527,25 ; 457,25 et 437,25 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F29, F26 et F20 dont les concentrations sont respectivement 20,47 ; 26,45 et 53,25mg/l.

3.2.3.2. Sulfates (SO₄²⁻)

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (CaSO₄, 2H₂O). Les sulfates peuvent provenir de l'activité humaine (Brinis, 2011).

La carte de distribution spatiale en sulfate (Fig.29) montre que les fortes valeurs se localisent au sud-est de sebkha.

Ceci peut être lié à une dissolution des formations riches en SO₄ ou à une contamination de la nappe soit par les eaux de l'Oued Nini ou du Garaat el Tarf et l'activité agricole (le retour d'eau d'irrigation qui accentue les teneurs).

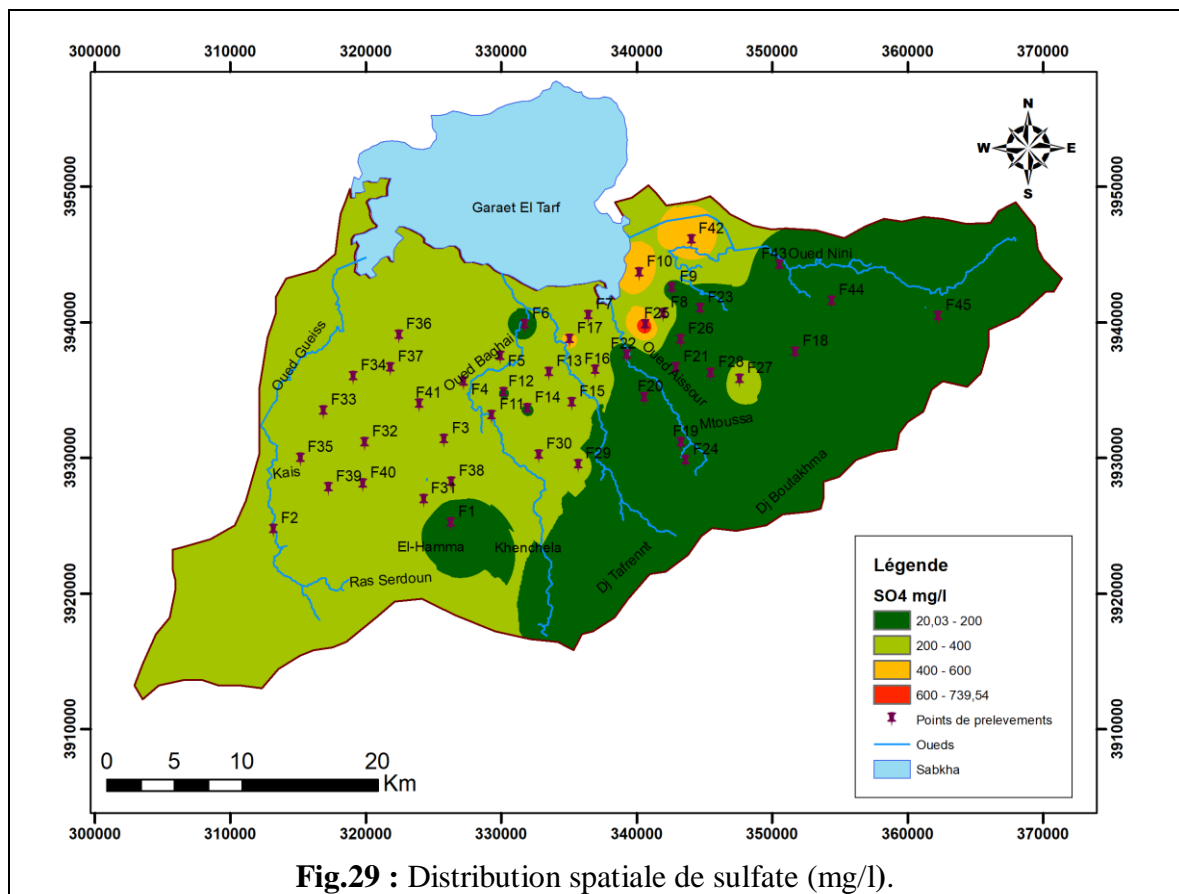
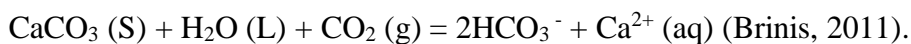


Fig.29 : Distribution spatiale de sulfate (mg/l).

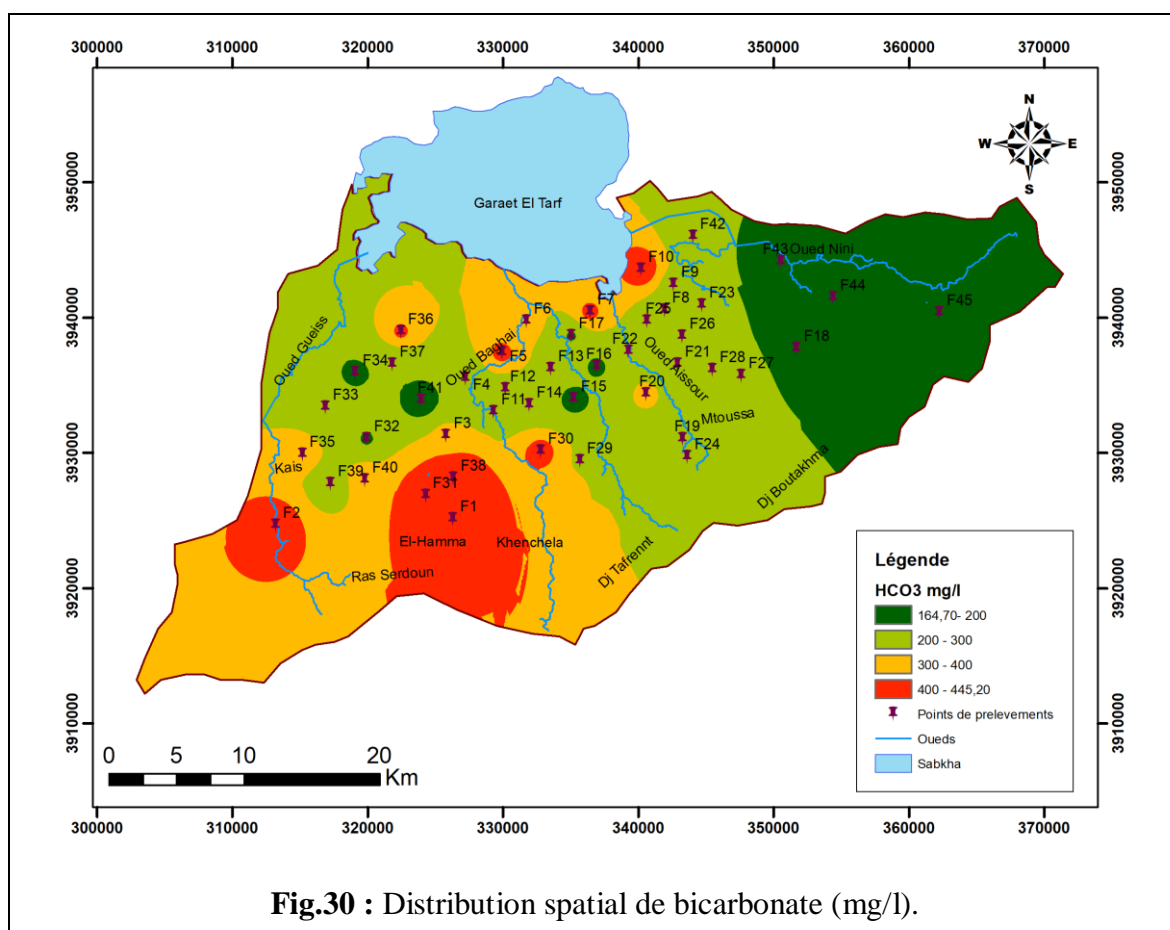
Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F25, F42 et F10 dont les concentrations sont respectivement 740, 560 et 550 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F23, F45 et F22 dont les concentrations sont respectivement 20,03 ; 35 et 45mg/l.

3.2.3.3. Bicarbonates (HCO_3^-)

Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2) selon l'équation suivante :



La carte de distribution spatiale en bicarbonate (Fig.30) montre que les fortes valeurs se localisent au sud-est de sebkha et au sud-ouest du bassin.



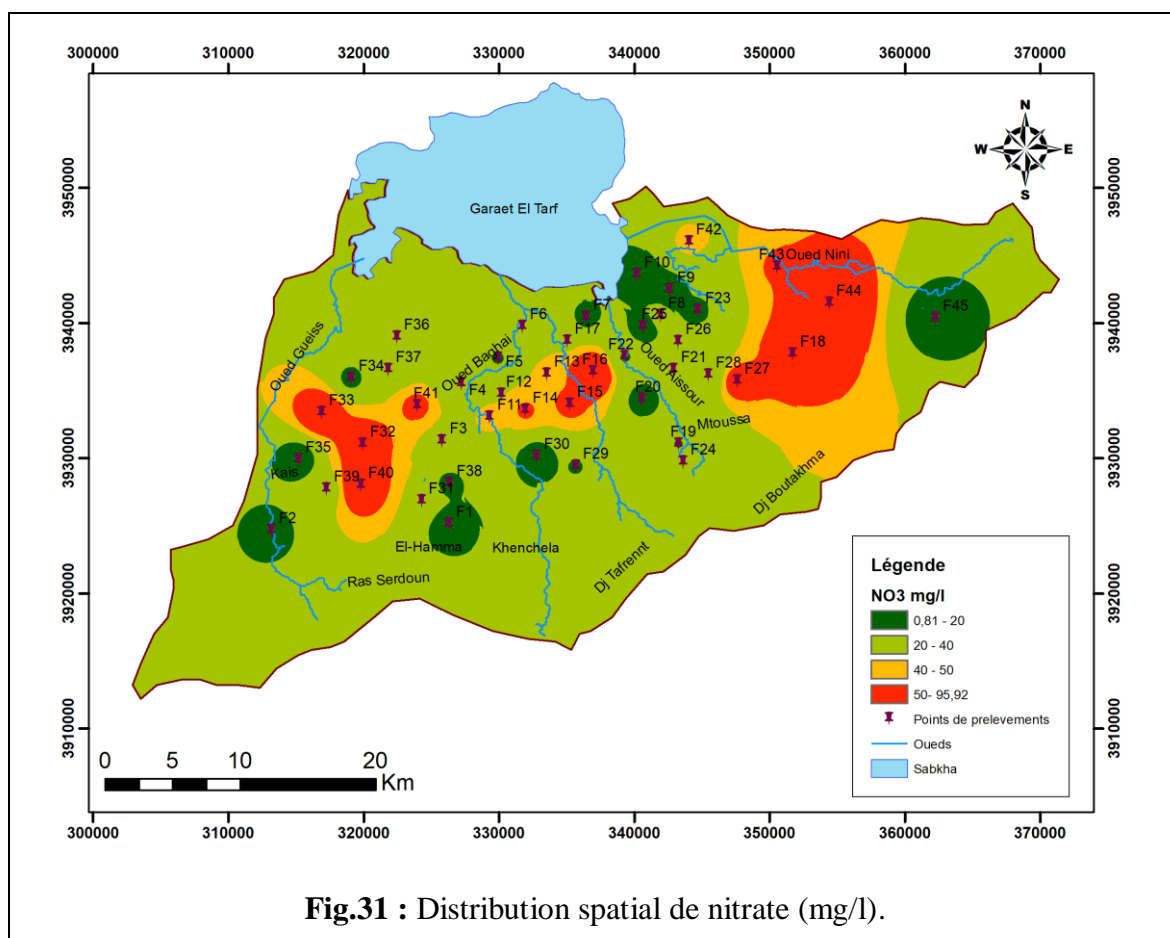
Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F18, F43 et F41 dont les concentrations sont respectivement 164,70 ; 176,90 et 200,10mg/l. Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F38, F10 et F1 dont les concentrations sont respectivement 445,20 ; 400 et 390,40 mg/l.

Ces derniers sont mesurés près des affleurements calcaires. L'accroissement de la teneur des bicarbonates juste à la sortie des calcaires maestrichtiens est attribué à leur grande solubilité. En s'éloignant des affleurements, les eaux deviennent saturées et les carbonate précipitent et leurs teneurs diminuent dans les eaux.

3.2.3.4. Nitrates (NO_3^-)

La présence des nitrates est généralement associée aux signes de pollution d'origine anthropique (agricole, égouts, fosses septiques,). Les nitrates sont extrêmement mobiles dans les sols et s'accumulent, après infiltration dans les nappes phréatiques.

La carte de distribution spatiale en nitrate (Fig.31) montre que les fortes valeurs se localisent à l'est, centre et l'ouest du bassin.



Les valeurs maximales sont enregistrées aux forages F16, F44 et F40 dont les concentrations sont respectivement 96, 84 et 82 mg/l. Les teneurs minimales sont enregistrées aux forages F35, F30 et F45 dont les concentrations sont respectivement 0,8 ; 4 et 4,20mg/l.

Cette présence de nitrates constitue un facteur de risque pour la santé humaine, surtout pour la population la plus vulnérable (nourrissons, femmes enceintes) là où on a une activité intense de l'agriculture et les eaux usées domestiques des agglomérations.

3.3. Représentation graphique des faciès hydrochimiques

Pour compléter l'interprétation des résultats des données physico-chimiques, l'identification de faciès chimiques est importante. Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de SCHOELLER et BERKALOFF (1935-1938) et celle de PIPER (1944).

3.3.1. Représentation de Piper

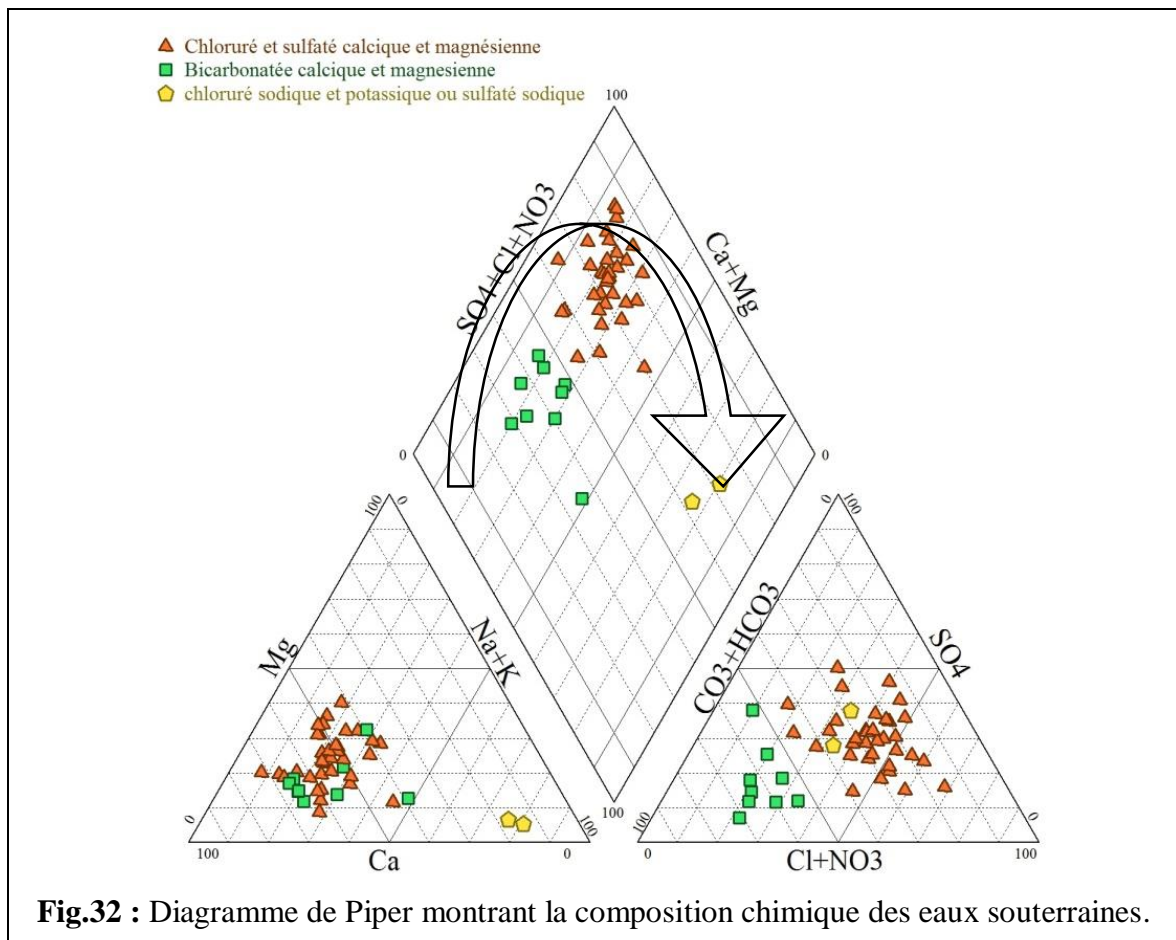
Le diagramme de Piper (Fig.32) a été construit avec le logiciel DIAGRAMME (Simler, 2004). En effet, ce diagramme permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements des faciès chimiques.

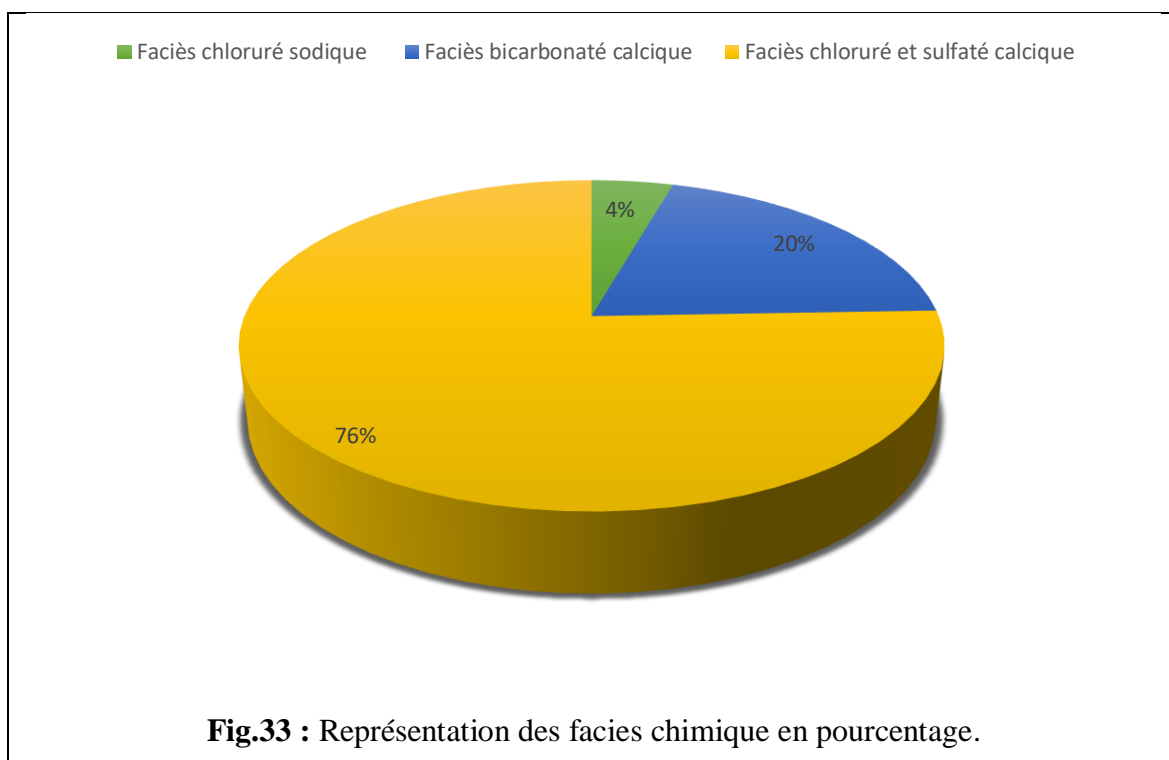
La représentation des données physico-chimiques de 45 échantillons sur le diagramme de Piper montre une variabilité du faciès chimique des eaux (Fig.33). Ces derniers sont :

Faciès bicarbonaté calcique : représente 20% de l'ensemble des échantillons ;

Faciès chloruré et sulfaté calcique : représente 76% de l'ensemble des échantillons ;

Faciès chloruré sodique : représente 4% de l'ensemble des échantillons.





Le diagramme de Piper montre une évolution du faciès chimique de l'amont à l'aval. Il apparaît très clairement, qu'en suivant le sens d'écoulement, l'évolution hydrochimique du système se fait depuis le pôle bicarbonaté calcique, dans les affleurements carbonatés au sud, vers des saumures du type chloruré sodique aux confins de Sebkhah et le faciès intermédiaire est chloruré sulfaté calcique et magnésien. En marge de cette tendance générale, certains points montrent une influence notable du pôle sulfaté ou du pôle chloruré sodique. Il s'agit de contaminations locales des eaux du trias dans le massif de Krouma et Aidel, soit depuis la surface à cause des activités anthropiques et des rejets domestiques (Houha, 1996).

3.3.2. Diagramme de Schoeller– Berkaloﬀ

Le diagramme de Schoeller Berkaloﬀ (1962) (Fig.34) permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence (Dominique, 2009).

Le diagramme tracé confirme la dominance du faciès chloruré calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- et Ca^{2+} .

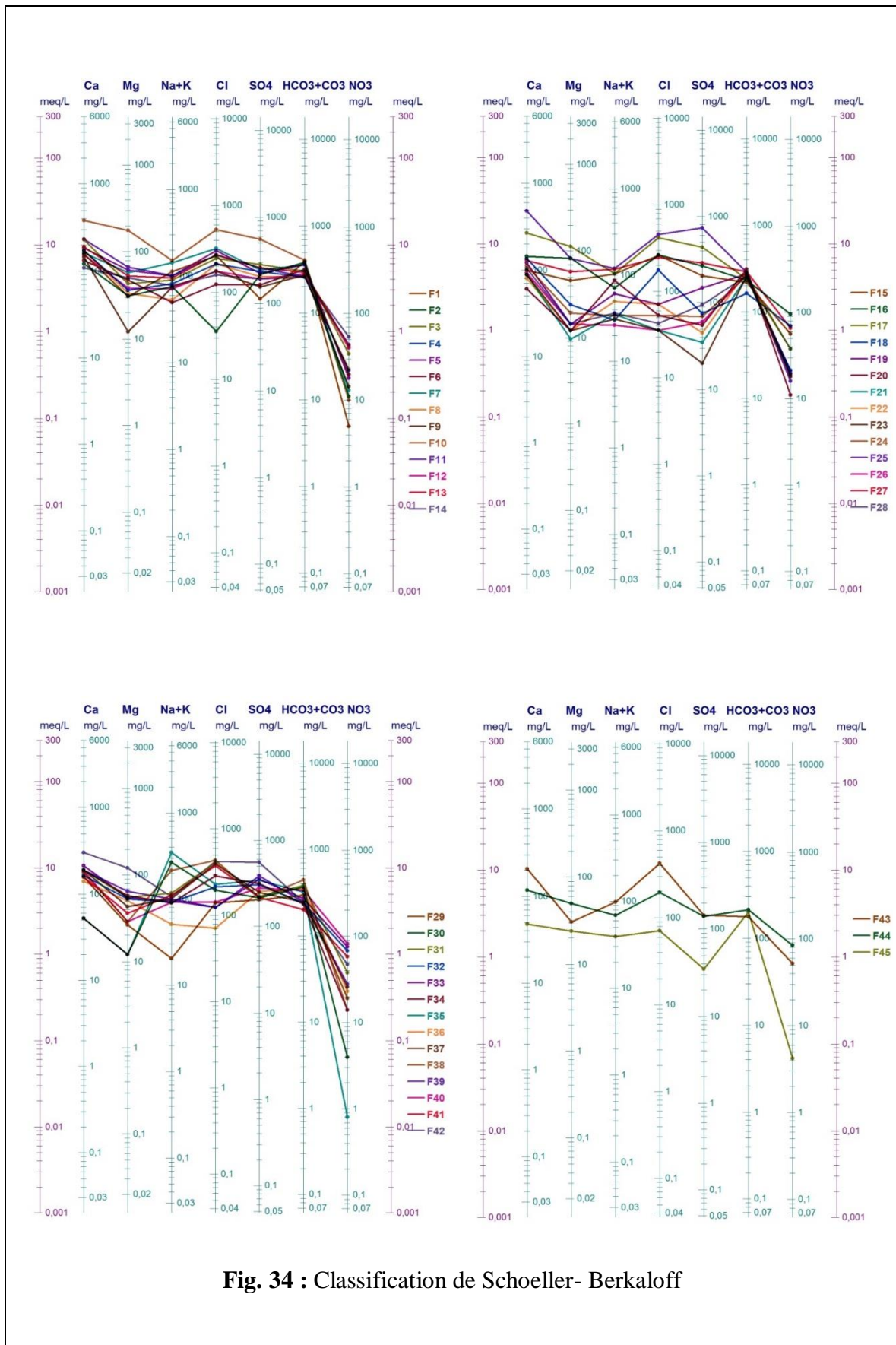


Fig. 34 : Classification de Schoeller- Berkaloff

3.4. Faciès caractéristiques

Afin d'avoir une idée sur la répartition et l'évolution des faciès chimiques et pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région d'étude. Les rapports caractéristiques : Cl/HCO_3 , Na/Ca et Cl/SO_4 , Na/Ca , sont utilisés.

L'examen des deux relations des rapports caractéristiques nous a permis de révéler la dominance des ions chlorures, sulfatés et bicarbonatés avec le pôle cationique calcique, ce qui explique que l'origine de ces eaux est de nature diverse (Fig.35).

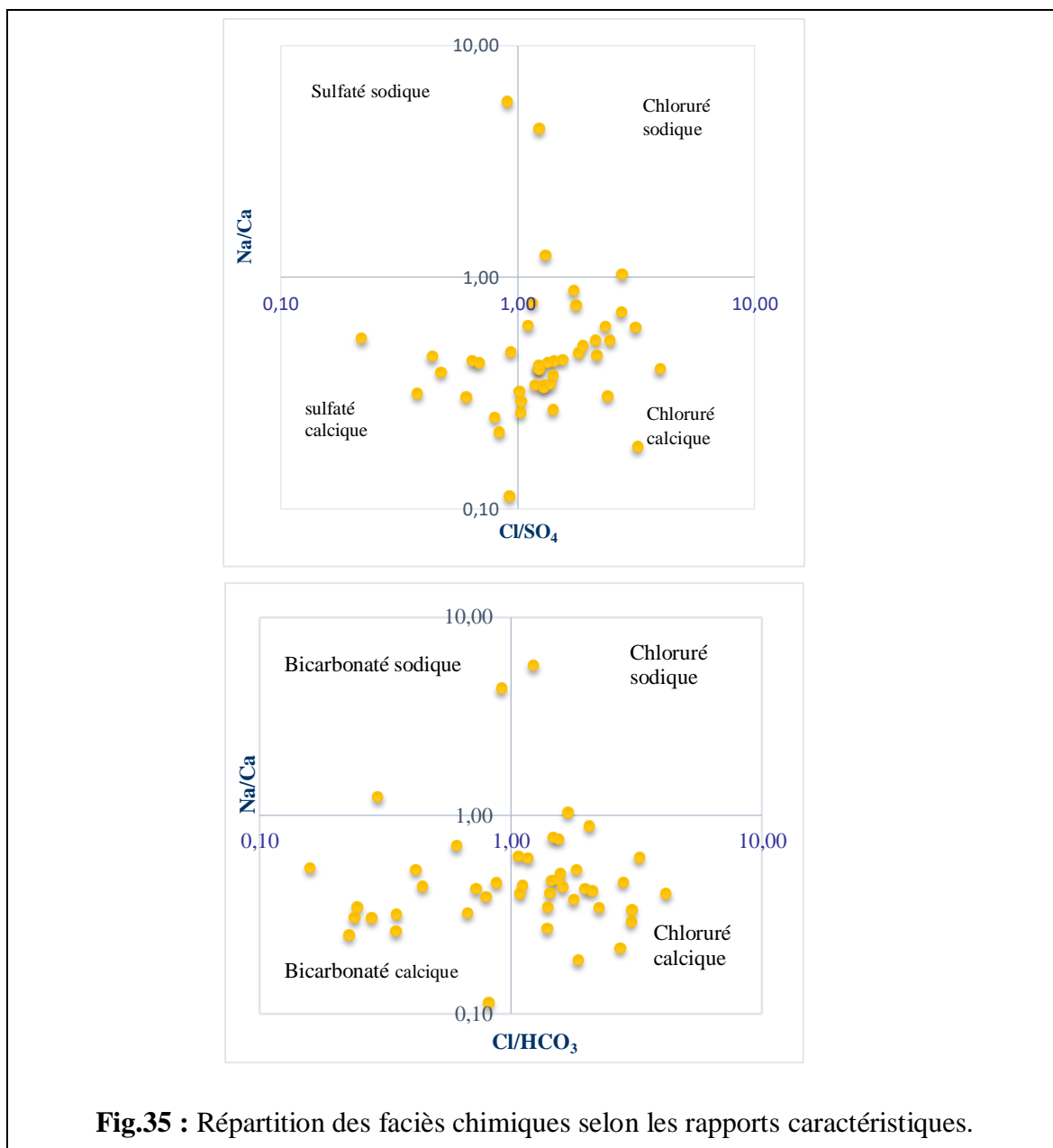


Fig.35 : Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques.

3.5. Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté les éléments majeurs en fonction de chlorure. Ce dernier est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux et constitue un traceur de mélange (Fetter, 1993 in Hsissou, 1999).

La disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce - eau salée (eau de pluie - eau de mer) peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange.

La figure (36) montre la relation entre les chlorures et les éléments majeurs (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} et SO_4^{2-}) des points d'eau prélevés dans les différentes zones de la région d'étude.

Le graphe Cl^- contre Na^+ montre que tous les points se trouvent en dessous de la droite de mélange. Étant donné que la teneur en Na^+ devrait équilibrer la teneur en Cl^- , le déficit en Na^+ est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère et se traduisant par une adsorption de Na^+ et une libération de Ca^{2+} .

La relation entre Mg^{2+} et Cl^- montre une parfaite concordance avec la droite des indices de saturation qui montre un équilibre géochimique entre la solution et le minérale ; ainsi les points alignés sur la droite de mélange traduisent un phénomène de dissolution du magnésium résultant de l'interaction eau-roche.

La relation entre SO_4^{2-} et Cl^- montre que la quasi-totalité des points se trouve au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée. L'enrichissement des points en sulfates est lié à la dissolution du gypse, et/ou à une contamination d'origine agricole (retour d'eau d'irrigation).

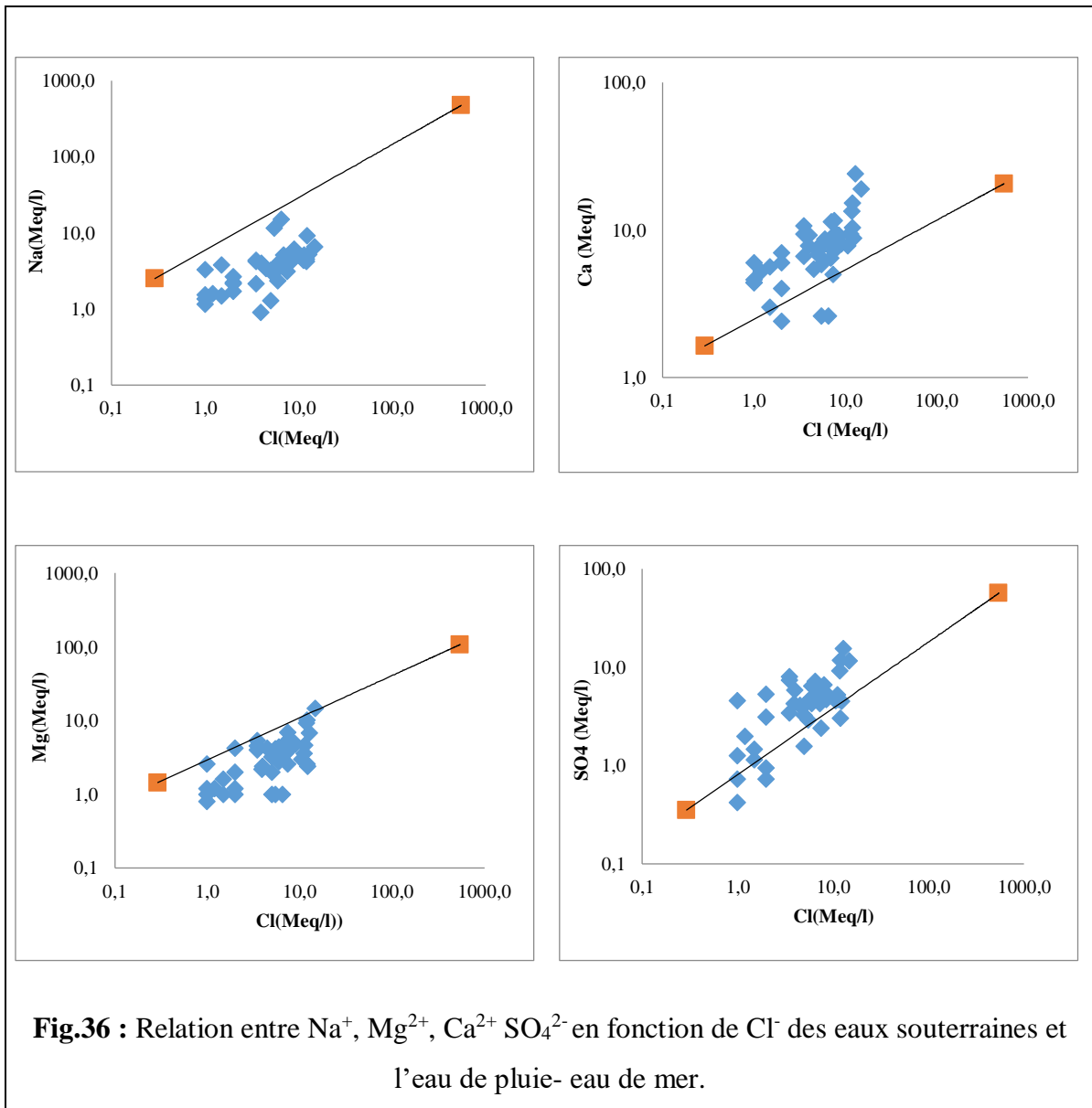


Fig.36 : Relation entre Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} SO_4^{2-} en fonction de Cl^- des eaux souterraines et l'eau de pluie- eau de mer.

3.6. Etude des rapports caractéristiques

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité en réaction. Ces rapports donnent de précieuses indications sur l'alimentation et la circulation des eaux souterraines, elle permet aussi de voir l'évolution des eaux d'un stade à un autre pendant leur trajet souterrain.

3.6.1. Le rapport caractéristique (rNa^+ / rCl^-)

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites. D'après la carte du rapport rNa^+ / rCl^- (Fig.37) nous observons que pour la majorité de la plaine on a une dominance des chlorures ceci est probablement dû au lessivage des terrains salifères d'un côté et l'influence de la salinité de Garaet El Tarf d'un autre côté. Dans la partie sud-ouest et sud-est, il y a une dominance du sodium près du massif carbonaté.

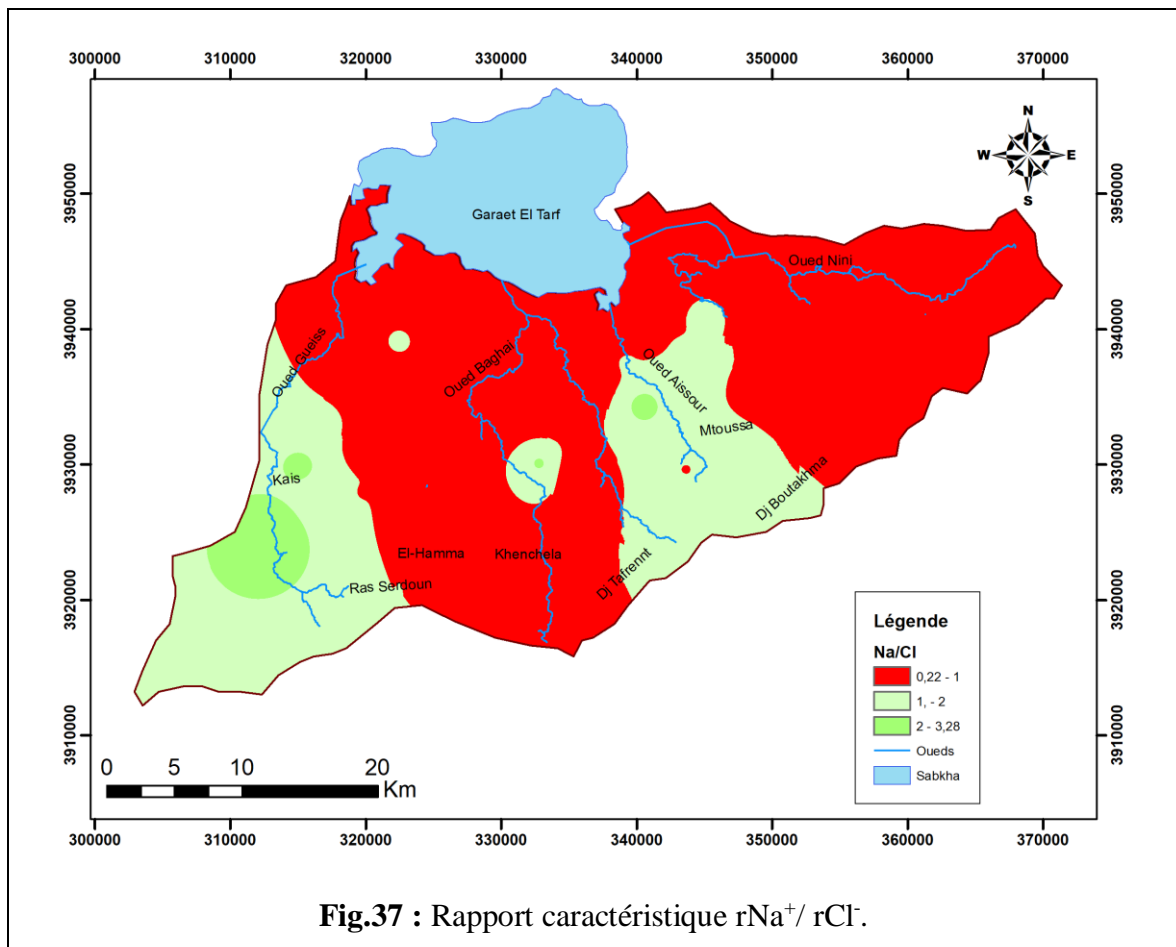
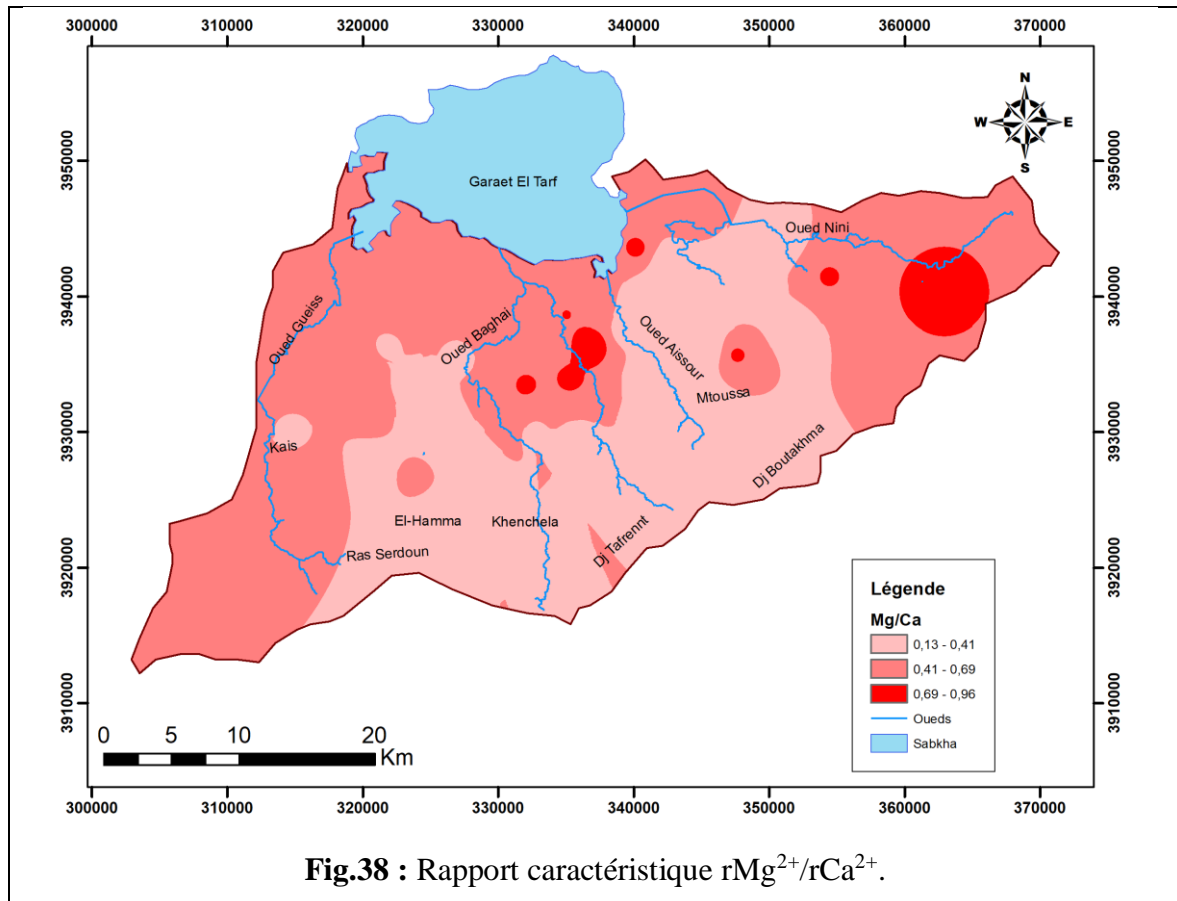


Fig.37 : Rapport caractéristique rNa^+ / rCl^- .

3.6.2. Le rapport caractéristique (rMg^{2+}/rCa^{2+})

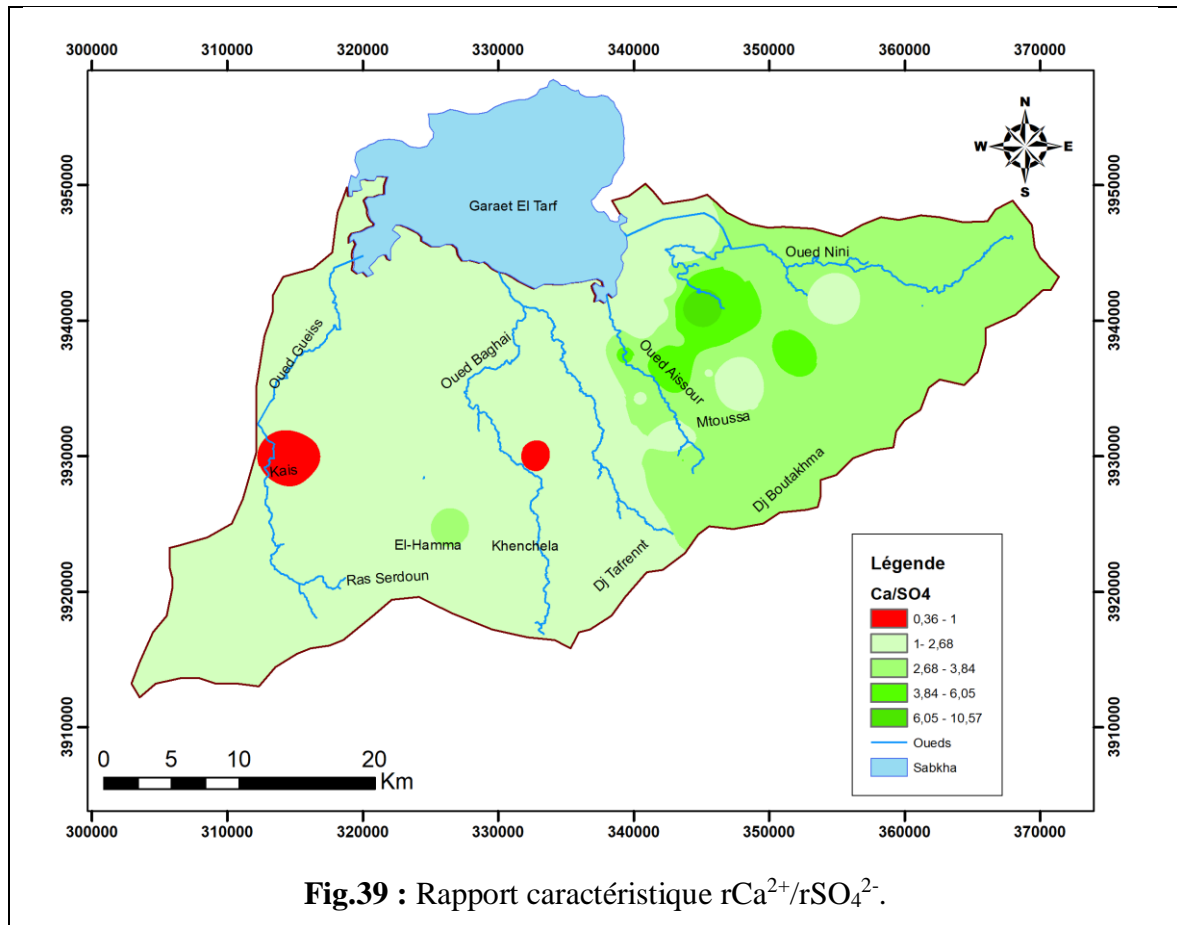
Le rapport rMg^{2+}/rCa^{2+} est inférieur à 1 pour l'ensemble des points situés dans la plaine (Fig.38) ce qui traduit un enrichissement en calcium par désorption des roches carbonatées.



3.6.3. Le rapport caractéristique (rCa^{2+}/rSO_4^{2-})

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, on aura donc la prédominance des sulfates, ce qui apparaît près du Oued Gueiss et Baghai, ceci indique qu'il existe une contamination de la nappe par les oueds (Fig.39).

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, c'est-à-dire une prédominance de calcium, ceci apparaît dans la majorité de la plaine due au lessivage des terrains carbonatés.

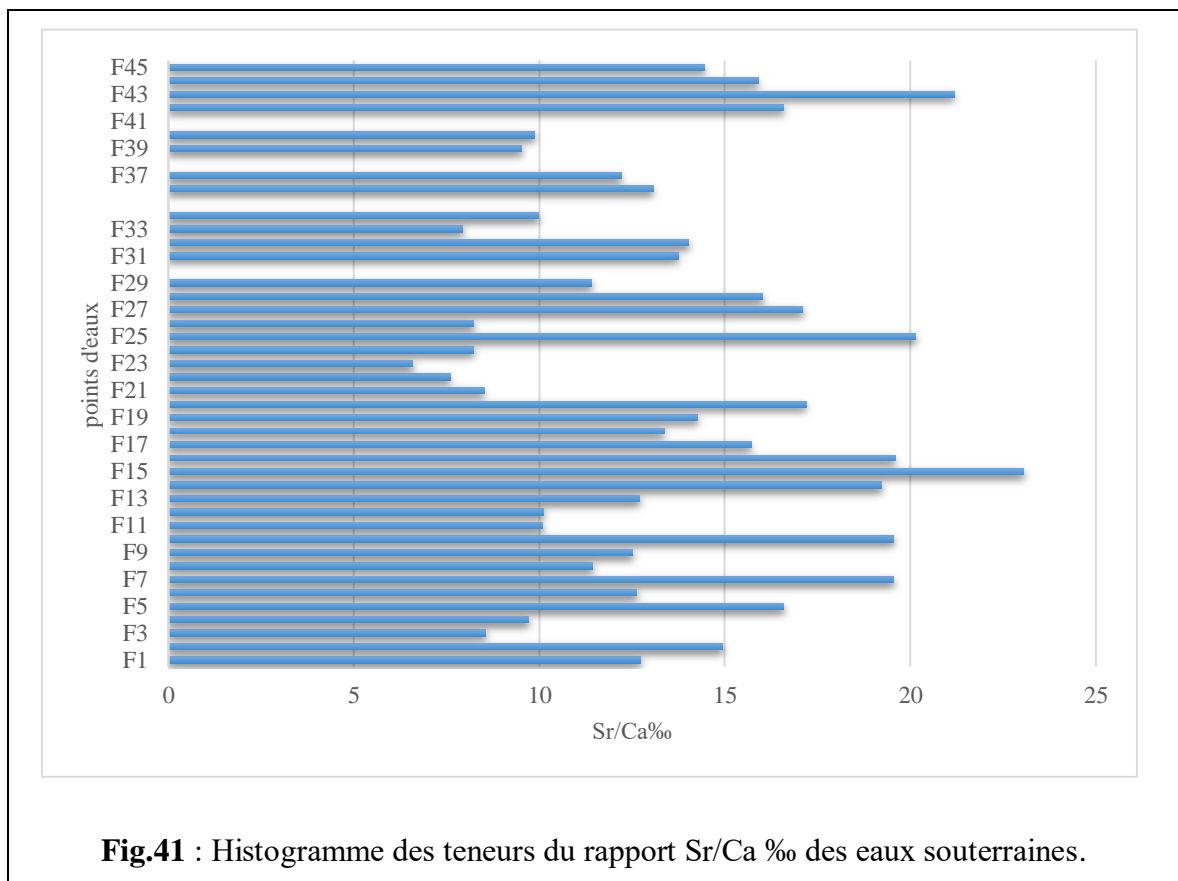
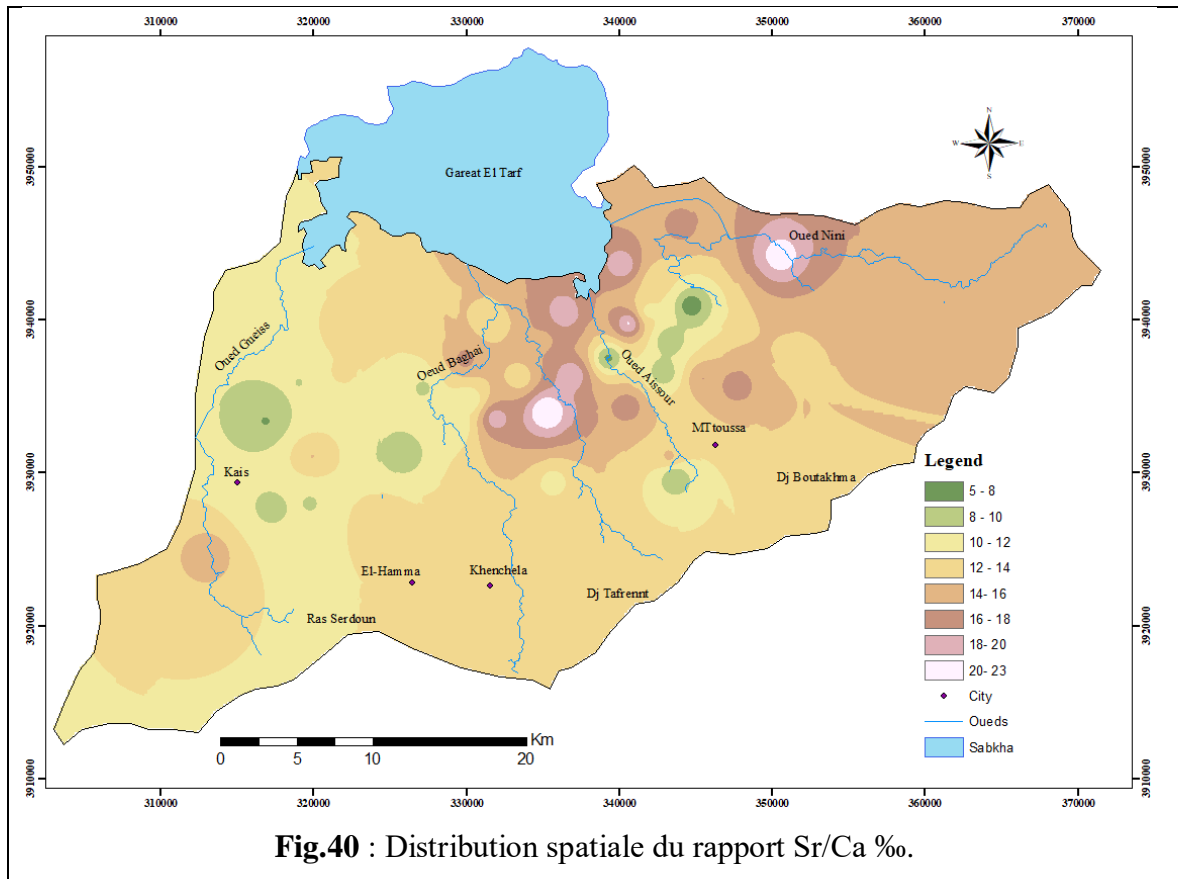


3.7. Etude du strontium (Sr^{+2})

Le strontium (Sr^{+2}) est un élément lié aux évaporites. Il est très faiblement intégré dans le réseau des carbonates et est peu adsorbé par les argiles. Les fortes teneurs en Sr^{+2} dans les eaux ne s'expliquent que par la dissolution de la Célestite ($SrSO_4$), minéral associé au gypse. Il forme ainsi un bon marqueur de la présence des évaporites (Carre, 1975).

Le strontium permet ainsi de distinguer les sulfates provenant de l'oxydation de sulfures (teneurs faibles) de ceux issus de la dissolution des évaporites (teneurs élevées). (Abdesselem et al.2000).

Le rapport $Sr^{2+} / Ca^{2+}\%$ est caractéristique d'une origine évaporitique, s'il est égale ou supérieur à 1% (Bakalowicz, 1988). Il est supérieur à 5 % dans les évaporites du Trias alpin (Meybeck, 1984) dans le trias évaporitique non affleurant (Abdesselem et al, 2000). Toutes les eaux souterraines de la plaine montrent des rapports Sr^{2+} / Ca^{2+} très élevés (> 5%). Il semblerait que les évaporites du trias contribuent au chimisme des eaux souterraines (Meybeck, 1984) et possèdent un chimisme d'origine évaporitique. Ce rapport atteint un maximum de 23% au centre et en allant vers l'Est de la plaine (Fig.40).



Les valeurs du rapport ionique molaire $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (Fig.41) nous permettent de distinguer deux groupes :

- Le premier groupe, dont le rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ rassemble les eaux des forages implantés dans le remplissage Plio-Quaternaire. Le rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ oscille entre 5 et 10 ‰ avec des teneurs en Sr^{2+} de l'ordre de 1.27 à 4.27 mg/l. Dans ce secteur les eaux souterraines circulent donc au contact d'évaporites dont l'extension est certainement limitée car les teneurs en Sr^{2+} restent faibles. L'argile salifère a précisément été rencontrée par certains forages dans les alluvions anciennes (CGG, 1970 ; Houha, 1996 et Guiraud, 1973).

- Le deuxième groupe, correspond aux eaux riches en SO_4^{2-} présentant un rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ supérieur à 10‰, ce qui le distingue bien des eaux précédentes. Les rapports obtenus présentent une variation importante (10-23‰) avec des teneurs élevées en Sr^{2+} (1.52-21.18mg/l) en relation probable avec les marnes évaporitiques cénomaniennes, qui témoignent donc de la diversité des formations évaporitiques de la région et/ou de modifications ultérieures (mélange d'eau, précipitations de carbonates, etc.) (Hsissou et al, 1996).

3.8. Indice de saturation

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère, considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997). L'utilisation du programme géochimique PHREEQC (Plummer et al, 1976), nous a permis de calculer l'indice de saturation de l'anhydrite, l'aragonite, la calcite, la dolomite, du gypse et de l'halite. (Amrani et Hinaje, 2014).

L'indice de saturation atteint une valeur zéro, quand la saturation est en équilibre avec une phase solide. Un indice de saturation positif indique une sursaturation et un indice négatif indique une sous-saturation vis-à-vis des minéraux. Sachant que ces derniers peuvent influencer la composition chimique de l'eau.

Les indices de saturation de certaines phases minérales communes montrent clairement que les eaux souterraines sont généralement sursaturées en ce qui concerne la plupart des phases minérales carbonatées (Fig.42) (Aragonite, dolomite et calcite) qui probablement responsables de la composition hydrochimique. On note une sous-saturation avec un ordre décroissant de l'Halite jusqu'au Gypse (minéraux évaporitiques) qui se trouve proche des points de saturation (Fig.43).

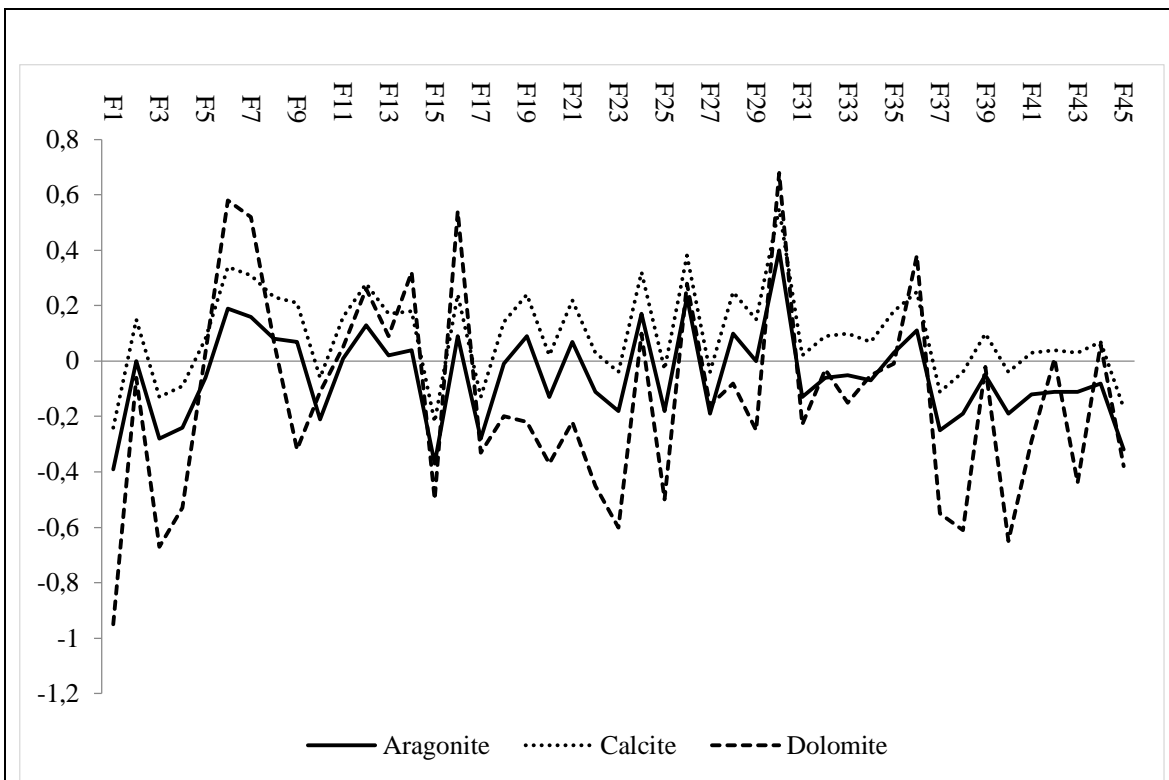


Fig.42 : Evolution spatiale des indices de saturation des minéraux carbonatés.

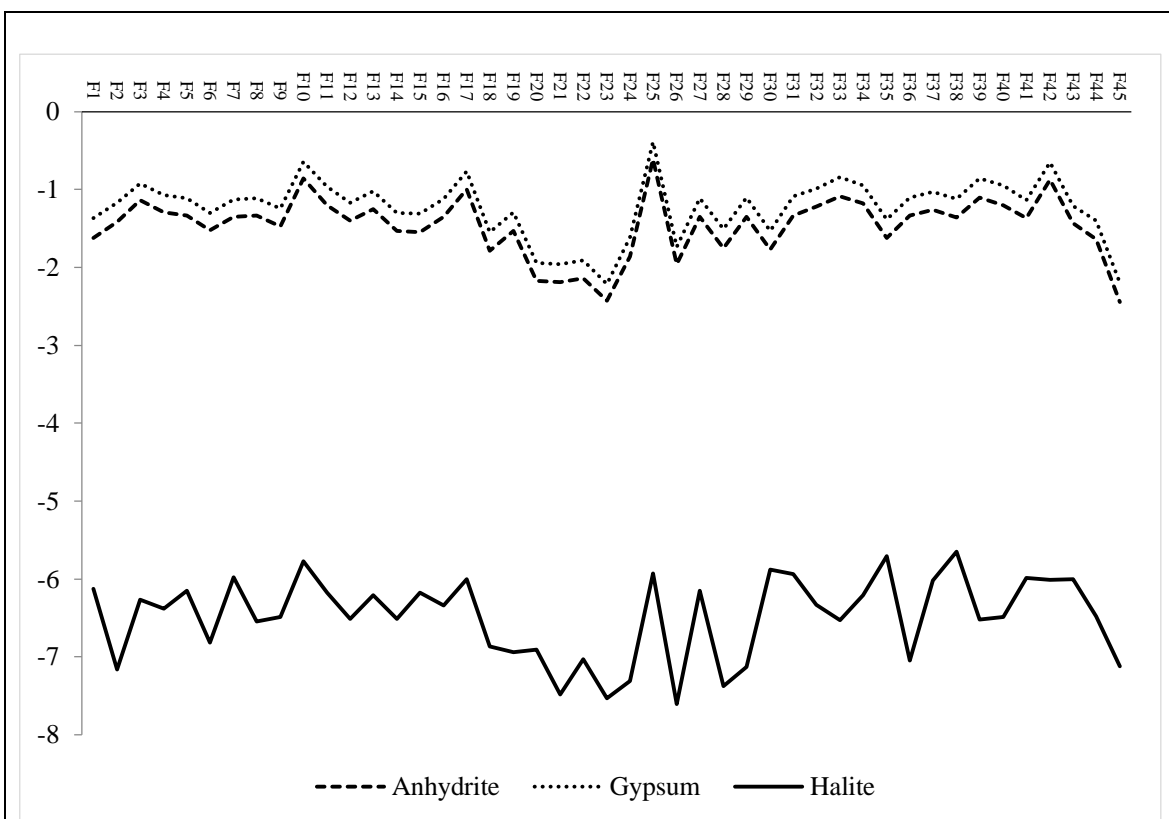


Fig.43: Evolution spatiale des indices de saturation des minéraux évaporitique.

3.9. Indice d'échange de base (i.e.b)

Pour permettre de suivre le chimisme des eaux de l'aquifère de la zone d'étude et de définir le sens d'échange ionique entre l'eau et les terrains encaissants, l'indice d'échange de base (i.e.b) est utilisé. L'expression de cet indice est la suivante :

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

- Ce rapport est positif quand la teneur en sodium et en potassium est faible (Fig.44). En d'autres termes quand l'eau a été faiblement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables. Ces échanges d'ions contenus dans la matrice avec ceux présents dans la solution sont très variables et dépendent entre autres, de la nature du substrat.

- Ce rapport est négatif quand la teneur en sodium et en potassium est élevée, c'est-à-dire que l'eau a été fortement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables.

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

De même, l'analyse du diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ (Fig.45) révèle qu'environ 33.33 % des eaux ont subi le processus d'échange de bases, 15.55 % des eaux présentent un excès en Ca^{2+} et en Na^+ et 51.11 % des points présentent l'état naturel.

En résumé, malgré la spécificité des conditions hydrogéologiques du secteur d'étude, l'indice d'échange de base (i.e.b) et l'analyse du diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ ont permis de constater que la moitié des échantillons présentent un excès en calcium et en sodium. L'autre moitié présente l'état naturel.

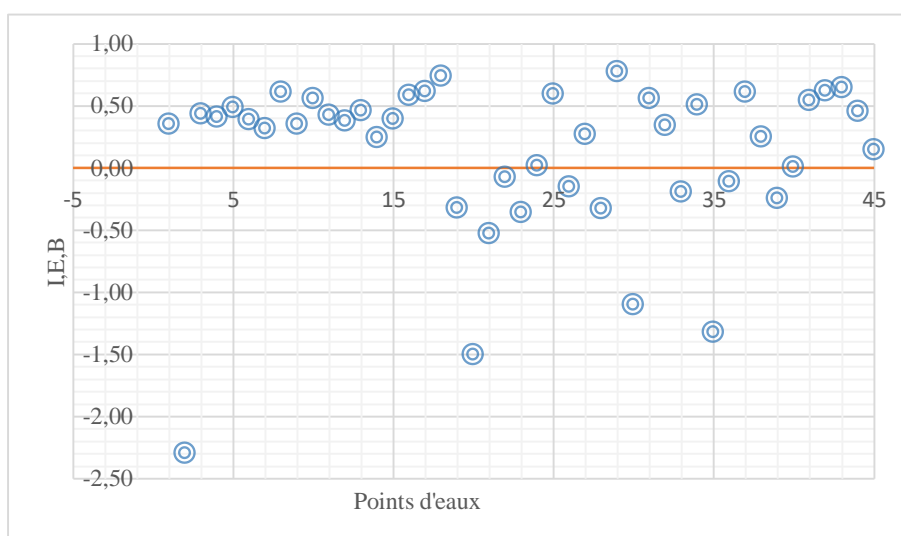


Fig.44 : représentation graphique de l'indice d'échange de base.

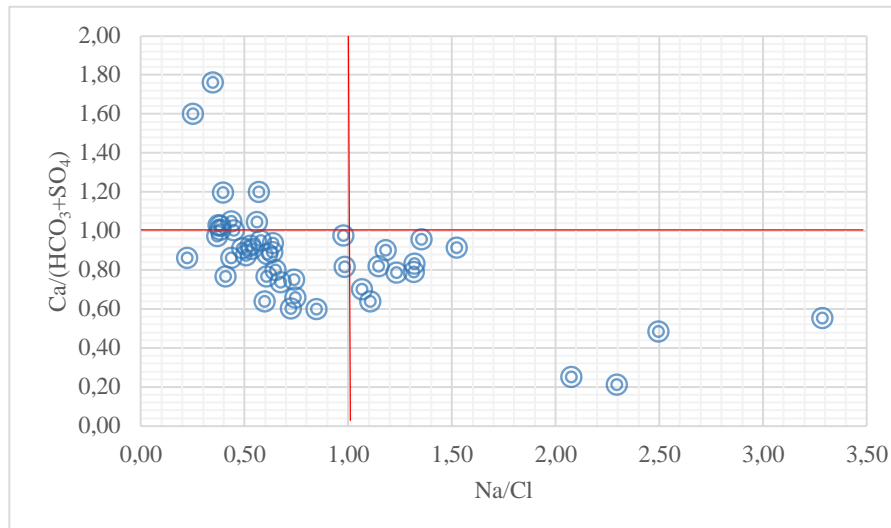


Fig.45 : Représentation de $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+/\text{Cl}^-$.

3.10. Etude du biseau salée

3.10.1. Origine de la salinité

La détermination de l'origine de la salinité des eaux souterraines dans la nappe est difficile en raison de l'existence de plusieurs processus (naturels ou anthropogéniques) qui interviennent dans l'augmentation de la concentration des éléments chimiques.

3.10.2. Détermination de la salinité par les rapports caractéristiques :

Dans cette étude, on a utilisé deux rapports caractéristiques ($\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ -CE) et ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$)-CE) permettant de voir l'évolution des éléments chimiques en fonction de la conductivité et la classification de YELLE, 2003.

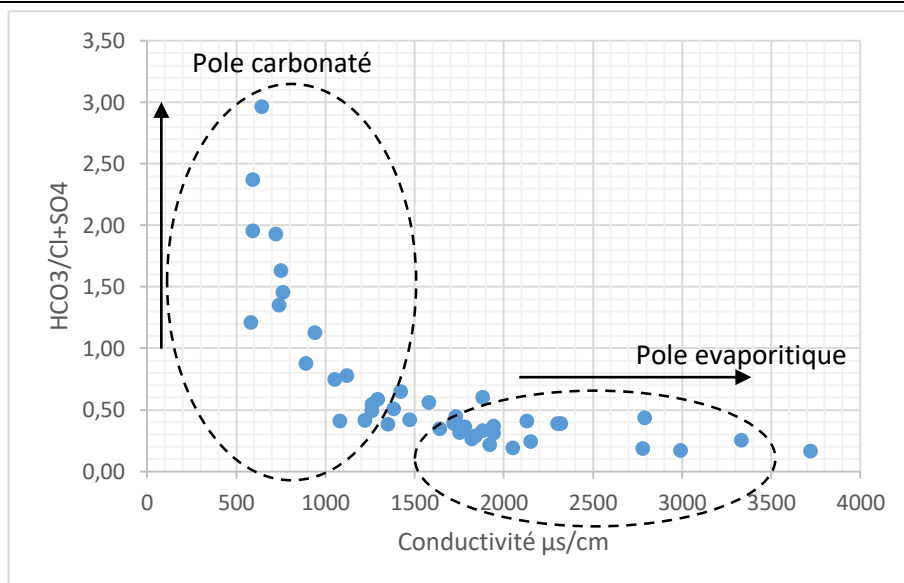
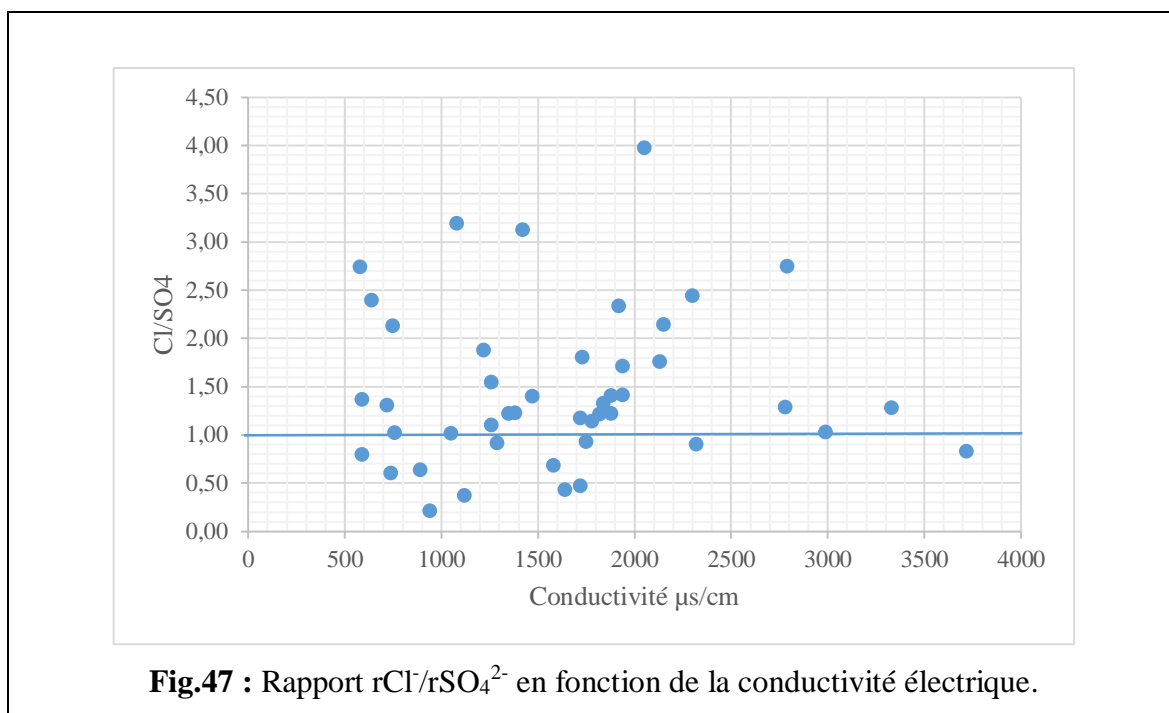


Fig. 46 : Rapport caractéristique $r\text{HCO}_3^-/r(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de la CE.

La figure (46) montre une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité, deux pôles sont observés, l'un bicarbonaté caractérisé par une dominance des ions HCO_3^- et des conductivités inférieures à $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Il englobe 46,66 % des points d'eau. L'autre représente le pôle évaporitique et affirme une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($> 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$) et rassemble 53,33 % des points.



Ce rapport permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la dissolution des ions évaporitiques (Cl^- marqueur de l'halite et SO_4^{2-} marqueur du gypse) en fonction de la conductivité. Le rapport des points sur le graphique (Fig.47) nous montre que 73.33 % des points d'eau présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une dominance des ions salifères par rapport à ceux des gypses.

Classification de YELLE, 2003 :

Tableau.20 : Critères d'identification de l'origine de la salinité (Yelle, 2003).

$\text{Cl}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^-$	Intrusion saline
$\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 18$	
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$	Présence de gypse (CaSO_4) ou de calcite (CaCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = 1$	Présence de dolomie (CaMgCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1$	Marque de l'eau de mer (intrusion saline) ou échange de base
$\text{K}^+ / \text{Na}^+ = 1$	Terrain cristallin

Les résultats de classification des échantillons selon les critères proposés par YELLE, 2003 (Tableau.20) sont représentés au tableau (21), ci-dessous :

Tableau.21 : Classification des échantillons selon les critères proposés par Yelle, 2003.

Critère	Numéro d'échantillon
$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	F3,F4,F10,F11,F13,F15,F16,F17,F27,F34, F37, F41,F42 ,F43.
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$	F1,F2,F3,F4,F8,F9,F11,F12,F13,F18,F19,F20,F21,F22,F23,F24,F25,F26,F28,F29,F30,F31,F33,F35,F37,F38,F40,F41,F43.
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = 1$	
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1$	

Les résultats obtenus après la classification montrent que selon le rapport $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ les échantillons F3,F4,F10,F11,F13,F15,F16,F17,F27,F34, F37, F41,F42 et F43 ont une salinité d'origine de sebkha.

Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ montre que 64.44% des échantillons acquièrent leur salinité de la présence de gypse (CaSO_4) ou de calcite (CaCO_3).

3.10.3. L'influence de Sebkhha (Garaat el Tarf)

Pour mettre en évidence l'influence de Sebkhha sur la salinité des eaux de la nappe, nous avons utilisé trois tracés I, II et III pour voir l'évolution spatiale des Cl et la CE en fonction de la distance au Sebkhha, (Fig.48).

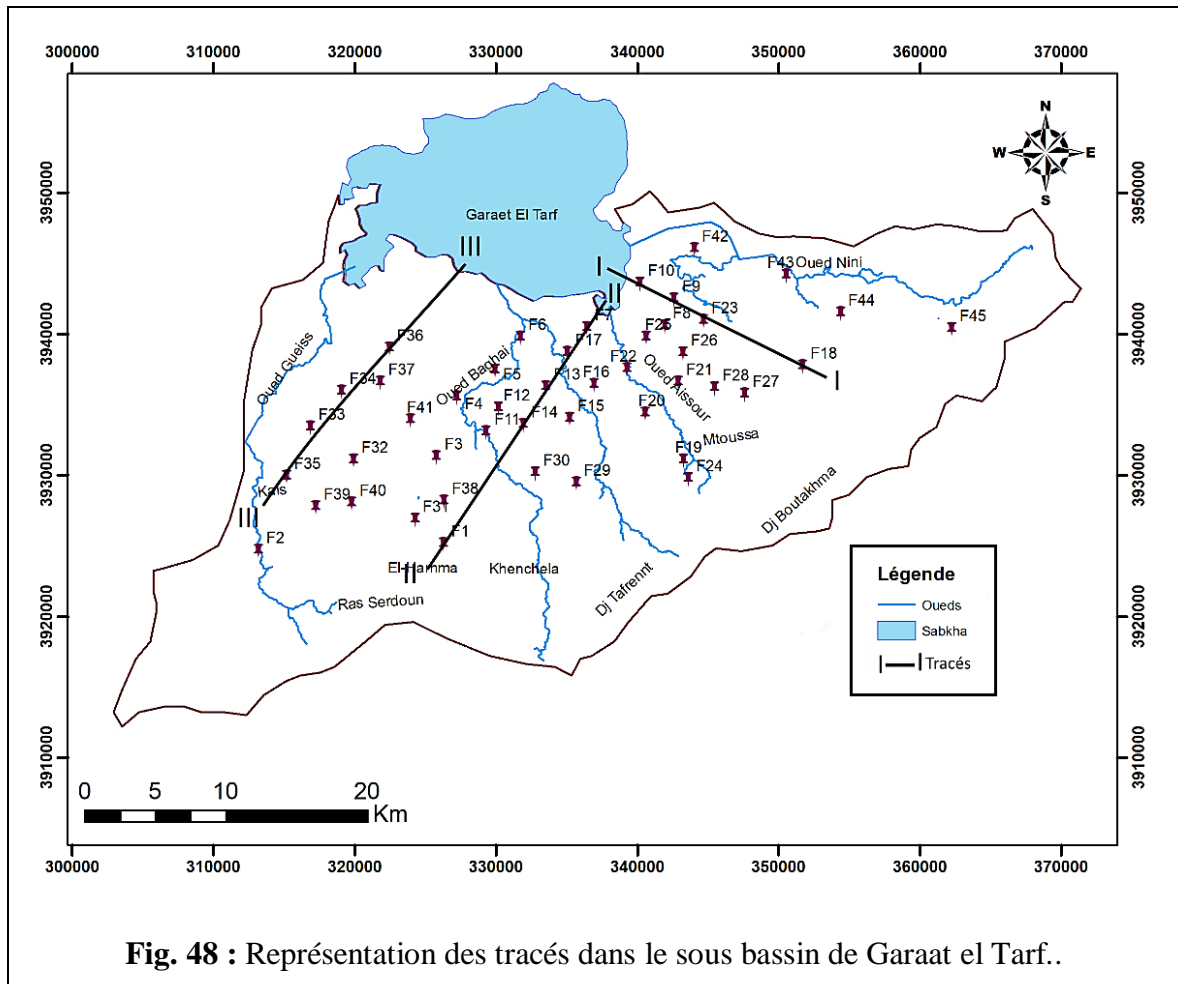


Fig. 48 : Représentation des tracés dans le sous bassin de Garaat el Tarf..

3.10.3.1. Tracé I-I

Les Chlorures

Ce tracé est de direction NW-SE. On remarque une diminution des concentrations en chlorures en fonction de la distance par rapport au sebkha (Fig.49). Les concentrations varient de 4260 mg/l au niveau de sebkha et 36 mg/l au point F 23 sur une distance de 6810 m puis elle augmente à 178 mg/l au point F18 sur une distance de 14485 m. Ceci permet de mettre en évidence l'influence de salinité de sebkha sur les eaux souterraines.

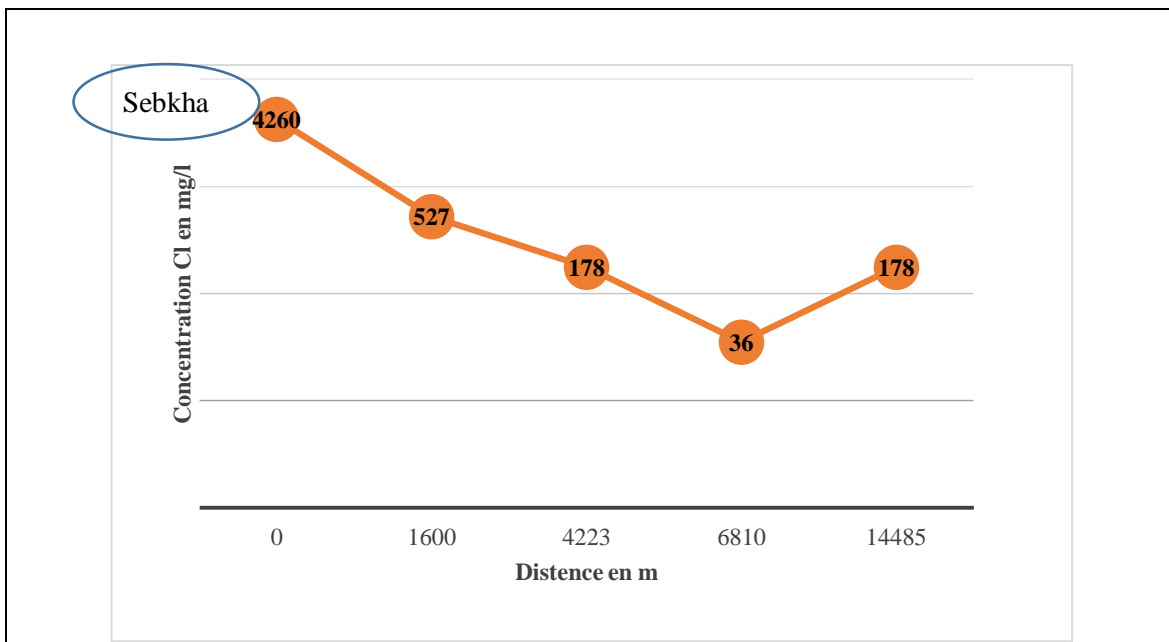


Fig.49 : Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé I-I

La conductivité électrique CE

Ce tracé est de direction NW-SE. On remarque une diminution des concentrations de conductivités en fonction de la distance par rapport au sebkha (Fig.50). Les concentrations varient de 143000 mg/l au niveau de sebkha et 640 mg/l au point F23 sur une distance de 6810 m puis elle augmente à 1080 mg/l au point F18 sur une distance de 14485 m.

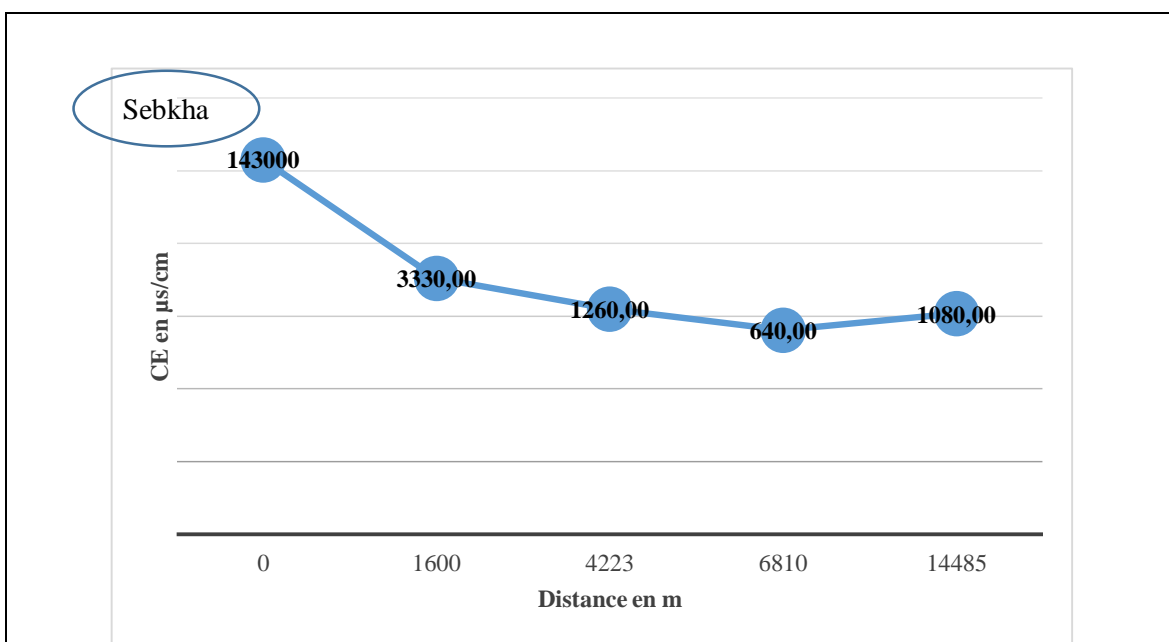


Fig.50 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé I-I.

3.10.3.2. Tracé II-II

✚ Les Chlorures

Ce tracé est de direction NW-SW. On remarque une diminution des chlorures en fonction de la distance par rapport au sebkha (Fig.51). Les concentrations varient de 4260 mg/l au niveau de sebkha et 160 mg/l au point F14 sur une distance de 10374 m puis elle augmente à 266 mg/l au point F1 sur une distance de 20536 m.

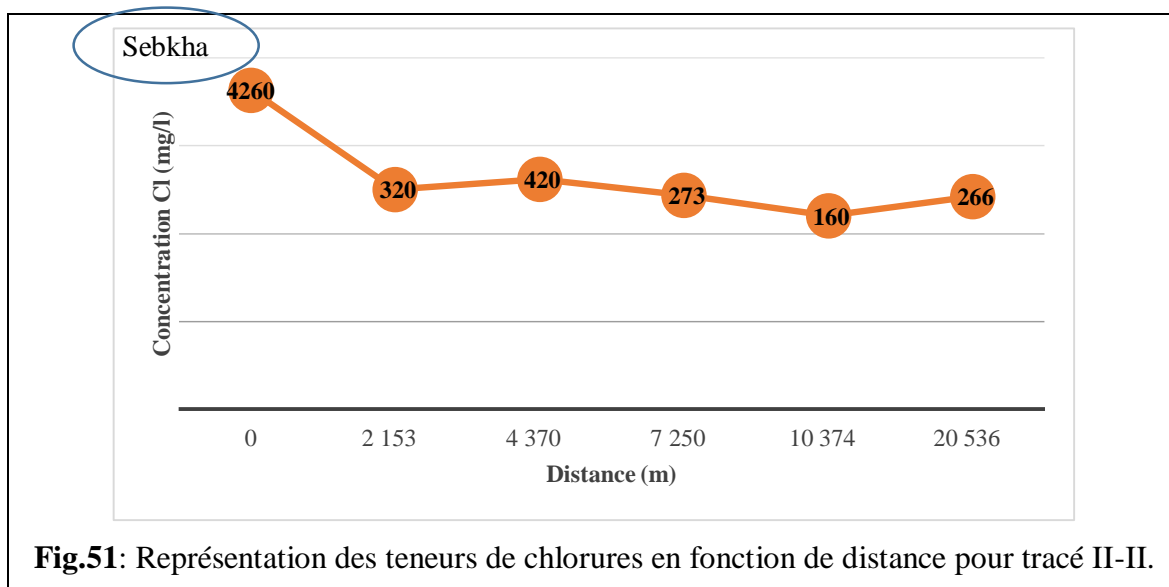


Fig.51: Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé II-II.

✚ La conductivité électrique :

Ce tracé est de direction NE-SW. En remarque une diminution des concentrations de conductivités en fonction de la distance par rapport au sebkha (Fig.52). Les concentrations varient de 143000 $\mu\text{S/cm}$ au niveau de sebkha et 1260 $\mu\text{S/cm}$ au point F14 sur une distance de 10374 m puis elle augmente à 1420 $\mu\text{S/cm}$ au point F1 sur une distance de 20536 m.

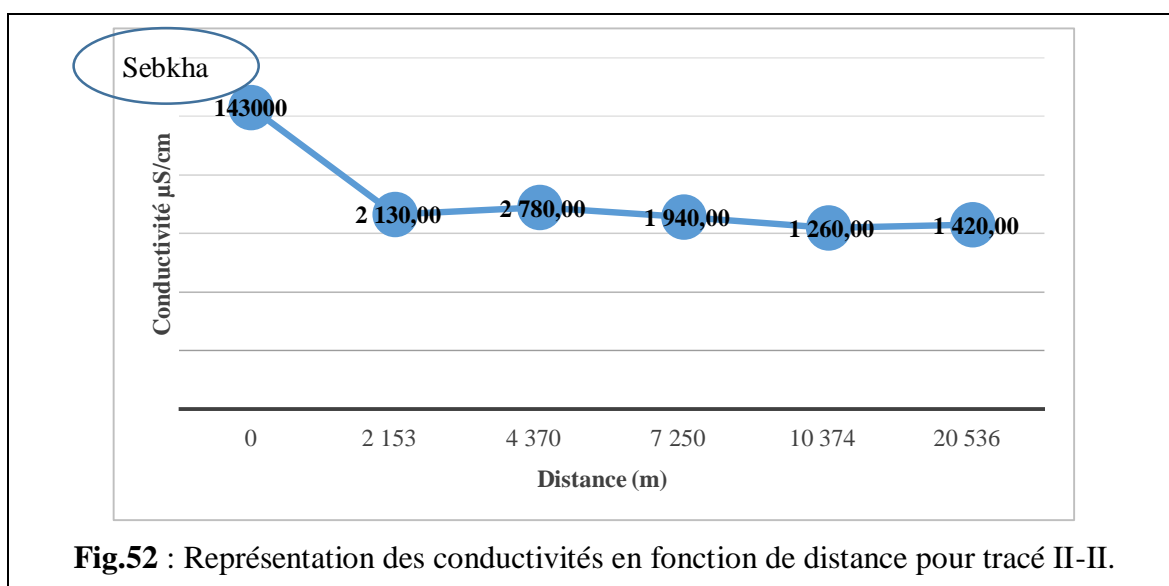


Fig.52 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé II-II.

3.10.3.3. Tracé III-III

✚ Les Chlorures :

Ce tracé est de direction NW-SW. Les concentrations des chlorures diminuent de 143000 mg/l au niveau de sebkha à 71 mg/l au point F36 puis elles augmentent à 284 mg/l au point F 34 sur une distance de 13550 m. Ceci est interprété par la faible influence du sebkha sur les eaux souterraines(Fig.53).

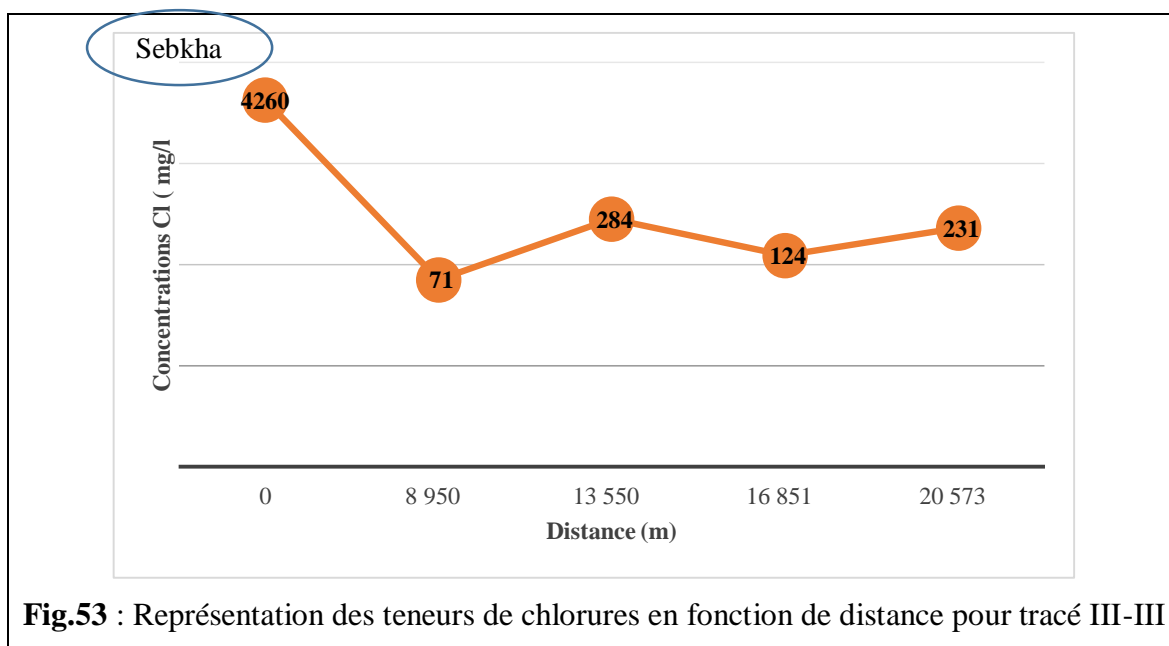


Fig.53 : Représentation des teneurs de chlorures en fonction de distance pour tracé III-III

✚ La conductivité électrique :

Comme pour les chlorures on remarque une diminution drastique des conductivités en fonction de la distance de sebkha. Ceci confirme la faible influence de cette dernière(Fig.54).

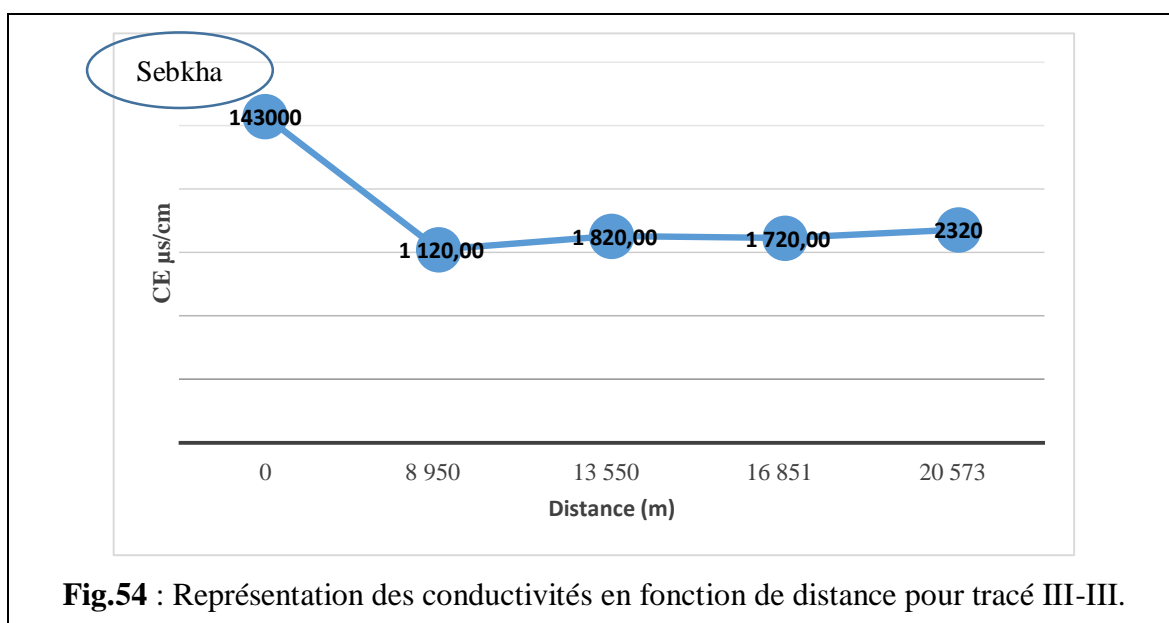
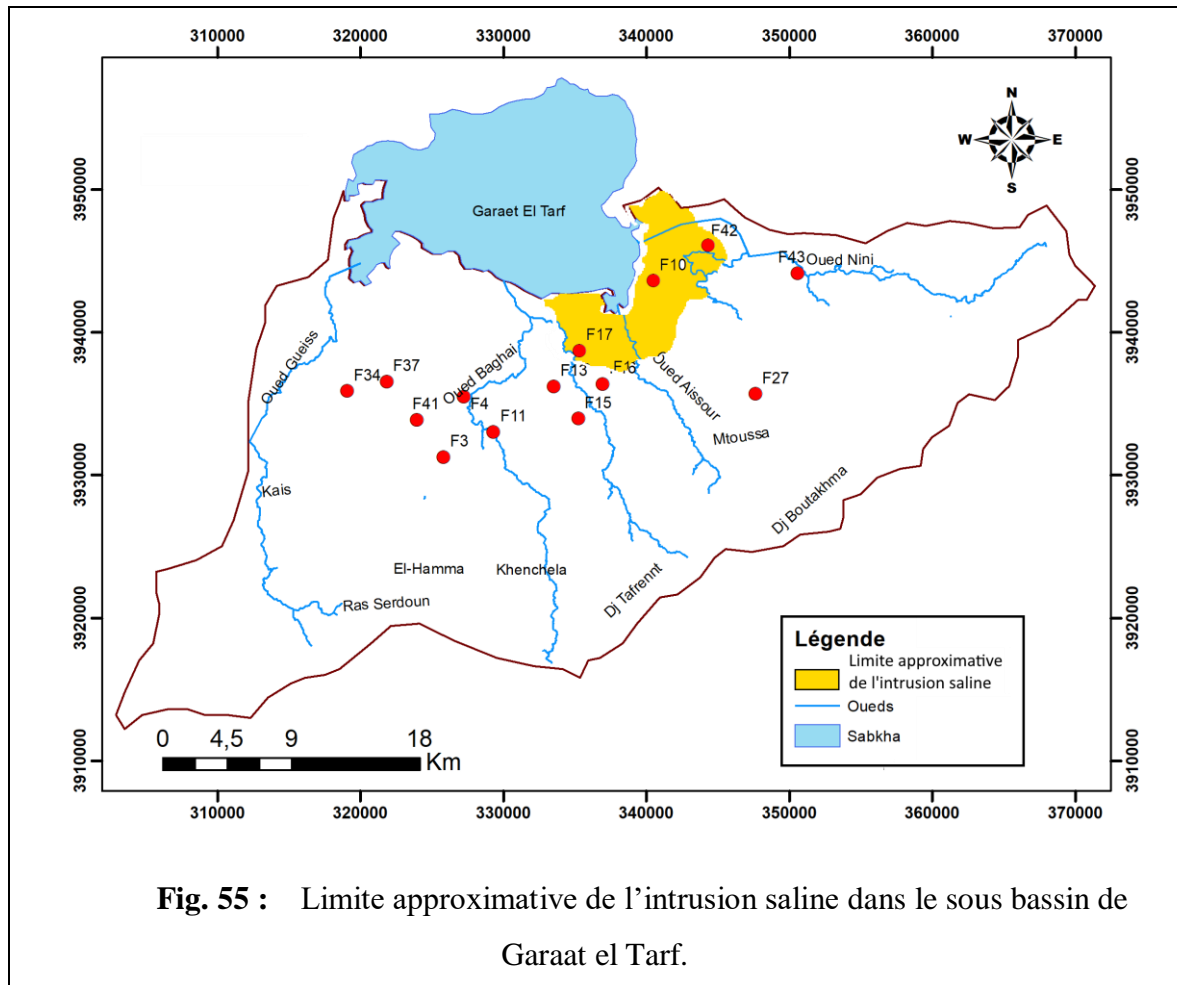


Fig.54 : Représentation des conductivités en fonction de distance pour tracé III-III.



La figure (55) montre que l'intrusion saline est bien localisée au sud-est de sebkha où il y a des concentrations élevées des éléments chimiques.

3.11. Analyse statistique

L'analyse factorielle est une technique d'analyse multivariée, qui tire un sous-ensemble de variables non corrélées appelées facteurs qui expliquent la variance observée dans l'ensemble de données originales (Anazawa et Ohmori, 2005 ; Brown, 1998).

L'analyse factorielle est utilisée pour découvrir la structure latente d'un ensemble de variables. En termes techniques, l'analyse factorielle commune représente la variance commune des variables, à l'exclusion de la variance unique, et est donc une approche corrélation focalisée cherchant à reproduire l'inter corrélation entre les variables. D'autre part, les composants (de l'ACP) reflètent à la fois commune et unique de la variance des variables et peut être considérée comme une approche variance focalisée qui reproduit à la fois la variance variable totale avec tous les composants ainsi que les corrélations.

L'ACP est beaucoup plus couramment utilisé que l'analyse factorielle principale (AFP). Cependant, il est commun aux 'facteurs' d'utilisation l'un pour l'autre avec des

‘composants’ dans l'analyse multivariée. L'analyse factorielle peut être réalisée sur n'importe quel type de données scientifiques pour établir un modèle de variation entre les variables ou de réduire les grands ensembles de données dans les facteurs pour une manipulation facile de l'interprétation.

Le nombre total de facteurs produits à partir d'une analyse factorielle typique indique le nombre total de sources possibles de variation des données. Les facteurs sont classés par ordres de mérite. Le premier facteur ou composant a la somme de vecteur propre la plus élevée et représente la source la plus importante de variation des données. Le dernier facteur est le processus le moins important contribuant à la variation chimique. Les chargements de facteur sur les tables de chargements de facteur sont interprétés comme coefficients de corrélation entre les variables et les facteurs (Belkhir, 2011).

3.11.1. Analyse factoriel

Dans cette étude, l'ACP a été appliquée aux données hydrochimiques pour extraire les principaux facteurs correspondant aux différentes sources de variation des données. Ici, L'ACP a été réalisée en utilisant le logiciel XI-STAT (2016), cette méthode statistique a été largement appliquée pour enquêter sur des phénomènes de l'environnement et les processus, hydrogéochimiques et choisir les rapports caractéristiques adéquats.

3.11.2. Matrice des corrélations

La matrice de corrélation issue de cette ACP (Tableau 22), montre que la CE présente une liaison significative (0,564 à 0,914) avec Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- SO_4^{2-} et Sr^{2+} ; ceci traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux. Ca^{2+} et Mg^{2+} présentent une forte corrélation positive entre eux (0,755), indiquant une origine commune. De même que pour Ca^{2+} et SO_4^{2-} (0,84) et SO_4^{2-} et Mg^{2+} (0,772) et Ca^{2+} et Sr^{2+} (0,752) qui possèdent également une très bonne corrélation positive. Les fortes teneurs de Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} , détectées dans certains échantillons peuvent suggérer la dissolution des sels de chlorures et de sulfates tels que le gypse, l'anhydrite, l'halite. La forte liaison qui existe entre les sulfates et le calcium confirme cette tendance.

Tableau.22 : Matrice de corrélation entre les paramètres mesurés.

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Sr	c25 °C	PH	T °C
Ca ²⁺	1											
Mg ²⁺	0,755	1										
Na ⁺	0,083	0,132	1									
K ⁺	0,106	0,162	0,847	1								
HCO ₃ ⁻	0,098	0,094	0,438	0,275	1							
Cl ⁻	0,709	0,662	0,470	0,462	0,130	1						
SO ₄ ²⁻	0,840	0,772	0,410	0,393	0,152	0,652	1					
NO ₃ ⁻	0,081	0,199	-0,211	-0,096	-0,468	0,098	0,086	1				
Sr	0,753	0,592	0,504	0,450	0,203	0,808	0,761	-0,036	1			
c25 °C	0,786	0,714	0,596	0,564	0,228	0,914	0,863	0,069	0,881	1		
PH	-0,761	-0,573	0,041	0,047	-0,258	-0,615	-0,516	-0,011	-0,481	-0,563	1	
T °C	0,327	0,335	-0,183	-0,145	-0,149	0,286	0,166	-0,111	0,223	0,178	-0,310	1

3.11.3. Représentation en composante principale (ACP)

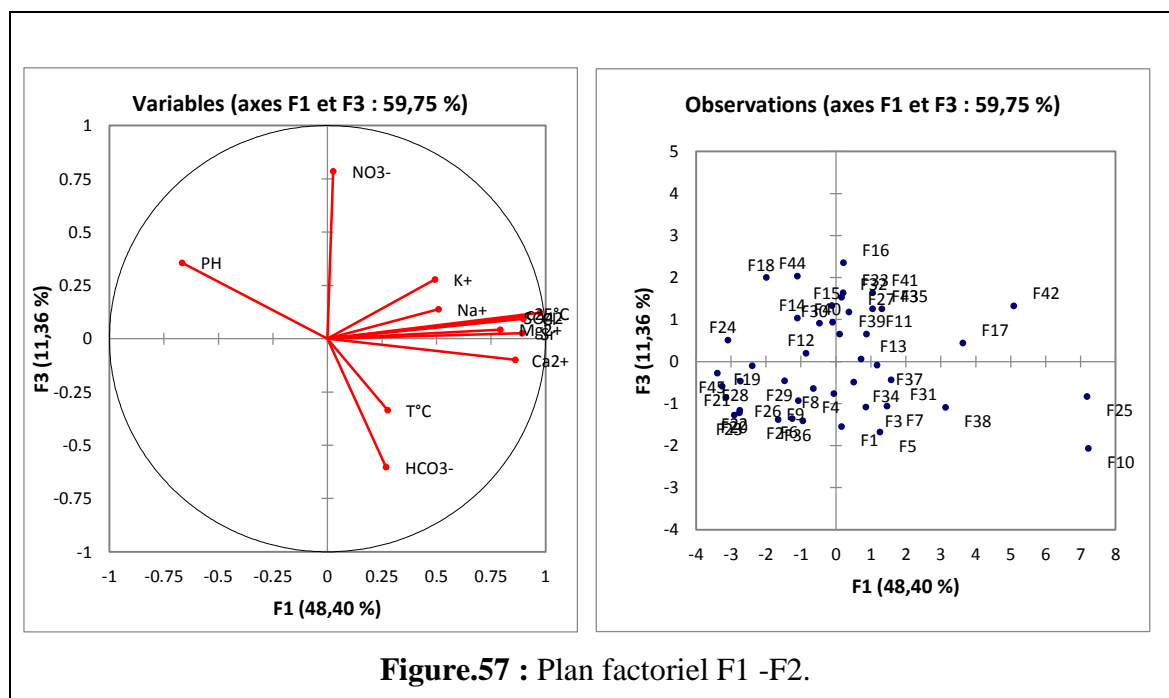
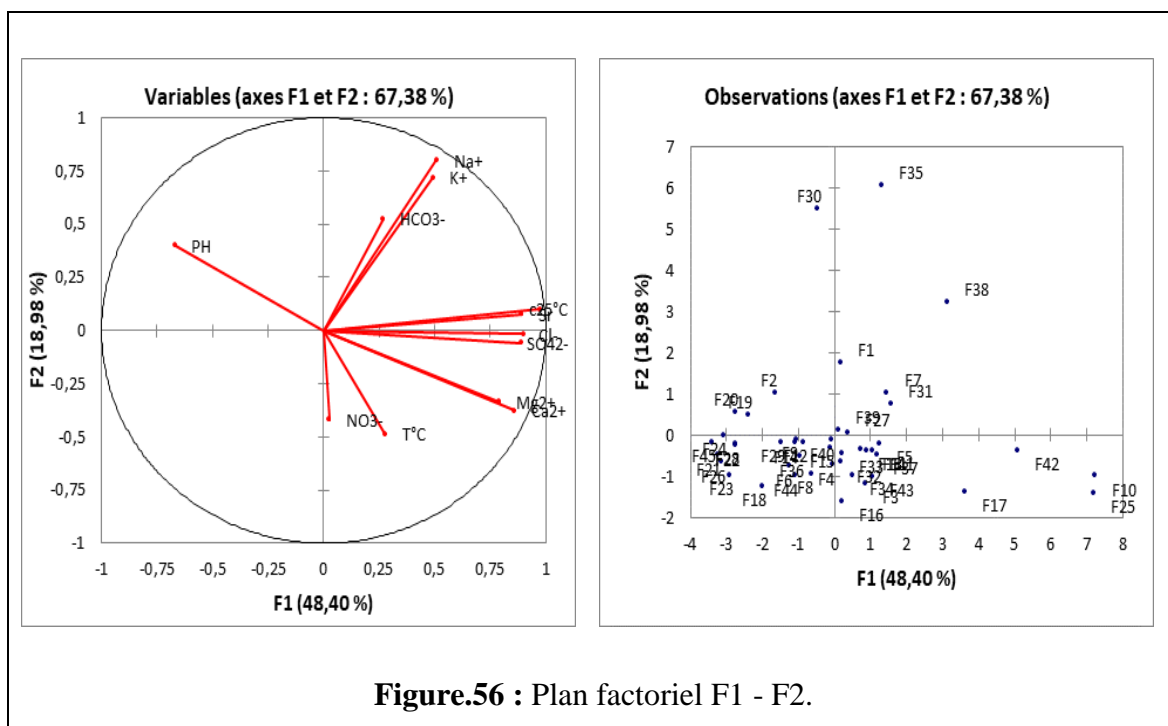
L'analyse en composantes principales met en évidence les liens qui semblent exister entre les éléments chimiques (Travi et Mudry, 1997). Une analyse en composantes principales a été effectuée sur les observations réalisées sur les eaux de la région.

Le plan factoriel F1 et F2 présente 67,38 % de l'information totale (Fig.56), l'axe F1 (48,40 %) est déterminé positivement (CE, SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{+2} , Sr^{2+}). L'axe F1 est un axe de minéralisation représente la part principale de la minéralisation due à l'interaction eau-roche.

L'axe F2 qui représente 18,98 % de la variance totale, est déterminé par Na^+ K^+ associé aux HCO_3^- en opposition avec NO_3^- , il traduit l'influence de la fraction argileuse, argiles rouges du Pantien, dans les processus d'échanges cationiques

L'axe F3 qui représente (11,36 %) de la variance totale (Fig.57), est déterminé par NO_3^- , c'est un axe de pollution agricole dans un milieu fracturé

La projection des individus sur le plan F1-F2 a révélé que : l'axe F1 montre l'opposition entre les eaux faiblement minéralisées en amont de la plaine, dans les affleurements calcaires, des eaux fortement minéralisées aux confins de la sebkha. L'axe F2 montre des eaux riches en alcalins par suite de l'interaction eau-roche prévues au centre de la plaine dans le remplissage moi-plio-quadernaire.



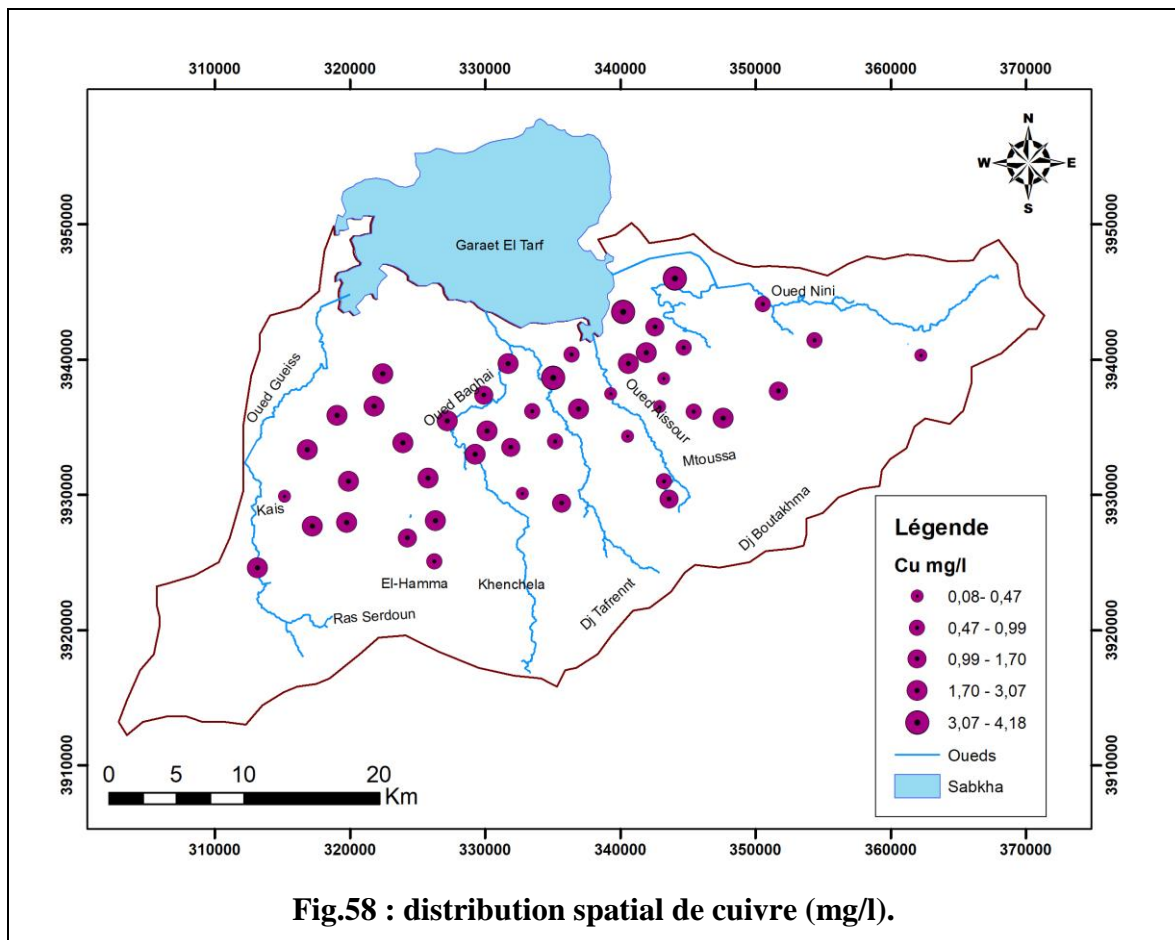
3.12. Les métaux

Les valeurs utilisées comme normes sont fixées par le décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 et la directive du Conseil de l'Union européenne n°98/83/CE du 3 novembre 1998.

3.12.1. Le cuivre (Cu)

Sur 45 points suivis, 22 échantillons présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (2 mg/l). Les concentrations varient de 0,08 mg/l à 3,91 mg/l. La concentration la plus importante correspond au forage W10. Le cuivre est référencé comme un élément indésirable, mais sa toxicité n'est pas certaine. L'environnement géologique peut être une source de cuivre, surtout dans le cas des eaux acides et en présence, en profondeur, de sulfures de cuivre plus ou moins oxydés, mais généralement les caractéristiques chimiques du cuivre (pH, Eh, solubilités des minéraux, co-précipitation) n'autorisent pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent pas habituellement 1 mg/l, ce qui veut dire que les fortes teneurs en Cu sont d'origine anthropique.

Les concentrations les plus élevées se situent au nord-est et nord-ouest de la plaine à la bordure de sebkha et à côté d'oued Baghai et oued Gueiss (Fig.58). Cette augmentation provient soit des traitements agricoles ou des pollutions industrielles.



3.12.2. Le Zinc (Zn)

Norme : une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 3 mg/l. Sur 45 points suivis, 26 échantillons présentent une concentration supérieure à la limite. Les concentrations en Zinc dans les eaux souterraines varient entre 0,18 mg/l enregistré au point F26 mg/l et 6.27mg/l enregistré au point F10.

Dans la plaine les concentrations les plus élevées se situent à côté d’oued Baghai, sa présence est probablement due au lixiviat de la décharge ménagère et à l’usine de textile militaire (Fig.59).

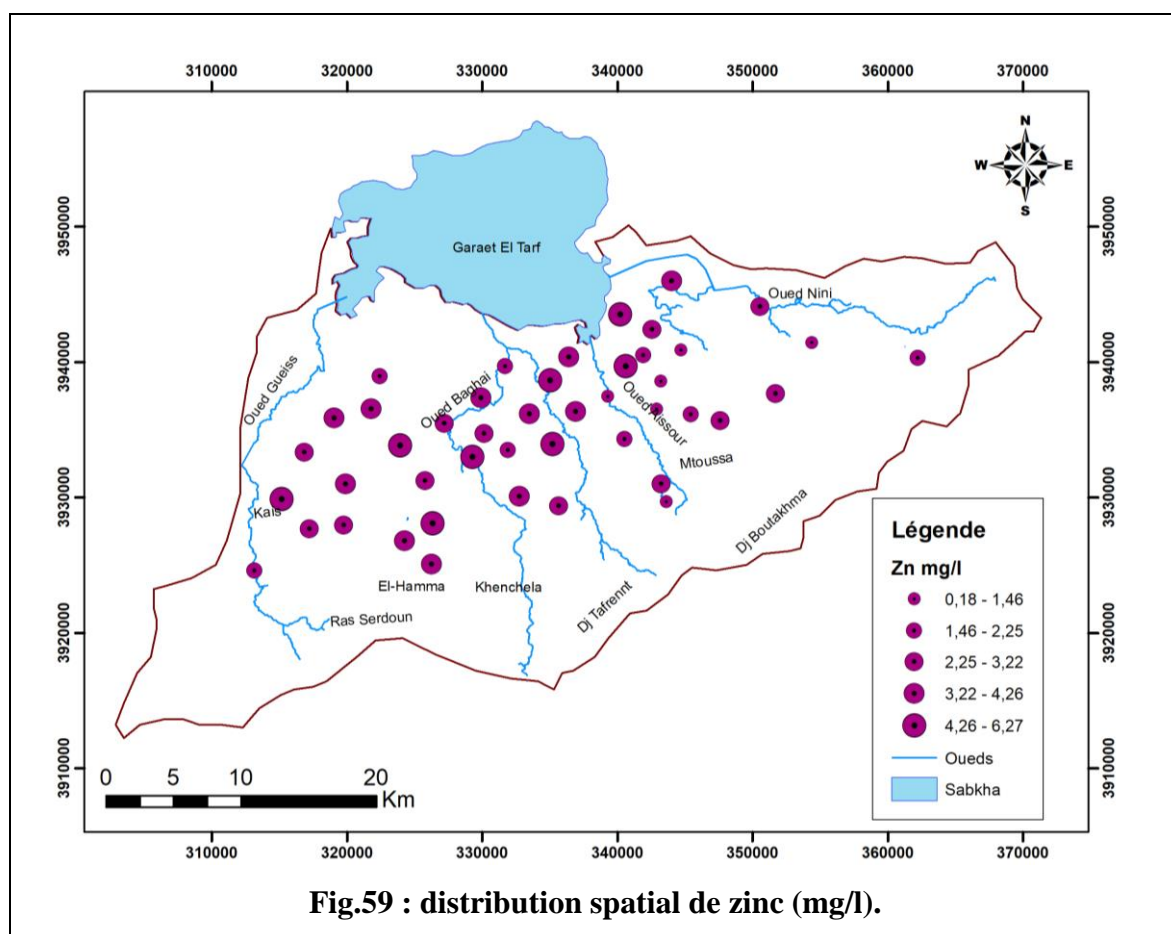
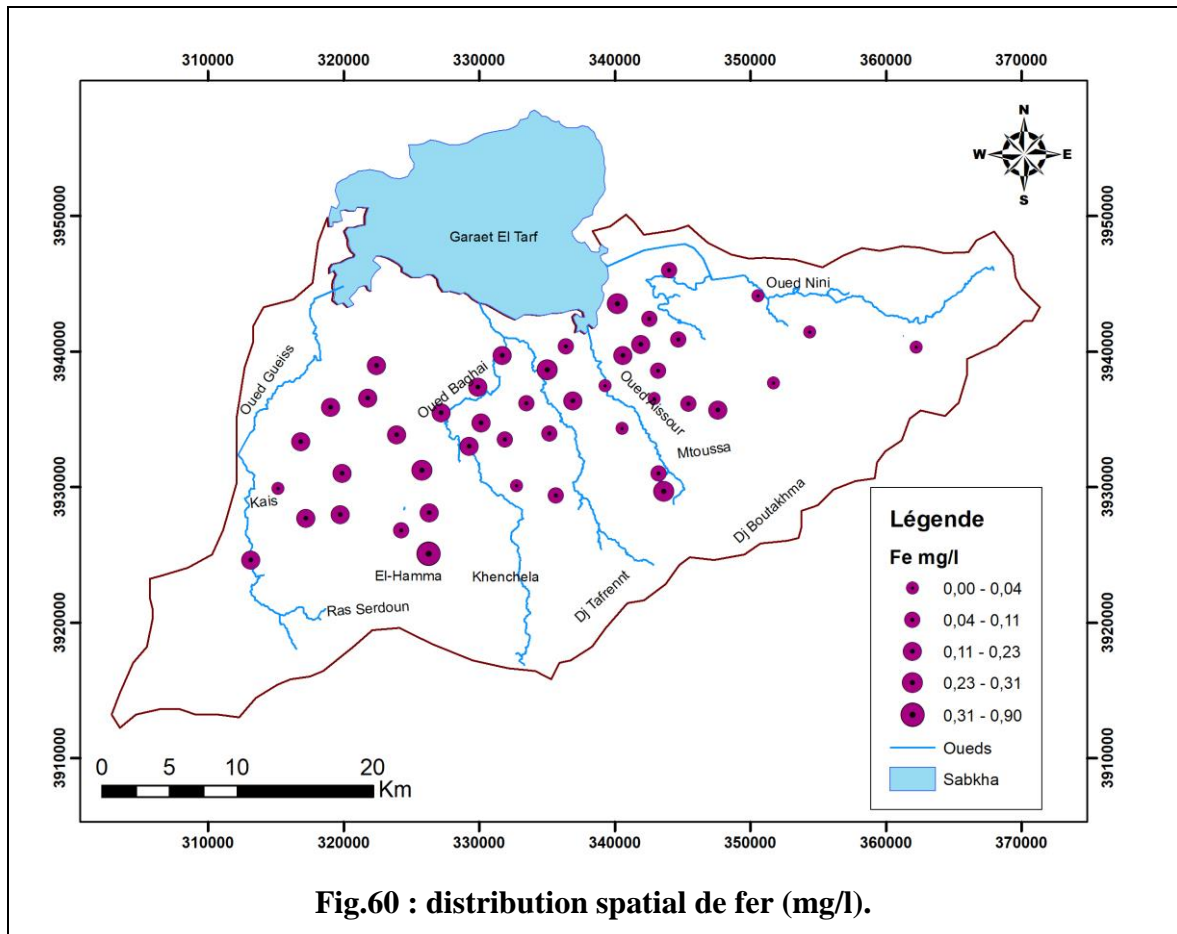


Fig.59 : distribution spatiale de zinc (mg/l).

3.12.3. Le Fer (Fe)

Cet élément chimique est souvent rencontré dans la nature. La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : naturelle par le lessivage des terrains argileux, artificielle par l'industrie (métallurgiques, sidérurgique). Les concentrations de fer dans les eaux souterraines de la plaine sont faibles, elles varient entre 0,01 mg/l et 0,9 mg/l. La valeur la plus importante correspond au point F1, cette forte valeur est liée probablement à l'état d'oxydoréduction de l'eau (Fig.60).

Norme : la concentration en Fer, pour une eau destinée à la consommation humaine, ne doit pas dépasser les 0.2 mg/l



3.13. Aptitude des eaux à l'irrigation

3.13.1. Risque de sodicité et de salinité (Méthode de Richard)

La salinité peut entraîner des effets nocifs consécutifs sur les sols, en raison de la fixation du sodium issu des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol.

Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. Sous cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (TOOD, 1980).

Lorsque la concentration en ion Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent dans le complexe adsorbant, les cations (Ca^{2+} le plus fréquemment). Une eau chargée en sel peut provoquer cette action.

Ce risque est déterminé à partir de la valeur du rapport du sodium adsorbable "Sodium Adsorption Ratio" (S.A.R). Pour une même conductivité, ce risque est d'autant plus grand que ce coefficient est plus élevé.

Le S.A.R est donné par la formule suivante :

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

Où Na, Ca, Mg sont exprimés en meq/l.

Le diagramme montre que les eaux souterraines de la plaine appartiennent à quatre classes (Fig.61, tableau.23). Il s'agit de C2-S1 de bonne qualité, C3-S1 et C3-S2 de qualité admissible, C3-S3, C4-S1, C4-S2 de qualité médiocre et C4S3 de qualité mauvaise. La qualité des eaux pour l'irrigation est donc du type bon à mauvais. On note que 68.88 % des eaux analysées sont de qualité admissible, 15.55% sont de bonne qualité et 13.33% de qualité médiocre et 2.22% de mauvaise qualité.

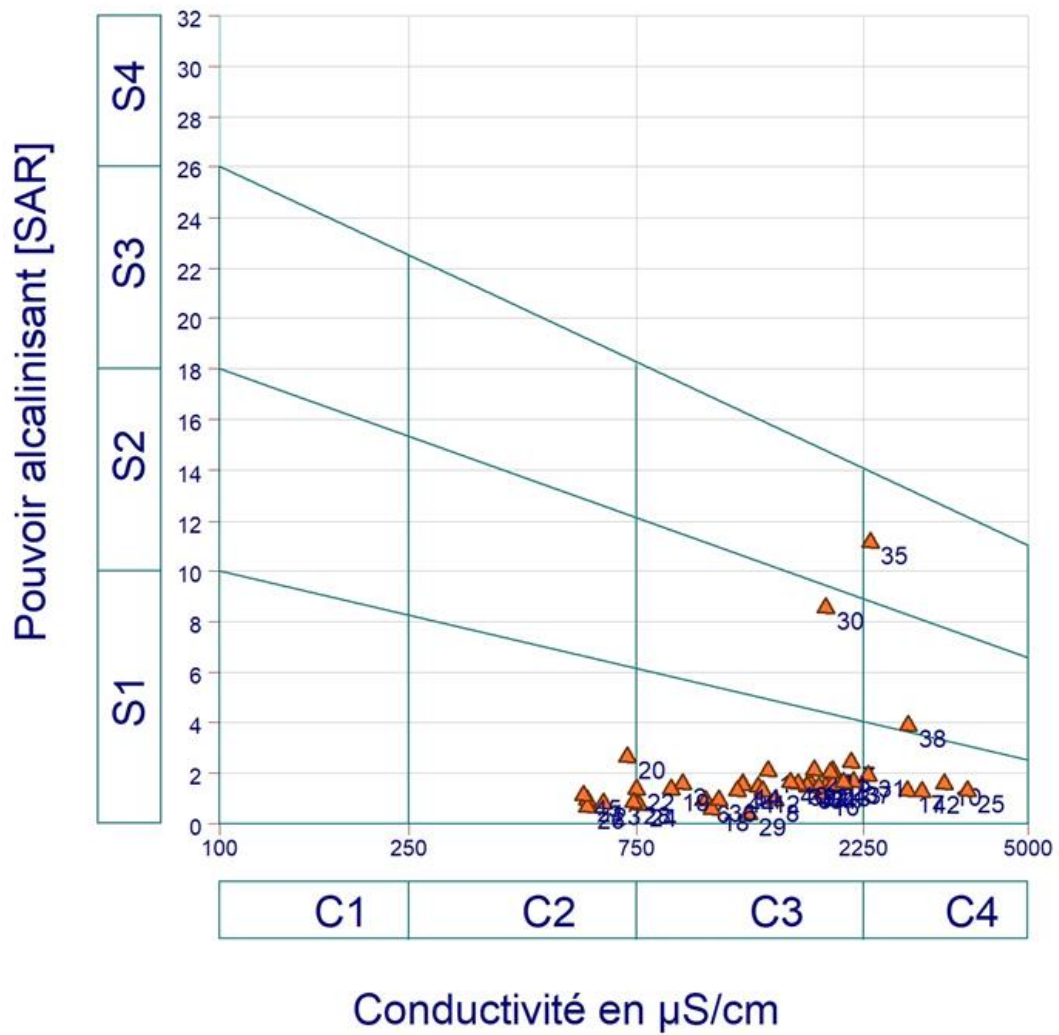
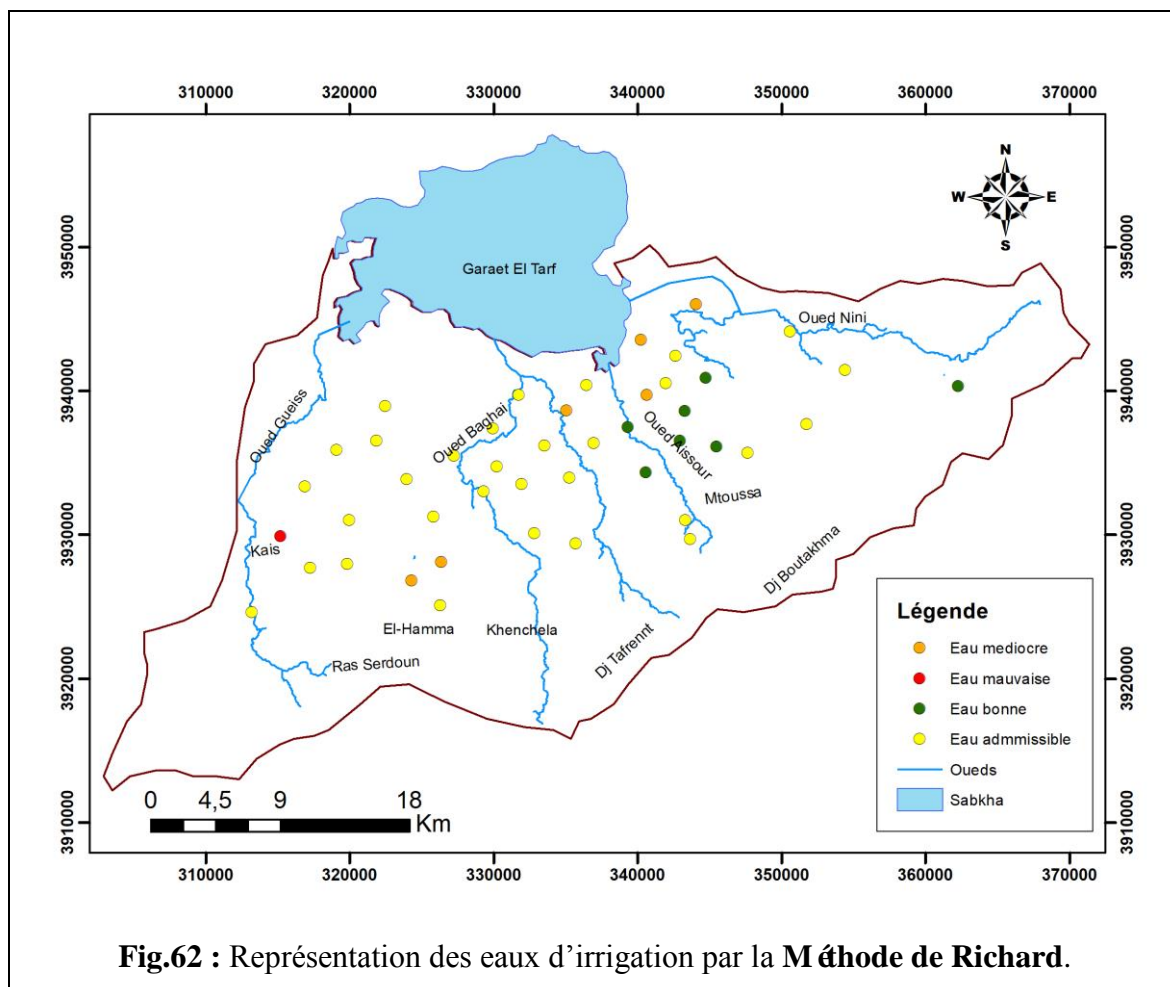


Fig.61: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR.

Tableau.23 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R.

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1	excellente	C1-S1	"Excellente" C1-S1 Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2	bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité
3	admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4	médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérantes très bien le sel.

Les points d'eau de qualité médiocre se trouvent près des Oueds et de sebkha. Il convient donc, de bien vérifier les conditions d'utilisation des puits concernés. On note également que les valeurs du S.A.R augmentent au nord avec le degré de salinité (Fig62).



3.13.2. Influence de la sodicité et la salinité sur la perméabilité du sol (Méthode de WILCOX)

En milieu salé, la conduite de l'irrigation est fortement influencée par la perméabilité du sol souvent très faible pour les solutions percolantes.

En effet, dans un sol salé imprégné de NaCl, la perméabilité reste bonne tant que la solution saline percolante présente une charge élevée en électrolyte, charge qui maintient les argiles floculées (Servant, 1975).

Si l'eau d'irrigation est chargée en sodium, le nombre d'ions Na combiné avec le sol augmente, cependant une quantité équivalente en cations et essentiellement en Ca^{+2} sera déplacée. On assiste à une dégradation de la structure, avec un gonflement des argiles ce qui entraîne une imperméabilisation du milieu. Le processus de dessalement et de drainage risque alors d'être complètement stoppé. Dans le cas où le calcium est le cation dominant, l'échange se fait dans le sens inverse, créant ainsi un sol plus floculé et plus perméable. L'apport de CaSO_4 au sol peut par l'échange de base, améliorer la texture du sol ainsi que son drainage.

Il est connu en g é n é r a l que le d é v e l o p p e m e n t des plantes est tr è s faible ou nul dans les sols satur é s en sodium. C'est pourquoi nous avons jug é utile d'utiliser la m é t h o d e de WILCOX fond é e justement sur la conductivit é é l e c t r i q u e et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau (Louvrier ,1976). Le pourcentage de sodium peut ê t r e d é f i n i comme suit :

$$\% \text{ Na} = r \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+}$$

meq/l.

Où tous les é l é m e n t s sont exprimés en

On s'aperç oit alors que 17.78% des eaux sont de qualit é excellente, 13.34 % de qualit é m é d i o c r e , 2.22 % qualit é a d m i s s i b l e et le m ê m e pourcentage pour qualit é m a u v a i s e et le reste soit 64.44 % sont de la bonne qualit é (Fig.63).

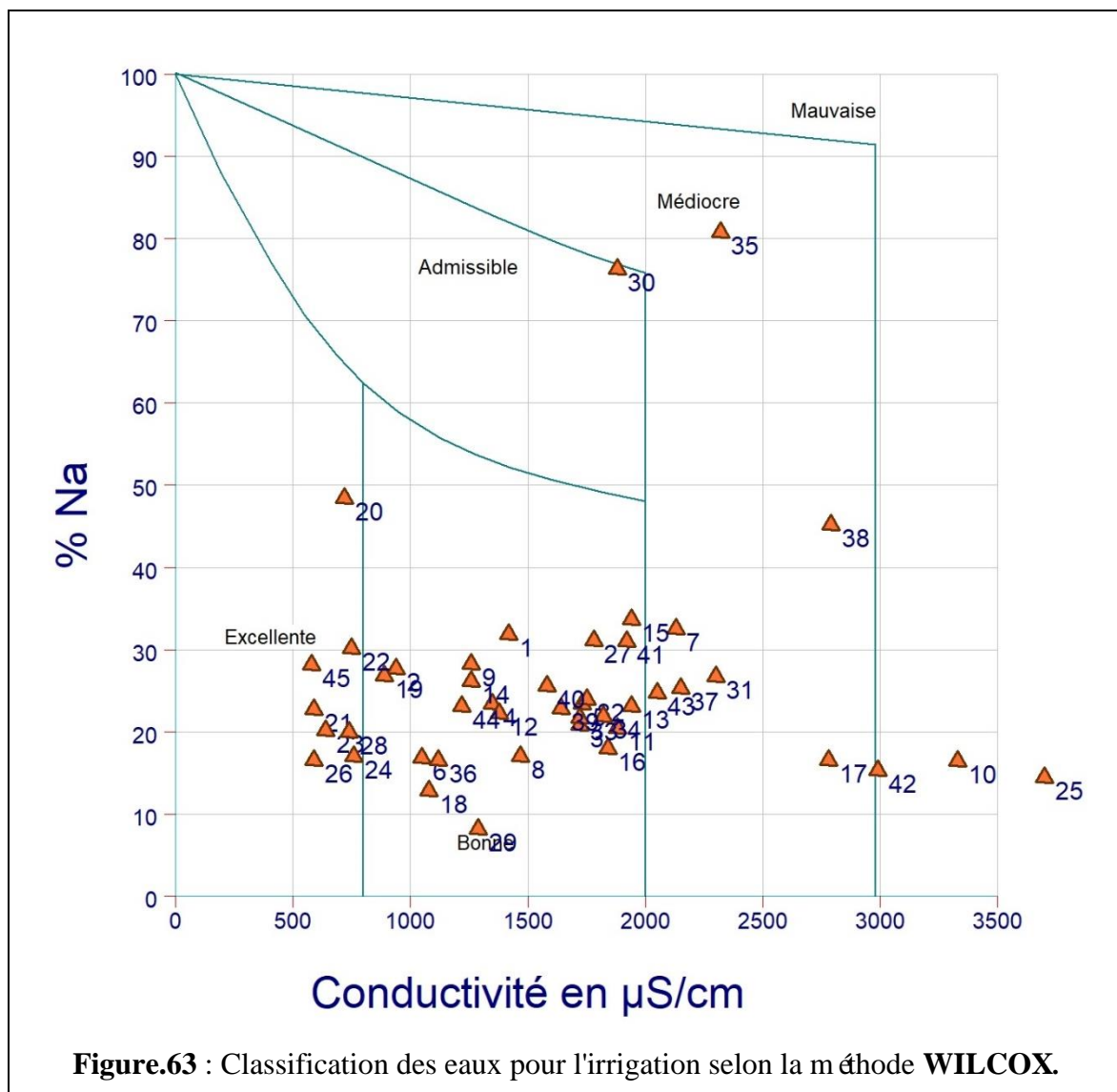


Figure.63 : Classification des eaux pour l'irrigation selon la m é t h o d e WILCOX.

Les eaux de bonne qualité se concentrent au centre et près des montagnes, alors que celles de mauvaise qualité se trouvent à l'ouest et au nord, on remarque la dégradation progressive de la qualité des eaux en se déplaçant de sud vers le nord par augmentation du pourcentage du sodium (Fig.64).

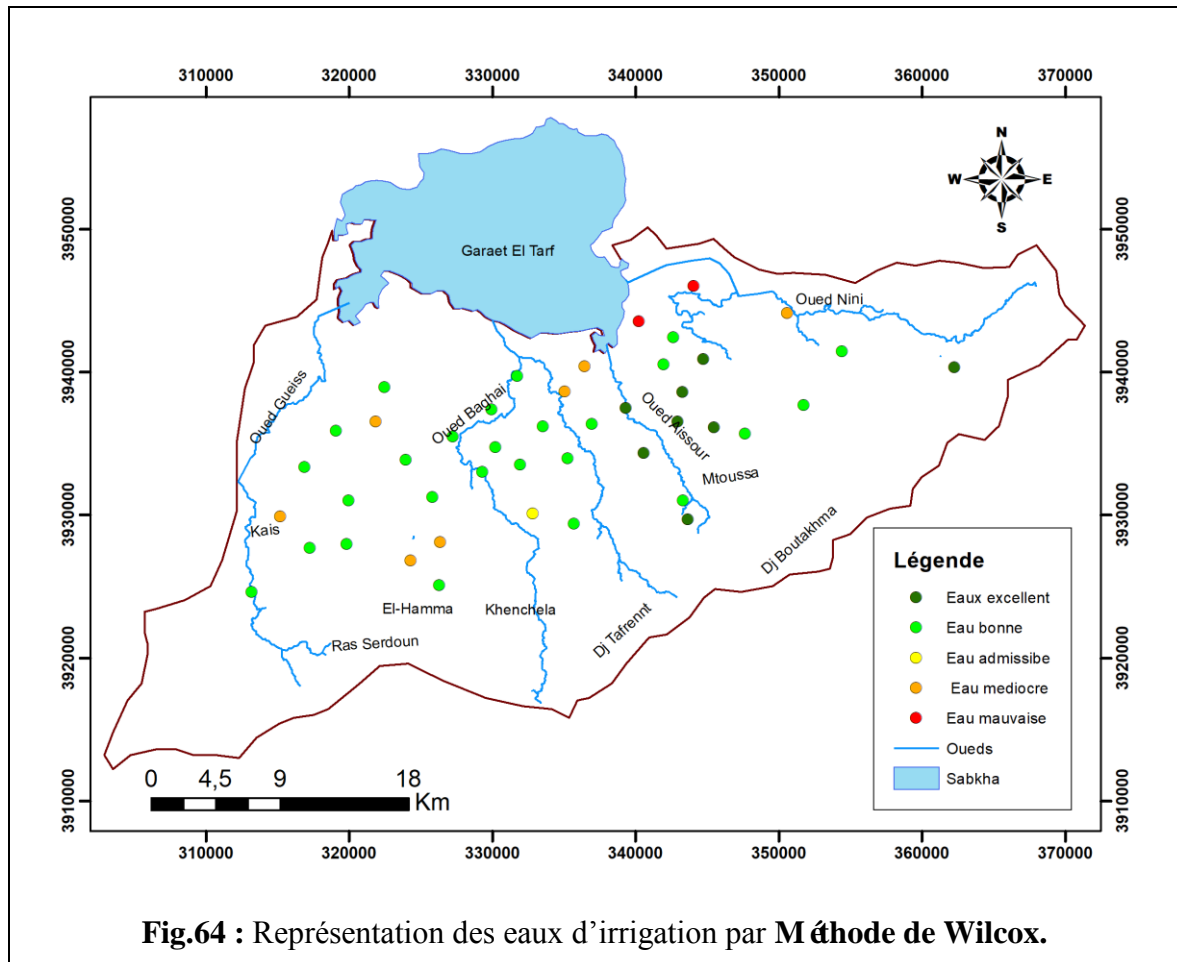


Fig.64 : Représentation des eaux d’irrigation par Méthode de Wilcox.

CHAPITRE V

Evaluation de la vulnérabilité
des eaux souterraines à la pollution

1. Introduction

La vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination est un concept complexe, mal défini et qui peut représenter autant la sensibilité et la susceptibilité à la contamination, que les conditions naturelles qui influencent la pénétration, la propagation des contaminants et même leur purification dans le milieu.

1.1. Objet des cartes de vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité permet de délimiter les zones qui sont plus susceptibles que d'autres à être contaminées par les activités, à ou près de la surface de la terre (Babiker et al. 2007). La cartographie de la vulnérabilité consiste généralement à présenter les résultats des diverses méthodes d'évaluation utilisées en classes (fourchettes de valeurs). Ceci, afin de délimiter les zones les plus affectées en les comparant avec les différentes autres zones (Duchaine, 1995). En conséquence, certaines zones terrestres sont plus vulnérables à la contamination des eaux souterraines que d'autres (Napolitano, 1995).

Dans cette étude et pour rendre compte de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique le modèle DRASTIC (Aller et al 1987) a été choisi à partir du contexte hydrogéologique de la zone d'étude.

La méthode DRASTIC repose sur quatre hypothèses fondamentales (Osborn et al, 1998) :

1. Les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
2. La surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme de l'infiltration efficace ;
3. La nature du contaminant n'est pas considérée, mais il est mobile dans le sol en phase dissoute ;
4. Le contaminant présente la même mobilité que les eaux souterraines.

La méthode DRASTIC considère sept paramètres pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines (Fig.65) :

D : profondeur d'eau (Depth of water)

R : la recharge efficace (net Recharge)

A : les matériaux de l'aquifère (Aquifère media)

S : le type de sol (Soil media)

T : la topographie ou la pente (Topography)

I : l'impact de la zone vadose ou zone non saturée (Impact of the vadose zone)

C : la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (hydraulic Conductivity of the aquifer). (Sinan et al, 2003)

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi cote (C), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité

La méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante :

$$Id=(Dc \times Dp)+(Rc \times Rp)+(Ac \times Ap)+(Sc \times Sp)+(Tc \times Tp)+(Ic \times Ip)+(Cc \times Cp)$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut :

c : notation accordée à chaque paramètre

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cotes des paramètres de la méthode DRASTIC. (Lallemande ; 1994)

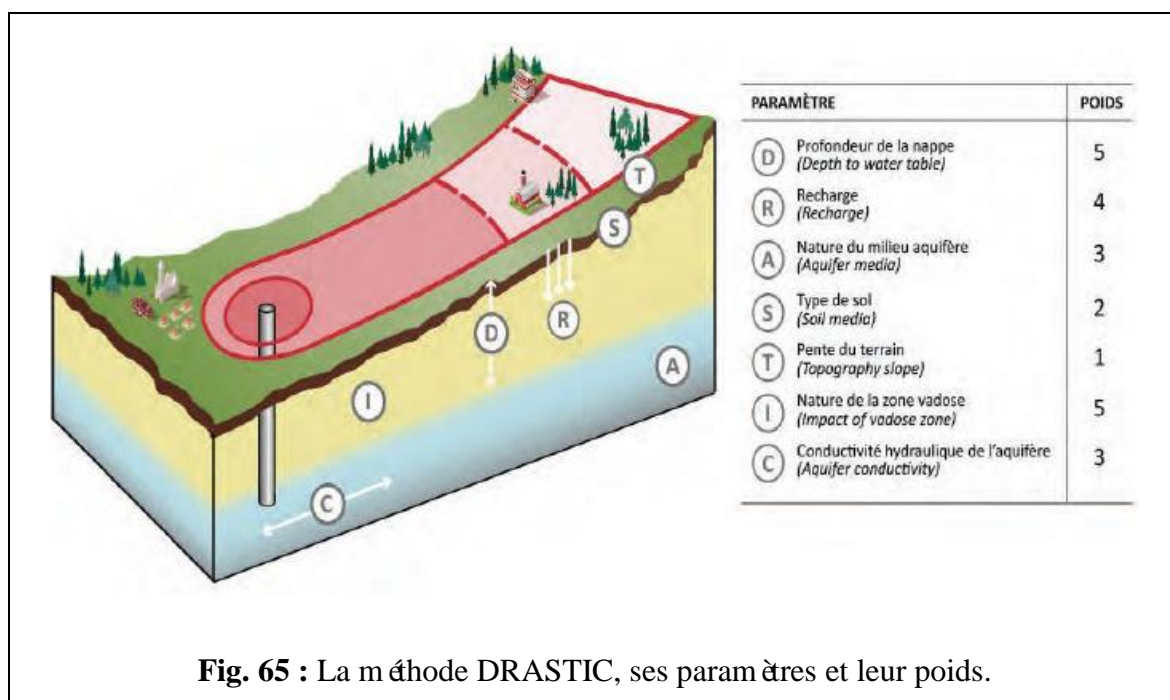


Fig. 65 : La méthode DRASTIC, ses paramètres et leur poids.

2. Méthodologie

Dans cette étude la cartographie et le calcul de la vulnérabilité à la pollution ont été réalisés par la méthode DRASTIC à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.3. Ce dernier a permis l'intégration et la répartition spatiale des scores pondérés (cote x poids), attribués aux sept paramètres de la méthode DRASTIC et leur représentation sous le format shapefile (Jourda et al. 2007). Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles ont été convertis en mode Raster. Chaque Raster représente la variation spatiale des scores

pondérés (Chandoul et al. 2008) (Tableau.24). Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC se fait directement par un calcul d'addition appliqué sur les sept Raster. Le résultat de ce calcul est l'élaboration d'une nouvelle couche d'information qui représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude (Fig.66).

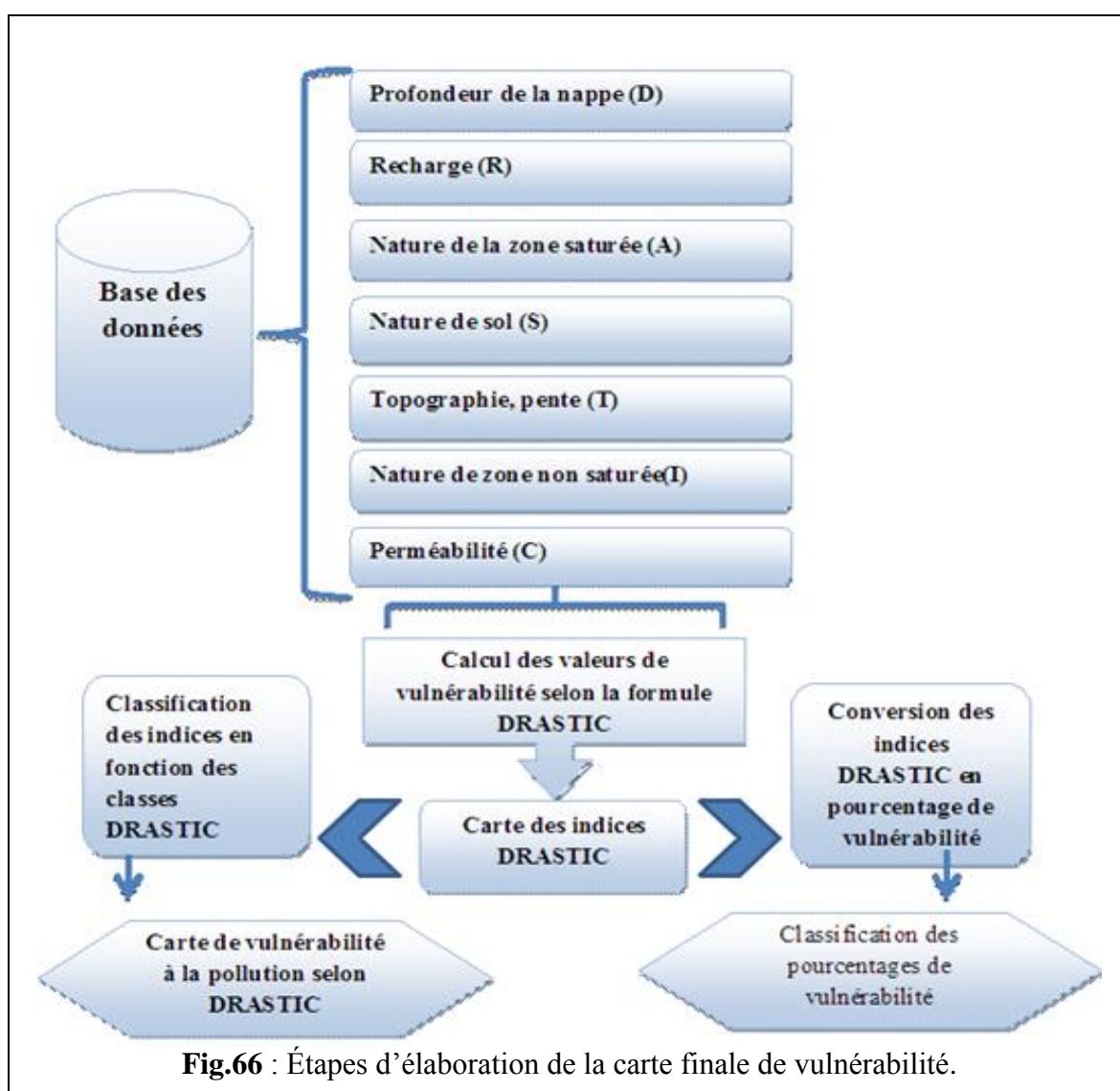


Tableau 24 : Type, sources des données et mode de traitement de chaque paramètre.

Paramètre	Type de données	Mode de traitement	Sources des données
Profondeur de la nappe (D)	Point	Interpolation	Niveaux statique sur 38 forages (DHOB et DHKH)
La recharge net (R)	Point	Interpolation	Etude climatique et carte des sols de l'Algérie 1 :500000
La nature de Zone saturée	Polygone	Interpolation	Fiches techniques sur 38 forages

(lithologie de l'aquifère) (A)			(DHOB et DHKH)
Texture de Sol (S)	Polygone	Digitalisation	Carte des sols d'Algérie Tébessa 1 :500.000
Topographie (T)	Polyline	Digitalisation	Modèle numérique de terrain MNT (https://earthexplorer.usgs.gov/)
La zone non Saturée(I)	Polygone	Interpolation	Fiches techniques sur 38 forages (DHOB et DHKH)
Perméabilité(C)	Point	Interpolation	

3. Application de la méthode DRASTIC

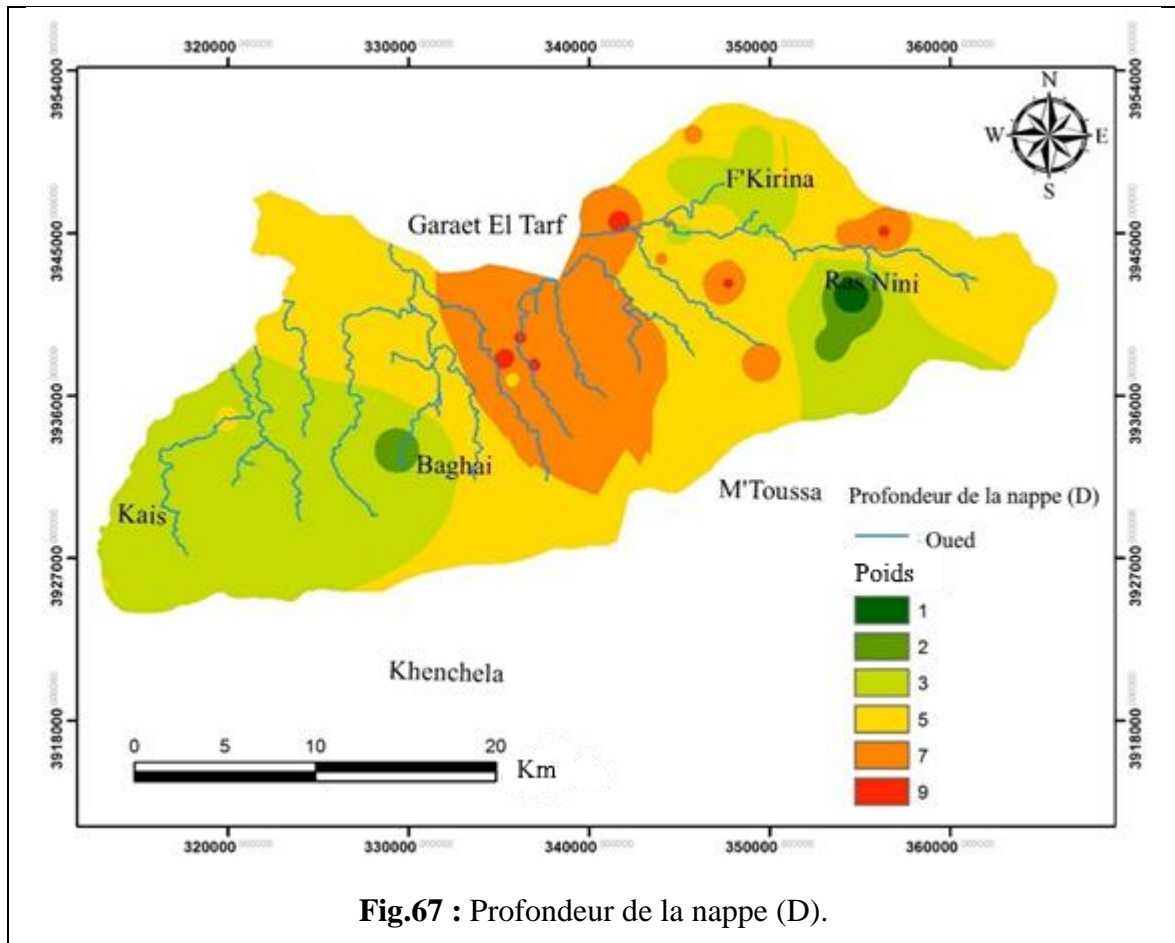
3.1. Profondeur de la nappe (D)

La profondeur de la nappe est un paramètre important pour la détermination de vulnérabilité, il détermine l'épaisseur de la partie du sous-sol qui est située entre la surface du sol et le toit de la nappe.

La carte de la profondeur de la nappe d'eau a été établie par la méthode d'interpolation des niveaux piézométriques, par la méthode des inverses des distances (IDW).

Six classes ont été déduites pour ce paramètre D et les notes attribuées varient de 1 à 9 (Fig.67) :

- **Classe 1** : 1,5 – 4,5 m ; cette classe représente les valeurs de la profondeur la plus faible représentée par des points qui se trouvent à l'est et au centre de la zone. Une note de 9 a été attribuée.
- **Classe 2** : 4,5 – 9 m ; cette classe de profondeur faible occupe la partie centrale de la zone d'étude. Une note de 7 a été attribuée.
- **Classe 3** : 9 – 15 m ; cette classe de profondeur moyenne est localisée aux alentours de la classe précédente (classe 2), avec une note de 5.
- **Classe 4** : 15 – 22 m ; cette classe est localisée à l'est du bassin avec une note de 3.
- **Classe 5 et 6** : >22,5 m ; c'est la classe des eaux les plus profondes et donc les mieux protégées, située au sud-ouest, sud-est nord-est de la zone d'étude. Avec une note de 2 et 1.



3.2. La recharge efficace (R)

C'est un paramètre qui est difficile à déterminer à cause de la multiplicité des facteurs qui l'affectent (la profondeur initiale de la nappe, la précipitation, types de sol...). La recharge définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et atteint l'aquifère, soit à partir des eaux des précipitations, soit par l'alimentation des oueds (relation oueds-nappe), qui permet de transporter les polluants de sol jusqu'à la zone saturée.

La méthode utilisée pour élaborer la carte de la recharge nette de la nappe de Garaet El Tarf est celle de Williams and Kissel (1991). La recharge est obtenue selon ce procédé avec les équations suivantes correspondant à différents groupes hydrologiques de sols :

$$R = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43) \rightarrow \text{groupe hydrologique A.}$$

$$R = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57) \rightarrow \text{groupe hydrologique B.}$$

$$R = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29) \rightarrow \text{groupe hydrologique C.}$$

$$R = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00) \rightarrow \text{groupe hydrologique D.}$$

Où P est la somme des précipitations annuelles et irrigation, exprimé en pouces. Les quatre groupes hydrologiques A, B, C et D (Viessmann et al, 1977) correspondent aux types de sols classés en fonction de leur infiltration :

- Groupe A : les sols qui ont un taux d'infiltration très élevé même si ils sont complètement mouillés
- Groupe B : Les sols avec une vitesse d'infiltration modérée lorsqu'ils sont complètement mouillés.
- Groupe C : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration lente lorsqu'ils sont complètement mouillés
- Groupe D : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration très lente lorsqu'ils sont complètement mouillés

La figure(68) montre que la recharge diminue en allant vers El Garaet (de 0 à 5 mm) en relation avec les types hydrologiques des sols (sur la base de la carte des sols de Tébessa). La recharge maximum est observée aux limites du bassin avec une note de 9. (>25 mm).

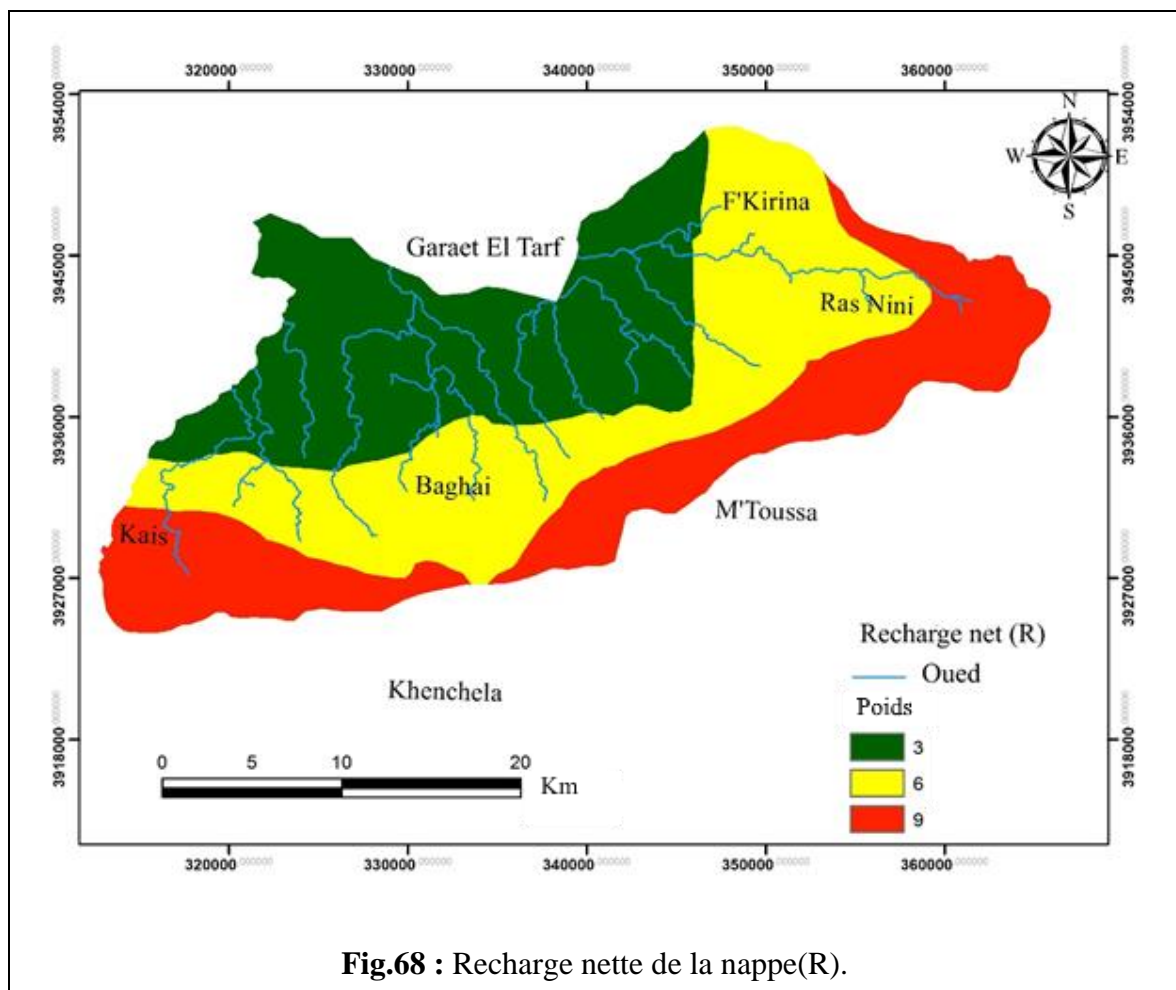


Fig.68 : Recharge nette de la nappe(R).

3.3. La nature de la zone saturée (A) : Lithologie de l'aquifère

Les milieux aquifères et les constituants sont le chemin par lequel l'eau est transportée dans l'aquifère. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Ces contaminants atteignent les eaux souterraines à travers des couches de sols faibles dans les milieux aquifères. La propagation des polluants contrôlée par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques. Les couches de sols dans la région aquifère ont une faible porosité en raison de sa forte teneur en argile.

Ce paramètre est déterminé par la corrélation des coupes lithostratigraphiques (données des forages). La répartition spatiale des niveaux réservoir de la nappe montre quatre classes lithologiques :

- Argile sableuse et gravier : couvrant la partie est de la zone d'étude (vert)
- Argile et gravier calcaire : couvrant le sud - ouest, la partie de Kais (jaune)
- Des formations marneuses calcaires au centre de la zone, la partie de Baghar (orange)
- Les argiles avec passage de sable nord de la zone à cote de sebkha (rouge)

Les milieux aquifères ont une composition hétérogène d'Argile, Mano-Calcaire, Argile-Gravier de calcaire et Argile sableux et Gravier (Fig.69).

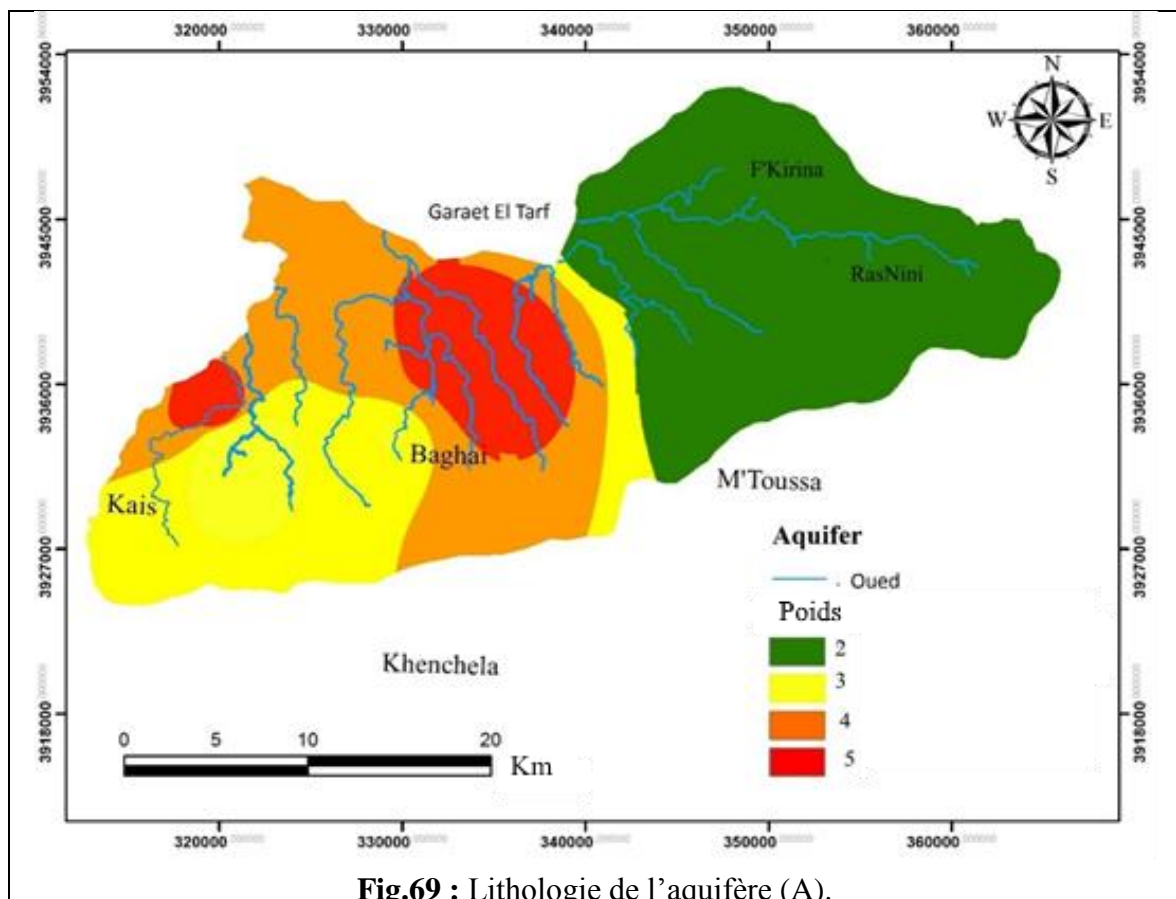


Fig.69 : Lithologie de l'aquifère (A).

3.4. La texture du Sol (S)

La nature de la surface du sol est un facteur important pour la protection de l'aquifère contre la contamination. Pendant la recharge, cette couche peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation du polluant vers l'aquifère et influence l'infiltration vers les eaux souterraines. Ceci dépend de plusieurs facteurs :

1. La perméabilité du sol ;
2. Le type d'argile constituant le sol ;
3. La présence de matières organiques, d'acides humiques et de minéraux argileux.

Ce paramètre est extrait à partir de la carte des sols d'Algérie 1 :500000 (Tébessa) de 1938 (R.J Bellon).

En se basant sur la classification pédologique de la méthode DRASTIC, trois classes ont été extraites :

- Sols argileux calcaires avec une note de 7 couvrant M'Toussa nord. et kais
- Sols limoneux sableux avec une note de 6 couvrant F'kirina, Baghai et Ras Nini
- Sols limoneux argileux et argileux avec une note de 3 près de Sebkhia (Garaet el Tarf proprement dit).

Plus le sol est riche en Argile plus l'absorption des polluants est moins importante et plus la protection des eaux souterraines est grande (Fig.70).

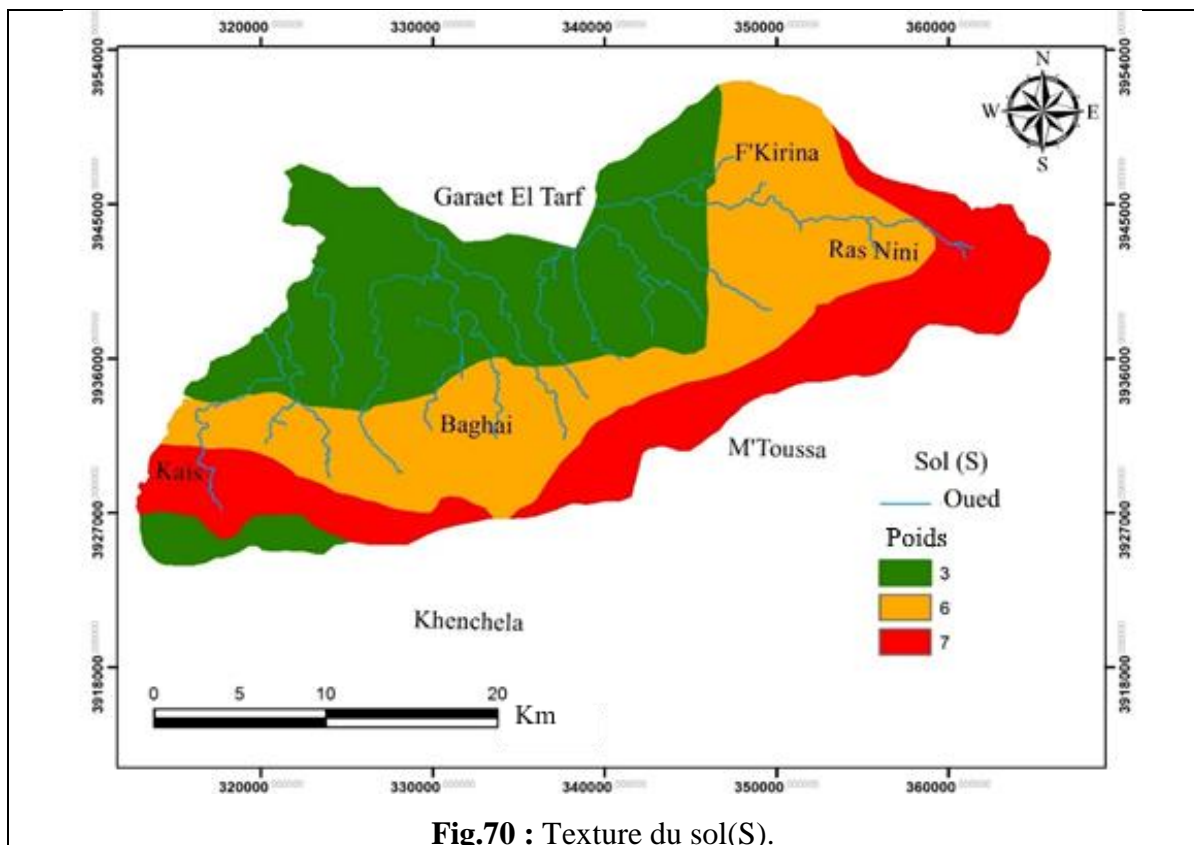


Fig.70 : Texture du sol(S).

3.5. La topographie, Pente (T)

Le paramètre «topographie» est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage. Il traduit la capacité à l'infiltration et au ruissellement des eaux de surface à introduire des agents polluants vers la nappe, reflétant son effet faible à modéré sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Lorsque la pente est inférieure à 2% le ruissellement est faible ce qui favorise l'infiltration. Par contre lorsque la pente est supérieure à 18 % les eaux de précipitation se ruissellent facilement et transfèrent les polluants. La pente a été calculée dans l'environnement SIG à l'aide du modèle numérique de terrain MNT. Les valeurs de la pente (en %) sont recalifiées selon la classification originale DRASTIC.

La carte matricielle obtenue (Fig.71) montre la prédominance des terrains inférieurs à 6%.

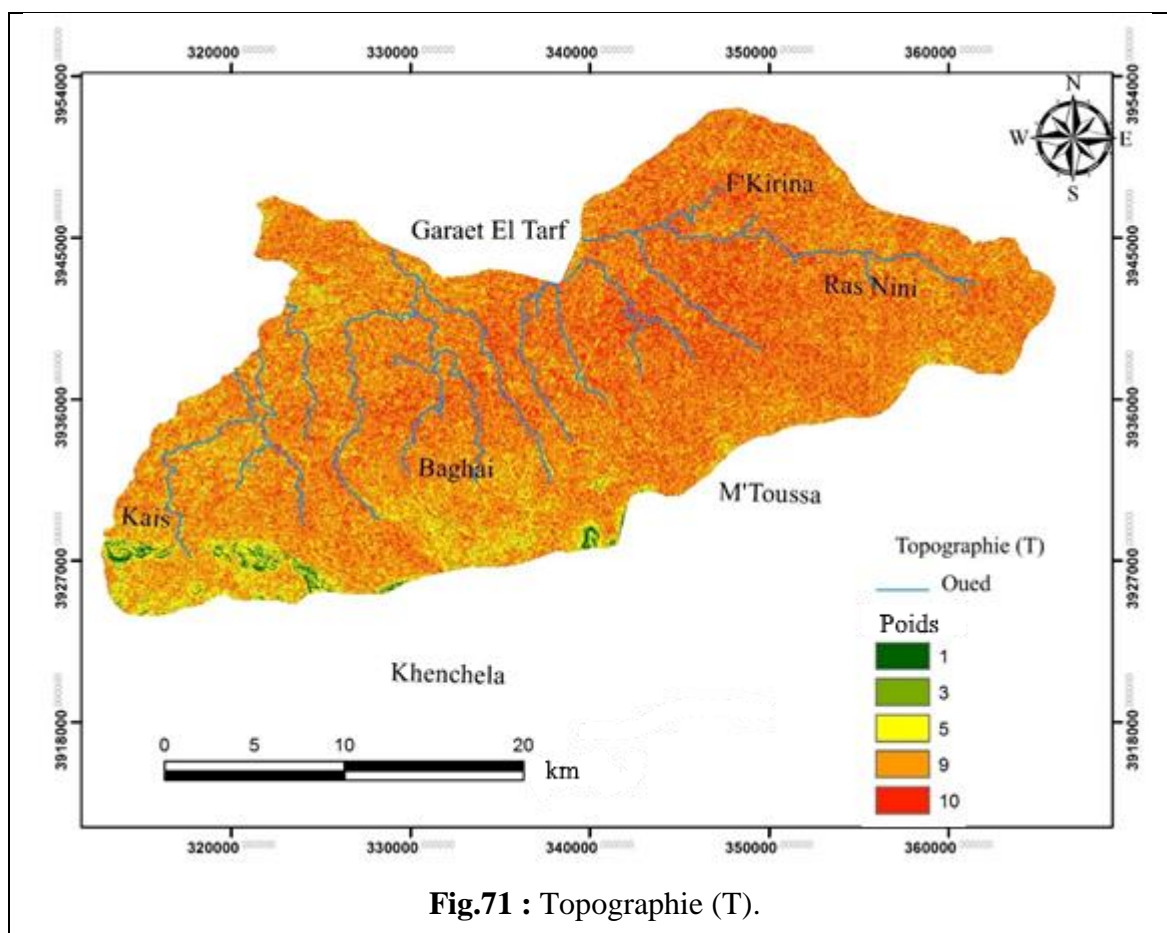


Fig.71 : Topographie (T).

Tableau.25 : Poids et cote du paramètre de Pente.

Pente %	≥18	12-18	6-12	2-6	0-2
Not	1	3	5	9	10

3.6. L'impact de la zone non saturée (I)

Zone non saturée ou la zone vadose correspond aux couches de terrain entre l'aquifère et le sol. L'influence de cette zone dans la contamination potentielle de l'aquifère dépend essentiellement de sa perméabilité et de sa capacité d'atténuation. Le principal outil qui a été utilisé pour l'évaluation de la zone vadose est les logs stratigraphiques des forages et quelques coupes géologiques dans la région.

La cote la plus élevée (6 et 7) pour toutes les unités a été attribuée aux Gravieres et sables et terres arables de par leur granulométrie grossière et détritiques, ces dépôts sont très perméables de F'kirina jusqu'à M'toussa. Une cote (5) a été attribuée aux calcaires argileux et graviers, alors que les régions où elles sont recouvertes par des dépôts argileux et fragments de calcaire ont eu des cotes variant de 3 à 4 (Fig.72).

Le modèle DRASTIC considère la zone vadose comme une variante très importante pour le processus de contamination des aquifères (vulnérabilité).

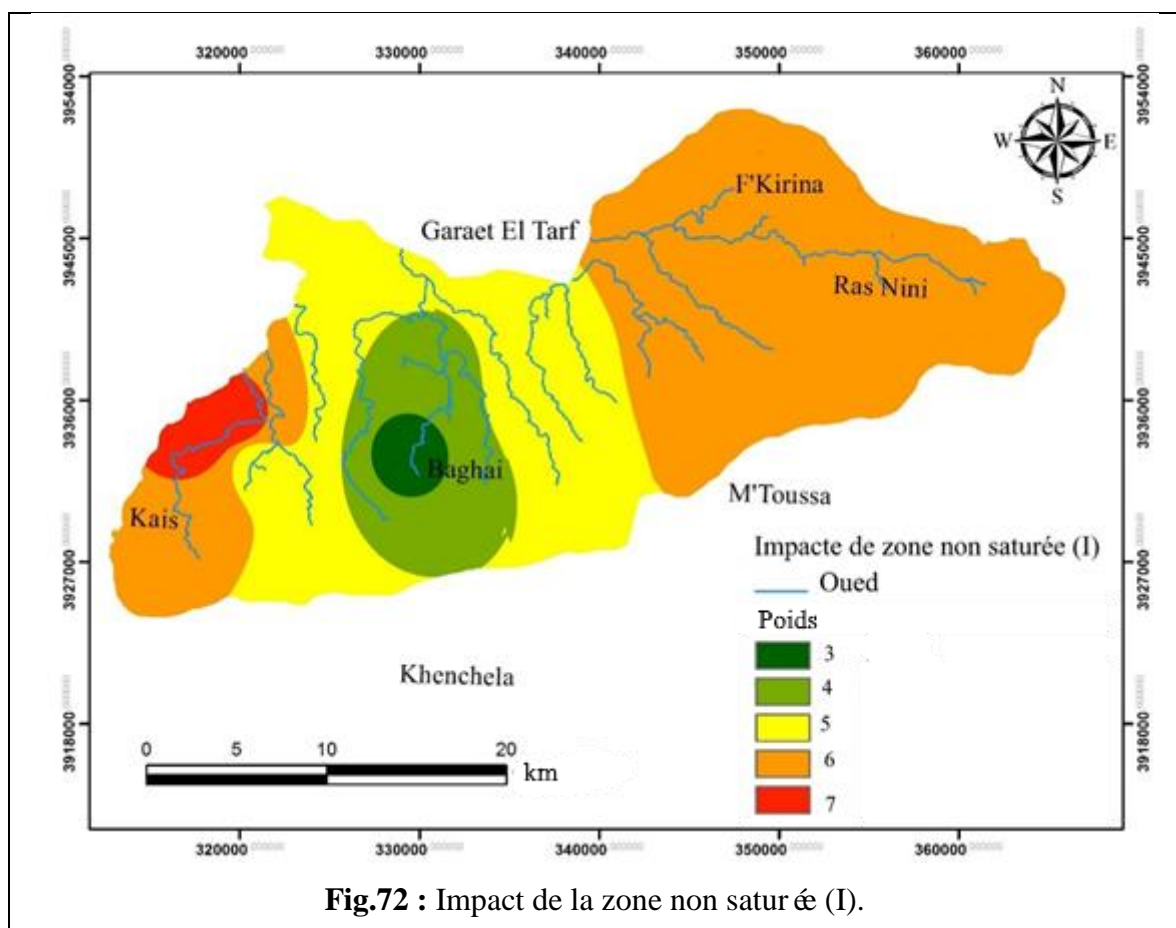


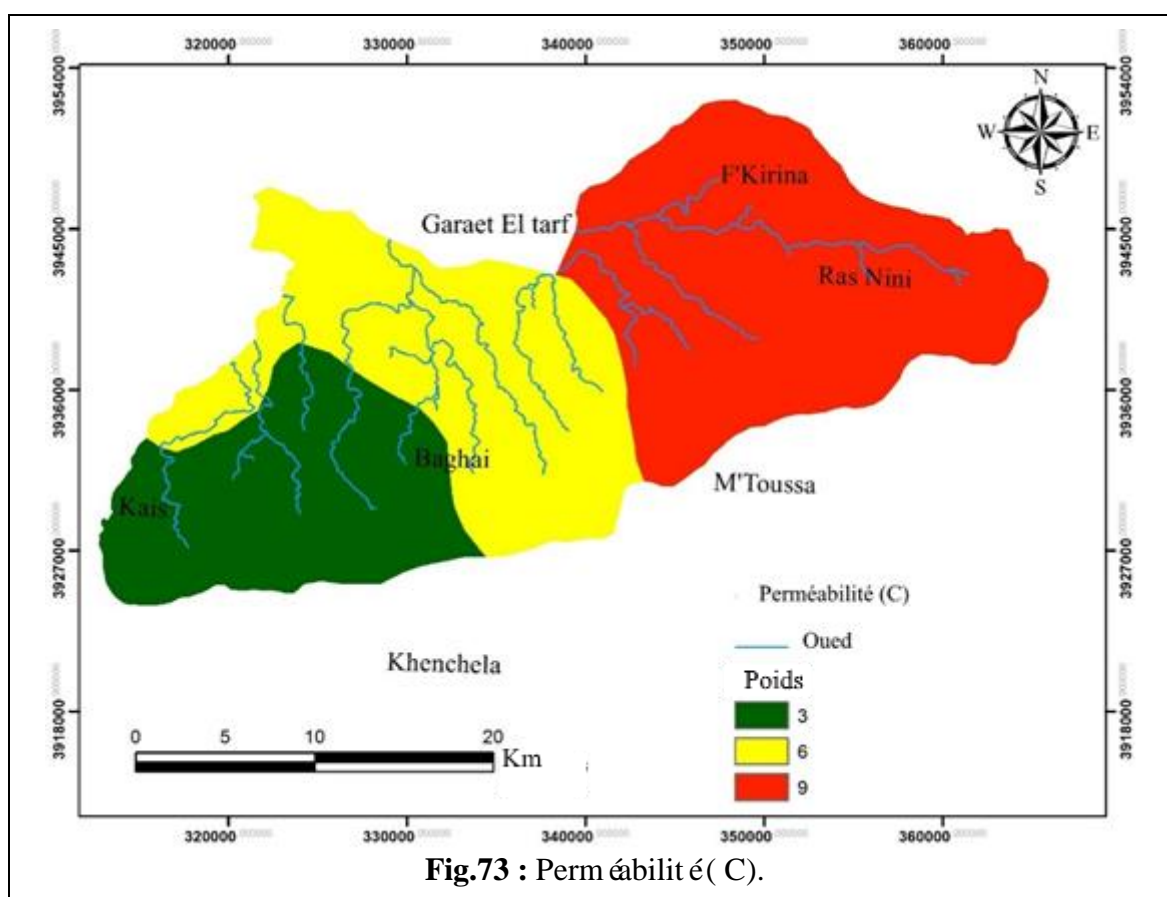
Fig.72 : Impact de la zone non saturée (I).

3.7. La Perméabilité (C)

La perméabilité ou la conductivité hydraulique corrélée avec la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau, elle contrôle la vitesse de propagation de polluant dans la zone saturée. L'estimation de la perméabilité dépend de la nature lithologique des aquifères (Freeze et Cherry, 1979). Les valeurs de la conductivité hydraulique sont celles mesurées lors des essais de pompage.

La zone aquifère de sous bassin est divisée en trois catégories (Fig.73), relatives à la conductivité hydraulique, les cotes assignées variant de 9 à 3 et les valeurs calculées pour la conductivité hydraulique sont :

- ✓ $4,7.10^{-5} - 14,7.10^{-5}$ m/s...Cote de (3),
- ✓ $32,9.10^{-5} - 4,7.10^{-5}$ m/s....Cote de (6),
- ✓ $4,7.10^{-4} - 9,4.10^{-4}$ m/s..... Cote de (9).



4. Indice de Vulnérabilité

L'élaboration de la carte de vulnérabilité, est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité Di qui intègre les sept paramètres selon la formule suivante :

$$Di = (Dc \times Dp) + (Rc \times Rp) + (Ac \times Ap) + (Sc \times Sp) + (Tc \times Tp) + (Ic \times Ip) + (Cc \times Cp)$$

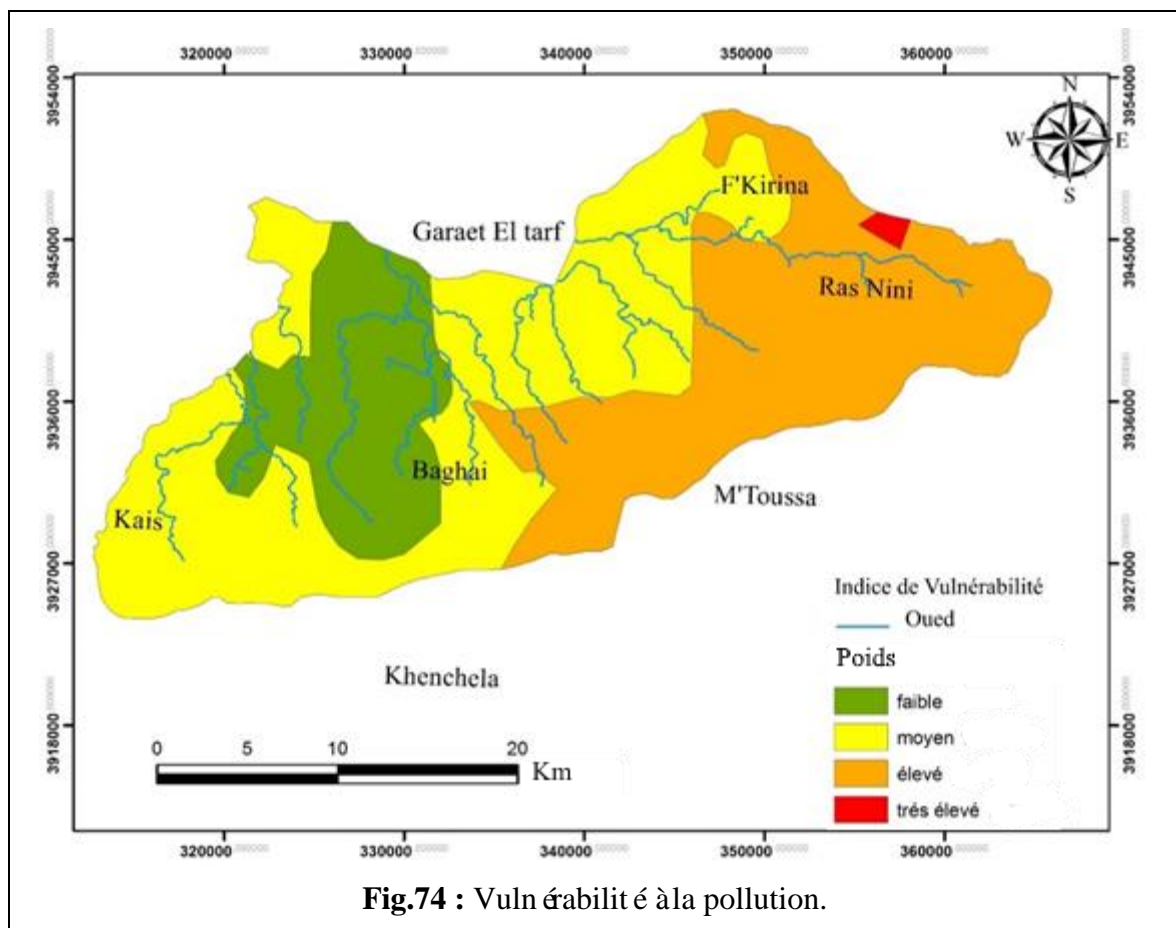
où D, R, A, S, T, I, C , sont les paramètres cités plus haut :

c : cotation accordée à chaque paramètre

p : poids à chaque paramètre

La carte de l'indice de vulnérabilité a été établie sous l'extension « Spaciale Analyst Tools » permet de calculer cet indice en tout point de la zone d'étude, par l'addition de sept paramètres présentés sous le format GRID.

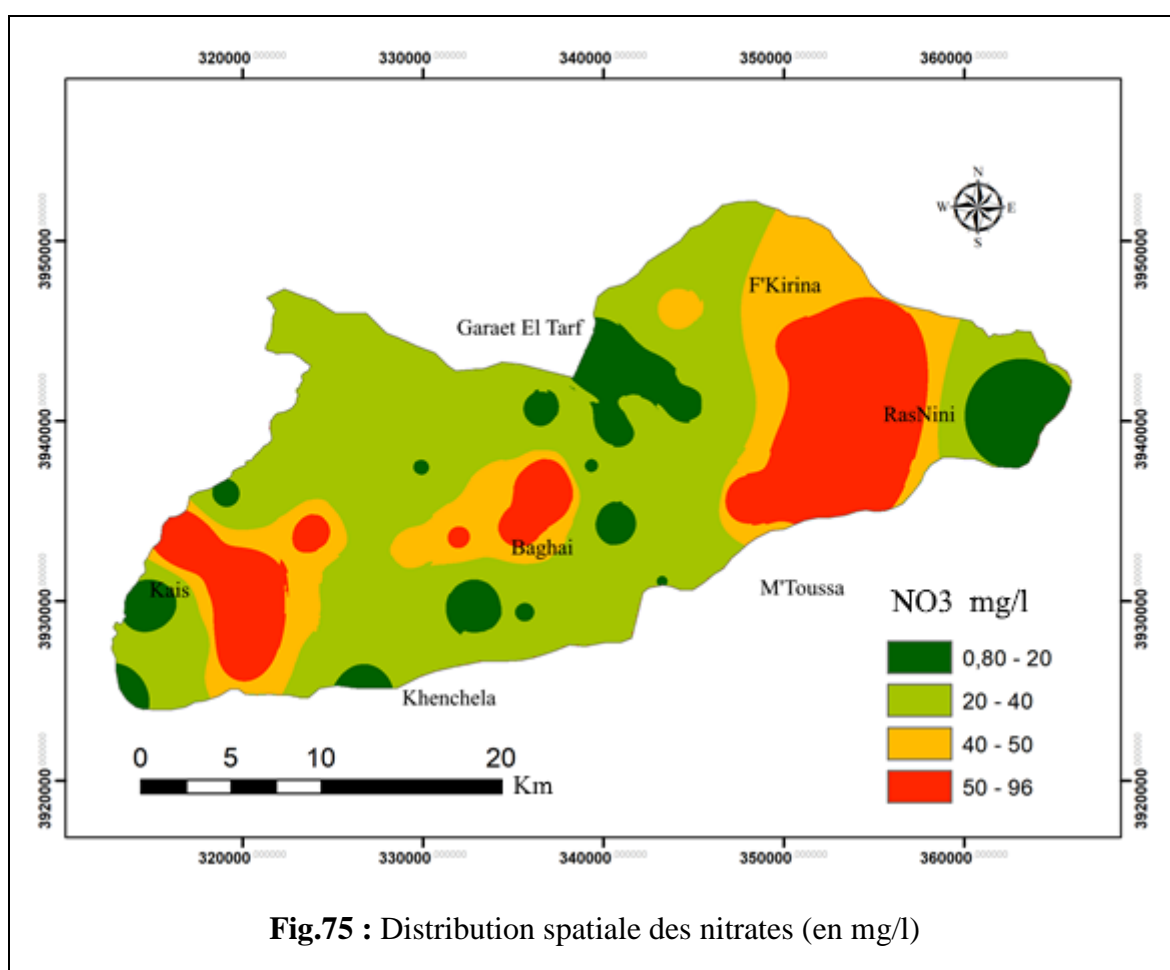
Pour la zone d'étude, l'indice de vulnérabilité est divisé en quatre intervalles d'indice de 56 à 174 ; chaque indice représente une évaluation du niveau de risque de contamination de la nappe, ce risque augmente avec la valeur de l'indice (Aller et al, 1987)



La carte de vulnérabilité (Fig.74) obtenue montre quatre classes de vulnérabilité :

- Vulnérabilité très élevée : dans la partie nord-est (F'Kirina) de la plaine (en rouge). Cette vulnérabilité peut être justifiée par un taux de recharge élevé de la nappe avec une pente égale ou inférieure à 2% et l'impact de la zone vadose. Ces conditions favorisent l'infiltration des contaminants présente au niveau de surface.
- Vulnérabilité élevée : se localise à l'est et au sud-est
- Vulnérabilité moyenne : couvrant plus de la moitié de la zone d'étude, localisée surtout au nord et au sud-ouest de la plaine.
- Vulnérabilité faible ; Cette classe de vulnérabilité se localise près d'el Garaet et sa partie ouest en relation avec les sols imperméables de cette zone.

5. Validation des cartes de vulnérabilité



Les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines de la nappe de Garaat El Tarf varient entre 0,80 mg/l et 96 mg/l, (Fig.75).

On constate une adéquation entre le degré de vulnérabilité et les concentrations mesurées des nitrates, Plus de 33,33 % des échantillons ont une concentration supérieure à 40mg/l se trouve dans une zone à forte vulnérabilité (développé très développé). En revanche, plus de 66,67 % des échantillons ont une concentration inférieure à 40 mg/l coïncident avec le degré de vulnérabilité faible à moyenne.

6. Conclusion

L'étude de vulnérabilité constitue une approche d'aide à la protection et à la prévention de la pollution des eaux souterraines de la nappe de Garaat El Tarf ainsi qu'à la cartographie de zones vulnérables à la pollution. Elle a été réalisée dans le but d'identifier les zones à haut risque de contamination. L'application de la méthode DRASTIC montre quatre classes de vulnérabilité allant de faible à très forte vulnérabilité

La carte de vulnérabilité constitue la synthèse des informations touchant les aspects de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination. Elle vise à rendre accessibles les informations spécialisées en les présentant dans un format avec lequel les aménageurs et les gestionnaires du territoire sont habitués de travailler. Cette carte constitue donc un outil précieux pour la gestion de la ressource.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le bassin versant de Garaet El Tarf est une entité hydrographique des bassins versants des hauts plateaux constantinois, située dans la partie Nord Orientale de l'Algérie entre l'Atlas Talien au Nord et l'Atlas saharien au Sud, et Il couvre une superficie de 2432 Km².

La région est soumise à l'influence d'un climat semi-aride, influencé par les courants d'airs froids et humides en provenance des Aurès où l'altitude dépasse les 1200 m. Des reliefs sur les versants Sud favorisent les précipitations 448 mm.

Sur le plan géologique la zone étudiée fait partie du domaine para- autochtone Nord-Aurésien avec une succession des formations sédimentaires que, avec une stratigraphie qui s'étale du Trias jusqu'au Quaternaire. La plaine est constituée par la superposition de trois ensembles ;

Un remplissage Mio-Plio-Quaternaire souvent très épais, constitue l'ensemble supérieur qui couvre la majorité de la surface (Agrégats, sables fins, limons, des graviers et des alluvions...). Un ensemble inférieur appartenant au Crétacé supérieur et moyen constitué par des calcaires fissurés parfois karstifiés. Ces deux ensembles reposent sur une couche marneuse imperméable de miocène inférieur qui constitue le substratum. La carte piézométrique réalisée montre que l'écoulement des eaux souterraines dont l'ensemble est de direction est –ouest (massif de calcaire vers Sebkha).

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres des eaux souterraines prélevées au cours de la campagne de terrain d'octobre 2014. D'après les résultats des analyses chimiques et à partir de plusieurs modes d'interprétations usuelles en hydrochimie, ont montré que :

Une minéralisation élevée des eaux souterraines vers le nord de la plaine (en avançons vers Sebkha). Cette minéralisation est due essentiellement au lessivage des formations géologiques évaporitiques et l'échange hydraulique eaux de sebkha - eaux souterraines. Les faibles valeurs de la minéralisation se localisent près des massifs calcaires, (lessivage des formations carbonatées). La projection des résultats des analyses hydrochimiques sur le diagramme de Piper montre trois types de faciès :

Faciès chloruré et sulfaté calcique : représente 76% de l'ensemble des échantillons ;

Faciès bicarbonaté calcique : représente 20% de l'ensemble des échantillons ;

Faciès chloruré sodique : représente 4% de l'ensemble des échantillons à la frontière de sebkha.

De l'observation de la carte de répartition spatiale des différents paramètres étudiés, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux souterraines est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge (interaction eaux-roches).

Bien qu'aux alentours de Sebkha, les eaux de la nappe superficielle acquièrent leurs fortes charges salines par l'échange hydraulique eaux de surface-eaux souterraines ou par l'infiltration des eaux pluviales.

L'analyse statistique multi variée (ACP) et l'analyse hydrochimique s'accordent pour montrer que les éléments chimiques en solution qui contrôlent la salinité des eaux souterraines proviennent essentiellement des minéraux évaporitiques par rapport aux minéraux carbonatés qui restent loin des points de saturation. La pluviométrie à dominance hivernale contribue dans la dissolution des évaporites.

Vis-à-vis l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, la majorité des échantillons étudiés présentent une eau admissible à bonne pour l'irrigation.

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines explique la pollution par la méthode DRASTIC et par le couplage des données recueillies avec un SIG révèle une tendance à la vulnérabilité forte à très forte au sud-Est et modéré à faible vers le nord-ouest de la zone d'étude.

À la lumière de ce travail nous recommandons les points suivants :

- ✚ En ce qui concerne l'agriculture, le problème majeur des eaux souterraines reste le développement important du maraîchage. Face à cette situation, il serait indispensable de limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques dans les sols à forte perméabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe ;

- ✚ Une modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et du transfert des polluants chimiques au niveau du bassin sera utile pour connaître leur dispersion sur l'ensemble du bassin ;

- ✚ Une étude de la dispersion de la faune et la flore sur le bassin et l'influence des décharges d'eau douce et saline sur celles-ci en déterminant le seuil d'équilibre entre ces eaux au-delà duquel on assistera à des perturbations du système.

- ✚ Les pompages dans l'aquifère profond conduisent à réduire la différence de pression entre nappe superficielle et nappe profonde et provoquer la dégradation de celle-

ci. Une modélisation des écoulements est dès lors nécessaire pour évaluer l'impact de l'exploitation des forages dans la dégradation de la ressource. Ce modèle sera bâti à partir du schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère et des sections descriptives des circulations de l'eau souterraine. Il tiendra en compte l'hydrodynamisme des deux nappes pour établir avec certitude les mécanismes d'échanges entre ces dernières.

- ✚ Elargir la minéralisation cationique des eaux, aux dépens des roches, aux éléments chimiques en traces.

- ✚ Implanter des piézomètres pour l'ensemble de la zone d'étude, surtout près des forages d'exploitation pour déterminer le coefficient d'emmagasinement

- ✚ Surveiller la pollution et implanter des stations de traitement aux sorties des différentes unités urbaines et industrielles, en localisant des périmètres de protection près des zones sensibles à la pollution.

- ✚ Diminuer la contrainte d'exploitation de la nappe en réalisant le projet de la station de traitement pour l'alimentation en eau potable

- ✚ Sensibiliser la population afin qu'elle optimise l'utilisation de cette ressource précieuse.

- ✚ L'évaluation des entrées et des sorties du système permettra de faire des simulations ou modèles dynamiques et chimiques des ressources en eau dans la région. Ce qui aidera les décideurs ou les utilisateurs à établir facilement les scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource en relation avec les changements globaux à venir.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdesselem M., Mania J., Mudry J., Gelard J-P., Chauve P., Lami H. and Aigoun C., (2000). Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). *Revue des sciences de l'eau*, 13(2) : 155-166.

Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J. and Hackett G., (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA/600/2-87-036, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Washington, D.C.

Amrani S et Hinaje S., (2014). Hydrodynamisme et minéralisation des eaux souterraines de la nappe phréatique plio-quadernaire du plateau timahdite-almisguigou (moyen atlas, Maroc). *European Scientific Journal*, 10 (20) :174-189.

Anazawa K. and Ohmori H., (2005). The hydrochemistry of surface waters in Andesitic Volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemosphere*, 59 : 605-615. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.10.018.

Babiker I.S., Mohamed A.A.M. and Hiyama T., (2007). Assessing ground water quality using GIS. *Water Resources Management*, 21 (4) : 699-715.

Bakalowicz M., (1988). Géochimie des sources carbonatées des corbières et formation de travertins. *In* : les édifices travertineux et l'histoire de l'environnement dans les Midi de la France. Aix-en-Provence, 280 p. Travaux de l'UA 903 ET ATP PIREN, Aix-en-Provence, n° VII, 210-225.

Belkhiri L., (2011). Étude de la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain Azel-Est Algérien. Doctorat En Hydraulique, Université El Hadj Lakhdar-Batna, 121p.

Benazzouz M.T., (1986). Recherches géomorphologiques dans les hautes plaines de l'Est Algérien : la sebkhet Tarf (Algerie). Thèse de doctorat en Géographie, Université de Paris, 294 p.

Bord J.P., (1981). Cartographie de l'utilisation du sol dans l'Est algérien : essai de zonage agricole. *Géographie*. Université Paul Valéry-Montpellier III.

Bouanani A., (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation. Étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie).Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université de Tlemcen, 249 p.

Boulabiez M., (2017). Évaluation de la pollution dans la plaine de Collo, interaction nappe-rivière. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, 183p.

Brinis N., (2011). Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride cas de l'aquifère d'El-Outaya, région Nord-Ouest de Biskra-Algérie. Thèse de doctorat en Hydraulique, Université Mohamed Kheider Biskra, 191 p.

Brown, C.E., (1998). AppliedMultivariateStatistics in Geohydrology and Related Sciences.Springer, New York. 250 p.

C.G.G. (Compagnie Générale de Géophysique) (1970). Prospection géophysique sur le plateau de Châria, Service des Études scientifiques, 26 p.

Carré J., (1975). Géochimie du strontium dans les eaux de la nappe et de surface de la région parisienne. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Paris VI, 216 p.

Chandoul E.R., Trabelsi N., Bouaziz S., Ben Dhia H., (2008). "Spatial Analyst" pour le calcul et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon la méthode DRASTIC. Application sur la nappe phréatique de Gabès Nord. La conférence francophone ESRI ,1et 2 octobre 2008, Versailles. www.esrifrance.fr/sig2008/DRASTIC.htm. 12 p.

Dali N., (2009). Ressources et gestion intégrée des eaux du bassin deGareat El Tarf (W. Khenchela). Mémoire de Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, 132p.

De Martonne EM., (1926).L'indice d'aridité. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 9 : 3-5.

Dib D., (2018).Origine et caractérisation de la Pollution des eaux dans le bassin de Tarf (Ne-Algerien). Thèse de doctorat en Écologie et Environnement, Université d'Oum El-Bouhaghi, 201p.

Dominique V., (2009). Études de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges Ile de La Réunion. Master en Géosphère, Spécialité Transfert Sol Aquifère,33 p.

Drever J.I., (1997). The geochemistry of natural waters. 3rd Edition. New York-Prentice-Hall INC. 436 p.

DSA (2017) : Direction des services agricoles-Khenchela. Statistiques sur les cultures les plus cultivées dans la wilaya de Khenchela.

DSP (2017) : Direction de la santé et de la population-Khenchela-2017. Statistiques sur la population de la wilaya de Khenchela.

Duchaine D., (1995). Cartographie de la Vulnérabilité Des Eaux Souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire de recherche, département de Géographie, Université du Québec INRS-Eau, 95p.

Eastman J.R., (1995). Idrisi, un SIG en mode image. Clark labs for cartographic technology and geographic analysis. Ed. CRIF, 500 p.

El-Tayeb El-Saddig M., (1993). Les systèmes aquifères de la région Geneina-Adre (confins soudano-tchadiens). Thèse de doctorat en Hydrogéologie. Université d'Avignon, France, 250 p.

Emberger L., (1955). Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des laboratoires de botanique, géologie et zoologie de la faculté des sciences de l'université de Montpellier (Série Botanique), Fascicule 7, 3-43.

ESRI,(2014). Arcgis desktop: release 10.3 redlands,ca: environmental systems research institute

Fetter C.W., (1993). Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, 458 p.

Freeze R.A. and Cherry J.A., (1979). Ground water. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall. London, 604 p.

Gausson H. et Bagnouls F., (1952). L'indice xérothermique. Bull, de l'Assoc. de Géographes français, Paris. Pp. 10-16.

Ghandriche H., (1991). Modalités de la superposition de structures de plissement chevauchement d'âge alpin dans les Aurès (Algérie). Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, France, 189 p.

Groen J., Schuchmann J. B. and Geirnaert W., (1988). The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in Northwestern Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 7(7): 999-1009.

Guiraud R., (1973). Évolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse de doctorat en Sciences, Université Nice, France, 270 p.

Guyot G., (1999). Climatologie de l'environnement-Cours et exercices corrigés. Dunod, Paris, 525p.

Hem J.D., (1985). Study and interpretation of the chemical characteristic of natural water. 3^{ed} Edition. US Geological Survey. Water-Supply. Paper 2254, 263 p.

Herkat M., (1982). Lithostratigraphie et sédimentologie des formations carbonatées du jurassique supérieur des monts Oulad Nail et la terminaison orientale du Djbel Amour (Atlas Saharien). Thèse 3^{ème} cycle, Université de Pau et des pays de l'Adour, France, 304 p.

Hernandez-Cerda ME., Torres-Tapia LA., Valdez-Madero G., (2000). Sequia meteorological. Pp25-40. En: Gay C. (comp) Mexico: una vision hacia el siglo XXI. El cambio climatico en Mexico, instituto de Geografia, UNAM, Mexico

Houha B., (1996). Quantité et qualité des eaux souterraines de la région de Khenchela (Garaet Tarf). Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, 113 p.

Houha B., (2007). Étude du fonctionnement hydrogéologique et salin d'un bassin semi-aride Rémila-Khenchela. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, 182 p.

Hsissou Y., (1999). Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride : cas de la plaine du souss. Thèse de doctorat d'État, Université Ibnou Zohr Agadir, Maroc, 228 p.

Hsissou Y., Chauve P., Mania J., Mangin A., Bakalowicz M. et Gaiz A., (1996). Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . *Journal of Hydrology*, 183: 445-451.

ICWE, (1992). Déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable. <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/francais/icwedecf.html>.

Jourda J.P., Kouame K.J., Adja M.G., Deh S.K., Anani A.T., Effini A.T. et Biemi J., (2007). Évaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. SIG 2007. 21p.

Laffitte R., (1939a). Étude géologique de l'Aurès. Thèse de doctorat en Sciences naturelles: Faculté des sciences de l'université de Paris, 484 p.

Laffitte R., (1939b). Structure et relief de l'Aurès (Algérie). Bulletin de l'Association de géographes Français, N°119,34-40 p.

Lallmand-Barres A., (1994). Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Étude documentaire. Rapport BRGM R 37928.

Lebourgeois F., Rathgeber C., Ulrich E.,(2010). Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance de *Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. Revue Forestière Française, 62(1) :pp7-2.

Louvrier M., (1976). Acquisition des données hydrogéochimie et traitements. Exemples d'application. Thèse 3^{ème} cycle, Paris, 182 p.

Marmi R., (1995). Les bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie nordorientale: Étude stratigraphique, sédimentaire, structurale et géochimique. Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, France, 253 p.

Meybeck M., (1984). Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France, 530 p.

Morris B.L., Lawrence A.R., Chilton P.J.C., Adams B., Calow R.C. and Klinck B.A., (2003). Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management. Early warning and assessment report series, RS. 03-3. United Nations Environmental Programme. Nairobi, Kenya. 126 p.

Napolitano P., (1995). GIS for aquifer vulnerability assessment in the PianaCampana, southernItaly, using the DRASTIC and SINTACS methods. MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.172 p.

Osborn N.I., Eckenstein E. and Koon K.Q., (1998). Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma Water Resourcesboards. Technical report. 98-5. https://www.owrb.ok.gov/studies/reports/aq-vuln/tr98_5.php.

Pilgrim D.H., Chapman T.G. and Doran D. G., (1988). Problems of rainfall runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4): 379-400. DOI:10.1080/02626668809491261.

Piper A.M., (1944). A graphic procedure in geochemical interpretation of water-analysis. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25 (6): 914-928.

Plummer L.N., Jones B.F. and Trudell A.H., (1976) (revised 1978, 1984). WATEQF; a FORTRAN IV version of WATEQ: a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *Water-Resources- Investigations Report 76-13*.

Schoeller H., (1962). Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Ed. Masson et Cie. 642 p.

Servant J., (1975). Contribution à l'étude des sols halomorphes. L'exemple des sols sales du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse de doctorat d'État, Université de Montpellier 2, 194p

Simler R., (2004). Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon, Logiciel d'hydrochimie multi langage en distribution libre.

Sinan M., Maslouhi R. and Razack M., (2003). Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 15p.

Strahler A., (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*. 38:913-920. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Thornthwaite C.W., (1948). An Approach to a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38 (1): 55-94.

Todd D. K., (1980). Ground-water Hydrology. (Second Edition): John Wiley and Sons, New York, 535 p.

Travi Y. et Mudry J., (1997). Méthode par évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, 1 :13-21.

Viessmann W., Knapp J.W and Lewis G.L., (1977). Introduction to hydrology. New York IEP-Dun-Donnelley, Harper & Row-Series in civil engineering xiv, 704 p.

Vila J.M., (1977). Notices explicatives de la carte géologique au 1/50000), Gareat El Tarf (175), service de la carte géologique de l'Algérie, SONATRACH, Alger. 22p.

Wilcox L.V., (1955). Classification and use for irrigation waters. USDA, Circular No. 969, United States Department Of Agriculture, Washington, 21 p.

Williams J.R. and Kissel D.E., (1991). Water percolation: an indicator of nitrogen-leaching potential. *In:* Follet R.F., Keeney D.R. and Cruse R.M. (Eds.). Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, 59-83.

Yelle P.E., (2003). Propre, propre et salée ; qualité de l'eau d'irrigation. Agri-vision 2003. MAPAQ, Saint-Rémi, 10 p.

Site web :

<http://www.worldwaterforum4.org.mx/files/report/FinalReport.pdf> (4th World Water Forum, 2006) World Water Forum, (2006). Local action for a global change. Final report.

Annexe

Annexes

Facteur de correction pour calcul de l'ETP de Thornthweit

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Forage de la coupe hydrogéologique I-I

FORAGE (Ain Massous)		
X : 912.000	Y : 269.000	Z : 860 m
Coupe géologique		
0-10m : argile brune		
10-16 m : argile Jaune avec des graviers de calcaires.		
16-20m : argile Jaune avec peu des graviers de calcaires		
20-31m : argile Jaune avec des graviers de calcaires.		
31-35m : argile sableuse.		
35-41m : argile sableuse avec très peu de graviers.		
41-47m : argile sableuse avec peu de graviers.		
47-56m : argile sableuse avec très peu de graviers		
56-60m : argile Jaune.		
60-77m : argile sableuse avec très peu de graviers.		
77-100m : argile sableuse avec peu de graviers		
100-102m : argile plastique de couleur noirâtre		
FORAGE (H47)		
X : 921.650	Y : 268.275	Z : 880m
Coupe géologique		
0-5m : argile brune plastique.		
5-9m : argile beige.		
9-19m : calcaire lacustre rose vert beige.		
19-23m : graviers de calcaire rose avec très peu d'argile.		
23-31m : argile brune avec très peu de graviers		
31-34m : graviers de calcaire mixte avec argile brune.		
34-42m : graviers de calcaire avec très peu d'argile.		
42-52m : graviers de calcaire.		
52-60m : graviers de calcaire mixte avec des argiles brunes sableuse		
60-74m : graviers de calcaire mixte avec des argiles jaune 50 %		
74-90m : graviers de calcaire avec très peu d'argile jaune – brunâtre		
90-95m : graviers de calcaire beige –gris.		
95-101m : graviers de calcaire avec très peu d'argile brune.		
101-106m : argile jaune avec très peu de graviers de calcaire.		
106-118m : graviers de calcaire avec des marnes grises.		
118-121m : marne grise.		
FORAGE (IJ34)		
X : 916.500	Y : 280.750	Z : 750 m
Coupe géologique		
0-7m : terre arable et des graviers et argile jaune.		
07-20m : croute calcaire.		
20-31m : gravier et peu d'argile beige.		

31-35m : gravier.
35-37m : gravier et argile blanchâtre.
37-40m : argile brune et marne grise et gravier.
43-48m : marne noire.
48-56m : marne grise avec passage du gravier de calcaire.
56-63m : marne noire et peu de gravier de calcaire.
63-75m : marne grise et peu de gravier de calcaire.
75m-78m : marne grise et gravier.
78-90m : marne grise et des graviers.
90-100m : marne grise et des graviers.

FORAGE (K44)

X : 922.250

Y : 277.850

Z : 901m

Coupe géologique

0-7m : argile rosâtre avec des graviers de calcaire blanchâtre et jaunâtre

1-10 : Argile brune avec des graviers de calcaire

10-32m : gravier de calcaire siliceux blanchâtre (ou conglomérat)

32-130m : marne grise de compacité variable

Article

Hydrochemical characterization of Gareat-El-Tarf plain groundwaters, northeastern, Algeria

H. Ouldammam* and B. Houha

Department of Ecology and Environment, Abbes Laghrou University, Khenchela 04004, Algeria.

*Corresponding author, email: Ouldhanane@hotmail.fr

Received date: Jan. 31, 2018 ; revised date: March 17, 2019 ; accepted date: Apr. 24, 2019

Abstract

A hydrochemical study has been conducted on groundwaters of Gareat-El-Tarf plain in order to discriminate the salinity origin. Achieved findings indicate that waters are of medium salinity, with a conductivity of 1618 μ S/cm. A spatial variation in chemical facies suggests that waters chemistry is influenced by a number of factors such as geology, climate and anthropogenic activity. Waters are bicarbonate-calcic type upstream of the basin and near calcareous outcrops, sulfate-calcic type in the Mio-Plio-Quaternary filling and ultimately become chloride-sodic type on the borders of the Sebkhah. Chloride ion crossing with major ions on binary diagrams suggests that waters salinity would be attributed to water-rock interaction characterized by mineral dissolution and precipitation, as well as cation exchange. Chemical tracing by trace elements such as strontium suggests that evaporites dissolution contributes to waters salinity of Gareat-El-Tarf plain. Statistical approach is another tool allowing to classify processes responsible for hydrochemical variability, in function of their significance. The increase in salinity is mainly due to climate aridity.

Keywords: Hydrochemistry, salinity, dissolution, Sebkhah, Algeria

1. Introduction

Water resources are increasingly scarce and are of poor quality in Saharan Atlas, where semi-arid climate prevails; with hot and dry winds (sirocco) originating from Sahara. Climate aridity, successive dry periods, precipitation irregularity and anthropogenic activity are factors having reduced waters amount of Gareat-El-Tarf basin and degraded their quality. Gareat-El-Tarf plain is located in the region of Khenchela northeast of Algeria; at the extreme east of the steppe upper plains stretching on an area of nearly 1378 km², between 35°56' of latitude north and 7°34' of longitude east. It is bordered to the southeast by DjChettaia, DjTafrent, DjBoutakhma, to the southwest by DjRasSerdoune, DjAures, to the east by F'kirina (ouedNini), to the west by Remila plain (ouedGuiss) and to the north a closed depression of 200 km², Gareat-El-TarfSebkhah. Climate is characterized by the annual temperature mean is of +16°C. The precipitations are of the order of 370 mm. A semi-arid region subject to ground waters salinity. It is a center of intensive agricultural activity. Most water needs derive and will keep deriving from groundwaters [1]. The aim of this work is to better understand the physicochemical state of the plain groundwaters in order to comprehend their hydrochemical behaviour to obtain data on their order and their salinity origin.

2. Experimental details

2.1. Geological setting

Geology is made up of Cenomanian marls at the base, surmounted by cracked limestones of Lower Cretaceous, on which deposit in discordance Miocene sandstones of limited extension. The whole is covered by Mio-Plio-Quaternary, consisting of sand and gravel conglomerates, with a set-up of visible Triassic in Khenchela and DjKroumaa [2]. Gareat-El-Tarf plain is replenished by rainwaters and wadis flood waters during flooding periods. Waters output occurs only by evaporation and intensively during dry seasons. The plain is characterized by a dense drainage system of small streams and wadis, the most important of which are El Guiss, Baghai, Aïssour and Niniwadis, which transport waters until the site [3]. The climatic conditions play a major role in the regime of these streams, particularly precipitations that are directly involved in the pluvial recharge of the catchment [4].

2.2. Sampling and Analytical Techniques

To characterize hydrochemistry of the aquifer system of Gareat-El-Tarf plain, 45 boreholes were sampled; sampling was performed in October 2014. All analyses were carried out at the LACIP laboratories of AinM'lila. Field measurements were carried out by means of multi-parameter Consort C931, version 2.4. In order to be able to quantitatively determine the elements that evolve after

sampling, such as temperature, pH, electrical conductivity

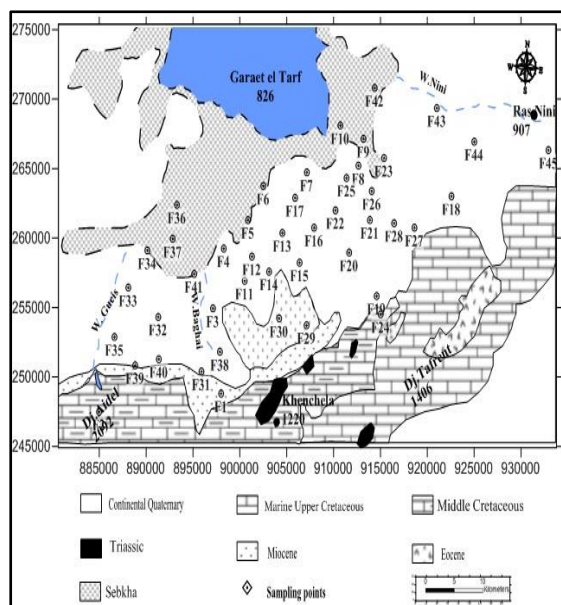


Figure 1. Geological map and inventory of water points -Gareat-El-Tarf plain.

3. Results and discussion

3.1. Physical parameters

Measured temperatures in situ on Quaternary aquifer groundwaters are fairly homogeneous and vary between 16° and 25°C, with a mean of 21°C.

In all sampled waters, measured pH are homogeneous, varying between 6, 5 and 8 with a mean of 7, 15.

The global fluctuations of chemical water load can be reflected by water electrical conductivity, which is a linear function of dissolved ions [5, 6]. Variation in electrical conductivity can have both an anthropogenic (groundwater pollution) and a natural origin (dilution by meteoric waters, infiltration of less mineralized surface water [5]. Conductivity values in the plain groundwaters are very dispersed, ranging between a minimum value of 580 μ S/cm and a maximum value of 2780 μ S/cm, exhibiting abnormalities in the area located on the borders of the Sebkhia, northeast and southwest of the plain being subject to a great anthropogenic influence as agricultural activity.

3.2. Hydrochemistry

So we have plotted the 45 samples on Piper diagram that show chemical facies evolution upstream/downstream. It is seems obvious that, following the flow direction, the hydrochemical evolution of the system occurs from bicarbonate calcic pole in the carbonate outcrops south towards chloride-sodic type brines on the borders of the Sebkhia, going through an intermediate chloride-sulfate-calcium-magnesium facies. Outside this general trend,

certain points indicate a notable influence of sulfate pole or chloride-sodic pole (Fig.2). These are waters local contaminations and saliferous minerals dissolution contained in the Triassic inclusions.

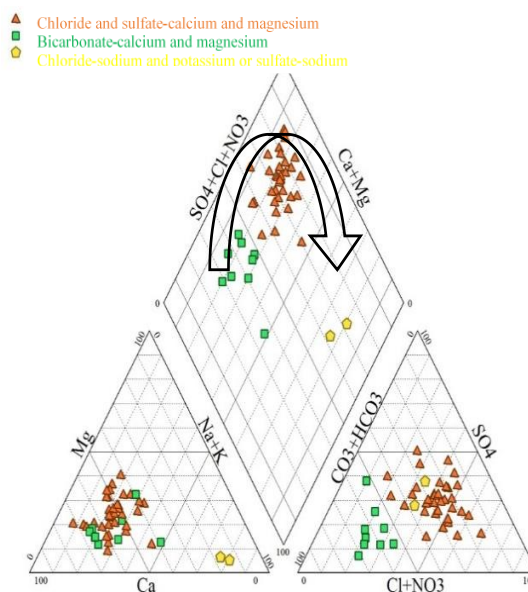


Figure 2. Piper diagram for groundwaters.

To better understand the groundwater mineralization process, we have plotted major elements in function of chlorides (Fig.3). This latter is a conserved element, does not contribute to water-rock interaction, characterizes the waters salinity origin and constitutes a mixing tracer[5, 6]. The disposition of different analyzed water points in relation to mixing line freshwater-saltwater (rainwater-seawater) can be of great significance to identify other phenomena associated with the mixing process.

The graph Cl versus Na⁺ shows that all water points are located below the mixing line. Given that Na⁺ Content should balance Cl⁻ content, Na⁺ deficit is explained by the ionic base exchange phenomenon between water and the aquifer and is reflected by Na⁺ adsorption and Ca²⁺ release [7]. Calcium input derives also from gypsum dissolution. The relationship between Ca²⁺ and Cl⁻ is a good illustration of this, indicating that the points are usually above the mixing line freshwater-saltwater.

The relationship between Mg²⁺ and Cl⁻ shows dolomite dissolution, resulting from water-rock interaction, with a tendency to the balance.

The relationship between SO₄²⁻ and Cl⁻ shows that the quasi-totality of the points is located above the mixing line freshwater-saltwater. The enrichment of the points in sulfate is associated with gypsum dissolution and/or with agriculture-originating contamination (irrigation return flow).

3.3. Saturation index

The use of PHREEQC software (USGS)[8], has allowed us to calculate the saturation index of anhydrite, aragonite, calcite, dolomite, gypsum and halite [9].

The saturation indices of certain common mineral phases show obviously that groundwaters are generally supersaturated regarding most carbonate mineral phases (Aragonite, dolomite and calcite) that are probably

responsible for hydrochemical composition (Fig.4). In contrast, evaporitic minerals (halite, gypsum and anhydrite) are always undersaturated.

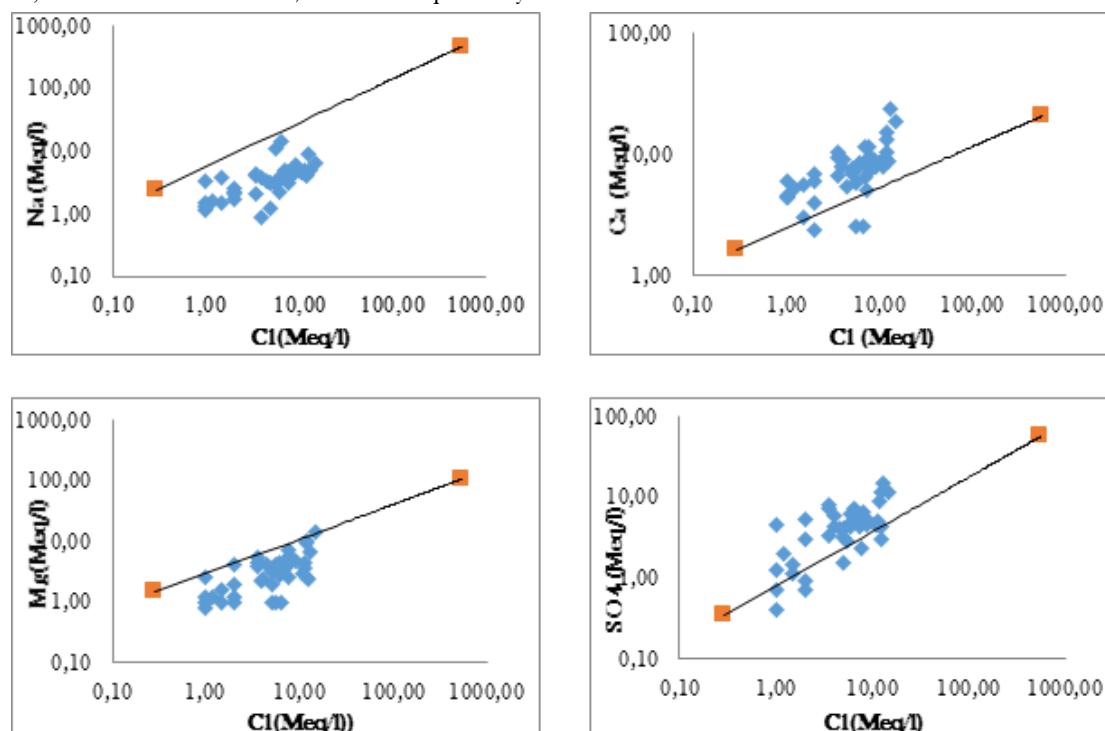


Figure 3. Relationship between Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} and Cl of groundwaters and rainwater-seawater.

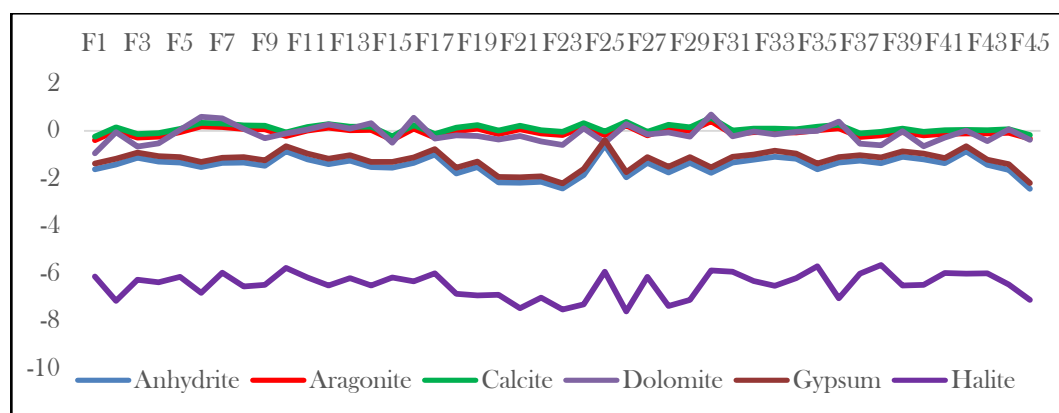


Figure 4. Curve indicating groundwaters saturation index.

3.4. Strontium study

The strontium (Sr^{2+}) is an element linked to evaporites. It is very marginally integrated into carbonates network and is little adsorbed by clays. High Sr^{2+} contents in waters are only explained by celestite (SrSO_4), a mineral associated with gypsum. So it constitutes a good marker of the evaporites presence [10].

Strontium allows then to distinguish sulfates deriving from sulfurs oxidation (low contents) from those deriving from evaporitic dissolution (high contents) [11].

$\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+}\%$ ratio is typical of evaporitic origin, if it is equal or greater than 1‰ [12]. It is greater than 5 ‰ in Alpine Triassic evaporites in non-outcropping evaporitic Triassic [11].

All groundwaters of the plain exhibit elevated $\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ ratios (> 5‰). It seems that Triassic evaporites contribute to groundwaters chemistry [13] and have chemistry of evaporitic origin. This ratio reach a maximum of 23‰ in the center and westward then decreases gradually northward and eastward, where minimum values concentrate (Fig.5).

3.5. Multivariate statistical analysis

The correlation between the physicochemical parameters in groundwaters helps understand certain phenomena resulting from water-rock interaction; it allows to provide an approach on the common origin of certain parameters [14].

3.5.1. Descriptive statistical analysis

The results of the physico-chemical analysis of groundwater are presented in Table 1

It is shown from the average of major element levels that the dominant cations are Ca²⁺ and Na⁺ and for the dominant anions are Cl⁻ and SO₄²⁻.

Table 1: Preliminary findings of physicochemical parameters.

Variable	Min	Max	Mean	Standard deviation
Ca ²⁺	48,100	480,960	161,428	81,501
Mg ²⁺	9,600	177,120	44,496	32,606
Na ⁺	20,470	343,970	92,342	59,452
K ⁺	0,012	4,753	0,912	1,059
HCO ₃ ⁻	164,700	445,300	283,587	61,948
Cl ⁻	35,500	527,250	217,712	135,740
SO ₄ ²⁻	20,000	740,000	229,244	145,407
NO ₃ ⁻	0,800	96,000	33,278	24,206
Sr	1,270	21,180	5,569	3,992
c25°C	580,000	3720,000	1617,778	738,952
PH	6,500	8,000	7,156	0,286
T°C	16,000	25,000	20,711	2,944

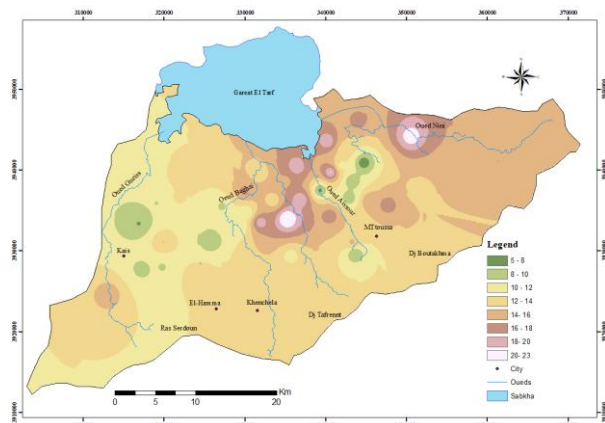


Figure 5. Spatial distribution of Sr/Ca ratio in groundwaters of Gareat-El-Tarf plain.

3.5.2. Correlation matrix

Correlation matrix from this PCA (Table.2) shows that EC exhibits a significant link (0,564 to 0,914) with Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ and Sr²⁺; this reflects the contribution of these elements to waters saline recharge acquisition. Ca²⁺ and Mg²⁺ exhibit a high positive correlation between them (0,755), indicating a common origin. The same is true for Ca²⁺ and SO₄²⁻ (0.84), SO₄²⁻ and Mg²⁺ (0.772), Ca²⁺ and Sr (0,752) that also have very good positive correlation. Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ and SO₄²⁻ high contents detected in certain samples can suggest chlorides and sulfates salts dissolution such as gypsum, anhydrite and halite. The close link existing between sulfates and calcium highlights this trend.

3.5.3. Principal component representation

Principal component analysis PCA highlights the links that seem to exist between chemical elements [15]. Principal component analysis was performed on the observations made on the area waters:

The F1 factorial design and F2 provide 66,51 % of total data (Fig.6), the F1 axis (45,86 %) is positively determined (CE, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺) The F1 axis is a mineralization axis and accounts for the main part of mineralization due to water-rock interaction.

The F2 axis, accounting for 20, 65 % of total variance, is determined by Na⁺ K⁺ associated with HCO₃⁻ as opposed to NO₃⁻ it reflects the influence of clay fraction, and Pontian red clay in cation exchange processes.

The F3 axis, accounting for (12, 38 %) of total variance (Fig.7), is determined by NO₃⁻ it is an agricultural pollution axis in a cracked area.

The projection of individuals on the F1-F2 design revealed that the F1 axis indicates opposition between marginally mineralized waters upstream of the plain in the calcareous outcrops, and highly mineralized waters on the borders of the Sebkha. The F2 axis indicates alkaline-rich waters, as a result of water-rock interaction recorded in the center of the plain in the Mio-Plio-Quaternary filling.

The PCA was performed using XLSTAT2016 software.

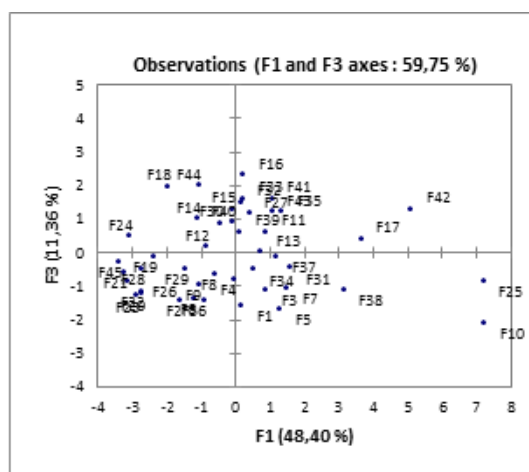
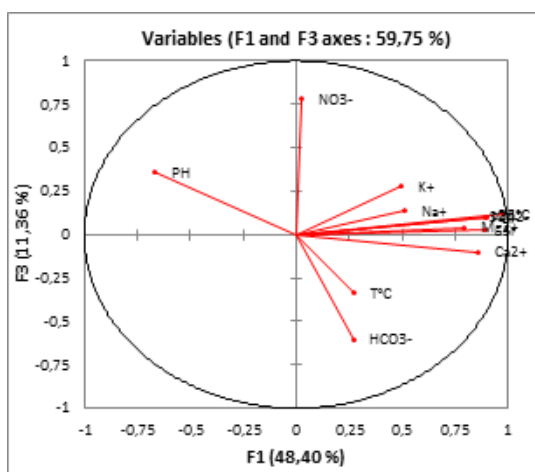


Figure 6: F1-F2 factorial design. Figure 7. F1-F2 factorial design.

Table 2: Preliminary findings of physicochemical parameters

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Sr	c ₂₅ °C	PH	T° C
Ca ²⁺	1											
Mg ²⁺	0,755	1										
Na ⁺	0,083	0,132	1									
K ⁺	0,106	0,162	0,847	1								
HCO ₃ ⁻	0,098	0,094	0,438	0,275	1							
Cl ⁻	0,709	0,662	0,470	0,462	0,130	1						
SO ₄ ²⁻	0,840	0,772	0,410	0,393	0,152	0,652	1					
NO ₃ ⁻	0,081	0,199	-0,211	-0,096	-0,468	0,098	0,086	1				
Sr	0,753	0,592	0,504	0,450	0,203	0,808	0,761	-0,036	1			
c ₂₅ °C	0,786	0,714	0,596	0,564	0,228	0,914	0,863	0,069	0,881	1		
PH	-0,761	-0,573	0,041	0,047	-0,258	-0,615	-0,516	-0,011	-0,481	-0,563	1	
T° C	0,327	0,335	-0,183	-0,145	-0,149	0,286	0,166	-0,111	0,223	0,178	-0,310	1

4. Conclusion

Geology is depicted as a sedimentary set made up of Cenomanian marls at the base, on which deposit Maastrichtian limestones; the whole is covered by sand, clay and gravel detrital filling. The plain groundwaters display significant mineralization variations. Electrical conductivity ranges between 580 to 2780 μ S/cm, presenting abnormalities, with elevated values located northeast and southwest and on the borders of the Sebkha. The chemical approach use, namely, major elements and trace element (Sr⁺), allowed us to understand the waters mineralization process. The waters chemical facies evolves from carbonate-calcic in the calcareous outcrops towards chloride-calcic downstream of the plain. Waters salinity would be attributed to water-rock interaction by the dissolution of Triassic evaporitic formations. The thermodynamic approach highlighted carbonates precipitation and halides dissolution. Chlorides- major ions binary ratios highlighted cation exchange process with sodium absorption and alkaline-earths desorption.

References

- [1] B. Houha, Doctorate thesis, 2007, university of Annaba (Algeria).
- [2] B. Houha, N. Kherici, S. Kachi, V. Valle., Am J Appl. Sci(2008) 891 -895.
- [3] B. Houha, magister thesis, 1996, university of Annaba(Algeria).
- [4] N. Dali, D. Zouini, N. Bougherira, J Hydrocarb Mines Environ Res (2013)61-65.
- [5] A. ElAchheb, J. Mania, J. Mudry, P. Chauve, Proceedings First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring and Management, Essaouira, Morocco 2001.
- [6] C. Fehdi, A. Boudoukha, A. Rouabhia, E.Salameh, AfrSci J (2009)217-231.
- [7] N. Belkoum, B. Houha, Sciences J Mater Environ Sci(2017)3262- 3268
- [8] L N B F.Plumme, Jones A H., Truesdell., WATEQF : à Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. - In: US Geological Survey. Water Research Investigation Report(1976).
- [9] S. Amrani, S. Hinaje, Eur Sci J, (2014)174-189.
- [10] J. Carre, Thesis 3rd cycle,1975 , Univerity of Paris(France) .
- [11] M. Abdesselem, J. Mania, J. Mudry, J-P. Gelard, P.Chauve, H. Lami, C. Aigoum, Rev Sci Eau (2000)155-166.
- [12] M. Bakalowicz, thesis, 1988, La formation des travertinspects géochimiques, Univerity of Provence (France).
- [13] M. Meyrbek, thesis, 1984, Univerity of Paris (France).
- [14] N. Brinis, A. Boudoukha, A. Ahmed Hamel, Larhyss J (2015) 123 -137.
- [15] Y. Travi and J. Mudry, Méthode pour l'évaluationet la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienned'Afrique de l'Ouest (1997).