



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



Université Akli Mohand Oulhadj BOUIRA
Faculté des sciences et des sciences appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

FREDJ Amira

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

Filière : HYDRAULIQUE

Option : RESSOURCES HYDRAULIQUES

Thème :

**Aptitude des eaux souterraines du bassin
versant Sahel à l'AEP et à l'irrigation**

Devant le jury composé de :

- Président : Mr METAICH Mehdi
- Examinatrice : Mm SIFOUN Naima
- Examineur : Mr DJAFARKHODJA Hakim
- Promotrice : Mme REZIG Amina
- Co-promotrice : Mme BALOUL Djouhra

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, mes vifs remerciements et ma profonde gratitude s'adresse à notre Dieu, le grand créateur qui m'a donné de la patience, du courage et de la volonté afin d'atteindre ce travail.

Je tiens à remercier vivement ma promotrice « Mm REZIG Amina » et ma co-promotrice « Mm BALOU Djouhra » pour leurs précieux conseils, leur amabilité de superviser et critiquer fructueusement le déroulement de cette étude, je leur exprime ici, ma vive reconnaissance.

Messieurs le président et les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail et de siéger au jury, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements les plus sincères vont aux enseignants du département de l'hydraulique pour leurs conseils, intérêt et orientation qu'ils m'ont porté durant ma formation.

J'adresse également mes vifs remerciements à ma petite famille, particulièrement à ma mère, qui n'a pas hésité à m'aider et m'encourager moralement et matériellement.

Je souhaite adresser un message de tendresse à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère, qui m'a protégé pendant toute ma vie, et qui a fait tout pour que je devienne ce que je suis.

À mon père qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés

A mon frère « Alaa Mohamed »

A tous les professeurs qui ont contribuées à ma formation

Pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer, et leur Patience durant ma vie.

À toute ma famille et à toute la promotion de l'hydraulique

Résumé:

La présente étude porte sur l'aptitude des eaux souterraines du bassin versant Sahel à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation de la région de Bouira, qui s'étend de la commune de Mchedellah à Ain Bessam. Les résultats des analyses réalisées montrent que ces eaux sont relativement riches voir polluées en calcium, magnésium, chlorures, bicarbonates, sulfates et nitrates conférant aux eaux les faciès bicarbonatée calcique et magnésienne, Chlorurées et sulfaté calcique et magnésienne. La cartographie faite pour les différents éléments à montrer que 70% des eaux des forages sont contaminés en premier lieu par les engrais chimiques et des autres activités anthropiques et ne sont pas destinées à l'alimentation en eau potable. L'examen des cartes des différents indices et le diagramme de Wilcox indiquent que les eaux souterraines du bassin versant Sahel ne provoque pas un risque pour les sols ou les cultures à irrigués à l'exception du Forage F19 qui présente un risque d'imperméabilité du sol et doit être éliminé.

Mot clés : eaux souterraines, bassin versant Sahel, pollution des eaux souterraines.

Abstract:

This study focuses on the suitability of groundwater in the Sahel watershed for drinking water supply and irrigation in the Bouira region, which extends from the commune of Mchedellah to Ain Bessam. The results of the analyzes carried out show that these waters are relatively rich or even polluted in Calcium, Magnesium, Chlorides, Bicarbonate, Sulfate and nitrate, giving the water the facies of calcium and magnesian bicarbonate, calcium and magnesian chlorides and sulfates. The mapping made for the different elements show that 70% of borehole water is contaminated by chemical fertilizers and other human activities and are not destined for drinking water supply. Examination of the maps of the different indices and the diagram of Wilcox indicate that the groundwater of the Sahel watershed does not pose a risk to soils or crops to be irrigated with the exception of drilling F19 which presents a risk of soil impermeability and must be eliminated.

Key words: groundwater , watershed sahel, groundwater pollution.

ملخص

تركز هذه الدراسة على ملائمة المياه الجوفية في مستجمعات مياه الساحل لتزويد مياه الشرب و الري في منطقة البويرة، التي تمتد من بلدية مشدالة إلى عين بسام. تظهر نتائج التحليلات التي تم إجراؤها أن هذه المياه غنية نسبياً بالكالسيوم، المغنيزيوم، الكلور، البيكاربونات، الكبريتات و النترات مما يعطي الماء سحنة الكالسيوم و بيكاربونات المغنيزيوم،

الكوريد و كبريتات الكالسيوم و المغنيزيوم. أظهر رسم الخرائط للعناصر المختلفة أن مياه الآبار ملوثة تشكل أساسي بالأسمدة الكيماوية و الأنشطة البشرية الأخرى و غير صالحة للشرب. يشير فحص خرائط المؤشرات المختلفة ومخطط ويلكس للمياه الجوفية لمستجمع مياه الساحل إلى أن هذه المياه الجوفية لا تمثل خطرا على التربة أو المحاصيل المروية باستثناء البئر 19 الذي يسبب عدم نفاذ المياه داخل التربة.

الكلمات المفتاحية : المياه الجوفية, مستجمعات مياه الساحل, تلوث المياه الجوفية.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition de l'eau.....	2
I.3. Les états de l'eau.....	2
I.3.1. L'eau sous forme solide.....	2
I.3.2. L'eau sous forme liquide.....	2
I.3.3. L'eau sous forme gaz.....	3
I.4. Les changements d'état de l'eau.....	3
I.5. Le cycle d'eau.....	3
I.5.1. L'évaporation et évapotranspiration.....	4
I.5.2. La condensation.....	4
I.5.3. Les précipitations.....	4
I.5.4. Le ruissèlement.....	4
I.5.5. Infiltration.....	4
I.6. Cycle domestique de l'eau.....	5
I.7. Ressources hydriques naturelles.....	7
I.7.1. Eau superficielle.....	7
I.7.2. Eau souterraine.....	7
I.7.2.1. Paramètres de la qualité des eaux souterraines.....	8
I.8. Eau potable.....	10
I.9. L'eau d'irrigation.....	10
I.11. Classification de la pollution.....	10
I.11.1. Selon le type de polluant.....	10
I.11.1.1. Pollution physique.....	10
I.11.1.2. Pollution chimique.....	11

I.11.1.3. Pollution biologique	11
I.11.2. selon l'origine de la pollution	11
I.11.2.1. Pollution domestique	11
I.11.2.2. Pollution urbaine	12
I.11.2.3. Pollution agricole.....	12
I.11.2.4. Pollution industrielle.....	12
I.12. Conséquences de la pollution.....	13
I.12.1. Conséquences sanitaires	13
I.12.2. Conséquences écologiques	13
I.12.3. Conséquences esthétiques	13
I.13. Conclusion	14

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction	15
II.2. Présentation de la wilaya d'étude	15
II.2.1. Situation géographique	15
II.2.2. Aspect administratif.....	16
II.2.3. Situation démographique et superficie	17
II.2.4. Relief.....	19
II.2.5. Paramètres climatiques	20
II.2.5.1. Pluviométrie.....	20
II.2.5.2. Température.....	21
II.2.5.3. Evaporation.....	22
II.2.5.4. Humidité	23
II.2.6. Ressources hydriques.....	24
II.2.6.1. Ressources superficielles	25
II.2.6.2. Ressources souterraines.....	25
II.3. Présentation du bassin versant.....	25

II.3.1. Hydrographie du bassin versant de la Soummam	26
II.3.2. Caractéristiques du bassin versant sahel	28
II.3.2.1. L'indice de compacité de Gravelius (KG).....	28
II.3.2.2. Le Rectangle équivalent	29
II.3.2.3. Paramètres du relief.....	30
II.3.2.3.1. La courbe hypsométrique du bassin versant Sahel.....	30
II.3.2.3.2. Les altitudes caractéristiques.....	31
II.3.2.3.3. Indice de pente globale (Ig).....	32
II.3.2.3.4. Pente moyenne du bassin versant (Im)	34
II.3.2.4. Le réseau hydrographique	34
II.3.3. Géologie de la zone	37
II.3.4. Hydrogéologie de la zone	40
II.4. Conclusion.....	40

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Introduction	41
III.2. Délimitation de la zone d'étude.....	41
III.2.1. Présentation de l'ArcGis.....	41
III.3. Echantillonnage	42
III.4. Analyses réalisées.....	44
III.4.1. Mesure in situ	44
III.4.1.1. Température :.....	44
III.4.1.2. pH.....	45
III.4.2. Analyse aux laboratoires.....	46
III.4.2.1. Paramètres physiques	46
III.4.2.2. Eléments majeurs	48
III.4.2.3. Contrôle de la balance ionique	52

III.5. Présentation des logiciels	53
III.5.1. Logiciel Diagramme	53
III.5.1.1. Diagramme de piper	54
III.5.1.2. Diagramme de schoeller-Berkaloff	56
III.5.1.3. Diagramme de Riverside	57
III.5.2. Logiciel SPSS	58
III.5.3. Langage R	59
III.5.4. Logiciel Minteq	60
III.6. Critère de d'aptitude de l'eau à l'irrigation	62
III.6.1. RSC	62
III.6.2. Taux d'adsorption du sodium (SAR)	63
III.6.3. Diagramme de Wilcox	65
III.6.4. Ratio d'absorption de magnésium	65
III.6.5. Bicarbonate de sodium résiduel	66
III.6.6. Indice de perméabilité	66
III.6.7. Indice de Stuyfzand	67
III.6. Conclusion	67

Chapitre IV : Aptitude des eaux souterraines du bassin versant Sahel à l'AEP

IV.1. Introduction	68
IV.2. Hydrochimie des eaux du bassin versant Sahel	68
IV.2.1. Classification chimique de l'eau	68
IV.2.1.1. Classification de piper	68
IV.2.1.2. Classification de Schoeller-Berkaloff	70
IV.2.2. Analyse en composantes principales (ACP)	74
IV.2.2.1. Matrice de corrélation	74
IV.2.2.2. Variance	75
IV.2.2.3. Matrice des composantes	76

IV.2.3. Relation entre les éléments majeurs	79
IV.2.3.1. Les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-	79
IV.2.3.2. Les éléments Ca^{2+} et SO_4^{2-}	81
IV.2.3.3. Les éléments Mg^{2+} et SO_4^{2-}	82
IV.2.3.4. Les éléments Na^+ et Cl^-	83
IV.2.3.5. Les éléments Cl^- et SO_4^{2-}	84
IV.2.4. Indice de saturation	85
IV.3. Etude de potabilité des eaux.....	88
IV.3.1. Paramètres physiques	88
IV.3.1.1. pH	88
IV.3.1.2. Température	89
IV.3.1.3. Conductivité	90
IV.3.2. Paramètres chimiques.....	90
IV.3.2.1. Calcium	90
IV.3.2.2. Magnésium.....	93
IV.3.2.3. Dureté.....	95
IV.3.2.4. Sodium	96
IV.3.2.5. Potassium	98
IV.3.2.6. Chlorure	100
IV.3.2.7. Sulfate	102
IV.3.2.8. Bicarbonate.....	105
IV.3.2.9. Nitrate	106
IV.4. Etude de la vulnérabilité des eaux de la nappe du bassin versant Sahel à la pollution .	111
IV.5. Conclusion	114
Chapitre V : aptitude des eaux souterraines du bassin versant Sahel à l'irrigation	
V.1. Introduction	115
V.2. Critères d'aptitude de l'eau à l'irrigation.....	115

V.2.1. RSC.....	115
V.2.2. Taux d'adsorption du sodium (SAR)	117
V.2.3. Diagramme de Wilcox.....	119
V.2.4. Ratio d'absorption de magnésium.....	120
V.2.5. Bicarbonate de sodium résiduel	121
V.2.6. Indice de perméabilité	123
V.2.7. Indice de Stuyfzand	124
V.3. Conclusion.....	126
Conclusion générale	127

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1: Le changement d'état de l'eau	3
Figure I.2: Le cycle hydrologique de l'eau	5
Figure I.3: Le cycle domestique de l'eau	6
Figure I.4: Les ressources hydriques naturelles	8
Figure I.5: Les types de pollution souterraine.....	13

CHAPITRE II :

Figure II.1: Frontières de la wilaya de Bouira	16
Figure II.2 : Les communes des daïras de la wilaya de Bouira	17
Figure II.3: Variation des précipitations moyennes mensuelles	21
Figure II.4: Variation des températures moyennes mensuelles	22
Figure II.5: Variation des évaporations moyennes mensuelles.....	23
Figure II.6: Variation des humidités moyenne mensuelles.....	24
Figure II.7 : Bassin versant Sahel et sa situation dans le BV Soummam.....	26
Figure II.8 : Sous bassins du bassin Soummam.....	27
Figure II.9: L'altitude en fonction de la surface partielle cumulée	31
Figure II.10: La méthode de détermination de l'altitude médiane	32
Figure II.11: Méthode de détermination du H95% et H5%	33
Figure II.12: Classification de Schumm du bassin versant Sahel	35
Figure II.13: Carte des sols du bassin versant Sahel et Soummam.....	37
Figure II.14: Carte géologique de la zone sud du bassin versant Sahel	38
Figure II.15 : Coupe synthétique et interprétative de la partie centrale du domaine tellien	39

CHAPITRE III :

Figure III.1: La délimitation du bassin versant Sahel et ses sous bassins avec ArcGis	42
Figure III.2 : L'appareil de mesure de pH « Powerhaus24 ».....	45
Figure III.3 : Appareil de mesure de conductivité « spectrophotomètre Dr 6000 HACH ».....	46
Figure III.4: Représentation des balances ioniques des forages du bassin versant Sahel	53
Figure III.5: Présentation de logiciel Diagramme	54
Figure III.6: Diagramme de piper	56

Figure III.7: Diagramme de schoeller-Berkaloff	57
Figure III.8 : Diagramme de Riverside.....	58
Figure III.9 : Fenêtre des données et des résultats du logiciel SPSS.....	59
Figure III.10: Régression linéaire avec logiciel R.....	60
Figure III.11: Logiciel MINTEQ	62

CHAPITRE IV :

Figure IV.1: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel (F1-F30) sur le diagramme de piper	69
Figure IV.2: classification des eaux des forages du bassin versant sahel sur le diagramme de Piper (F30-F34).....	70
Figure IV.3: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (F1-F14)	71
Figure IV.4: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de schoeller-Berkaloff (F14-F28)	72
Figure IV.5: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de schoeller-Berkaloff (F28-F34)	73
Figure IV.6: matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant Sahel	75
Figure IV.7 : diagramme de composante.....	77
Figure IV.8: diagramme des individus	77
Figure IV.9: carte de minéralisation des forages du bassin versant Sahel.....	78
Figure IV.10: carte de concentration de nitrate des forages du bassin versant Sahel	79
Figure IV.11: corrélation linéaire entre Ca^{2+} + et HCO_3^-	80
Figure IV.12 : corrélation linéaire entre $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ et HCO_3^-	81
Figure IV.13 : corrélation linéaire entre les éléments Ca^{2+} et SO_4^{2-}	82
Figure IV.14: corrélation linéaire entre Mg^{2+} et SO_4^{2-}	83
Figure IV.15: corrélation linéaire entre Na^+ et Cl^-	84
Figure IV.16: corrélation linéaire entre Cl^- et SO_4^{2-}	85
Figure IV.17: évolution des indices de saturation des minéraux du bassin versant Sahel	87
Figure IV.18: variation des valeurs du pH des forages du Sahel	89
Figure IV.19: variation des valeurs de la température des forages du Sahel.....	89
Figure IV.20: variation des valeurs de la conductivité des forages du bassin versant Sahel....	90

Figure IV.21 : variation des concentrations de Ca des forages du bassin versant Sahel.....	91
Figure IV.22: carte de la répartition spatiale des concentrations de calcium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	92
Figure IV.23 : zoom sur les zones à forte concentration de Ca^{2+} sur la carte d'occupation de sol de la partie est (B) et ouest (A) du bassin versant Sahel.....	92
Figure IV.24 : variation des concentrations de magnésium des eaux du bassin versant Sahel	93
Figure IV.25: carte de répartition spatiale des concentrations de Mg (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	94
Figure IV.26 : zoom sur les zones à forte concentration de Mg^{2+} sur la carte d'occupation du sol de la partie nord (A) et sud (B) du bassin versant Sahel.....	94
Figure IV.27: variation des valeurs de la dureté des forages du bassin versant Sahel.....	95
Figure IV. 28: carte de répartition spatiale de la dureté (en °F) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	96
Figure IV.29: variation des valeurs de Sodium des forages du bassin versant Sahel	97
Figure IV.30: carte de répartitions spatiale des teneurs en sodium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	98
Figure IV.31 : variation des valeurs de potassium des forages du bassin versant Sahel.....	99
Figure IV. 32: la répartition spatiale des concentrations de potassium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	99
Figure IV.33 : variation des valeurs de chlorure des forages du bassin versant Sahel.....	100
Figure IV.34: la répartition spatiale des concentrations (en mg/l) de chlorure des eaux souterraines du bassin versant Sahel	101
Figure IV.35 : zoom sur la zone à forte concentration de Cl^{-} sur la carte d'occupation de sol de la partie nord et ouest du bassin versant Sahel.....	102
Figure IV.36 : variation des valeurs de sulfate des forages du bassin versant Sahel.....	103
Figure IV.37 : carte de répartition spatiale des teneurs en sulfate (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	104
Figure IV.38 : zoom sur les zones à forte concentration de SO_4^{2-} sur la carte d'occupation du sol de la partie ouest (B) et sud (A) du bassin versant Sahel.....	104
Figure IV.39 : variation des valeurs des bicarbonates des forages du bassin versant Sahel ..	105
Figure IV.40 : la répartition spatiale des teneurs en bicarbonate (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	106
Figure IV.41 : variation des valeurs de nitrate des forages de Sahel	107

Figure IV.42: répartition spatiale des concentrations de nitrate des eaux souterraines du bassin versant Sahel	108
Figure IV.43: carte d'occupation du sol du bassin versant Sahel	109
Figure IV.44: carte de la variation spatiale de l'indice de contamination des forages du bassin versant Sahel	113

CHAPITRE V :

Figure V.1: diagramme de Riverside pour la classification des eaux d'irrigation en fonction de SAR	117
Figure V.2 : répartition spatiale du SAR des eaux du bassin versant Sahel de la wilaya de Bouira	118
Figure V.3: pourcentage de sodium vs conductivité électrique dans le diagramme de Wilox des eaux du système aquifère du bassin versant Sahel continental.....	119
Figure V.4 : répartition spatiale des carbonates de sodium résiduel des eaux du bassin versant Sahel	120
Figure V.5: histogramme de la variation de la valeur de MAR des eaux souterraines du bassin versant Sahel	120
Figure V.6: carte de la répartition spatiale du MAR (%) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	121
Figure V.7: variation de RSBC des eaux souterraines du bassin versant Sahel	122
Figure V.8: carte de variation de RSBC (méq/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	122
Figure V.9: variation des valeurs de PI des eaux de forages du bassin versant Sahel	123
Figure V.10: variation de l'indice de perméabilité (en %) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	124
Figure V.11 : variation des valeurs de chlorure des eaux des forages du bassin versant Sahel	125
Figure V.12: carte de variation spatiale de chlorure (mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel	126

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Les caractéristiques de l'eau de surface et souterraine	9
--	---

CHAPITRE II :

Tableau II.1: le nombre d'habitant par commune de la wilaya de Bouira	17
Tableau II.2: Code des sous bassins du bassin versant Soummam (ANRH Blida 2005).....	27
Tableau II.3: Caractéristiques du bassin versant Sahel avec Arcgis	28
Tableau II.4 : Résultats des parametres de forme du BV Sahel.....	29
Tableau II.5: Répartitions hypsométriques de Bassin Sahel.....	30
Tableau II.6: Fréquences des ordres du bassin versant Sahel	35

CHAPITRE III :

Tableau III.1: points de prélèvement du bassin versant Sahel	43
--	----

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1: représentation des ions dominants selon Schoeller	74
Tableau IV.2 : représentation de la variance exprimée	75
Tableau IV.3: matrice de chaque composante	76
Tableau IV.4 : évolution des indices de saturation des minéraux du bassin versant Sahel	86
Tableau IV.5: les valeurs max et min des paramètres physiques et sa norme	90
Tableau IV.6 : valeurs min et max des éléments majeurs et leurs normes	109
Tableau IV.7: aptitude des eaux de forages du bassin versant Sahel à l'AEP	110
Tableau IV.8: classement en vue de la détermination de l'indice de contamination.....	111
Tableau IV.9: tableau de la vulnérabilité des eaux du forage du bassin versant Sahel à la pollution.....	112

CHAPITRE V :

Tableau V.1: résultat de RSC du bassin versant Sahel.....	115
---	-----

Liste des abréviations

ADE : Algérienne des eaux

ANRH : Agence national des ressources en eau

OMS : Office mondiale de la santé

DSPB : Direction de la santé et de la population de la wilaya de Bouira

DRCB : Direction régionale de la wilaya de Bouira

Introduction générale

La qualité de l'eau baisse partout dans le monde en raison surtout des activités humaines, l'urbanisation, la croissance démographique, l'agriculture, l'augmentation du niveau de vie. Si elles ne sont pas gérées de façon adéquate, ces activités génèrent une pollution qui peut nuire aux ressources en eau et aux écosystèmes aquatiques. Une bonne qualité de l'eau est indispensable pour garantir un environnement sain et la bonne santé des êtres humains. Dès lors l'utilisation durable des ressources en eau est un véritable défi pour notre société.

Nous sommes maintenant devant la nécessité d'utiliser, de gérer, et de protéger l'eau de façon durable, car elle est à la base de toutes les formes de vie sur Terre. Tout comme l'air que nous respirons, l'eau de qualité et en quantité suffisante est un trésor collectif indispensable et irremplaçable, qui est en train de devenir un objet de conflits.

A la région de Bouira, les eaux souterraines constituent la ressource importante de l'approvisionnement des populations en eau potable et en irrigation. Dans le cadre d'une campagne d'échantillonnage que l'ADE (algérienne des eaux) a menée dans cette région dans la saison hivernale et d'été de l'année 2016, nous avons été amenés à constater les concentrations trop élevées des différents éléments physico-chimiques dans plusieurs points de captage d'eau.

L'objectif fixé par ce travail est d'étudier la qualité de l'eau des forages du bassin versant Sahel de la wilaya de Bouira et d'évaluer son aptitude à l'alimentation en eau potable (AEP) et à l'irrigation. Pour atteindre nos objectifs nous avons procédé de la manière suivante :

- délimiter la zone d'étude et présenter sa localisation géographique puis on s'est intéressé à identifier toutes les formations et les structures géologiques qui ont une relation de près ou de loin avec notre aquifère.
- Présenter la méthode et les différents logiciels utilisés pour effectuer cette étude
- Etudier la qualité de la nappe du bassin versant Sahel pour évaluer son aptitude à l'AEP en traçant des cartes spatiales de la qualité chimique de l'eau et la carte d'occupation du sol et déterminer la vulnérabilité de cette eau à la pollution.
- Evaluer l'aptitude des eaux de la nappe étudiée à l'irrigation à l'aide des diagrammes et des indices qui identifient l'impact de ces eaux sur le sol à irriguer.

CHAPITRE I

I.1. Introduction

L'eau se trouve presque partout sur la terre et elle est vitale pour tous les organismes vivants connus, près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau. Les réserves disponibles en eau naturelle sont constituées d'eau souterraine (nappe souterraine), des eaux terrestres (barrage, lac, rivière...) et en eau de mer. Ce chapitre est consacré à présenter les différentes ressources d'eau et à souligner les principaux types de pollution ainsi sa nature.

I.2. Définition de l'eau

L'eau liquide est souvent perçue comme une substance assez ordinaire grâce à sa transparence, caractère inodore, insipide et se présente sur terre en grande quantité. C'est un élément naturel d'une importance primordiale, indispensable à toute forme de vie. L'eau présente une richesse nécessaire à toute activité humaine, c'est un facteur de production déterminant dans le développement durable, pour ces raisons, elle devient de plus en plus au centre des intérêts stratégique (MARGAT. J (1994)).

I.3. Les états de l'eau

L'eau est un constituant fondamental de notre environnement. Elle se présente sous différents états : solide, liquide et gaz.

I.3.1. L'eau sous forme solide

L'eau est solide quant la température est inférieure à 0°C. Elle présente la glace de la banquise au niveau des pôles, celle des glaciers alpins, le givre qui se forme par temps froid sur les arbres en hiver. Les calottes glaciaires et les glaciers représentent 2.1% de l'eau présente sur terre (BOUGHAZI.S (2018)).

I.3.2. L'eau sous forme liquide

Les plus grands réservoirs d'eau liquide sont les océans et les mers constitués d'eau salée, ils représentent 97.2% de l'eau de terre. Les autres réservoirs d'eau liquide sont les lacs, les rivières et les eaux souterraines. Ils sont constitués d'eau douce. Les lacs et les rivières correspondent à 0.01 % de l'eau présente sur terre et les eaux souterraines à 0.06% de cette eau (BOUGHAZI.S (2018)).

I.3.3.L'eau sous forme gaz

Dans l'atmosphère l'eau existe sous forme gaz, c'est la vapeur d'eau présente dans l'air humide. Elle ne correspond qu'à 0.001% de l'eau de la terre (BOUGHAZLI.S (2018)).

I.4. Les changements d'état de l'eau

L'eau peut changer d'état selon la température et sous l'action du soleil (figure I.1) (YEBDRI.D (2007)) :

- ❖ **Fusion** : passage de l'état solide à l'état liquide ;
- ❖ **Vaporisation** : passage de l'état liquide à l'état gazeux ;
- ❖ **Liquéfaction** : passage de l'état gazeux à l'état liquide ;
- ❖ **Solidification** : passage de l'état liquide à l'état solide ;
- ❖ **Sublimation** : passage de l'état solide à l'état gazeux ;
- ❖ **Condensation** : passage de l'état gazeux à l'état condensé (solide ou liquide).

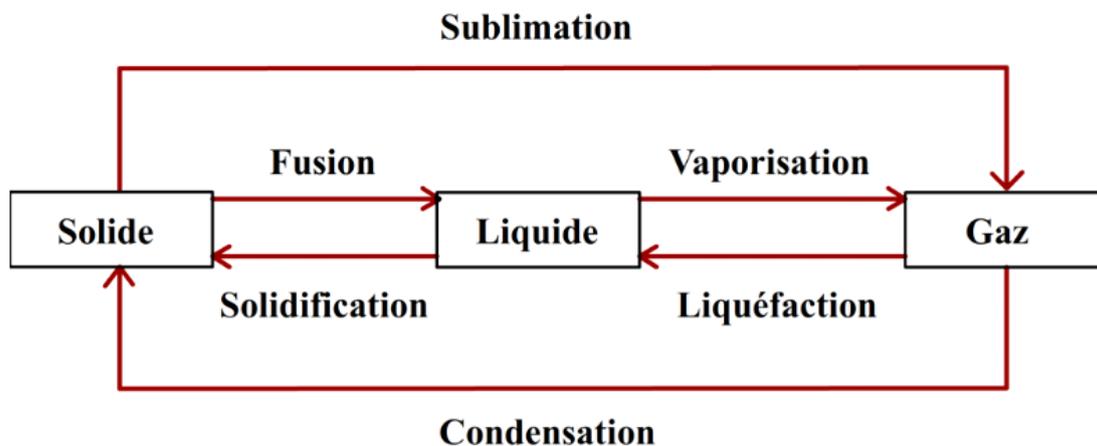


Figure I.1: Le changement d'état de l'eau

I.5. Le cycle d'eau

L'eau est la source de la vie sur terre, est aussi le vecteur principal du déplacement de tous les éléments minéraux ou organiques. Le voyage de l'eau de l'océan vers la terre est principalement lié à l'évaporation, celle-ci générant de la vapeur d'eau qui est transportée sur les continents sous forme de pluie ou de neige selon la variation de température (figure I.2.).

Le cycle de l'eau se décompose en plusieurs étapes :

I.5.1. L'évaporation et évapotranspiration

Grâce à l'énergie solaire, l'eau des mers et des océans s'évapore dans l'atmosphère en se débarrassant de son sel et de ses impuretés.

L'évaporation peut également provenir de la terre (la végétation), nous parlerons alors d'évapotranspiration. Cette vapeur d'eau viendra ensuite s'accumuler dans les nuages, de la même manière que l'évaporation des mers et océans (figure I.2) (GLEIK, P.H (1996)).

I.5.2. La condensation

Au contact de l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en gouttelettes qui vont former les nuages, la brume ou le brouillard (GLEIK, P.H (1996)).

I.5.3. Les précipitations

Sous l'impulsion des vents, les nuages se déplacent dans l'atmosphère. Lors d'un changement climatique et par effet de gravité, les nuages s'alourdissent et retombent sur le sol sous forme d'eaux pluviales, de grêle ou de neige (GLEIK, P.H (1996)).

I.5.4. Le ruissèlement

L'eau qui n'est pas absorbé par le sol, ruisselle le long des pentes jusqu'à se déverser dans les ravins, les fleuves et les lacs. Elle sera ensuite transportée jusqu'aux mers et océans (GLEIK, P.H (1996)).

I.5.5. Infiltration

L'eau résultante reste dans le sol et descend progressivement jusqu'aux eaux souterraines, ce phénomène est nommé infiltration (GLEIK, P.H (1996)).

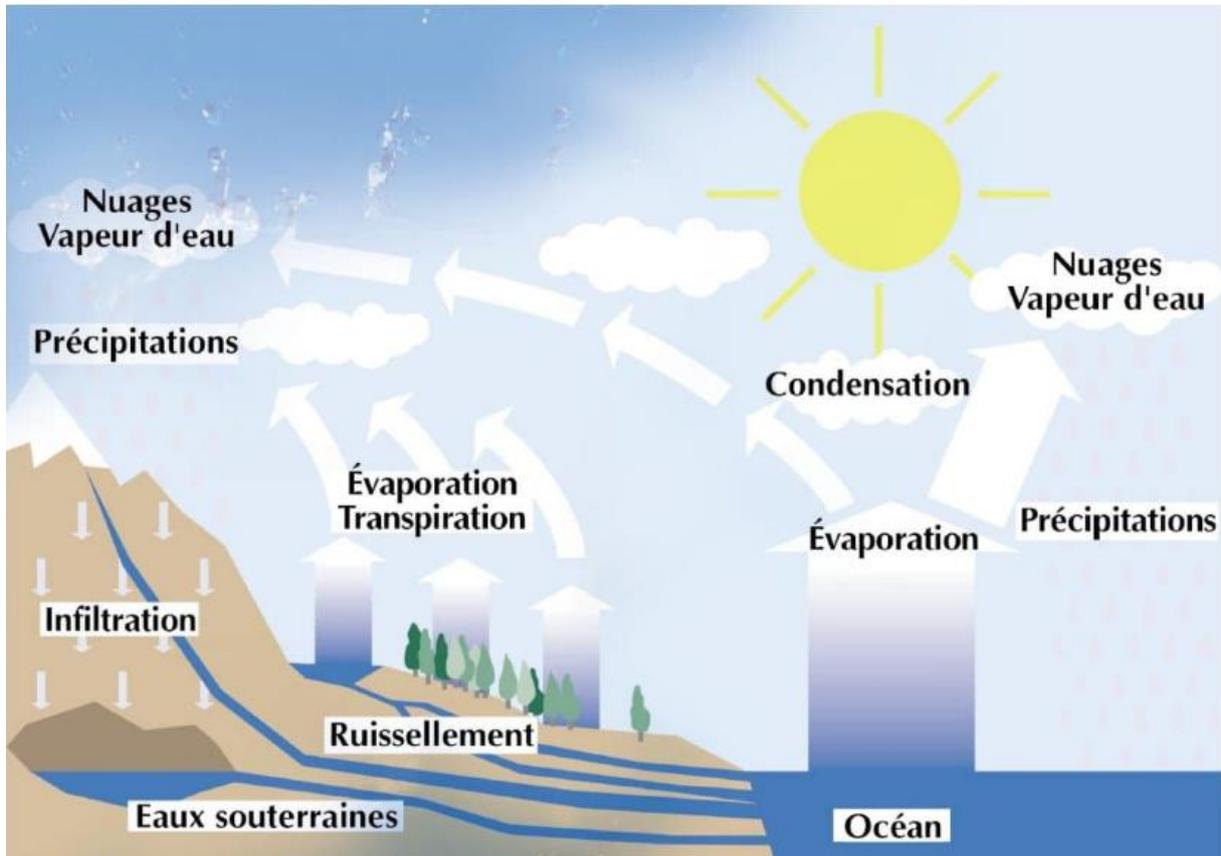


Figure I.2: Le cycle hydrologique de l'eau

I.6. Cycle domestique de l'eau

En parallèle du voyage éternellement renouvelé de l'eau sur notre planète, l'eau peut être détournée vers un autre cycle, plus court et restreint aux activités humaines. C'est grâce à ce petit voyage intérieur que nous pourrions utiliser l'eau du robinet pour notre consommation d'eau, la dépolluer après usage avant de la rendre au milieu naturel (figure I.3) (ZERDANE.D (2013)).

Pour assurer une bonne gestion de l'eau, le cycle domestique doit respecter plusieurs étapes :

- **Le captage** : il sert à pomper de l'eau à partir d'une source.
- **Le traitement** : L'eau pompée est propre mais elle n'est pas potable. Elle est donc ensuite rendue potable dans une usine de traitement.

- **Le stockage :** L'eau est stockée dans un réservoir. Le plus souvent il s'agit d'un château d'eau. L'eau y est stockée dans la partie haute à l'aide de pompes. Cet ouvrage permet de garantir la disponibilité de l'eau pour chacun d'entre-nous.
- **La distribution :** L'eau est acheminée jusqu'aux habitations, les exploitations agricoles ou les sites industriels grâce à la pression exercée selon le principe des vases communicants.
- **La dépollution :** Après utilisation par les consommateurs, l'eau usée est acheminée jusqu'à la station d'épuration pour y être nettoyée. L'eau en ressort suffisamment propre mais non potable pour être rejetée dans le milieu naturel.

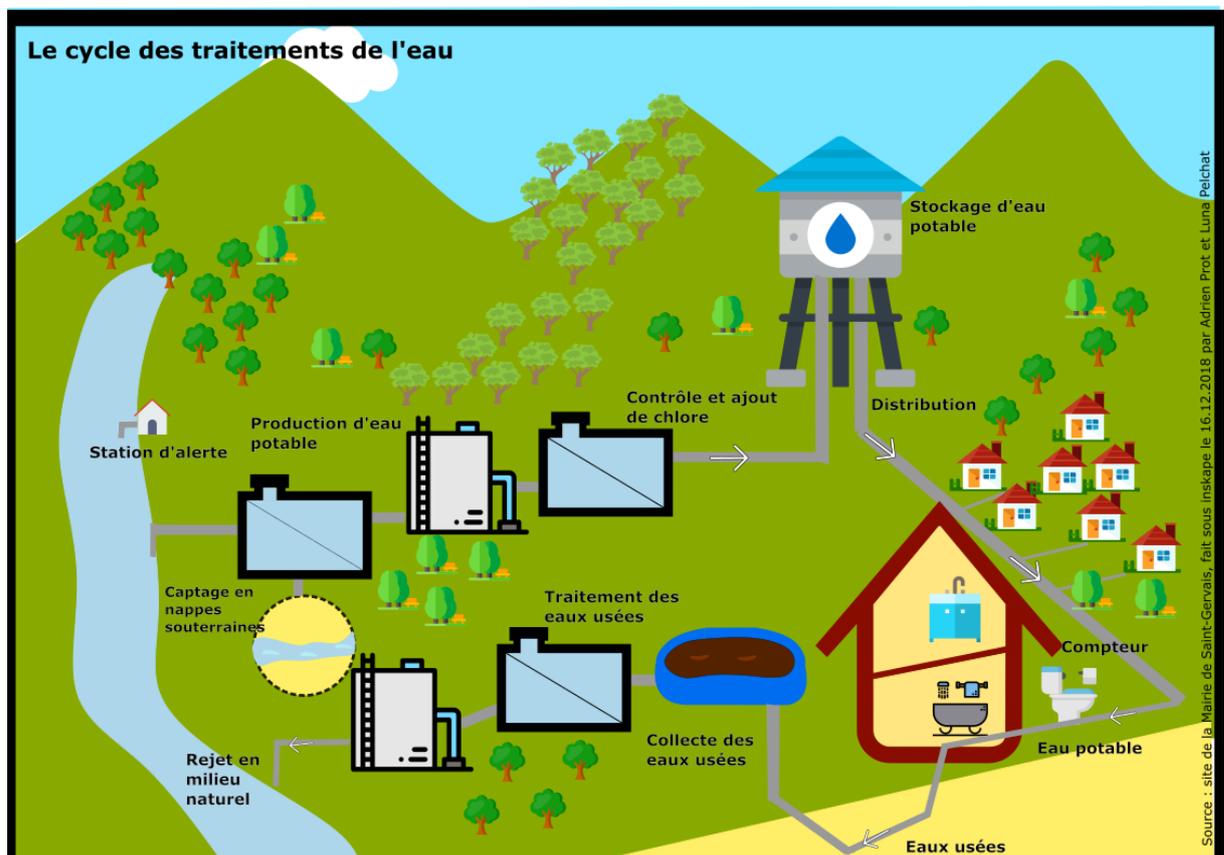


Figure I.3: Le cycle domestique de l'eau

I.7. Ressources hydriques naturelles

L'homme à recours généralement pour satisfaire ses propres besoins et permettre l'usage de l'eau dans ses diverses activités industrielles et agricole, à deux types de ressources naturelles (figure I.4) :

I.7.1. Eau superficielle

Elle est constituée par toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents. Elle est pour origine soit les eaux de ruissellement, soit les nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseaux puis de rivière. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (étangs et lacs) ou artificielles (retenues, barrages) caractérisées par une surface d'échange eau-atmosphère quasiment immobile. La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. Par échange à la surface eau-atmosphère, l'eau va se charger en gaz dissous (O_2 , N_2 , CO_2) (HADEF.D (2017)).

I.7.2. Eau souterraine

L'eau souterraine est issue de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Cette infiltration lente conduit à l'équilibre chimique entre solution percolant et minéraux du sol. Les minéraux du sol vont donc se dissoudre en partie et conduire à un enrichissement en minéraux de la solution du sol, cela va donc définir la caractéristique de chaque eau souterraine (HADEF.D (2017)).

Ces eaux forment deux types de nappes appelées également aquifères :

- les nappes phréatiques proches de la surface du sol.
- les nappes captives qui sont plus profondes.

Elles sont ensuite recueillies par captage puis analysées afin d'assurer la qualité de l'eau pour la consommation humaine.

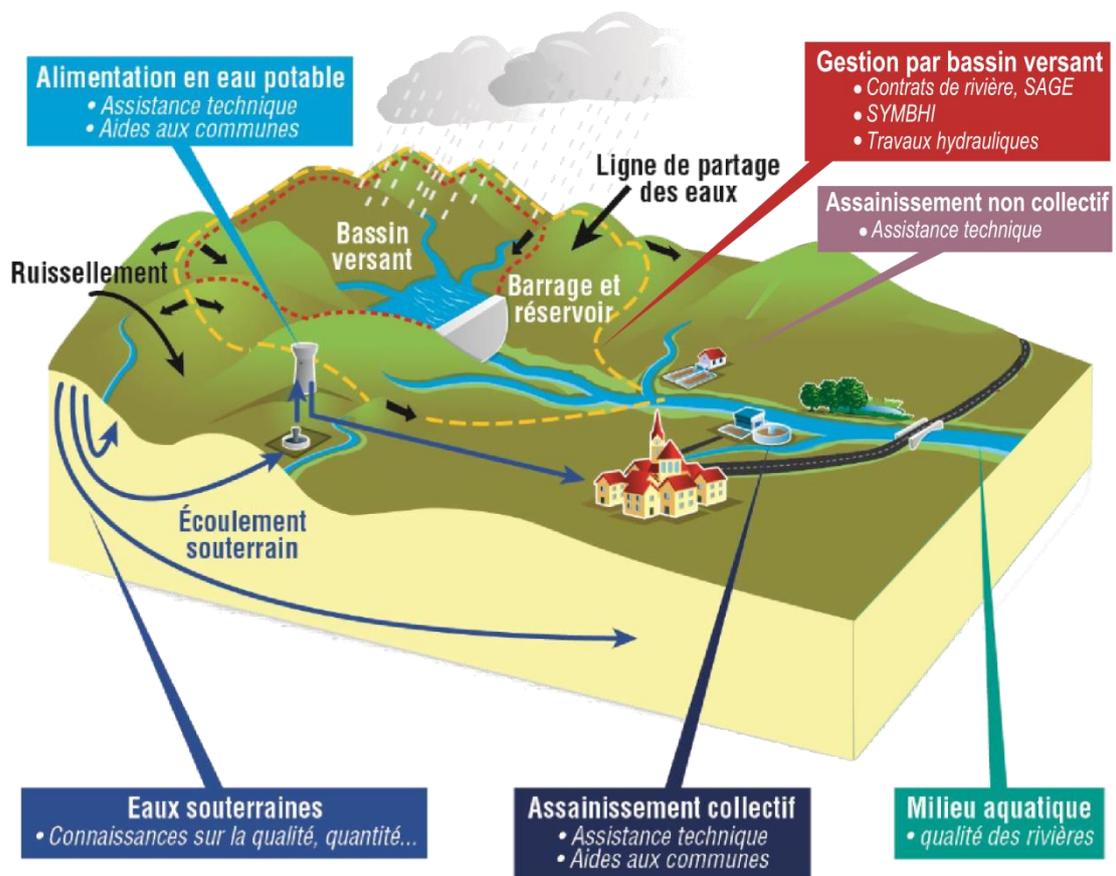


Figure I.4: Les ressources hydriques naturelles

I.7.2.1. Paramètres de la qualité des eaux souterraines

La composition des eaux souterraines (tableau I.1) est liée étroitement aux paramètres suivants :

- Géologie et composition des roches.
- Vitesse de percolation et chemins de transfère.
- Temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration (HADEF.D (2017)).

Tableau I.1: Les caractéristiques de l'eau de surface et souterraine (BEAUCHAMPS.J (2006))

Caractéristique	Eau de surface	Eau souterraine
Température	Variable suivant saisons	Relativement constante
Turbidité, MES	Variable parfois élevé	Faible ou nulle
Couleur	Liée surtout au MES sauf dans les eaux très douces et acides	Liée surtout aux matières en solution (acides humiques)
Minéralisation globale	Variable en fonction du terrain, des précipitations	Sensiblement constante en généralement nettement plus élevée que dans les eaux de surface
Fe^{2+} et Mn^{2+}	Généralement absentes sauf en profondeur des pièces d'eau en état d'eutrophisation	Généralement présentes
CO_2 agressif	Généralement absent	Souvent présent en grande quantité
O_2 dessous	Le plus souvent au voisinage de la saturation	Absent la plupart du temps
H_2S	Généralement présent	Souvent présent
NH_4^+	Présent seulement dans les eaux polluées	Présent fréquemment sans être un indice systématique de pollution bactérienne
Nitrates, nitrites et silice	Peu abondants en générale	Teneur souvent élevée
Micropolluants minéraux et organiques	Présents dans les eaux des pays développées, mais susceptible après suppression des sources	Généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
Eléments vivants	Bactérie (dont certain pathogène), virus, plancton (animale et végétale)	Ferro bactérie fréquents

I.8. Eau potable

Selon l'O.M.S (Organisation Mondiale de la Santé), l'eau est potable lorsqu'elle n'est pas susceptible de porter atteinte à ceux qui la consomment et elle doit être exempte de micro-organismes pathogènes et de substances toxiques, mais elle peut contenir une certaine quantité de sels minéraux et de micro-organismes saprophytes. En outre elle doit être agréable à boire (SKENDRAOUI.H (2018)).

I.9. L'eau d'irrigation

Une irrigation consiste en un apport artificiel d'eau douce sur des terres à des fins agricoles. C'est donc une forme de précipitation artificielle, souvent automatisée avec une irrigation par aspersion mais aussi manuelle. L'irrigation est utilisée pour favoriser la croissance des cultures agricoles, l'entretien des paysages, et la re-végétalisation des sols perturbés dans les zones arides et pendant les périodes de pluies insuffisantes (SKENDRAOUI.H (2018)).

I.10. Définition de la pollution de l'eau

La pollution d'eau est une altération des qualités naturelles (physiques et chimiques) d'une eau. La pollution des eaux souterraines entraîne le risque permanent de limitation de cette ressource dans un proche avenir. Elle résulte essentiellement de l'activité humaine indépendamment de la détérioration naturelle liée aux facteurs géologiques.

Les principales manifestations de la pollution des eaux de surface sont de nature chimique ou biologique et peuvent être pathogène pour l'homme, la plupart des sources d'eau potable sont contaminées propagation des grandes épidémies (peste, choléra, typhoïde...) (DESBORDES.A (2000)).

I.11. Classification de la pollution

I.11.1. Selon le type de polluant

Il existe plusieurs manières de classer la pollution, selon le type de polluant on peut classer la pollution en trois catégories : physique, chimique et biologique.

I.11.1.1. Pollution physique

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Elle regroupe la pollution mécanique (effluents solides), la pollution thermique (réchauffement de l'eau par des usines) et la pollution nucléaire (retombées de radioéléments issus des explosions d'armes nucléaires, résidus des usines atomiques et accidents nucléaires) (BEAUCHAMPS.J (2006)).

I.11.1.2. Pollution chimique

Elle est due au déversement des rejets industriels apportant de grandes quantités de substances chimiques dont certaines sont non dégradables par exemple : les eaux usées (les matières inhibitrices) et les routes nationales (Monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PS), les oxydes de l'azote (NO, NO_2 , NOX), les métaux lourds) (BEAUCHAMPS.J (2006)).

I.11.1.3. Pollution biologique

Il s'agit de la pollution par les micro-organismes (bactéries, virus, parasites, champignons, efflorescences planctoniques.....etc) sont issues des mauvais raccordements d'habitations au réseau d'assainissement, de débordements des réseaux d'eaux usées, de rejets de station d'épuration d'eaux résiduaires et du ruissellement sur les sols lors des pluies importantes (BEAUCHAMPS.J (2006)).

I.11.2. selon l'origine de la pollution

On distingue quatre catégories d'origine (figure I.5) : domestique, urbaine, agricole et industrielle.

I.11.2.1. Pollution domestique

La pollution domestique se caractérise par la présence des germes fécaux, de fortes teneurs en matières organiques, des sels minéraux et des détergents. Elle peut être responsable de l'altération des conditions de transparence et d'oxygénation de l'eau ainsi que du développement de l'eutrophisation dans les rivières.

Elle est due principalement aux rejets domestiques (eaux de lavage, huiles de vidange, matières fécales, etc.) (GUILLEMIN. C et ROUXJ.C (1992)).

I.11.2.2. Pollution urbaine

Ce sont les eaux des habitations et des commerces qui entraînent la pollution urbaine de l'eau. Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération notamment des rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables selon l'importance de l'agglomération et son activité (GUILLEMIN. C et ROUXJ.C (1992)).

I.11.2.3. Pollution agricole

L'agriculture, l'élevage, l'aquaculture et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. Ces contaminants comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des composés phosphorés ou azotés issus des déchets animaux et des engrais commerciaux, notamment des nitrates (GUILLEMIN. C et ROUXJ.C (1992)).

I.11.2.4. Pollution industrielle

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution très importante. En effet, celle-ci est devenue plus massive, plus variée et plus insidieuse. Devant l'extrême diversité de ces rejets, une investigation propre à chaque type d'industrie est nécessaire: il est donc primordial d'être parfaitement informé sur les procédés de fabrication et le circuit des réactifs et des produits. Plusieurs industries cause la pollution des eaux, les plus connues sont : l'huilerie et les matériaux de construction (GUILLEMIN. C et ROUXJ.C (1992)).

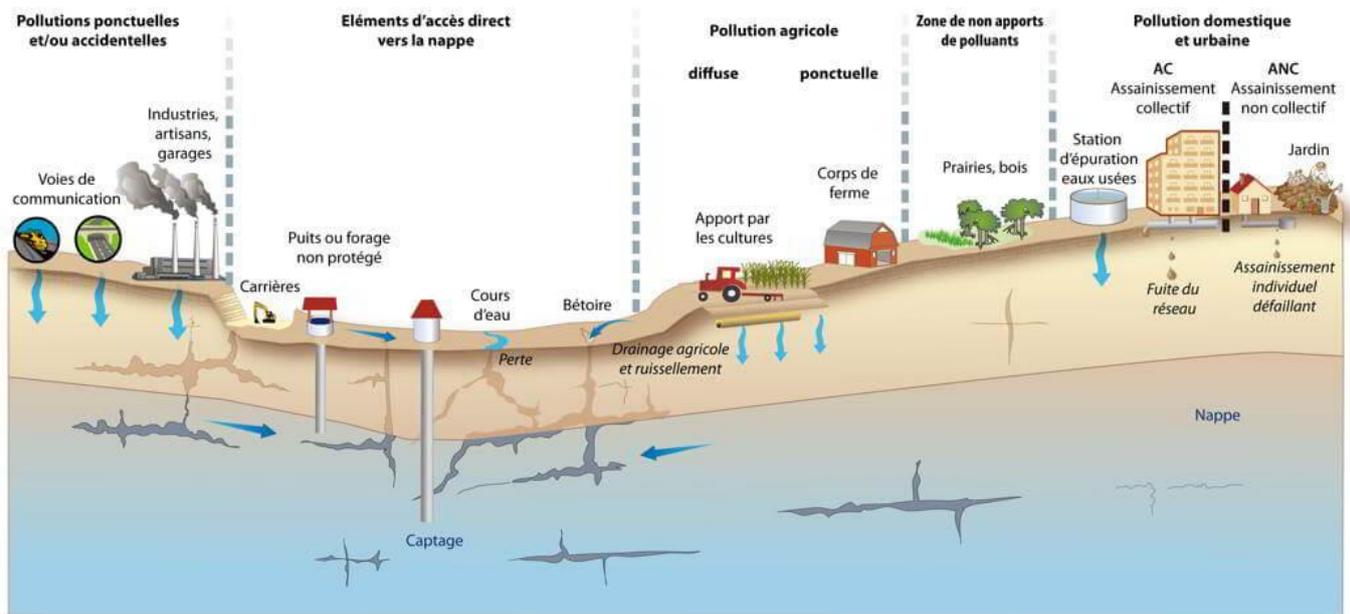


Figure I.5: Les types de pollution souterraine

I.12. Conséquences de la pollution

I.12.1. Conséquences sanitaires

Ces conséquences qui sont liées à la santé humaine, peuvent être liées à l'ingestion d'eau, de boisson,... Mais aussi par un simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites) (SKENDRAOUI.H (2018)).

I.12.2. Conséquences écologiques

Les conséquences écologiques de la pollution se manifestent principalement par (SKENDRAOUI.H (2018)) :

- La présence de produits toxiques ;
- La modification physique du milieu récepteur ;
- La présence de bactéries ou de virus pathogènes.

I.12.3. Conséquences esthétiques

Ces conséquences ne touchent pas à la santé humaine, ni à la santé du milieu, mais elles perturbent l'image du milieu (papiers, bouteilles,...sur les plages) (SKENDRAOUI.H (2018)).

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit d'une manière générale les différents types d'eau qu'on peut trouver sur la terre et les problèmes de pollution présente par l'être humain. Le détail sur les caractéristiques d'eau souterraines de la zone d'étude et ses problèmes sera l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE II

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente le site d'étude d'une vue géographique et démographique ainsi que les caractéristiques hydrographique et géologique afin de faire une présentation globale des données nécessaires à notre étude.

II.2. Présentation de la wilaya d'étude

II.2.1. Situation géographique

La wilaya de Bouira a été créé par ordonnance N° 74/69 du 02 juillet 1974 et se situe dans la région centre du pays, à environ 130 km au Sud-Est de la capitale. Elle est limitée géographiquement (figure II.1) :

- Au Nord par Boumerdés et Tizi Ouzou ;
- Au Sud et Sud-Ouest par M'Sila et Médéa ;
- À l'Est et Sud-Est par Blida et Bordj Bou Arréridj ;
- À l'Ouest par Blida et Médéa. (ANDI 2013)

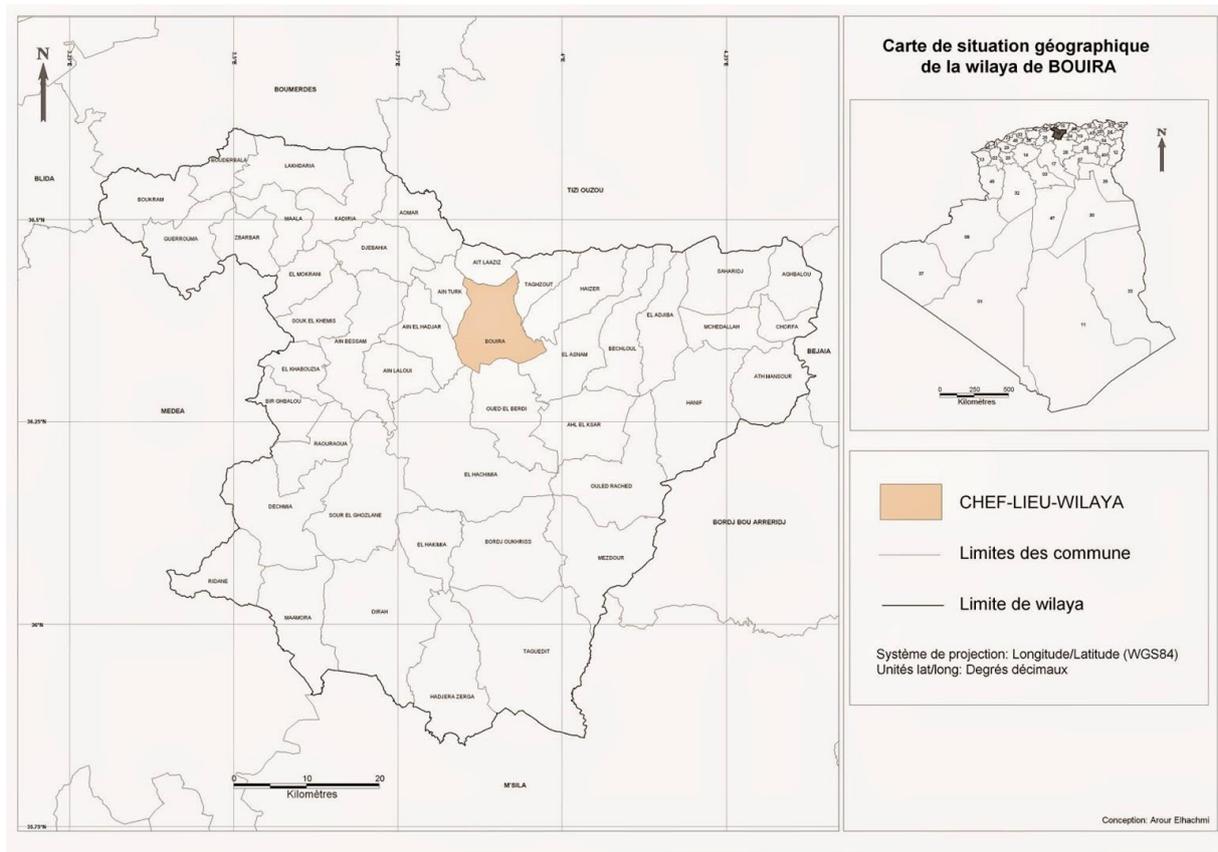


Figure II.1: Frontières de la wilaya de Bouira

II.2.2. Aspect administratif

Elle est composée administrativement comme le représente la figure II.2 de:

- 12 Dairas.
- 45 Communes.



Figure II.2 : Les communes des daïras de la wilaya de Bouira (OPGI Bouira 2008)

II.2.3. Situation démographique et superficie

D'après le recensement de la direction régionale du commerce de l'année 2017, la superficie de la wilaya de Bouira est de : 4454 km² avec une population de : 820 050 Habitants soit une densité de 184 habitants au km², dont 53,65 % d'habitant est de population urbaine et 46,35% d'habitant est de population rurale.

Le tableau II.1 représente le recensement de DSPR de l'année 2018 de la population par commune de la wilaya de Bouira:

Tableau II.1: le nombre d'habitant par commune de la wilaya de Bouira

Daïra	Commune	Nombre d'habitant
BOUIRA	BOUIRA	108 899
	AIN-TURK	9 167
	AIT LAAZIZ	16 539

HAIZER	HAIZER	20 673
	TAGHZOUT	14 993
BECHLOUL	BECHLOUL	13 545
	EL ESNAM	15 067
	AL ADJIBA	13 855
	AHL EL KSAR	16 151
	OULED RACHED	10 036
M'CHEDELLAH	M'CHEDELLAH	28 223
	SAHARIDJ	9 606
	CHORFA	17 818
	AHNIF	11 039
	AGHBALOU	20 892
	ATH MANSOUR	11 429
KADIRIA	KADIRIA	26 016
	AOMAR	22 742
	DJEBAHIA	17 842
LAKHDARIA	LAKHDARIA	70 224
	BOUKRAM	6 358
	MAALA	6 107
	BOUDERBALA	20 489
	Z'BARBAR	4 260
	GUERROUMA	15 352
BIR GHBALOU	BIR GHBALOU	13 746
	RAOURAOUA	10 265
	KHABOUZIA	7 235
AIN BESSAM	AIN BESSAM	54 569
	AIN LALOU	8 223
	AIN LAHADJAR	11 420
SOUK EL KHEMIS	SOUK EL KHEMIS	9 718
	EL MOKRANI	4 619
EL HACHIMIA	EL HACHIMIA	21 090

	OUED EL BERDI	12 655
SOUR EL GHOZLANE	SOUR EL GHOZLANE	63 426
	MAAMORA	4 260
	RIDANE	3 821
	EL HAKIMIA	2 576
	DECHMIA	9 073
	DIRAH	15 251
BORDJ OKHRISS	BORDJ OKHRISS	12 939
	MESDOUR	12 833
	TAGUEDITE	11 097
	HADJRA ZERGA	3 912

II.2.4. Relief

Le territoire de la Wilaya de Bouira est caractérisé par 05 grands espaces géographiques :

a) Depression central

Espace, composé par :

- La vallée de l'Oued Sahel, de l'Oued Dhous et de la plaine d'El Esnam,
- Le plateau de Taghzout, El Madjen;
- La plaine des Arribs, Ain Laloui;
- Le Plateau d'El Hachimia , Ath Mansour.

b) Terminaison orientale de l'Atlas Blidéen

Constitué d'un ensemble de collines de formations à dominance marneuse très sensible à l'érosion, on y trouve :

- Un important potentiel hydro-agricole;
- D'importantes agglomérations : Lakhdaria , Kadiria et Aomar;
- De grands axes de communications (RN5, voie ferrée et projet Autoroutier Est – Ouest);
- Le barrage de Koudiet Acerdoune.

c) Versant du Djurdjura

Il se rapporte surtout aux parties centrales et occidentales du massif du Djurdjura.

d) Chaîne des Bibans et les hauts reliefs du sud

Cette région essentiellement forestière est interrompue à l'Ouest par la dépression de Sour-El Ghozlane.

Ces reliefs sont prolongés vers le Sud par trois importants massifs et composés par :

- Le massif de Djebel Dirah, culminant à 1810 m;
- Le Djebel Ketef à 1434 m;
- Le Djebel Ben Abdellah à 1314 m;
- Le Djebel Taguedite;
- Le Djebel Afroun qui culmine à 1547 m. (direction du commerce de Bouira 2013)

La zone boisée représente 25 % du territoire avec 111 490 ha de massif forestier. On trouve le pin d'Alep, le chêne vert ainsi que le chêne-liège et le cèdre de l'Atlas (sud Djurdjura). (ANDI 2013)

II.2.5. Paramètres climatiques**II.2.5.1. Pluviométrie**

Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station pluviométrique de Bouira Pour la période 2009/2017 ont été calculées à partir des données mesurées pour chaque mois pendant 8 ans (figure II.3).

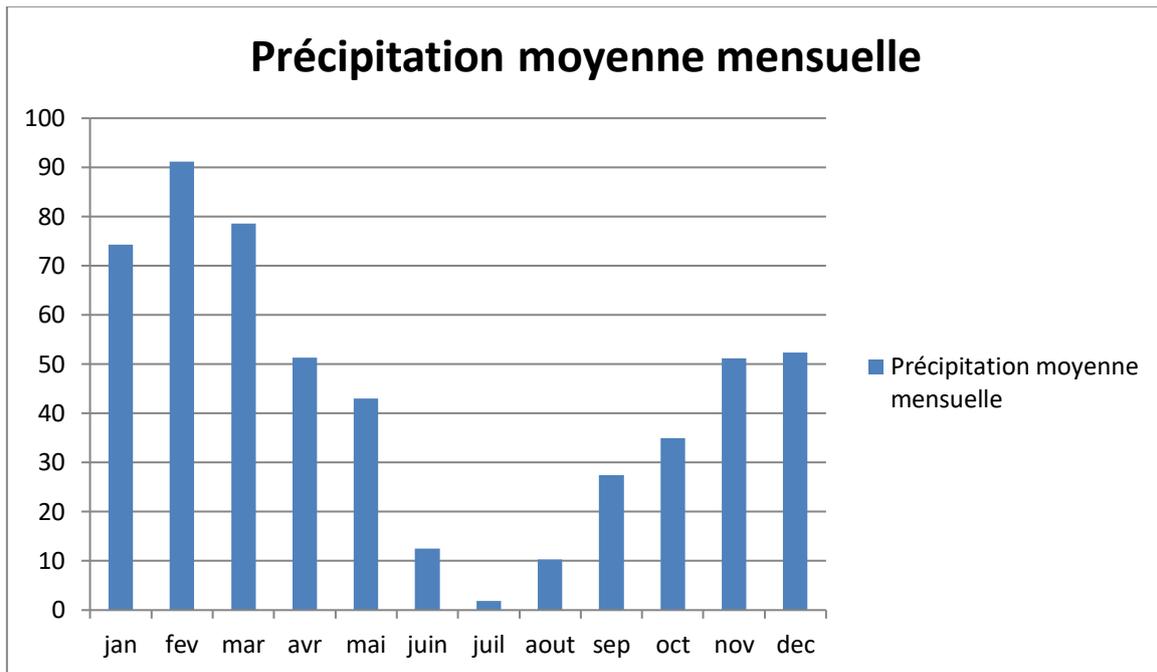


Figure II.3: Variation des précipitations moyennes mensuelles (2009/2017)

L'histogramme de précipitations moyennes mensuelles montre que les mois allant de septembre à mai sont les plus pluvieux, dont la lame d'eau tombée constitue plus de 95% du total annuel.

II.2.5.2. Température

La figure suivante représente la distribution des températures moyennes mensuelles de la période 2009-2017 de la station de BOUIRA (figure II.4).

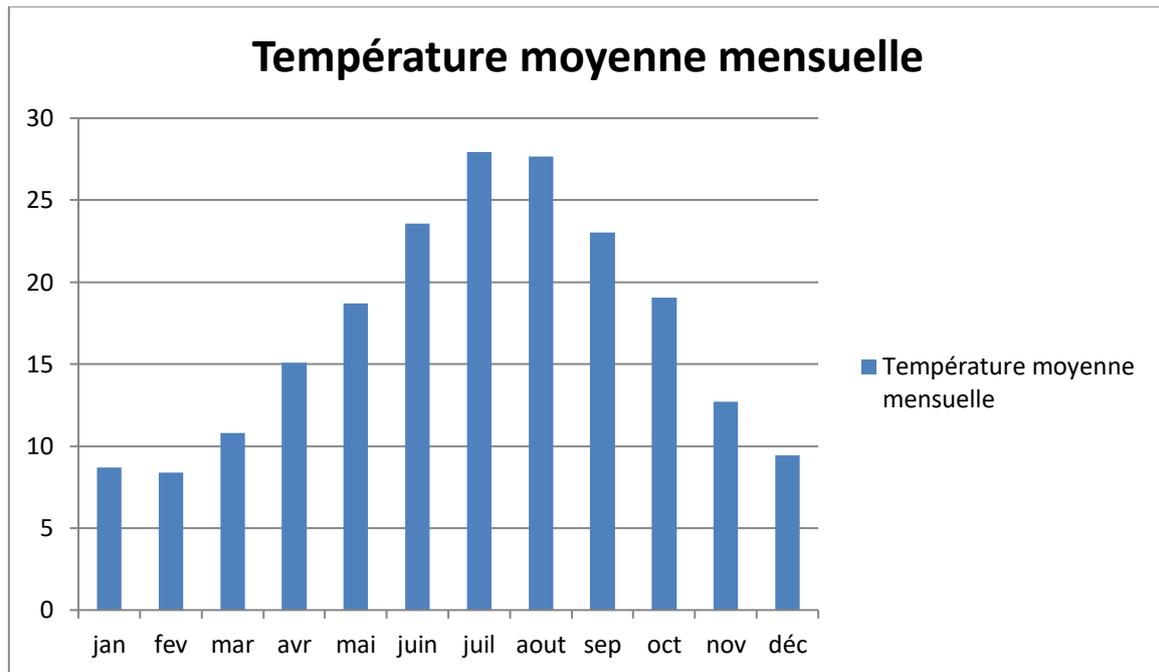


Figure II.4: Variation des températures moyennes mensuelles (2009-2017)

La température de cette région, donne un caractère de type de climat semi-aride. Ce climat est caractérisé par des valeurs extrêmes élevées pour les températures.

II.2.5.3. Evaporation

L'évaporation moyenne mensuelle de la wilaya de BOUIRA est calculée à partir des données mesurées par la station de BOUIRA (figure II.5).

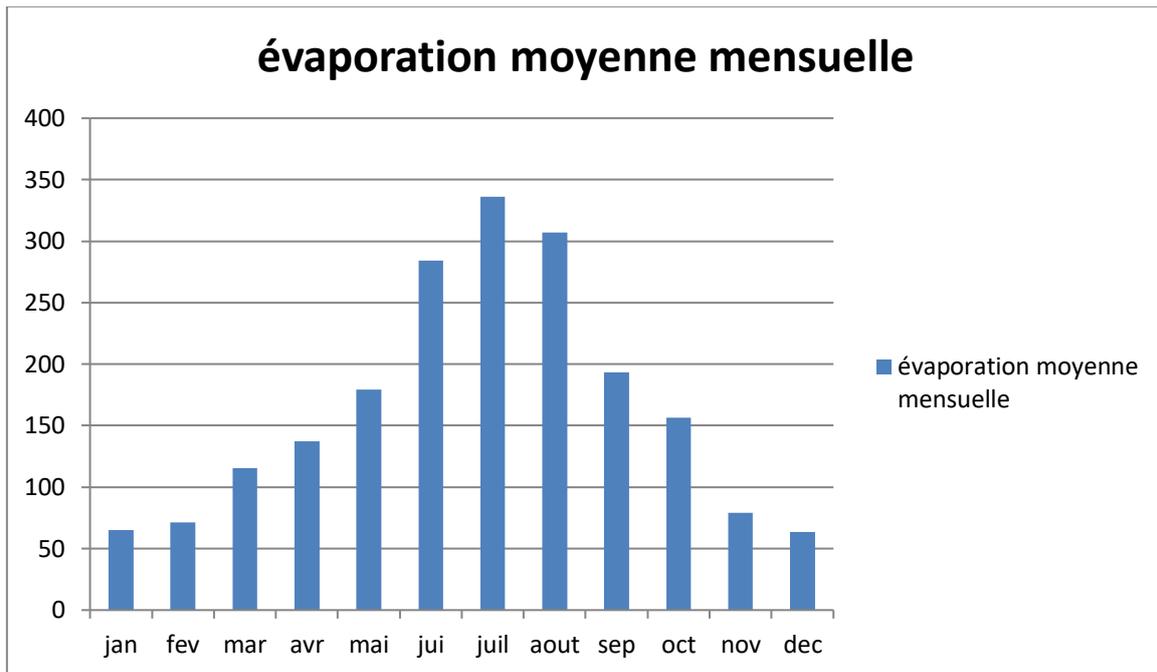


Figure II.5: Variation des évaporations moyennes mensuelles (2009-2017)

L'évaporation moyenne annuelle entre 2009 et 2017 enregistrée dans la station pluviométrique de Bouira est de 1981,7 mm/an, et sa valeur mensuelle est toujours au-dessus de 50 mm. La plus forte évaporation, observée en juillet (336,1 mm) résulte de la température élevée.

II.2.5.4. Humidité

L'humidité est mesurée par une station abri météorologique (de Bouira) pour calculer l'humidité moyenne mensuelle de la période 2009-2017 (figure II.6).

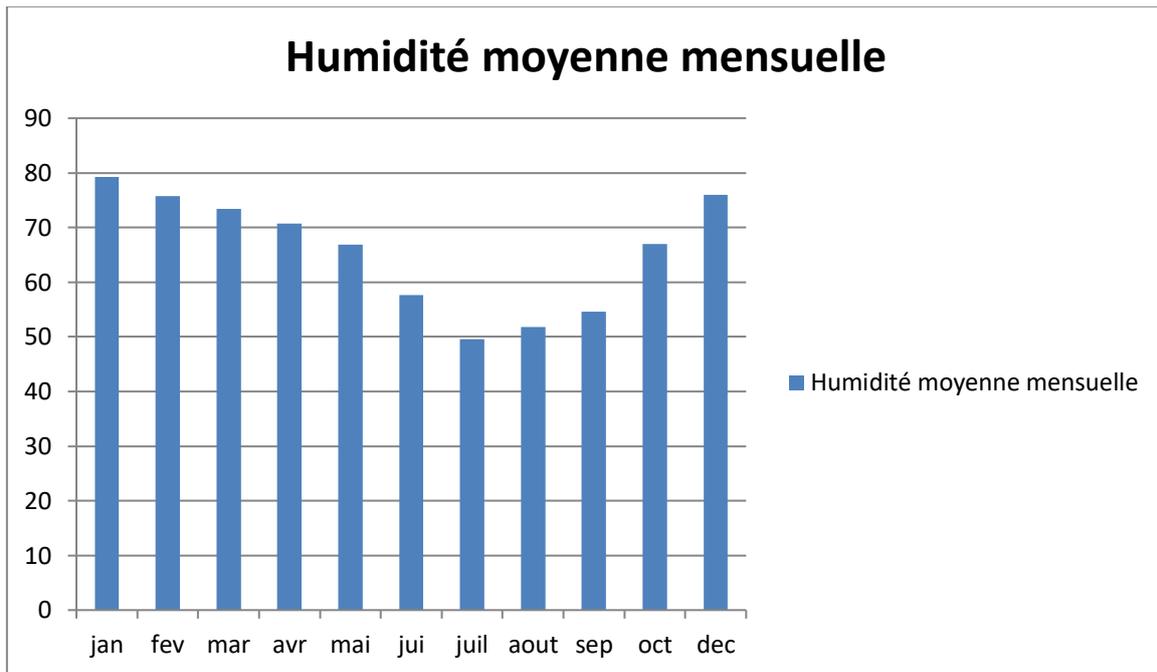


Figure II.6: Variation des humidités moyenne mensuelles (2009-2017)

A Bouira, les humidités moyennes mensuelles calculées sur la période de 2009 à 2017 sont comprises entre 49,62% et 79,25%. Le mois le plus humide est janvier pour lequel l'humidité maximale journalière dépasse couramment 75%, cela résulte de la baisse de l'évaporation.

D'après la direction régionale du commerce de Bouira pour l'année 2013 le climat de la wilaya de Bouira est chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver. La pluviométrie moyenne est de 660 mm/an au nord et de 400 mm/an dans la partie sud.

II.2.6. Ressources hydriques

La wilaya de Bouira renferme d'importantes ressources en eau. Elle est traversée par des cours d'eau importants dont l'apport moyen annuel est de l'ordre de 561 millions de m³ constitué par :

- Cours d'eau d'Isser : 135 millions de m³/an ;
- Cours d'eau Sahel Soummam : 380 millions m³/an ;
- Cours d'eau du Hodna : 35 millions m³/an ;
- Cours d'eau Humus : 11 millions m³/an. (ANDI 2013)

II.2.6.1. Ressources superficielles

La prise d'eau à partir de 3 barrages pour alimenter la wilaya de Bouira et 4 wilayas voisines. D'après la DRCB pour l'année 2013, on distingue :

- Barrage Koudiet asserdoune commune de Maala capacité 640 Hm³;
- Barrage Tilesdit commune de Bechloul capacité 167 Hm³;
- Barrage Lakhhal commune d'Ain bessem capacité 30 H m³.

II.2.6.2. Ressources souterraines

Les ressources souterraines provenant de 3 champs captant : Oued Ed Dous à l'ouest, le bassin d'oued Zaiane au centre et à l'est le bassin d'oued Sahel amont, et plus de 31 forages partagés dans les différentes communes de la wilaya avec une capacité de 35.5 Hm³. (ADE Bouira 2019)

II.3. Présentation du bassin versant

La région d'étude appartient à la wilaya de Bouira comporte trois sous bassins (oued Zaiane, oued Dhous, oued Sahel) regroupés sous la dénomination de Bassin versant Sahel. Il appartient au grand bassin versant de la Soummam portant le numéro 15 selon la nomenclature adopté par l'ANRH (figure II.7).

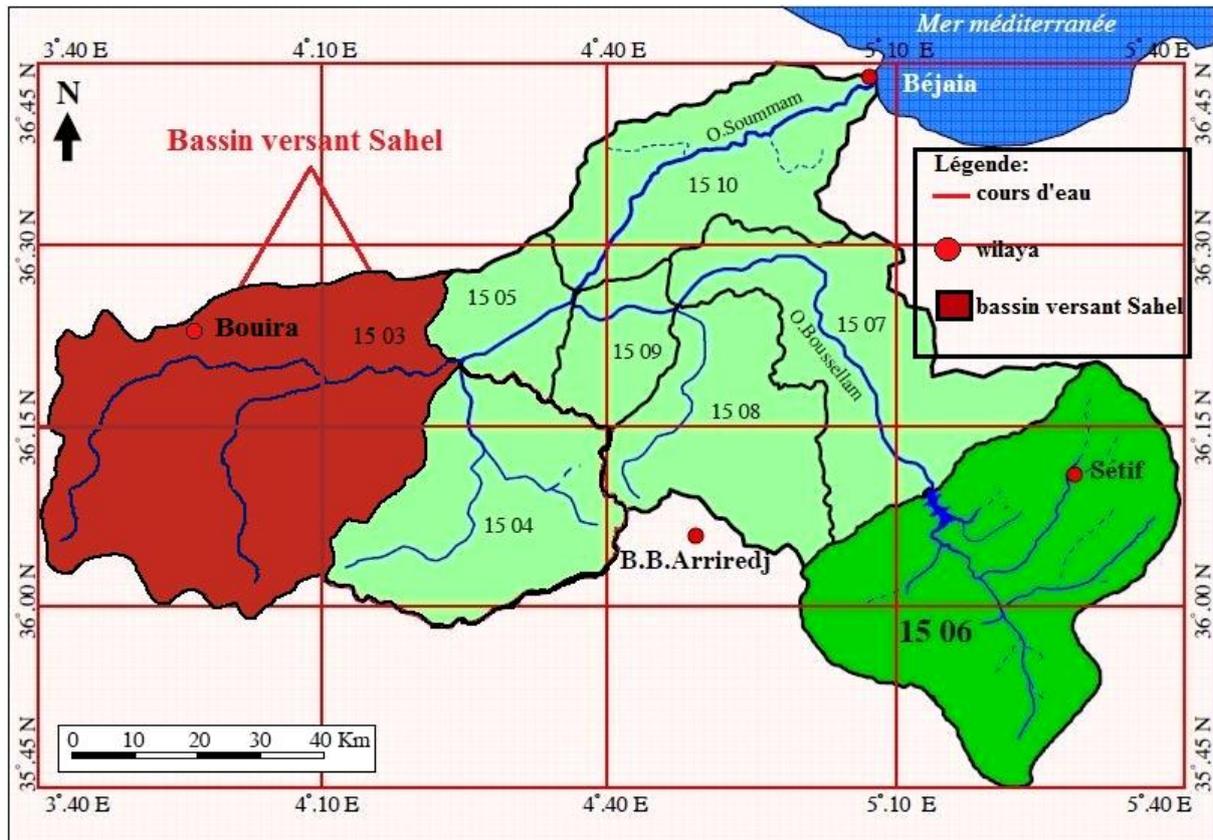


Figure II.7 : Bassin versant Sahel et sa situation dans le BV Soummam

II.3.1. Hydrographie du bassin versant de la Soummam

La vallée de la Soummam se situe à environ 230 km à l'Est d'Alger et appartient administrativement à la wilaya de Bejaia. Troisième fleuve en Algérie, situé à la charnière de la Basse et de la Haute Kabylie. Il est formé de la confluence de l'oued Sahel qui descend des montagnes du Djurdjura et du plateau de Bouira, et de l'oued Bou Sellam qui descend du plateau Sétifien. Il se jette dans la mer Méditerranée à Béjaia après un cours de 150 Km, allant de Bou-Sellam à Oued Rhir. La superficie du bassin-versant de l'oued Soummam est d'environ 8 800 km² (à l'embouchure). Ce dernier couvre une région essentiellement montagneuse caractérisée par un réseau hydrographique très marqué et bien alimenté, ayant provoqué des érosions profondes (L.MOUNI et K.MOUSSACEB (2009)).

Ce bassin versant se compose de dix sous bassins correspondant aux unités hydrologiques (Figure II.8), (tableau II.2) dont certaines sont contrôlées par des stations hydrométriques. Il a une forme irrégulière, étiré dans la direction Est-Ouest et accède à la méditerrané par le golf de Bejaia. Le bassin versant de la Soummam est limité par les chaînes du Djurdjura, à l'Est

par les montagnes de la petite Kabylie et au Sud par les montagnes des Bibans et de Mansourah.

En ce qui concerne les eaux souterraines, dans la grande partie de bassin versant de la Soummam, elles sont confinées dans des couches profondes et ne peuvent remonter en surface que par des courants ascendants (ZERDANE.D (2013)).

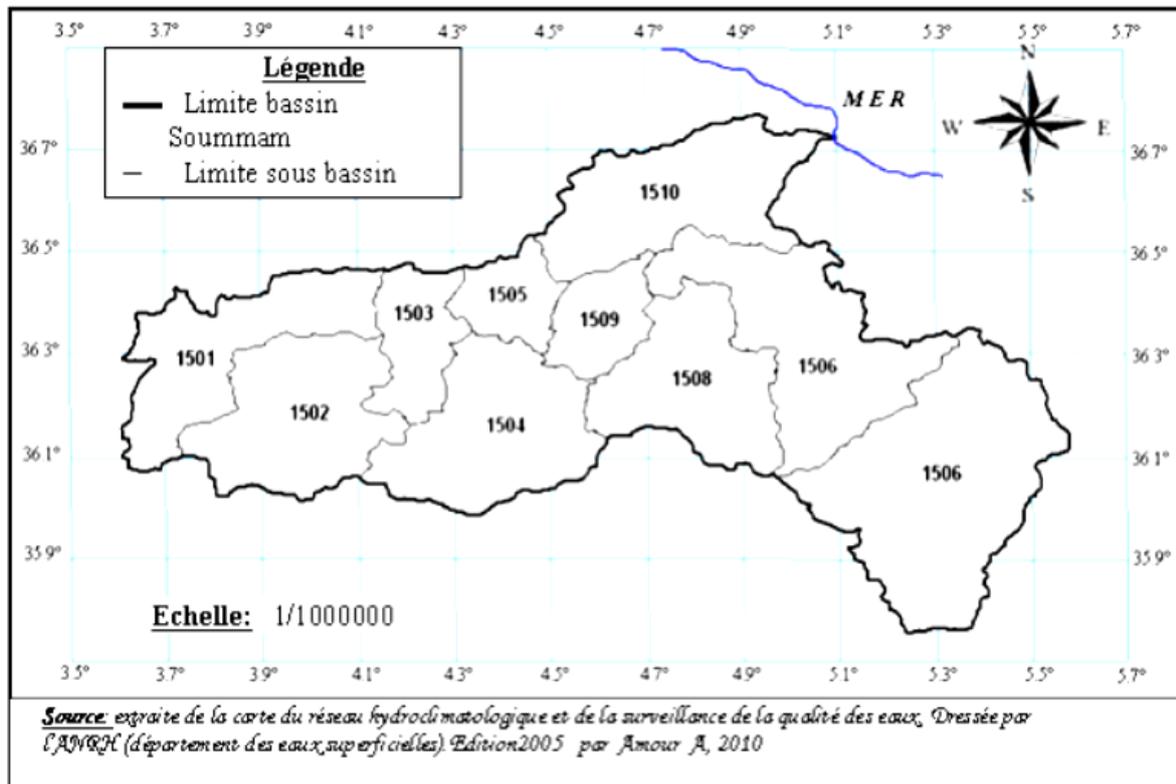


Figure II.8 : Sous bassins du bassin Soummam (ANRH Blida 2005)

Tableau II.2: Code des sous bassins du bassin versant Soummam (ANRH Blida 2005)

Sous bassin versant	Code
Oued Dhous	1501
Oued Zaiane	1502
Oued Sahel	1503
Oued Azerou	1504
Oued Sahel Aval	1505
Oued Bouselam amont	1506
Oued Bouselam moyen	1507
Oued El Ham	1508
Oued bouselam aval	1809
Oued Soummam	1510

II.3.2. Caractéristiques du bassin versant sahel

Le bassin versant Sahel se compose de la région les plateaux de Bouira et il couvre une superficie de 2216,156Km². Il est situé entre latitude 36°11' et 36°28' nord et la longitude 3°55' et 3°97', il est entouré par les trois grands bassins Sebaou, Isser, Hodna.

Ce bassin versant est caractérisé par un climat continental avec des hivers humides et des étés chauds. Ses précipitations annuelles peuvent atteint 300 mm(ZERDANE.D (2013)).

La délimitation et les caractéristiques du bassin versant Sahel à été faite avec le logiciel Arcgis.

Tableau II.3: Caractéristiques du bassin versant Sahel avec Arcgis

Sous bassin	Surface (Km2)	Périmètre (Km)	Elévation maximale (m)	Elévation minimale (m)	Longueur de cours d'eau principal (Km)	La pente moyenne (%)
Oued Zaiane	962,903	151,89	1448	376	71,017	7
Oued Dhous	875,716	187,12	1510	362	53,427	5.81
Oued Sahel	422,537	112,58	1867	179	39,828	6.07
Bassin versant Sahel	2216,156	451,59	1867	179	105.22	7.21

II.3.2.1. L'indice de compacité de Gravelius (KG)

Il est appelé aussi indice de forme, cet indice caractérisant la forme du bassin versant est donnée par la formule. Il se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

P : périmètre du bassin versant en (Km).

A : superficie en (Km²).

Si:

- $K_c < 1.12 \Leftrightarrow$ le bassin versant est compacté ;
- $K_c > 1.12 \Leftrightarrow$ le bassin versant est allongé ;
- $K_c = 1.12 \Leftrightarrow$ le bassin versant est cercle. (BENNEBI;1985)

\Rightarrow Dans ce cas, $K_c = 1,41$ Ce qui veut dire que notre bassin a **une forme allongé**.

II.3.2.2. Le Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent permet de ramener la forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même périmètre et le même indice de compacité (CHIKHI.T (2016)).

Les dimensions de ce rectangle se calculent à l'aide des relations suivantes :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent (Km) ;

l : largeur du rectangle équivalent (Km).

Le tableau suivant résulte les caractéristiques du rectangle équivalent pour chaque sous bassin :

Tableau II.4 : Résultats des parametres de forme du BV Sahel

bassins versant	Superficie A (Km ²)	Périmètre P (Km)	Indice de Gravilus KC	Forme	L (m)	l (m)
Sahel	2216,156	237,22	1,41	Allongée	95,27	23,26

II.3.2.3. Paramètres du relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants : 1800/ 200

II.3.2.3.1. La courbe hypsométrique du bassin versant Sahel

Cette courbe met en relation les altitudes et les surfaces dans un bassin, sous forme de fréquence de superficies inférieures à un seuil donné. Elle porte sur l'axe des abscisses, les altitudes et sur l'axe des ordonnées, la surface.

Tableau II.5: Répartitions hypsométriques de Bassin Sahel

Altitudes (m)	Altitude moyenne (m)	Surfaces partielles (Km)	Surfaces partielles cumulées (Km)	Surfaces partielles (%)	Surfaces partielles cumulées (%)
1867-1800	1833,5	0,061	0,361	0,0027	0,0027
1800-1700	1750	0,382	0,743	0,01689	0,0196
1700-1600	1650	0,816	1,559	0,03609	0,0557
1600-1500	1550	1,488	3,047	0,06581	0,1215
1500-1400	1450	3,026	6,073	0,13383	0,2553
1400-1300	1350	9,074	15,147	0,4013	0,6566
1300-1200	1250	22,150	37,297	0,97959	1,6364
1200-1100	1150	56,362	93,659	2,49262	4,1293
1100-1000	1050	145,801	239,46	6,44807	10,5783
1000-900	950	266,575	506,035	11,78932	22,3691
900-800	850	307,271	813,306	13,58911	35,9601
800-700	750	398,669	1211,975	17,6312	53,5936
700-600	650	408,244	1620,219	18,05466	71,6507
600-500	550	373,850	1994,096	16,53358	88,1865
500-400	450	210,894	2204,963	9,32268	97,5145
400-300	350	56,047	2261,01	2,47869	99,9935
300-200	250	0,144	2261,154	0,00637	99,9999

200-179	198,5	0,002	2261,156	0,00009	100
Total		2261,156			

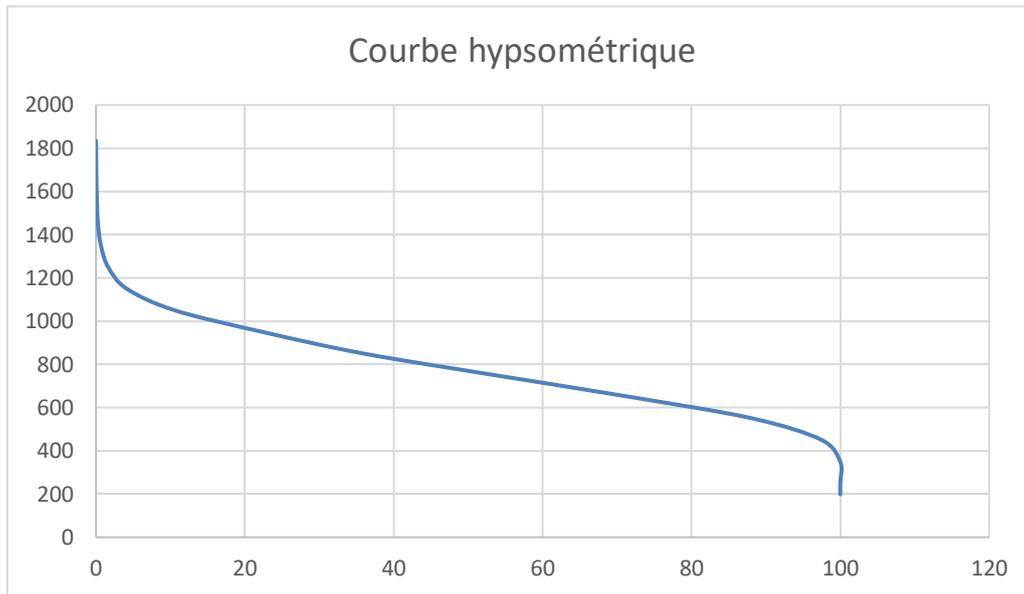


Figure II.9: L'altitude en fonction de la surface partielle cumulée

II.3.2.3.2. Les altitudes caractéristiques

Il existe quatre types d'altitudes caractéristiques qu'on peut calculer à partir de la courbe hypsométrique (CHIKHI.T (2016)) :

a) Altitudes minimales et maximale :

Les altitudes minimales et maximales de notre bassin sont lues directement à partir de la carte.

- $H_{min} = 179 \text{ m}$ \Rightarrow elle correspond à celle de l'exutoire.
- $H_{max} = 1867 \text{ m}$ \Rightarrow elle correspond au point le plus élevé du bassin.

b) Altitude moyenne :

L'altitude moyenne (H_{moy}) se déduit directement de la courbe hypsométrique, elle est définie comme suit :

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum H_i \cdot A_i$$

Avec :

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau.

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau.

A : la surface totale du bassin versant.

On obtient : $H_{moy} = 737 \text{ m}$

c) Altitude médiane :

Elle correspond à l'altitude lue à 50 % de la surface totale sur la courbe hypsométrique.

Elle se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin considéré représente une pente régulière.

$$H_m = H_{50\%}$$

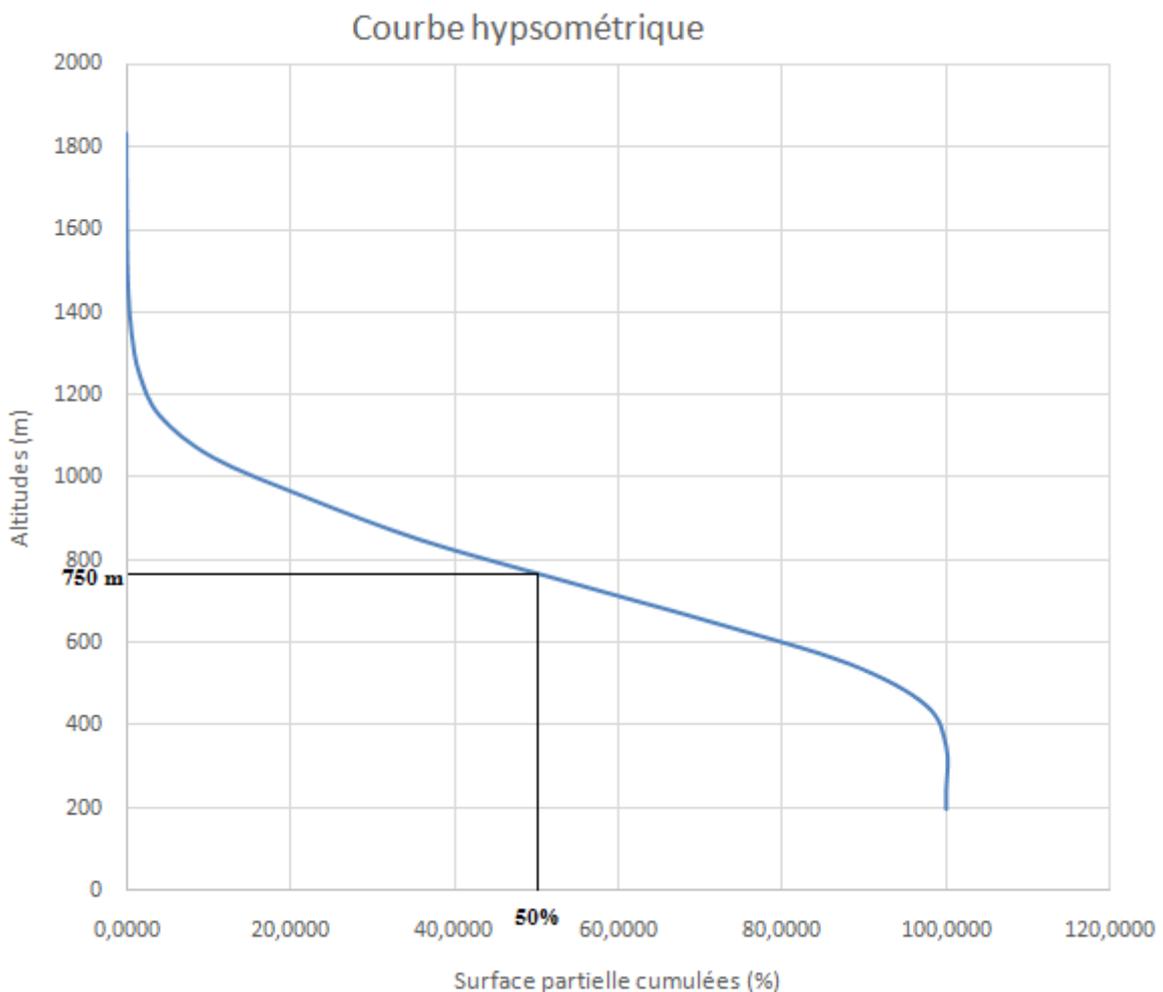


Figure II.10: La méthode de détermination de l'altitude médiane

$$\Rightarrow H_m = 750 \text{ m}$$

II.3.2.3.3. Indice de pente globale (I_g)

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule :

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

Avec :

D : dénivelée en (m)

L : longueur du rectangle équivalent en (Km)

D : est déterminé à partir de la courbe hypsométrique telle que : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

H (5% et 95 %) sont les altitudes entre lesquelles s'inscrit 95 % de la surface du bassin versant.

$$\Rightarrow I_g = 17,98 \text{ m/Km}$$

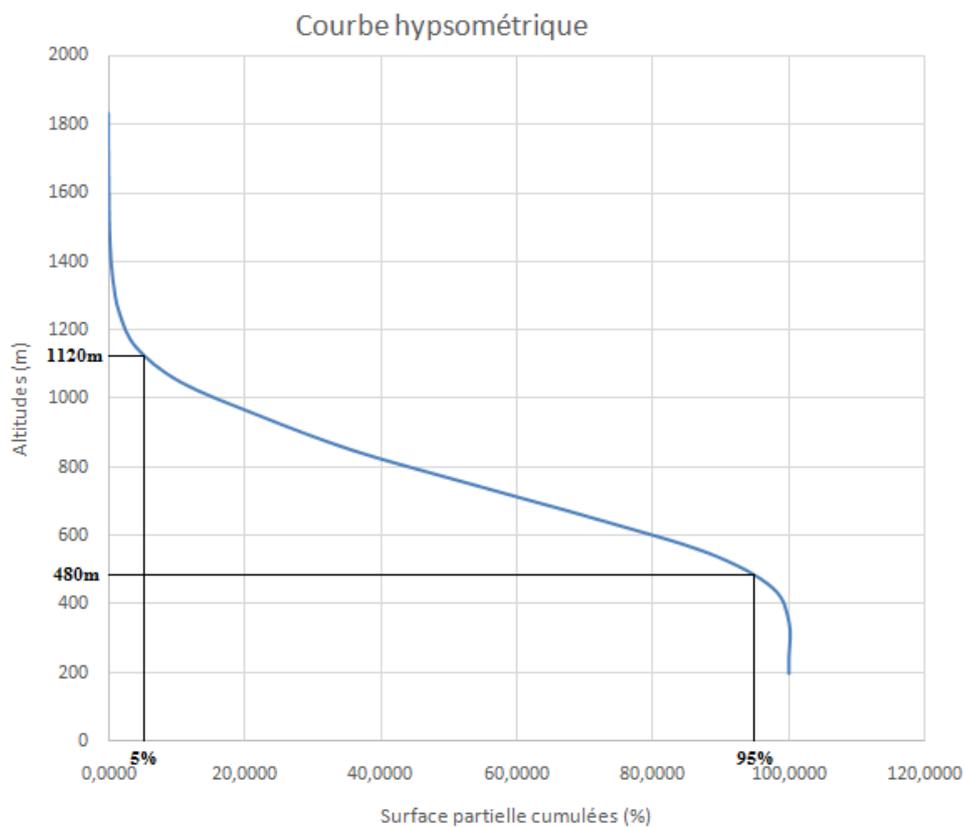


Figure II.11: Méthode de détermination du H95% et H5%

II.3.2.3.4. Pente moyenne du bassin versant (I_m)

Elle est donnée par la formule :

$$I_m = \frac{\Delta H * (0.5 * I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)}{S}$$

Avec :

ΔH : Dénivelée (m) ;

I_i : Longueur de la courbe de niveau d'ordre 1, 2, ..., n en m ;

S : Surface du bassin versant (Km²).

On trouve : $I_m = 14,5 \%$

II.3.2.4. Le réseau hydrographique

L'hydrographie c'est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels ; permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement notre zone d'étude possède un réseau hydrographique très développé (CHIKHI.T (2016)).

II.3.2.4.1. Classification de Schumm

Cette classification permet de classer les cours d'eau.

D'après Schumm « Est d'ordre x+1, tout tronçon de cours de rivière formé par la réunion de 2 cours d'eau d'ordre x ».

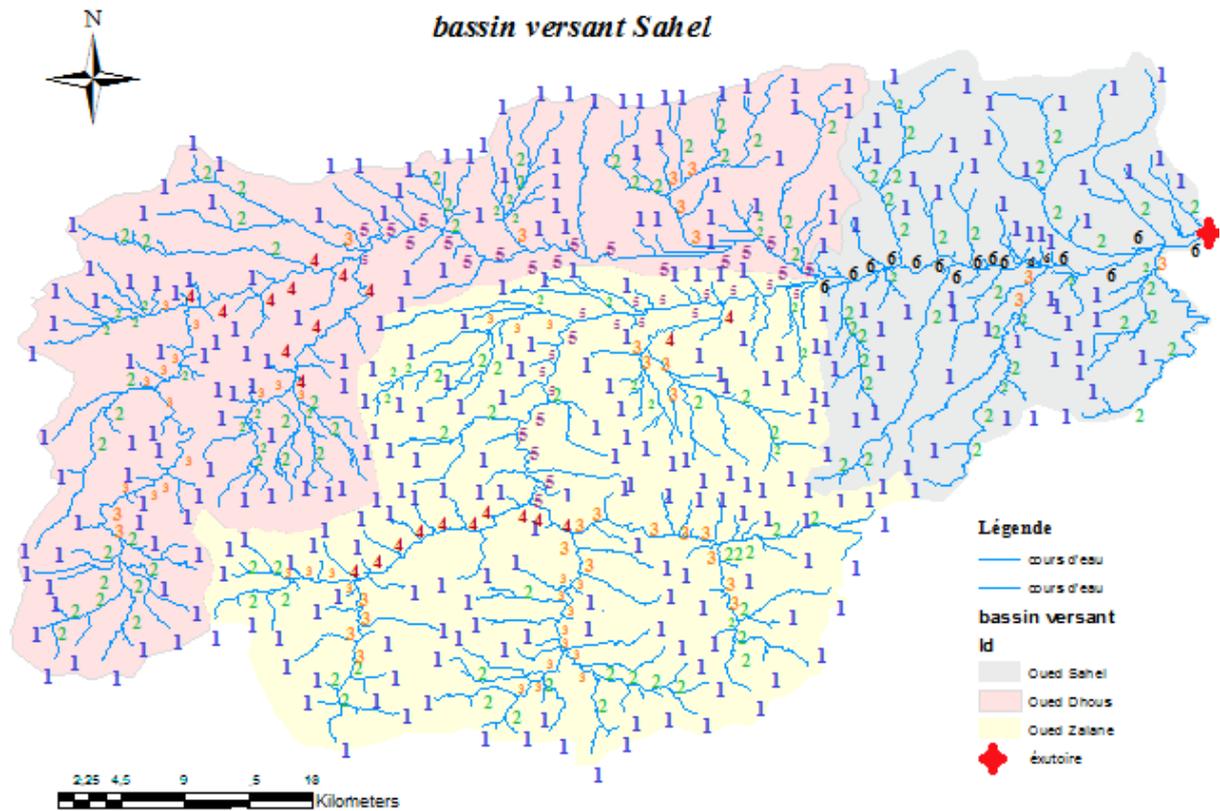


Figure II.12: Classification de Schumm du bassin versant Sahel

Selon cette classification, le cours d'eau principal est d'ordre 6.

Dans les calculs qui suivent, le cours d'eau principal, représenté par les ordres 1, 2, 3, 4, 5 et 6 est pris en considération. Cette classification permet d'identifier les confluences quand la morphologie des cours d'eau se ressemble, particulièrement pour les cours d'eau temporaires.

Tableau II.6: Fréquences des ordres du bassin versant Sahel

Ordre	Nombre	Fréquence (%)
1	413	57,20
2	166	22,99
3	48	6,65
4	37	5,12
5	42	5,82
6	16	2,22

Totale	722	100
--------	-----	-----

II.3.2.4.2. La densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie de bassin. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D_d = \frac{\sum Li}{A}$$

Avec :

D_d : densité de drainage (km/km²) ;

$\sum Li$: somme des longueurs des cours d'eau (km).

$$\Rightarrow D_d = 0.0071 \text{ km/km}^2.$$

II.3.2.4.3. La densité hydrographique

La densité hydrographique appelée aussi la fréquence de drainage est définie comme le nombre de drains du bassin par unité de surface, elle donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{N_i}{A}$$

Avec :

F : densité hydrographique (1/Km²) ;

N_i : nombre de cours d'eau ;

A : superficie du bassin versant (Km²).

$$\Rightarrow F = 0.3$$

II.3.2.4.4. Temps de concentration

C'est le temps que met une goutte de pluie la plus éloignée pour arriver à l'exutoire ; il est convient particulièrement prudent par les déférentes formules empiriques (formule d'IzzardMeunir, formule de Bramby Williams ;Basso...) nous donne la formule de Giandotti, car elle donne des valeurs acceptables par rapport les autres formules.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

T_c : Le temps de concentration en (h) ;

A : Surface du bassin versant ;

H_{min} : Altitude minimale en m ;

H_{moy} : Altitude moyenne en m ;

L : longueur du cours d'eau principal.

$$T_c = 19h$$

II.3.3. Géologie de la zone

Dans ce bassin versant on trouve des types de sols anciens de formation paléo marécageuse qui sont caractérisés par des formations bien accentués. La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie (figure II.13). Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables. Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux.

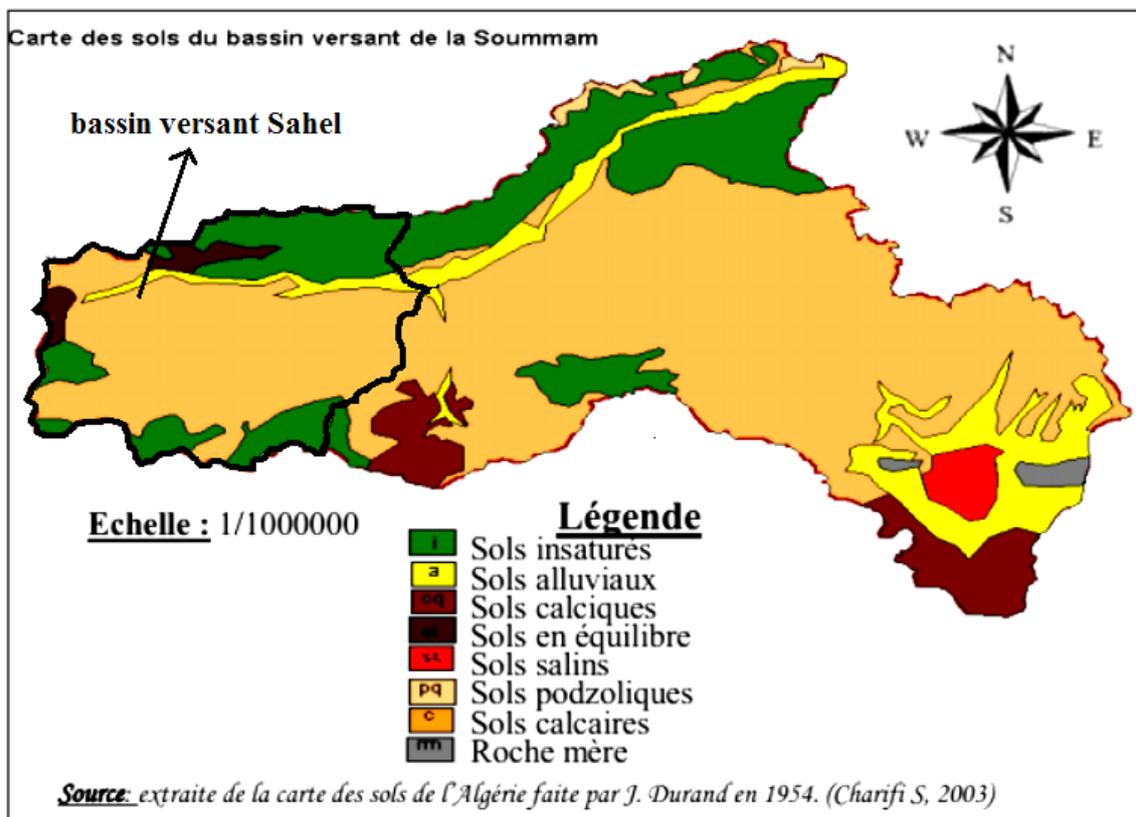


Figure II.13: Carte des sols du bassin versant Sahel et Soummam

Dans la zone sud du bassin versant Sahel sont reconnus les terrains carbonatés, marnes, carbonato-terrigènes et terrigènes du Trias, Crétacé supérieur et Paléogène. Les faciès

continentaux représentent les formations meubles et faiblement cimentées du Pléistocène-Holocène (figure II.14) (KHELOUFI.B (2019)). Cette zone correspond à l'Atlas Saharien, il est séparé du domaine tellien par le grand accident nord atlasique (BOUDIAF.A, HERVE.P, COUTELLE.A et RITZ.J (1999)).

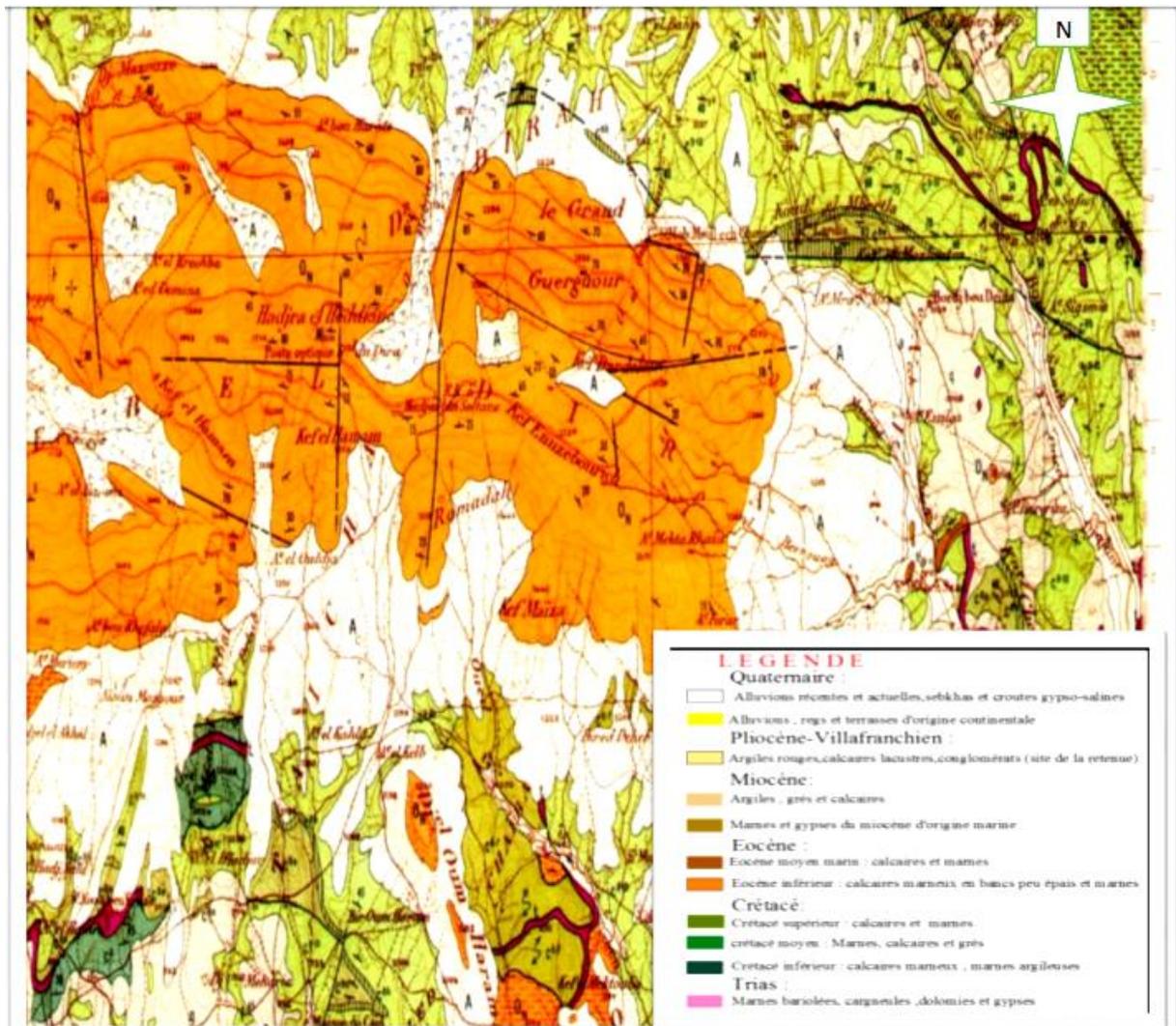


Figure II.14: Carte géologique de la zone sud du bassin versant Sahel

La partie nord du bassin versant Sahel se situe dans la partie centrale des chaînes alpines d'Afrique du Nord. Dans cette partie la couverture sédimentaire des nappes est constituée de formations calcaires mésozoïques qui correspondent aux plus forts reliefs en bordure sud des massifs kabyles (chaîne du Djurdjura) (BOUDIAF.A, HERVE.P, COUTELLE.A et RITZ.J (1999)). Cette partie correspond au domaine structural tellien de l'Algérie (figure II.15) qui situe dans limites de la chaîne orogénique périméditerranéenne d'âge alpin qui est formée de trois domaines paléogéographique, on distingue (ZERDANE.D (2013)) :

- ❖ **Domaine interne** : il se localise dans les massifs de Chenoua, d'Alger, de grande et petite Kabylie, îles de structure très complexe et il regroupe l'ensemble des : socle Kabyle, la couverture paléozoïque et la dorsale Kabyle.
- ❖ **Domaine des Flyschs** : ces flyschs se situent au sud du domaine interne auquel nous y rattachons trois types de nappes : nappe du flysch mauritanien, massylien et numidien.
- ❖ **Domaine externe** : il est situé au sud du domaine des flyschs, ce sont des dépôts telliens miogéosynclinaux, observé sur presque toute la région du BV Sahel.

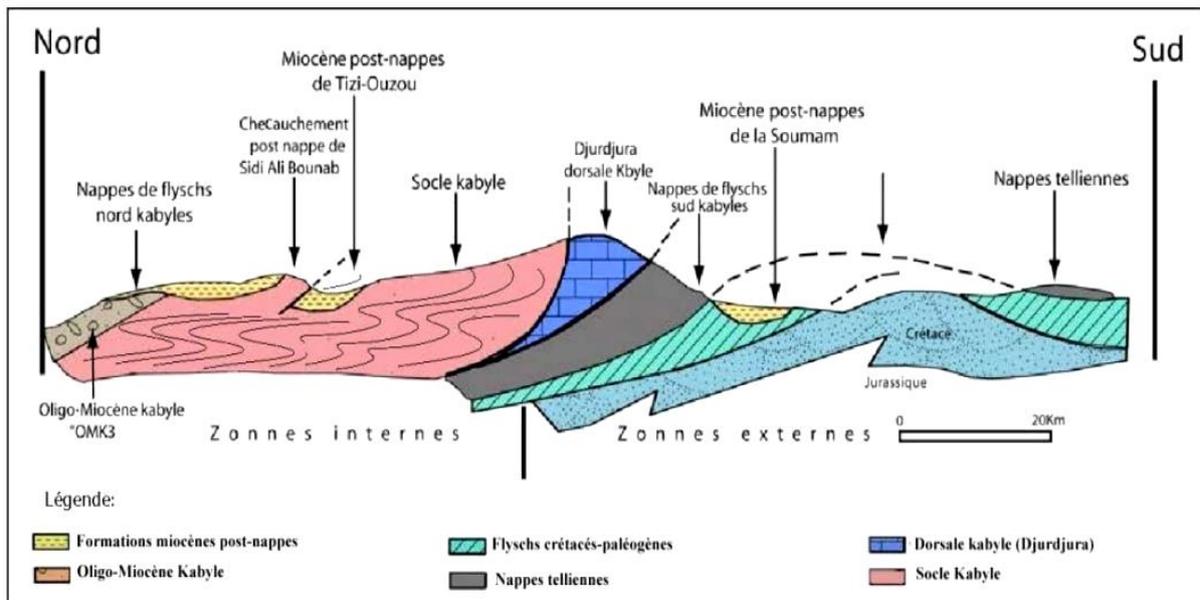


Figure II.15 : Coupe synthétique et interprétative de la partie centrale du domaine tellien (Durand Delga et Al 1969)

On distingue au niveau du bassin versant Sahel différentes formations géologiques CHIKHIL.T (2016):

- **Le Quaternaire** : il s'agit des alluvions le long des Oued.
- **Le Pliocène Continental**: le coteau du sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.
- **Le Miocène**: il s'agit essentiellement du Miocène inférieur post nappe.
- **L'Oligocène** : il est généralement argilo-gréseux.
- **L'Eocène** : il est complètement marneux, parfois calcaro-marneux. On le trouve surtout au niveau des hautes plaines.
- **Le Crétacé** : se présente, en général, sous forme de flysch. Il est étendu, continu depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie.

- **Le Jurassique** : il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'Est. Il est principalement calcaro-dolomitique.
- **Le trias** : il est de faciès gypso-salin et apparaît le long de contacts anormaux (contact des nappes de charriage) dans le Tell méridional et est présenté par des conglomérats et des grès rougeâtres dans Tell septentrional.

II.3.4. Hydrogéologie de la zone

La majorité des sols dans le bassin de l'oued sahel sont des sols calcaires (riches en calcaire). Leur complexe absorbant est modifié par l'eau. Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméable.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des Oueds, les sols sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux à profil indifférencié ou présentent une simple accumulation de matières organique en surface. En plus on rencontre aussi des sols calciques (CHIKHI.T (2016)).

II.4. Conclusion

Après avoir étudié les différentes caractéristiques du bassin du sahel nous avons pu tirer les synthèses suivantes :

- ❖ Le bassin possède un réseau hydrographique très développé (ordre 6). Trois Oueds et leurs affluents constituent son squelette hydrographique.
- ❖ L'altitude maximum est de 1867 m au pic de Lalla Khadidja. Ces reliefs élevés sur les bordures du bassin provoquent un écoulement assez rapide des eaux et des temps de concentration assez courts.
- ❖ Les paramètres morphologiques déterminés sont intimement liés aux caractères lithologiques des roches du bassin qui sont en majorité semi-perméables à imperméable.

CHAPITRE III

III.1. Introduction

L'eau est une ressource indispensable à la vie mais peut causer plusieurs problèmes de santé si elle ne répond pas aux normes de qualité. Ce chapitre a pour but de présenter les différents éléments d'eau des forages à étudier ainsi de vérifier la qualité d'analyse de ces forages et de présenter les logiciels utilisés pour effectuer ce travail.

III.2. Délimitation de la zone d'étude

Notre zone d'étude concerne le bassin versant Sahel qui appartient au grand bassin Soummam, ce bassin versant décompose en 3 sous bassins : Sahel, Oued Dhous, Oued zaiane.

En générale, chaque bassin versant est séparé des autres par une ligne de partage des eaux. Cette limite est déterminée sur carte topographique. En commençant par l'exutoire, on trace à main levée des segments perpendiculairement aux courbes de niveau en passant par les crêtes, aboutissant automatiquement à l'exutoire.

Dans notre cas la délimitation était faite automatiquement par le logiciel « ArcGis».

III.2.1. Présentation de l'ArcGis

D'après le site web officiel des ressources Arcgis, ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques (figure III.1). En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque.

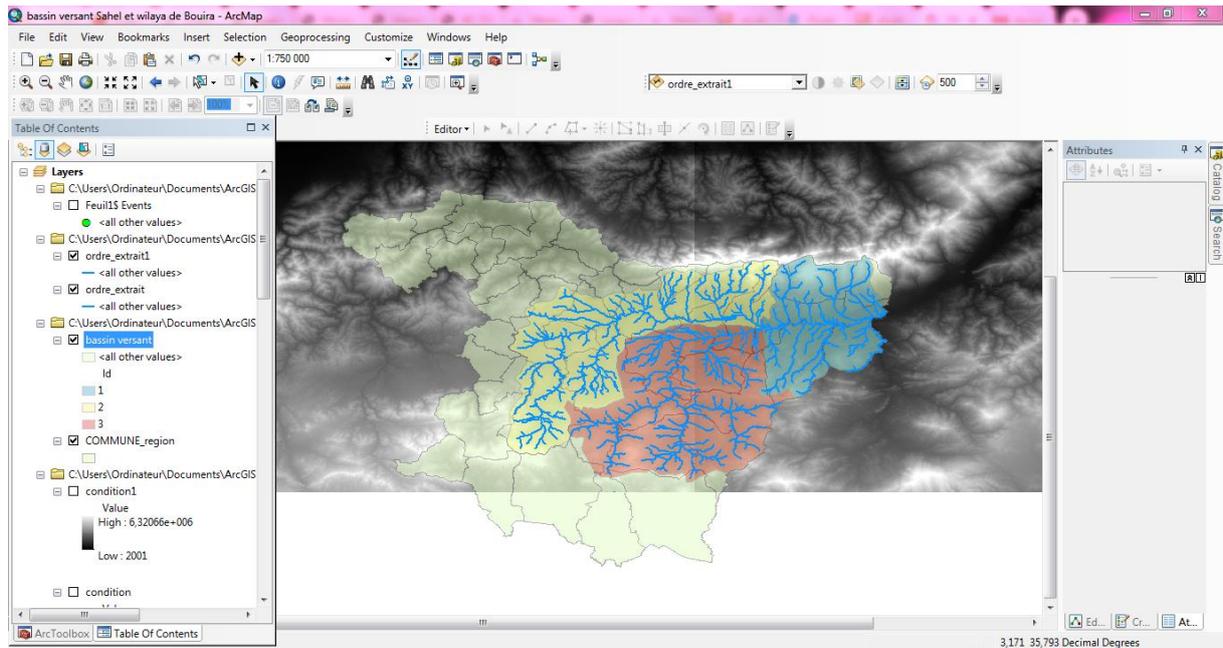


Figure III.1: La délimitation du bassin versant Sahel et ses sous bassins avec ArcGis

III.3. Echantillonnage

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de la nappe étudiée (tableau III.1).

Les campagnes ont été effectuées deux fois par an. Les eaux ont été systématiquement prélevées a partie des robinets des consommateurs.

La procédure du prélèvement d'un échantillon d'eau doit être comme suit :

- Le contenant fourni par le laboratoire est stérilisé, doit être ouvert uniquement au moment du prélèvement et ne doit jamais être rincé, car il contient des agents de préservation requis pour les analyses. Les parois internes ou l'intérieur du couvercle ne doivent pas être touchés avec les doigts.
- L'échantillon doit provenir du robinet d'eau froide le plus utilisé et l'eau de ce robinet ne doit pas avoir été modifiée par un système de filtration.
- Le robinet doit être débarrassé de tout accessoire complétant son bec comme les aérateurs, grillages, pommes d'arrosage, boyaux. S'il est impossible d'enlever ces accessoires, il faut choisir un autre robinet.

- L'extérieur et l'intérieur du bec du robinet doivent être nettoyés à l'aide d'une pièce de coton propre imbibé d'une solution d'eau de javel (environ 5 % d'hypochlorite de sodium) ou de l'alcool (alcool à friction).
- Afin de s'assurer que l'eau prélevée est représentative de celle circulant dans le système de distribution, il faut laisser couler l'eau pendant 5 minutes avant de prélever un échantillon.
- Le contenant doit être rempli au moins jusqu'au niveau indiqué sur la bouteille et en dessous de l'espace d'air d'au moins 2.5 cm entre la surface du liquide et du bouchon.
- Le formulaire de demande d'analyse rempli soigneusement doit toujours accompagner l'échantillon.
- L'échantillon doit être conservé à environ 4 °C entre le moment du prélèvement et la réception au laboratoire.
- L'échantillon doit parvenir la même journée que le prélèvement.

Tableau III.1: points de prélèvement du bassin versant Sahel

Forages	Forage
F Ouled Bouali	F1
F1 Chorfa	F2
F3 Chorfa	F3
F4 Chorfa	F4
F51 Mchedellah	F5
F3 Bechloul	F6
F1 adjiba	F7
F2 Adjiba	F8
F3 Semmache	F9
F1 Haizer	F10
F2 Haizer	F11
F5 Haizer	F12
F3 Taghzout	F13
F4 Taghzout	F14
F7 Taferka	F15

F12 Taferka	F16
H12 taghzout	F17
H17 taghzout	F18
F16 Sidi Ziane	F19
Puit Ain El Beida	F20
puit Ouled Zidane	F21
F Guelta Zarga	F22
F Bekouche	F23
F21 Sidi Ziane	F24
F1 SidiZiane	F25
F8 Harket	F26
F1 Said Abid	F27
F2 Said Abid	F28
F11 Ouadhia	F29
F2 Al Asnem	F30
F3 Al Asnam	F31
F Thamer	F32
F Djaada	F33
F1 Guemgouma	F34
Puit Tarfa	F35
F Oued El Berdi	F36
Source El Mesdour	F37

III.4. Analyses réalisées

III.4.1. Mesure in situ

Les seules mesures effectuées in situ par l'équipe de laboratoire de l'ADE de Bouira sont le pH et la Température.

III.4.1.1. Température :

C'est un facteur important pour l'activité biologique, il influence la solubilité de l'oxygène du milieu récepteur, donc son pouvoir auto épurateur (BENALLOU. A, (2004)).

La température de l'eau dépend d'une série de facteurs :

- Situation géographique, la saison
- La profondeur (la température des profondeurs est généralement plus faible qu'en surface)
- La couleur de l'eau (une eau sombre absorbe plus fortement la chaleur)
- Le volume de l'eau (plus le volume est élevé moins importantes sont les fluctuations de température). [31]

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre.

III.4.1.2. pH

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acidité carbonique, et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (MAKHOUKH.M (2011)).

Le pH est mesuré à l'aide de l'appareil « powerhaus24 » (figure III.2) en :

- remplissant le contenant avec l'échantillon de l'eau à tester ;
- jetant le comprimé sans le toucher dans le contenant rempli et en laissant fondre tout en fermant le contenant ;
- comparant la couleur obtenue à l'échelle des couleurs imprimées.



Figure III.2 : L'appareil de mesure de pH « Powerhaus24 »

III.4.2. Analyse aux laboratoires

Les analyses d'eau ont été effectuées au laboratoire de l'ADE de Bouira. Elles ont porté sur les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-).

Les méthodes utilisées sont :

- Méthode volumétrique pour les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^-) ;
- Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique (en utilisant un spectrophotomètre Dr 6000 (HACH) (figure III.3)) pour les éléments (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^-).

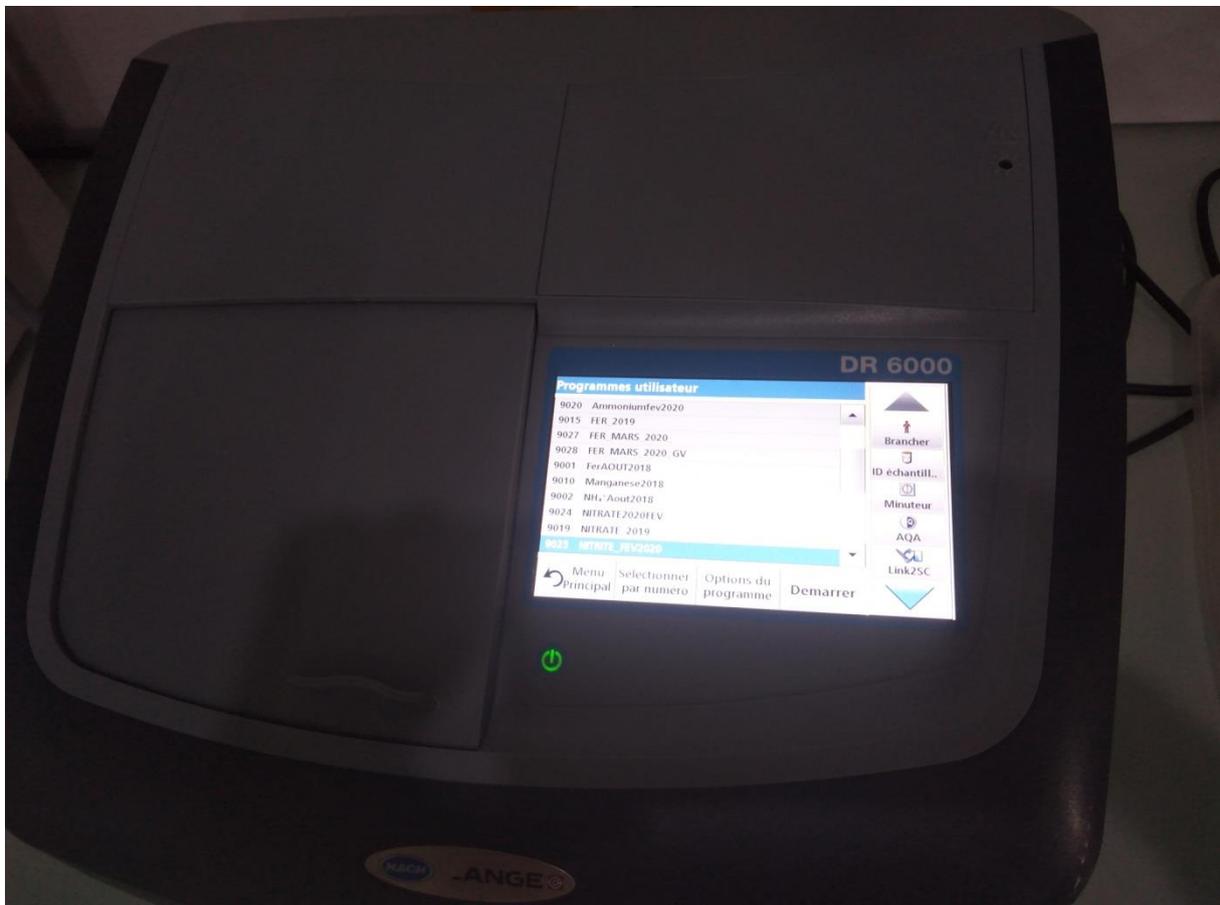


Figure III.3 : Appareil de mesure de conductivité « spectrophotomètre Dr 6000 HACH »

III.4.2.1. Paramètres physiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés après les prélèvements sont le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique, la température et la dureté.

III.4.2.1.1. Conductivité électrique (δ)

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm (HADEF.D 2017).

Elle est mesurée au laboratoire à l'aide du spectrophotomètre Dr 6000 HACH (figure III.3).

Tableau III.2: Résultats d'analyse physique des forages du Bassin versant Sahel

Forages	Forage	Température (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
F Ouled Bouali	F1	15,3	7,495	1636
F1 Chorfa	F2	16,35	7,31	1236,5
F3 Chorfa	F3	15,8	7,22	917,5
F4 Chorfa	F4	16,6	7,22	943,5
F51 Mchedellah	F5	17,9	7,09	1450
F3 Bechloul	F6	16,8	6,86	1654
F1 adjiba	F7	16,65	7,71	996
F2 Adjiba	F8	20,5	7,13	911
F3 Semmache	F9	17,25	7,9	1028,5
F1 Haizer	F10	18,2	7,2	1055
F2 Haizer	F11	18,7	7,325	935,5
F5 Haizer	F12	19,05	7,35	763
F3 Taghzout	F13	20,5	7,25	795
F4 Taghzout	F14	20,8	7,37	785
F7 Taferka	F15	21,2	7,23	1764
F12 Taferka	F16	21,2	7,23	1764
H12 taghzout	F17	20,95	7,27	1404,5
H17 taghzout	F18	20,95	7,27	1404,5
F16 Sidi Ziane	F19	17,5	7,09	1092,5
Puit Ain El Beida	F20	17,4	7,05	1767
puit Ouled Zidane	F21	17,6	7,05	1288
F Guelta Zarga	F22	19,9	7,73	1111,33

F Bekouche	F23	14,8	7,67	1002
F21 Sidi Ziane	F24	20,6	7,05	1448
F1 SidiZiane	F25	18,6	7,11	1020
F8 Harket	F26	18,05	7,135	1141,5
F1 Said Abid	F27	21,6	7,24	854
F2 Said Abid	F28	21	7,31	856
F11 Ouadhia	F29	19,4	7,115	1158,5
F2 Al Asnem	F30	17,1	7,08	1096
F3 Al Asnam	F31	13,8	6,84	1445
F Thamer	F32	15,6	6,92	1491
F Djaada	F33	16	7,06	1396
F1 Guemgouma	F34	15,85	7,025	1173,5
Puit Tarfa	F35	23,35	7,235	2515
F Oued El Berdi	F36	19,6	7,33	1219,5
Source El Mesdour	F37	23,25	7,82	684,5

III.4.2.2. Eléments majeurs

Les eaux contiennent naturellement des ions en quantité plus ou moins importante. Ces ions se divisent en cations, à charge positive, et en anions chargés négativement. Dans les cations et anions identifiés dans les eaux, il y a ceux qu'on qualifie de majeurs, et les mineurs, présents évidemment en faible quantité et souvent le reflet d'eau polluée (BENANDELOUAHID.H (2018)).

III.4.2.2.1. Calcium (Ca^{2+})

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$), soit la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$), ou origine agricole (HADEF.D (2017)).

III.4.2.2.2. Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrés (calcaires dolomitiques, dolomies du

jurassique ou du trias moyen). Une autre origine influe sur la concentration du Mg qui est les engrais agricoles (HADEF.D (2017)).

On distingue de nombreux minéraux constitutifs de ses roches : l'olivine $(Fe, Mg)_2(SiO_4)$, les clinopyroxènes et les orthopyroxènes $(Mg, Fe)_2(SiO_3)_2$, l'amphibol $(Mg, Fe)_7(Si_8O_{22})(OH, F)_2$ et les biotites $K(Mg, Fe)_3[Si_3AlO_{10}(OH, F)_2]$ OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007)).

III.4.2.2.3. Dureté (TH)

La dureté de l'eau, ou titre hydrotimétrique (TH), est un indicateur de la minéralisation de l'eau, qui correspond à la teneur de l'eau en calcium (Ca^{2+}) et en magnésium (Mg^{2+}). L'unité utilisée pour exprimer la dureté est le degré français (°f) : $1\text{ °f} = 10\text{ mg/l}$ de carbonate de calcium (calcaire) ou 4 mg/l de calcium ou $2,4\text{ mg/l}$ de magnésium ou $0,2$ milliéquivalent par litre (meq/L) (DDASS (2008)).

La détermination du TH consiste à doser essentiellement les ions calcium et magnésium contenus dans l'eau. Au cours de ce dosage, le réactif titrant utilisé est l'anion éthylènediaminetétracétate abrégé EDTA, le milieu étant tamponné à $pH = 10$. L'indicateur utilisé est le noir Triochrome T et la réaction de titrage est la suivante :



Avec :

M^{2+} : Ion calcium ou ion magnésium.

Y^{4-} : Ion éthylènediaminetétracétate.

Le titre hydrotimétrique idéal se situe entre 10° et $15^\circ F$ et ne doit pas dépasser $40^\circ f$.

III.4.2.2.4. Chlorure (Cl^-)

La concentration des chlorures dans l'eau dépend du terrain traversé. Les eaux ont tendance à se charger en ions Cl^- le long de leur trajet souterrain (SKENDRAOUI.H (2018)).

Pour doser les chlorures, on a utilisé un réactif composé de thiocyanate mercurique $Hg(SCN)_2$ en solution méthanolique, l'acide perchlorique $HClO_4$, le perchlorate ferrique $Fe(ClO_4)_3$ et l'eau. Les ions chlorures présent dans l'échantillon réagissent avec les thiocyanate de mercure en excès pour libérer les ions SCN^- qui, à leur tour, réagissent avec

les ions Fe^{3+} pour donner un complexe rouge-orangé dosé par colorimétrie. Les réactions successives sont les suivantes :



L'origine de cet ion peut être (OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007)) :

- Atmosphérique : aérosols contenus dans l'eau de pluie ;
- Interaction eau/roche : de nombreuses roches volcanique contiennent des minéraux riche en Chlore ;
- Marine (le biseau salé) : c'est un mouvement entrant d'eau de mer dans les aquifères d'eau douce dans le cas de la surexploitation des aquifères ;
- Anthropique : rejets des eaux usées d'origine domestique et industriel ou engrais chimique.

III.4.2.2.5. Sodium (Na^+)

L'eau chargée en sodium est une eau qui traverse les terrains gypsifère, elle provient de la dissolution de l'Halite et des eaux usées d'origine industrielle et domestique (GOUAIDIA.L ,MS LAOUAR , DEFAFLIA.N et ZENATI.N (2017)).

La concentration de sodium est mesurée à l'aide d'un spectromètre après addition d'un tampon spectral de chlorure de césium.

Les minéraux les plus abondants constitutifs des roches sont les feldspaths sodiques $Na(Si_3AlO_8)$ (OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007)).

III.4.2.2.6. Potassium (K^+)

Le Potassium provient de l'altération des formations silicatées (Gneiss, Schiste), des argiles potassiques [4]. Dans le cas des grandes concentrations, son origine provient de la dissolution des engrais chimiques ou la dégradation des animaux ou des humains (Wilson.S et DAVIDSON.P (2011)).

III.4.2.2.7. Sulfate (SO_4^{2-})

La teneur en sulfate dans l'eau est liée aux composés alcalins de la minéralisation (BELKACEM.M (2016)).

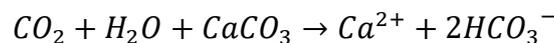
La teneur en sulfate dans l'eau peut être liée à plusieurs origines (OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007)) :

- Les composés alcalins de la minéralisation (ex : la pyrite(FeS_2)) ;
- Le lessivage de formations évaporitiques (ex : Le gypse($CaSO_4, 2H_2O$)) selon la réaction suivante : $CaSO_4 + 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$
- L'oxydation de sulfures dans les précipitations atmosphériques (phénomène des pluies acides) ;
- Anthropique (engrais).

La présence de sels de sulfates dans l'eau favorise la corrosion des canalisations métalliques par effet électrolytique. Les sulfates peuvent induire la prolifération de bactéries sulfatoréductrices dans les zones de stagnation de l'eau dans le réseau de distribution. Celles-ci peuvent produire du sulfure d'hydrogène et donner à cette eau une odeur et un goût déplaisants, accélérer la corrosion (corrosion biologique) et nuire à la désinfection de l'eau dans les réseaux de distribution.

III.4.2.2.7. Bicarbonate (HCO_3^-)

La dissolution des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) et l'action combinée du CO_2 des eaux météoriques et du sol sont : d'une manière générale les principales origines des bicarbonates donc ils résultent de l'équilibre physico-chimique entre : « La roche – l'eau et le gaz carbonique » selon l'équation générale suivante (OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007)) :



L'eau peut être aussi enrichie des bicarbonates par la décomposition de la matière organique et la respiration des racines dans la zone du sol.

III.4.2.2.8. Nitrate (NO_3^-)

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et des plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les sources d'azote peuvent être (RAHMANI.B (2016)) :

- La matière organique du sol par la minéralisation ;
- Les amendements organiques comme le fumier et les autres déchets ;
- Les engrais azotés.

III.4.2.3. Contrôle de la balance ionique

Une qualité d'analyse d'une eau effectuée sur les éléments majeurs doit être contrôlée par la méthode de balance ionique. Il faut rappeler qu'en théorie, une eau naturelle est électriquement neutre. De ce fait, la somme (en équivalents chimiques) des cations devrait être égale à celle des anions (en équivalents chimiques) (HAISSOUNE.A (2013)).

Cette démarche de validation est un préalable indispensable à la présentation des résultats d'analyse et à leur interprétation.

Le calcul des balances ioniques se fonde sur la relation suivante OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007) :

$$NICB = 100 * \frac{(\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions})}{(\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions})}$$

Avec :

NICB (Normalized Inorganic Charge Balance) : La balance ionique exprimée en pourcentage,

\sum Cations : La somme des cations (unités en meq/l),

\sum Anions : La somme des anions (unités en meq/l).

En règle générale, les résultats des analyses sont considérés de la manière suivante :

- $-1\% < NICB < 1\%$: Fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- $-5\% < NICB < 5\%$: Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- $-10\% < NICB < 10\%$: Fiabilité des résultats d'analyses médiocre.
- $NICB < -10\%$ ou $NICB > 10\%$: Mauvaise fiabilité des résultats d'analyses.

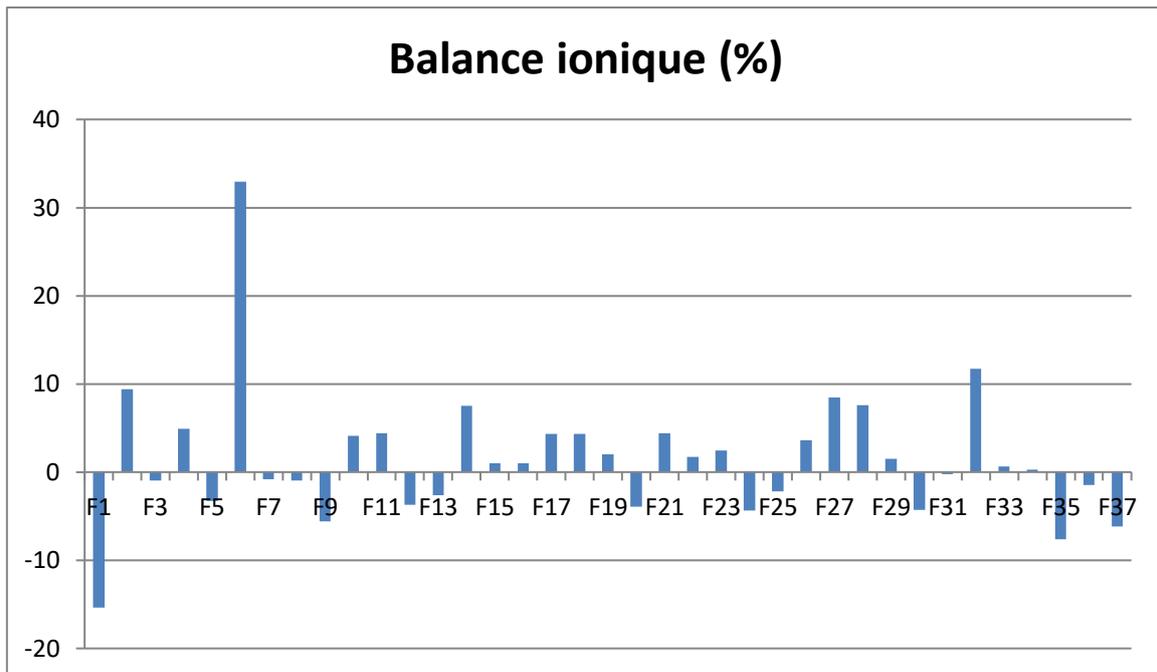


Figure III.4: Représentation des balances ioniques des forages du bassin versant Sahel

Le graphique précédant (figure III.4) représente la balance ionique calculée pour chaque eau des 37 forages.

70% des forages ont $-5\% < \text{NICB} < 5\%$ donc la qualité des analyses est acceptable.

92% des forages ont un NICB ($-10\% < \text{NICB} < 10\%$), cette balance est élevée mais reste cependant dans une fourchette de valeur tolérable. Ce qui s'exprime par la fiabilité de ses résultats obtenus.

Seuls les échantillons correspondant aux forages F1, F6 et F32 dépassent la fourchette du NICB comme indiqués sur l'histogramme, ces analyses sont considérées comme douteuse.

Toutes les analyses qui présentent des NICB dont les valeurs $> 10\%$ ont été systématiquement éliminées de cette étude, seules les analyses dont la NICB $< 10\%$ ont été retenues.

III.5. Présentation des logiciels

III.5.1. Logiciel Diagramme

Logiciel Diagramme permet la création des diagrammes spécifiques à l'hydrogéologie et la validation des données analytiques (figure III.5) (SIMLER.R (2012)).

Il est utilisé pour faire la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité d'une comparaison aisée voire une classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques (HAISSOUNE.A (2013)).

De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer :

- le diagramme de Piper,
- le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff,
- le diagramme de Stiff, - le diagramme à coordonnées rayonnante,
- diagramme d Riverside,
- diagramme de wilcox,

Dans notre étude, on va utiliser 3 représentations graphiques. Il s'agit de : diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff, le diagramme de Piper et le diagramme de Riverside.

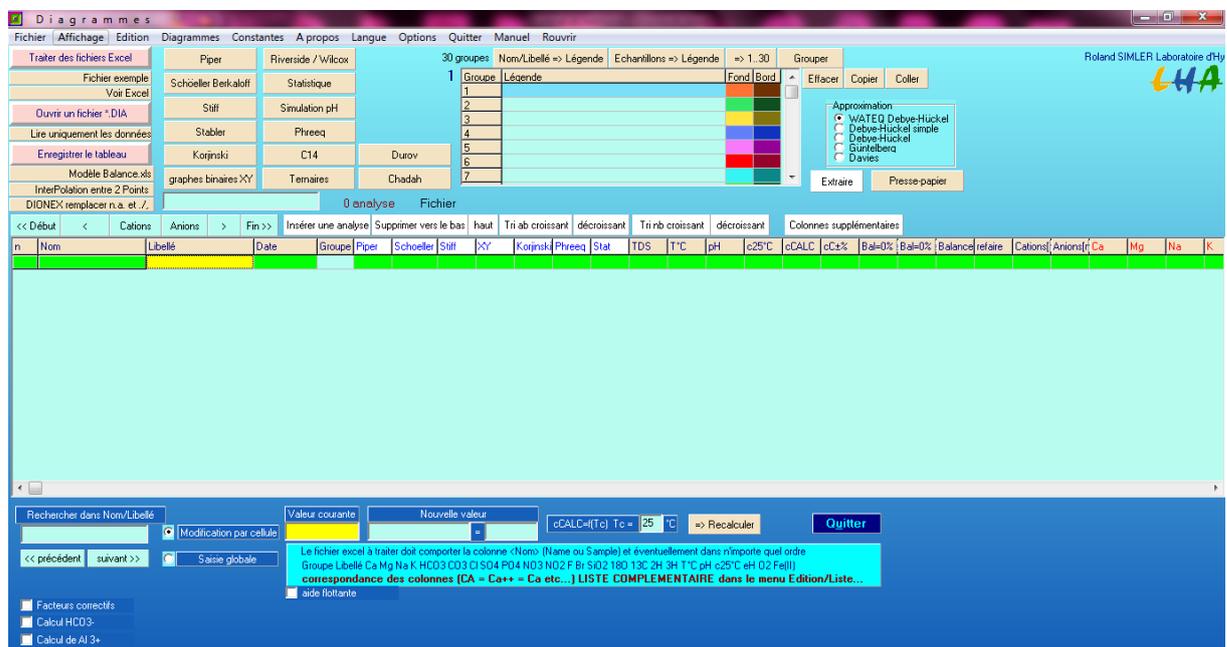


Figure III.5: Présentation de logiciel Diagramme

III.5.1.1. Diagramme de piper

Le Diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles (figure III.6). Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection 27 des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le

faciès de l'eau naturelle concernée. Le diagramme de Piper permet également (HAISSOUNE.A (2013)) :

- D'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes ;
- d'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques ;
- d'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant ;
- la projection de plusieurs échantillons en même temps ;
- Pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace
- Pour les comparer ;
- Pour avoir une idée sur la notion de mélange ;
- de suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle.

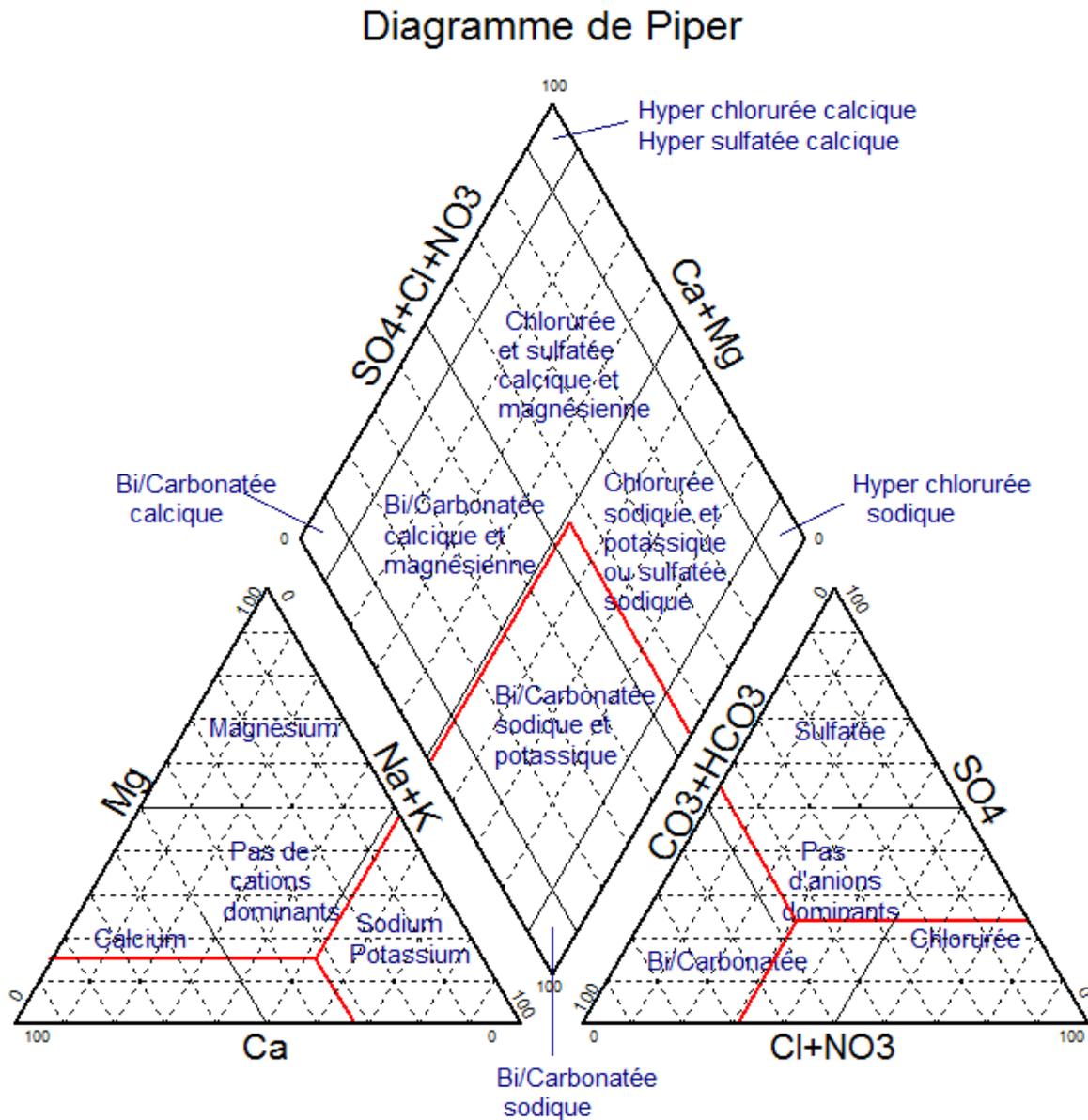


Figure III.6: Diagramme de piper

III.5.1.2. Diagramme de schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en mg/l sur l'axe des ordonnées (figure III.7). Les points obtenus sont reliés par des droites.

L'allure du graphique permet de visualiser le faciès des eaux analysées. Cette représentation permet aussi la détermination du faciès d'une eau. En effet, le diagramme de Schöeller-Berkaloff indique pour chaque eau analysée la teneur moyenne (mg/l) en éléments

majeurs de ces eaux, de comparer des éléments en traces et d'établir les faibles variations entre les éléments chimiques (HAISSOUNE.A (2013)).

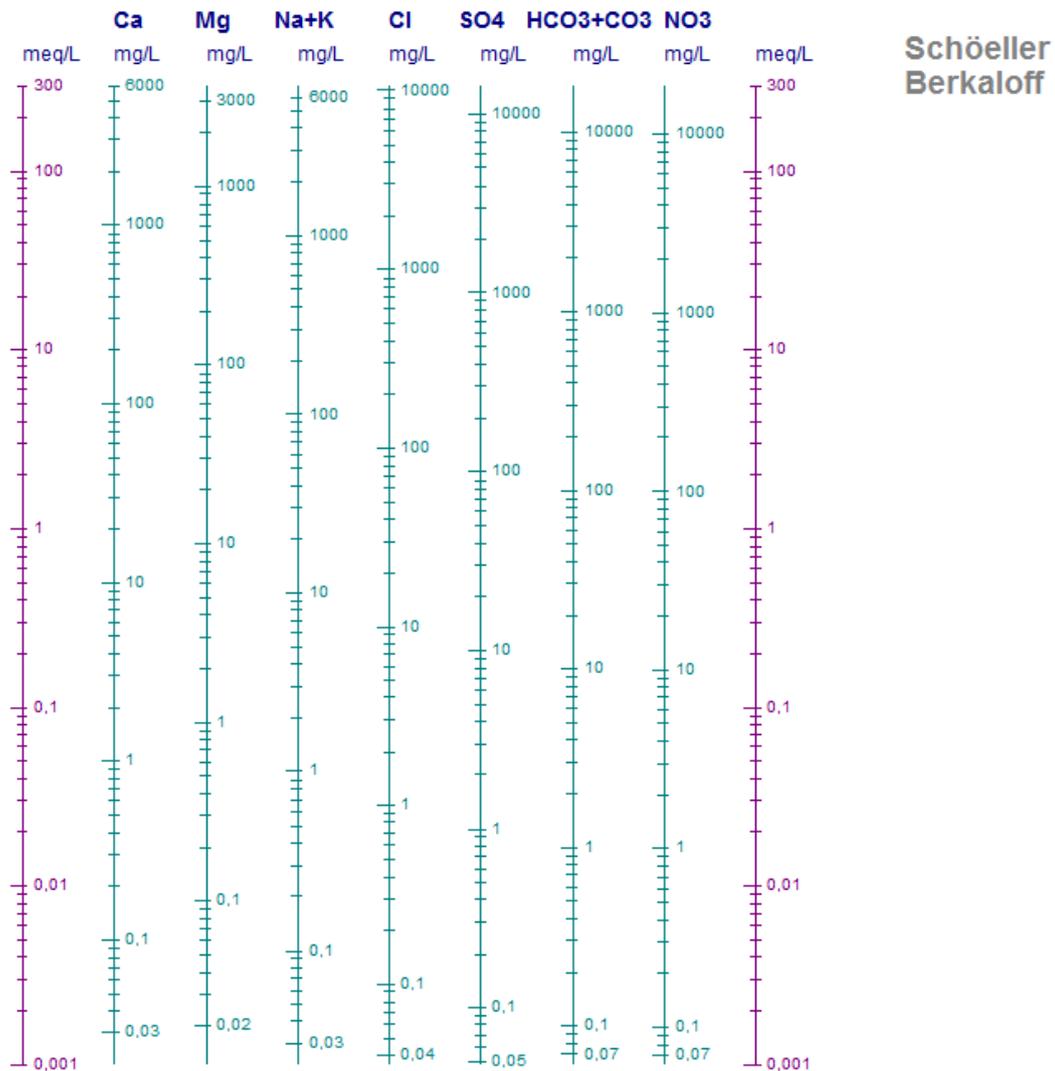


Figure III.7: Diagramme de schoeller-Berkaloff

III.5.1.3. Diagramme de Riverside

C'est un diagramme utilisé dans le domaine d'irrigation pour l'évaluation de la salinisation des sols sous l'effet de l'irrigation. Pour l'utilisé on a besoin de la conductivité électrique de l'eau et l'indice d'adsorption du sodium SAR qui se calcule par 3 éléments, le sodium, magnésium et calcium (figure III.8) (HAISSOUNE.A (2013)).

Le diagramme est découpé en quatre classes de risque de sodisation.

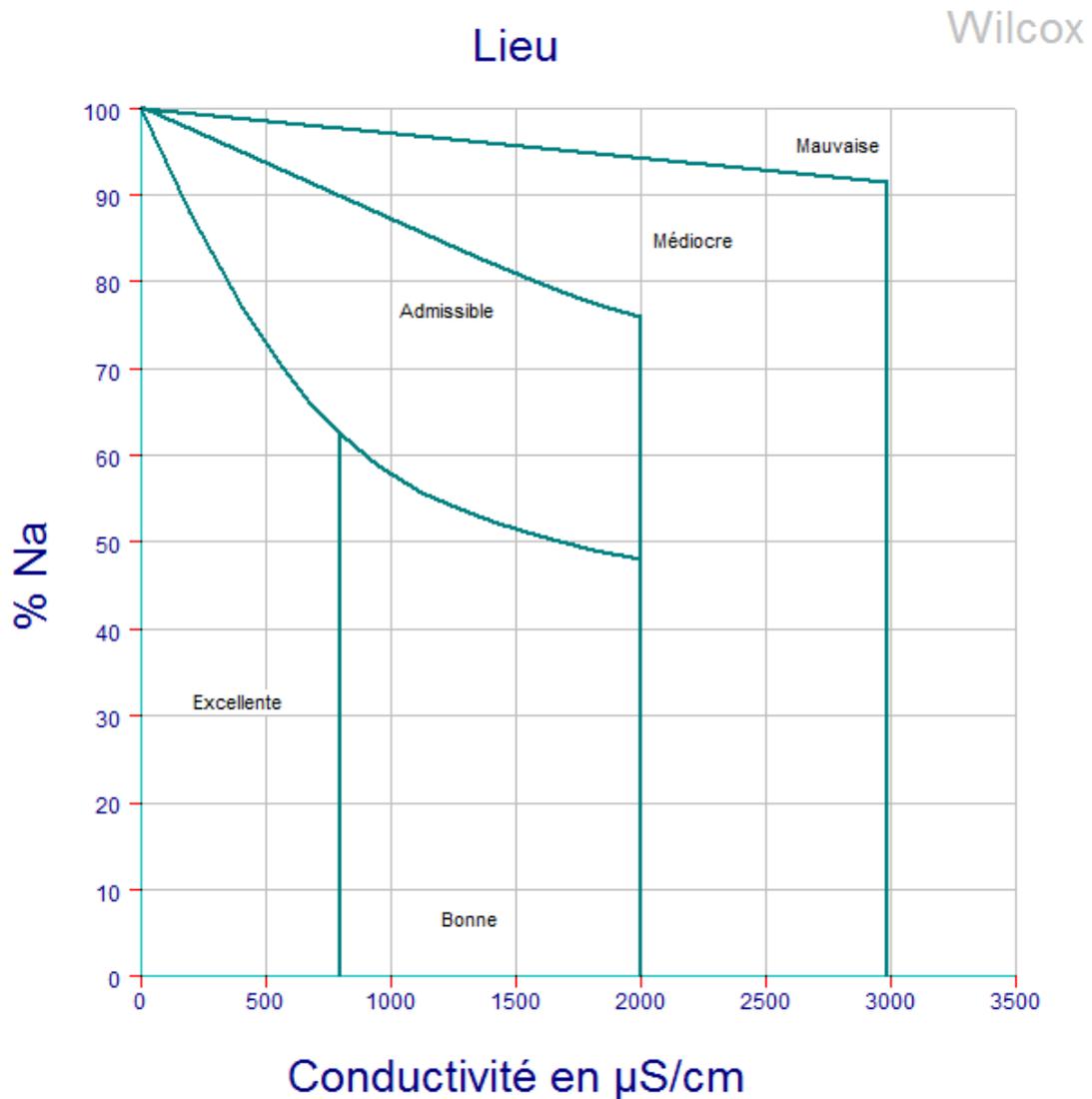


Figure III.8 : Diagramme de Riverside

III.5.2. Logiciel SPSS

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais pour principal component analysis), ou selon le domaine d'application la transformation de Karhunen–Loève, est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

L'ACP des eaux souterraines du bassin versant Sahel sera réalisée par le logiciel SPSS Windows (figure III.9). Ce logiciel est un instrument particulièrement adapté à la mise en œuvre de techniques d'analyse des données statistiques. Il favorise la gestion des données dans un environnement graphique convivial associant menu descriptif et boîtes de dialogue. En plus cet environnement offre un langage de commande qui permet d'écrire des programmes afin d'optimiser des tâches de production. Il permet de traiter les données avec efficacité et d'effectuer des analyses sur de grandes bases de données. Il offre plusieurs possibilités pour organiser et synthétiser les informations statistiques. L'exploitation et le traitement statistique des données d'enquête de terrain supposent toujours un travail préalable d'organisation et de restructuration des informations. SPSS présente toutes les fonctionnalités requises pour effectuer ce travail (5eme module informatique, cours (2020)).

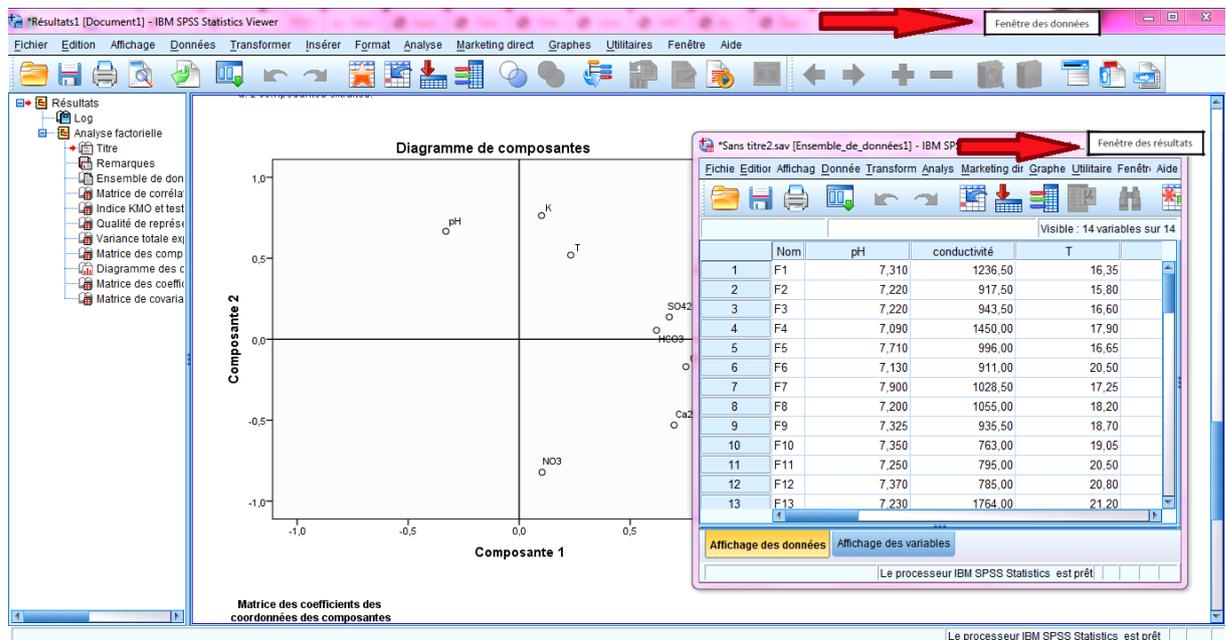


Figure III.9 : Fenêtre des données et des résultats du logiciel SPSS

III.5. 3. Langage R

L'hydrochimie des eaux souterraines du bassin versant Sahel a été utilisée pour la caractérisation de la variation de leur qualité spatio-temporelle. D'après les analyses et les mesures chimiques des échantillons, on va essayer de déterminer l'origine probable des ions. Cette origine va se traduire par des relations binaires entre les éléments sous des diagrammes réalisés par le logiciel R.

Le logiciel R est un logiciel de statistique créé par Ross Ihaka & Robert Gentleman (figure III.10). Il est à la fois un langage informatique et un environnement de travail : les commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage relativement simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont visualisés directement dans une fenêtre qui leur est propre.

Une des grandes forces de R réside dans ses capacités, bien supérieures à celles des autres logiciels courants du marché, à combiner un langage de programmation avec la possibilité de réaliser des graphiques de qualité. Les graphiques usuels s'obtiennent aisément au moyen de fonctions prédéfinies (VINCENT.G (2016)).

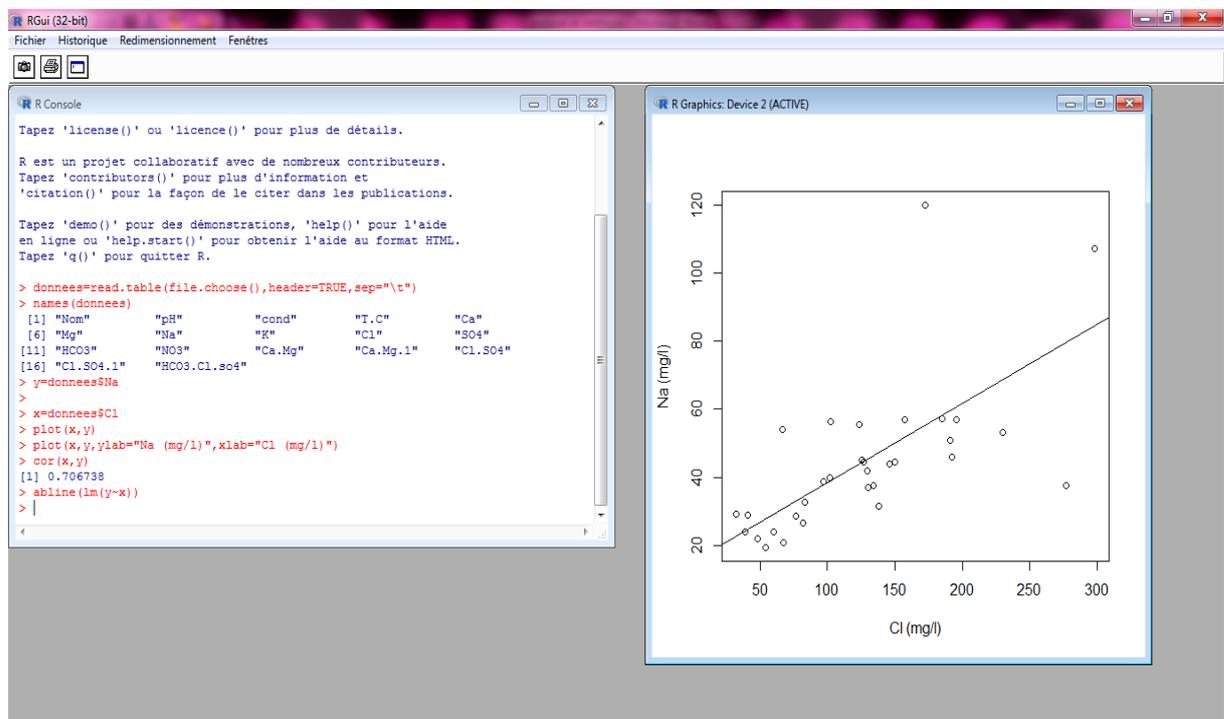


Figure III.10: Régression linéaire avec logiciel R

III.5.4. Logiciel Minteq

La qualité de l'eau souterraine et ses interactions avec le sol et les roches pendant sa percolation, son mouvement et son stockage dans les aquifères représentent les facteurs clés de la chimie des eaux souterraines. Ces interactions impliquent principalement les réactions chimiques et leurs résultats à travers les processus de dissolution et de précipitation, qui sont contrôlés par les produits de solubilité des différentes phases minérales impliquées.

Généralement, les indices de saturation sont utilisés pour exprimer la tendance de l'eau vers la précipitation ou la dissolution.

D'après la loi d'action de masse, pour une solution aqueuse en équilibre avec un minéral, le produit d'activité ionique (PAI) du minéral est égal à la constante d'équilibre (K_{sp}) thermodynamique. Le degré de saturation d'une eau peut être représenté par :

$$IS = \text{Log} \left(\frac{PAI}{K_{sp}} \right)$$

Cette constante K caractérise l'équilibre établi dans un système réversible qui cesse d'évoluer (pour une température donnée). Il se détermine par l'équation :

$$\ln K_s = \frac{\Delta G_0}{RT}$$

Avec :

ΔG_0 : Energie d'enthalpie libre standard de réaction, en J/mol ;

R : Constante de gaz parfait, en J/mol ;

T : Température, en K.

- Si $IS < 0$: sous saturation (dissolution) ;
- Si $IS > 0$: sur saturation (précipitation) ;
- Si $IS = 0$: solution en équilibre, peut aussi être considéré comme saturée.

Dans la présente étude, les indices de saturation (IS) par rapport aux minéraux de carbonate (calcite, dolomite et aragonite) et d'évaporite (gypse, halite et anhydrite) ont été calculés en utilisant le programme Minteq (GOUAIDIA.L ,MS LAOUAR , DEFAFLIA.N et ZENATI.N (2017)).

Visual Minteq est un modèle d'équilibre chimique freeware pour le calcul de la spéciation des métaux, des équilibres de solubilité, de la sorption, etc pour les eaux naturelles (figure III.11). Il combine des descriptions de pointe des réactions de sorption et de complication avec des menus et des options faciles à utiliser pour importer et exporter des données depuis

et vers Excel (Description (2020)).



Figure III.11: Logiciel MINTEQ

III.6. Critère de d’aptitude de l’eau à l’irrigation

III.6.1. RSC

Carbonate de sodium résiduel ou residual sodium carbonate (RSC) a été constaté que, dans les eaux à faciès chloruré, le SAR minimise de manière fréquente le risque de sodisation et d’alcalinisation de ces eaux (GOUAIDIA.L, GUEFAIFIA.O, BOUDOUKHA.A, ET HEMILA.M. L. (2013)). Il convient alors de déterminer le RSC, obtenu par l’équation suivante pour avoir une idée de l’aptitude de l’eau à l’irrigation (tableau III.3).

$$RSC = ([CO_3^{2-}] + [HCO_3^-]) - ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])$$

Avec :

CO₃, HCO₃, Ca et Mg : concentrations en méq/L.

Tableau III.3 : classification de l'aptitude des eaux à l'irrigation en fonction de la valeur du RSC

Valeur de RSC	Aptitude de l'eau à l'irrigation
] ← 1,25]	eau de bonne qualité
] 1,25 – 2,50 [	eau de qualité moyenne
[2,50 → [	eau salée et impropre

III.6.2. Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Les eaux pompées des nappes profondes, contiennent des sels dissous qui en fonction de leur concentration peuvent affecter la qualité des sols et par la suite celles des cultures. Le sodium d'adsorption ratio ou le risque du sodium, pour l'eau d'irrigation, est un paramètre important, qui permet d'apprécier la qualité d'une eau destinée à l'irrigation (SALEY.A (2018)).

Il est obtenu par l'équation suivante :

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

Avec :

SAR : indice de risque du sodium ;

Na, Ca et Mg : concentrations de sodium, calcium et magnésium en méq/L.

Tableau III.4: classification des eaux destinées à l'irrigation, selon les valeurs de SAR et de la conductivité électrique

classe	Valeur SAR	Aptitude des eaux à l'irrigation
S1	] 0 – 10]	Eau à faible risque de salinisation, convient à tous les sols
S2	] 10 – 18]	Eau à risque moyen de salinisation, ne peut être utilisée que pour les plantes tolérantes à la salinité et pour les sols aérés (texture grossière) et perméables
S3	] 18 – 26]	Eau à fort risque d'alcalinisation, peut être utilisée que

		pour les plantes très tolérantes à la salinité et pour les sols bien drainés et mieux avec ajout de la matière organique
S4	] 26 – +∞]	Eau à très fort risque d'alcalinisation, non utilisable pour l'irrigation
Classe	Valeur de conductivité	Aptitude des eaux à l'irrigation
C1	] 0 – 250 µS/cm]	Conductivité faible, eau sans risque de salinisation
C2	] 250 – 750 µS/cm]	Conductivité moyenne, eau utilisable pour des plantes ayant une tolérance en sel
C3	] 750 – 2250 µS/cm]	Conductivité élevée, eau à risque élevé de salinisation, ne peut être utilisée que pour les plantes très tolérantes à la salinité et pour les sols bien drainés
C4	] 2250 – +∞ µS/cm]	Conductivité très élevée, eau non indiquée pour l'irrigation

Tableau III.5: classification de Richards basée sur la conductivité et le SAR

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1 ^{ère}	Excellente	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plus part des cultures, sur la plus part des sols.
2 ^{ème}	Bonne	C2S1 C1S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 ^{ème}	Admissible	C3S1 C2S3 C3S2	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainé. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 ^{ème}	Médiocre.	C4S1 C4S2 C3S3	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol bien drainé.
5 ^{ème}	Mauvaise	C3S4 C4S3 C4S4	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

III.6.3. Diagramme de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation à partir de l'équation suivante (SANDAO.I (2013)) :

$$Na(\%) = \frac{[Na^+]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]} \times 100$$

Avec :

Na, Ca, Mg et K : concentrations de sodium, calcium et magnésium et potassium en méq/L.

III.6.4. Ratio d'absorption de magnésium

Les sols contenant des niveaux élevés de magnésium échangeable sont souvent exposés à des problèmes d'infiltration du sol. Le rôle du magnésium dans la cause ou la cause partielle de ces problèmes n'est pas bien documenté. Dans une eau à dominance de magnésium (rapport Ca / Mg <1) ou dans un sol contient du magnésium (rapport sol-eau Ca / Mg <1), l'effet potentiel du sodium peut être légèrement augmenté et par conséquent une augmentation de salinisation du sol. En d'autres termes, une valeur SAR donnée montrera un peu plus de dégâts si le rapport Ca / Mg est inférieur à 1 (RAHMANI.B (2016)).

Le MAR est définie par l'équation suivante (SAXENA.R, B. F. VOIGHT, et AL. (2007)) :

$$MAR (\%) = \frac{[Mg^{2+}]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} \times 100$$

Avec : les concentrations de magnésium et calcium exprimées en méq/l.

Classe d'eau	MAR (%)	Qualité d'eau
1	0 – 49	Adapté
2	50 – 65	Marginal
3	> 65	Inapproprié

Tableau III.6: classification de l'eau pour le risque de magnésium

III.6.5. Bicarbonate de sodium résiduel

La concentration de bicarbonate et de carbonate affecte l'aptitude de l'eau à l'irrigation. L'eau à haute RSBC (residual sodium bicarbonate) a un pH élevé. Le sol irrigué avec une telle eau devient infertile et conduit au dépôt de carbonate de sodium (EATON, F. M. (1950)). Le RSBC est calculé par l'équation suivante (GUPTA.I and A.KSIENSKI (1983)) :

$$RSBC = [HCO_3^-] - [Ca^{2+}]$$

Avec : les concentrations de bicarbonate et calcium est en méq/l

Tableau III.7: classification de l'eau par RDBC

Classe d'eau	Valeur de RSBC (méq/l)	Qualité d'eau
1	<5	satisfaisant
2	5 – 10	Marginal
3	> 10	insatisfaisant

III.6.6. Indice de perméabilité

Le problème de perméabilité liée à la qualité de l'eau se produit lorsque le taux d'infiltration d'eau dans et à travers le sol est réduit par l'effet de sels spécifiques ou le manque de sels dans l'eau à tel point que la culture n'est pas suffisamment approvisionnée en eau et le rendement est réduit (SANDAO.I (2013)).

L'indice de perméabilité est donné par la formule suivante (ASHLEY, E. A., M. DHORDA, et AL : (2014)) :

$$PI = \frac{[Na^+] + \sqrt{[HCO_3^-]}}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+]} \times 100$$

Classe d'eau	Indice de perméabilité (%)	Qualité d'eau
1	>75%	Excellent
2	25 – 75 %	Bien
3	< 25%	Inapproprié

Tableau III.6: classification de l'eau par l'indice de perméabilité

III.6.7. Indice de Stuyfzand

Les chlorures dans l'eau peuvent causer des problèmes comme les problèmes comme le problème de digestion chez les humains. De nombreuses plantes sont sensibles à une forte concentration de chlorure et parfois à un niveau élevé de Na dans leurs feuilles (MILLER, R. W. and R. L. DONAHUE (1995)). La teneur en ions chlorure dans l'eau d'irrigation augmente avec l'augmentation de la conductivité électrique et sodium. Si la concentration de chlorure dans les feuilles dépasse la tolérance de la culture, les symptômes de la blessure se développent tels que la brûlure des feuilles ou le dessèchement du tissu foliaire (Ayers, R. S. and D. W. Westcot (1985)).

Tableau III.7: classification de Stuyfzand des eaux eau souterraines pour l'irrigation

Classe d'eau	Valeur de Cl (mg/l)	Qualité de l'eau
1	< 5	Très Oligohaline
2	5 - 30	Oligohaline
3	30 - 150	Fraiche
4	150 – 300	Fraiche saumâtre
5	300 – 1000	Saumâtre
6	1000 - 10000	Saumâtre salée
7	10000 - 20000	Salée
8	> 20000	Très salée

III.6. Conclusion

Les eaux naturelles possèdent des propriétés très différentes et contiennent de nombreuses substances dissoutes ou en suspension en fonction de leur origine. Ces divers constituants peuvent être minéraux (sels, gaz), organiques ou biologiques.

Ce chapitre a eu pour objectif de décrire les paramètres physico-chimiques qui peuvent constituer un danger pour la santé humaine. Ainsi d'identifier tous les logiciels utilisés pour évaluer l'origine des différents éléments et la qualité de l'eau souterraines de l'ensemble du bassin versant Sahel.

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction

Le présent chapitre traite la qualité physico-chimique des eaux souterraines du sous bassin versant Sahel. Ce chapitre va permettre 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.

C'est dans ce but que ce chapitre a été consacré, où on va utiliser certain nombre de diagrammes avec les différentes cartes tracés par le logiciel Arcgis (10.3.1) par une interpolation IDW pour l'ensemble des éléments chimiques. Une analyse statistique va être effectuée aussi sur les principaux paramètres caractérisant la chimie des eaux de l'aquifère.

IV.2. Hydrochimie des eaux du bassin versant Sahel

IV.2.1. Classification chimique de l'eau

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître les différents faciès chimiques des eaux naturelles.

Dans notre étude, nous avons utilisé les méthodes principales les plus utilisées tel que: la classification de Stabler, de Schoeller-Berkaloff et celle de Piper. Toutes ces classifications sont basées essentiellement sur la composition chimique.

IV.2.1.1. Classification de piper

Le diagramme de piper a pour but de déterminer les faciès chimiques des eaux étudiées. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Les résultats du diagramme de piper (figures IV.1 et IV.2) est représentés comme suit :

- Dans le triangle des cations on a deux ions dominants, il s'agit du calcium et magnésium.
- Dans le triangle des anions les eaux se répartissent essentiellement au niveau du pôle bicarbonaté et chloruré.
- Dans le losange, les eaux se répartissent en deux faciès : Bicarbonatée calcique et magnésienne, Chlorurées et sulfaté calcique et magnésienne.

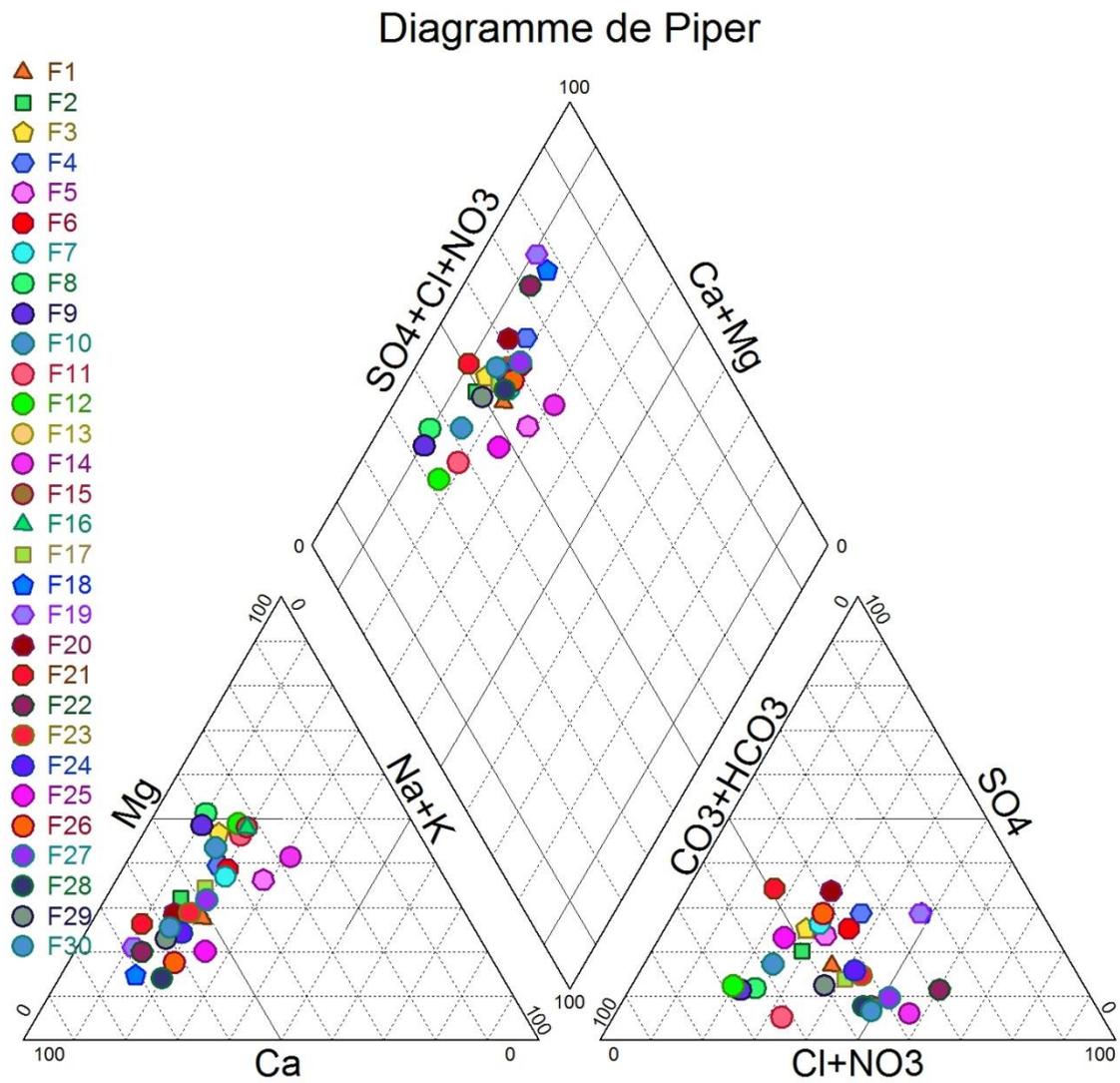


Figure IV.1: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel (F1-F30) sur le diagramme de piper

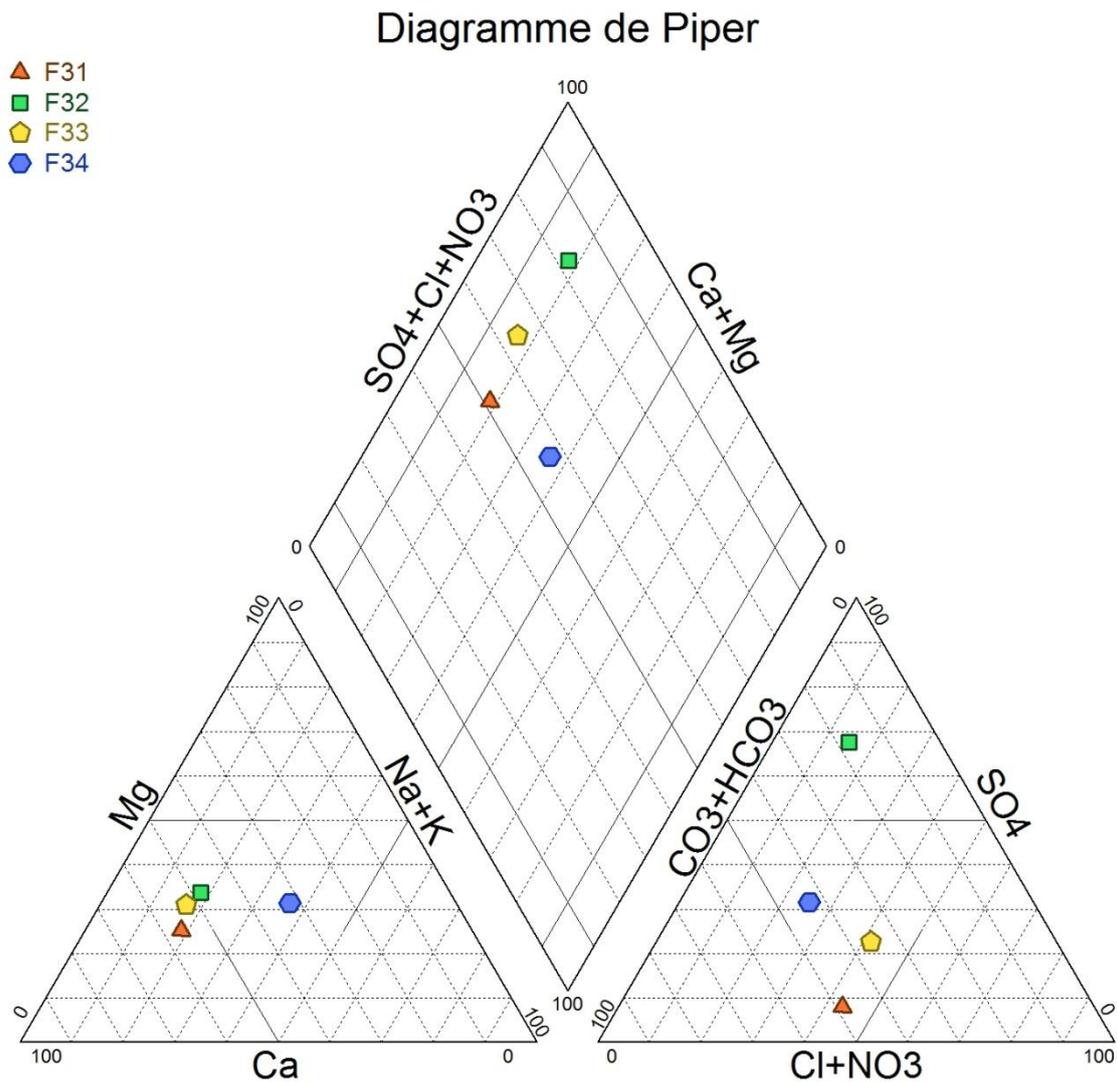


Figure IV.2: classification des eaux des forages du bassin versant sahel sur le diagramme de Piper (F30-F34)

IV.2.1.2. Classification de Schoeller-Berkaloff

Ce diagramme permet de représenter les compositions cationiques et anioniques de nombreux échantillons sur un seul graphique dans lequel les principaux groupements ou les tendances dans les données peuvent être observés visuellement.

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 (NDEMBO.L (2009)).

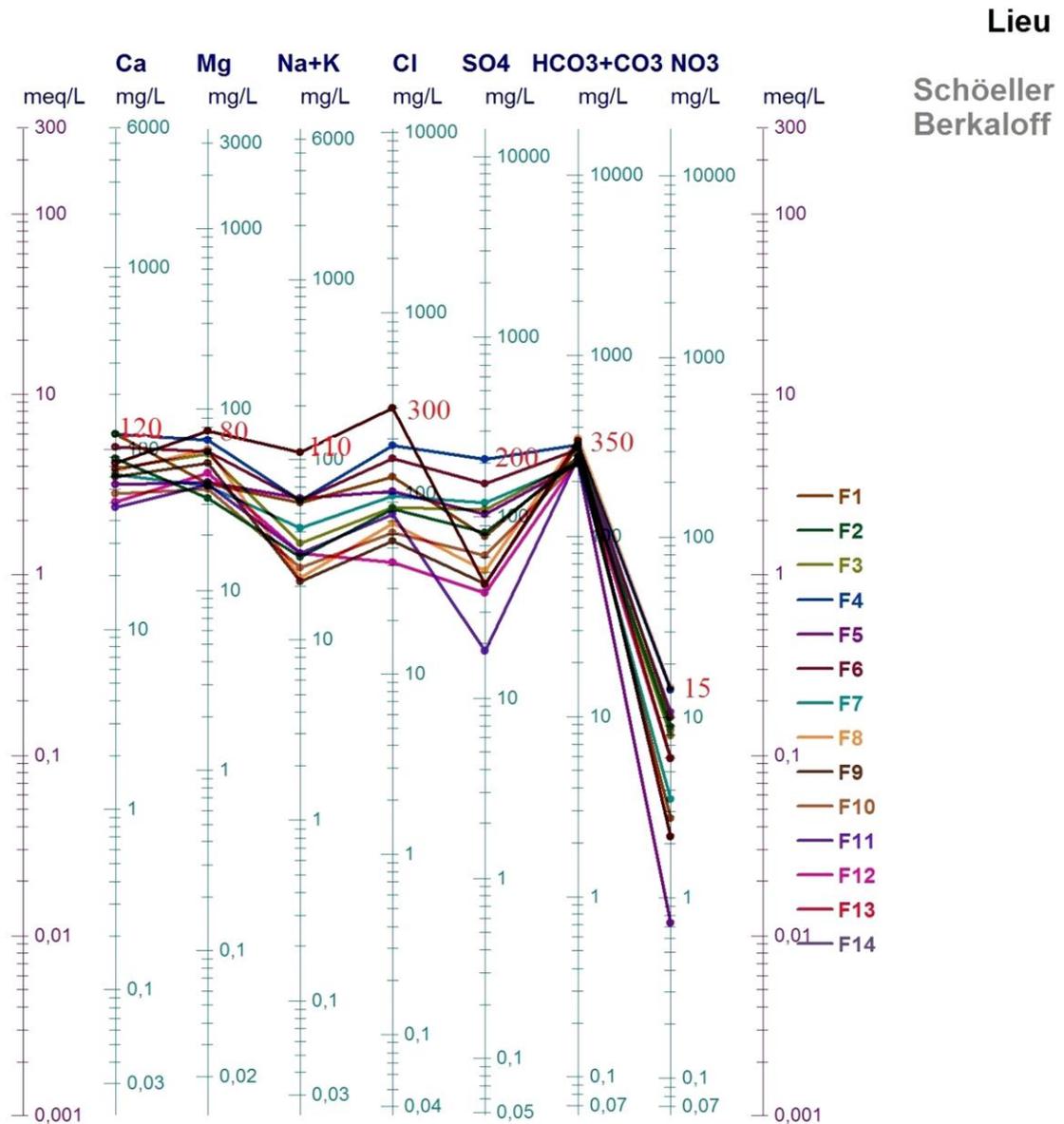


Figure IV.3: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (F1-F14)

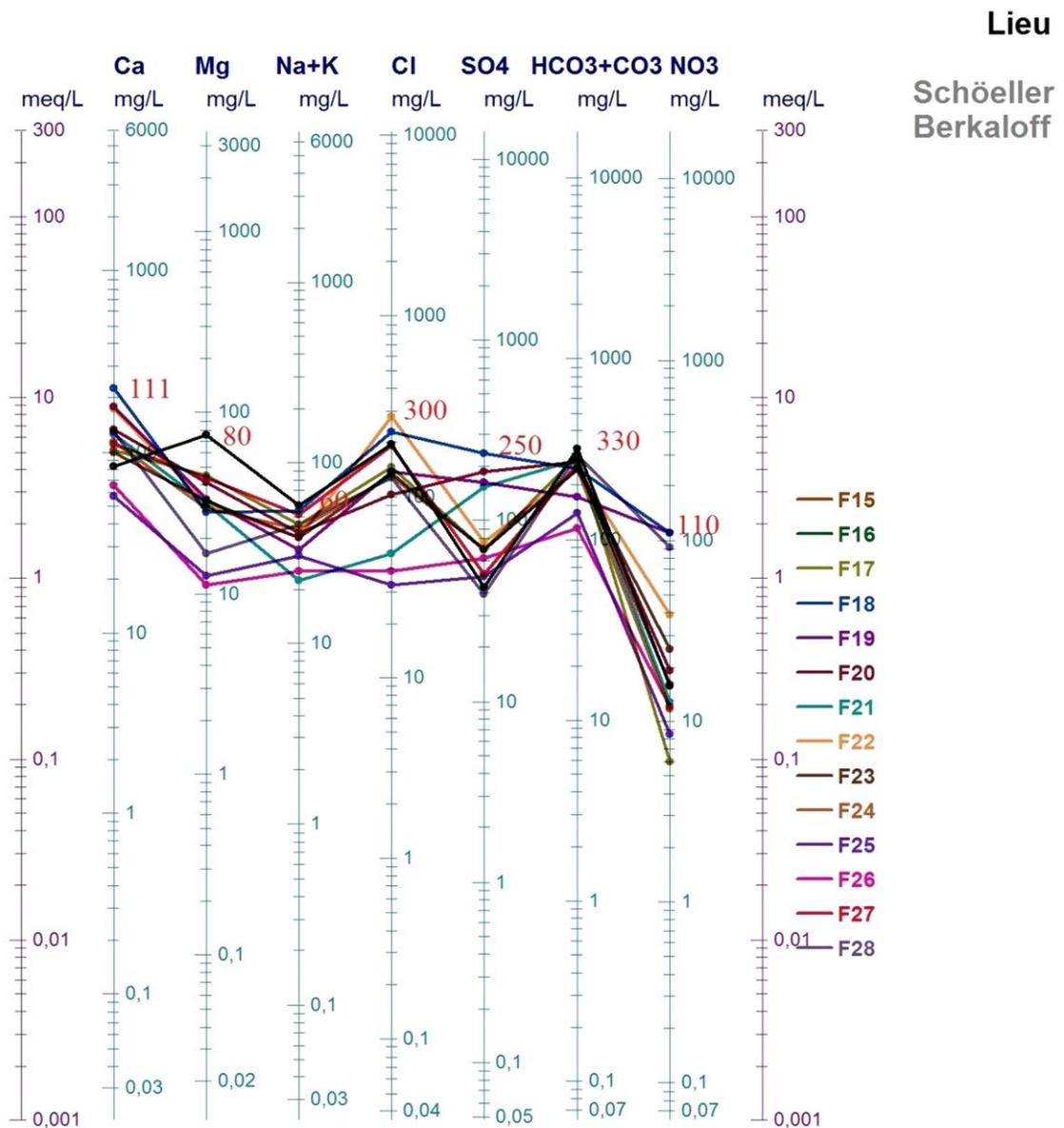


Figure IV.4: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de schoeller-Berkaloff (F14-F28)

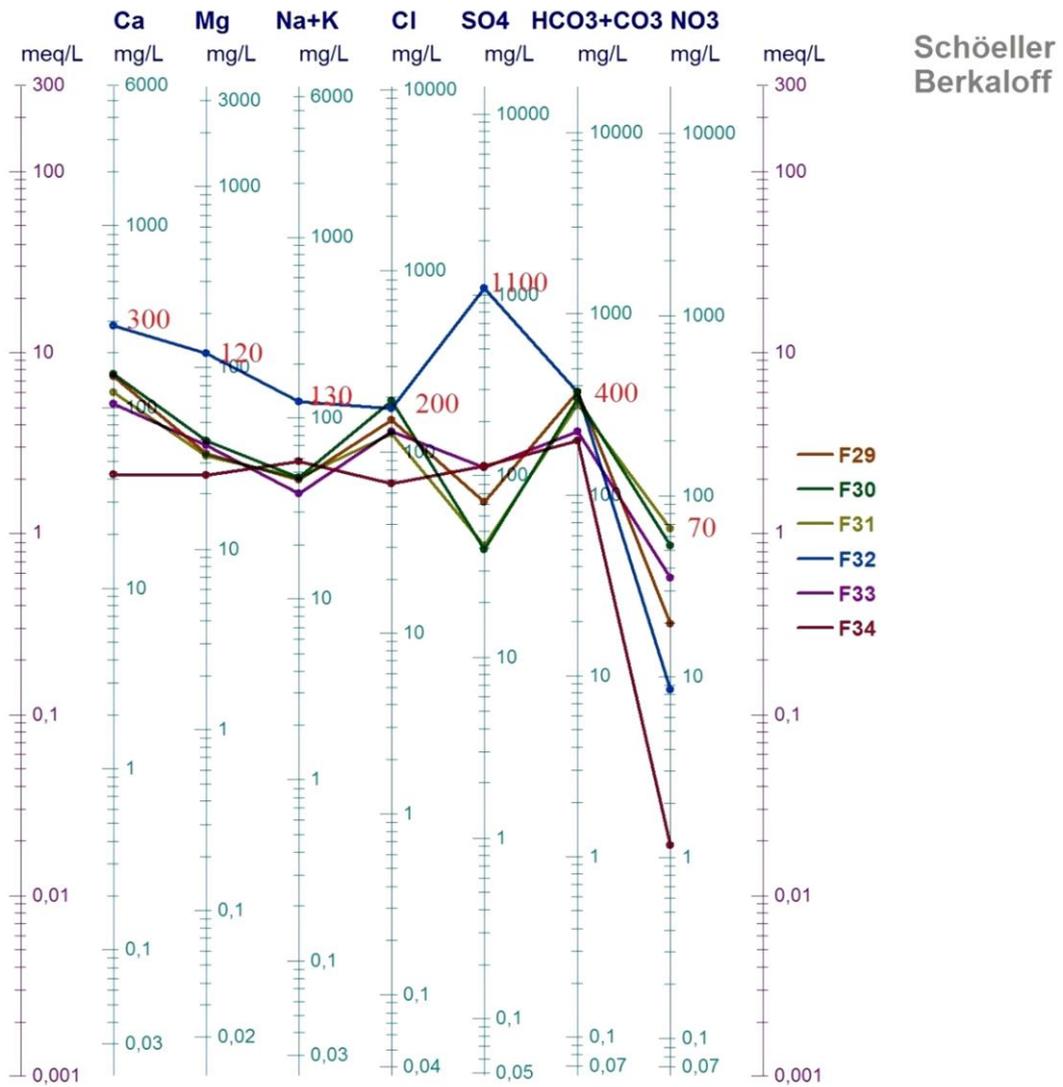


Figure IV.5: classification des eaux des forages du bassin versant Sahel sur le diagramme de schoeller-Berkaloff (F28-F34)

Le tableau suivant résulte l'interprétation des diagrammes de schoeller (figures IV.4 et IV.5) :

Tableau IV.1: représentation des ions dominants selon Schoeller

Figure	Forage	Classification cation	Classification anion	Cation dominant	Anion dominant
3	F1-F14	$Ca^{2+} > (Na^+ + K^+) > Mg^{2+}$	$(HCO_3^- + CO_3^{2-}) > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$	Ca^{2+}	$HCO_3^- + CO_3^{2-}$
4	F15-F28	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > (Na^+ + K^+)$	$(HCO_3^- + CO_3^{2-}) > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$	Ca^{2+}	$HCO_3^- + CO_3^{2-}$
5	F29-F34	$Ca^{2+} > (Na^+ + K^+) > Mg^{2+}$	$SO_4^{2-} > (HCO_3^- + CO_3^{2-}) > Cl^- > NO_3^-$	Ca^{2+}	SO_4^{2-}

Les diagrammes tracés pour les 34 forages (Figure IV.3, IV.4 et IV.5), confirment la prédominance des facies bicarbonatée calcique et sulfatée calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée essentiellement aux ions $HCO_3^- + CO_3^{2-}$, Cl^- , SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

IV.2.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Pour comprendre les mécanismes régissant la qualité des eaux de la région, nous avons utilisé l'outil statistique particulièrement l'analyse en composantes principales. Cette dernière met en évidence les liens qui semblent exister entre les éléments chimiques (TRAVI.Y. et MUDRY.J. (1997)).

IV.2.2.1. Matrice de corrélation

L'étude statistique a englobé les 34 échantillons prélevés de chaque forage. Le nombre de variables de base retenues pour l'ACP est de 11 qui sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , pH, la conductivité et la température.

variables	pH	cond	T	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	Cl-	SO42-	HCO3-	NO3-
pH	1										
cond	-0,339	1									
T	0,195	0,148	1								
Ca2+	-0,388	0,761	-0,128	1							
Mg2+	-0,058	0,664	0,364	0,26	1						
Na+	-0,077	0,792	0,392	0,376	0,709	1					
K+	0,462	-0,022	0,18	-0,308	0,314	0,383	1				
Cl ⁻	-0,418	0,747	0,149	0,446	0,457	0,707	-0,014	1			
SO42 ⁻	0,038	0,64	0,275	0,695	0,566	0,517	0,151	0,104	1		
HCO3 ⁻	-0,259	0,501	-0,196	0,253	0,67	0,455	0,097	0,42	0,215	1	
NO3 ⁻	-0,427	0,217	-0,291	0,546	-0,314	-0,125	-0,455	0,217	0,005	-0,129	1

Figure IV.6: matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant Sahel (logiciel Rstudio)

L'analyse de cette matrice (figure IV.6) montre une bonne corrélation positive (supérieur à 0,7) entre :

- La conductivité et le calcium, le sodium, le chlore ;
- Le magnésium et le sodium ;
- Le sodium et le chlore.

IV.2.2.2. Variance

Le traitement de nos données par analyse en composantes principales (ACP) a donc été réalisé à l'aide de logiciel IBM SPSS Statistics v21. Cette analyse a été poussée jusqu'à 2 facteurs et 63,31 % de la variance ont pu être exprimés (tableau IV.2).

Tableau IV.2 : représentation de la variance exprimée

Composante	Variance totale expliquée					
	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	4,358	39,614	39,614	4,358	39,614	39,614
2	2,606	23,693	63,307	2,606	23,693	63,307
3	1,284	11,670	74,978			
4	1,021	9,286	84,263			

5	0,732	6,656	90,920
6	0,396	3,598	94,518
7	0,302	2,741	97,260
8	0,135	1,229	98,488
9	0,106	0,962	99,451
10	0,048	0,434	99,885
11	0,013	0,115	100,000

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

IV.2.2.3. Matrice des composantes

L'analyse des variables (figure IV.7) montre que:

- Facteur 1 ou pole 1 (axe X) : il est bien corrélé (matrice de composante > 0.5 (tableau IV.3)), avec les variables : Conductivité, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Donc c'est le pole de minéralisation (63,63% de l'inertie totale) ;
- Facteur 2 ou pole 2 (axe Y) : il représente 36,36% de l'inertie totale de nuage, il est bien corrélé avec le pH, la température, K^+ , NO_3^- et il est dominé par les nitrates.

Tableau IV.3: matrice de chaque composante

Matrice des composantes		
	Composante	
	1	2
pH	-0,330	0,667
conductivité	0,956	-0,140
Température	0,232	0,520
Ca2	0,698	-0,530
Mg2	0,795	0,424
Na	0,860	0,320
K	0,100	0,764
Cl	0,750	-0,170
SO42	0,676	0,138
HCO3	0,619	0,055
NO3	0,103	-0,822

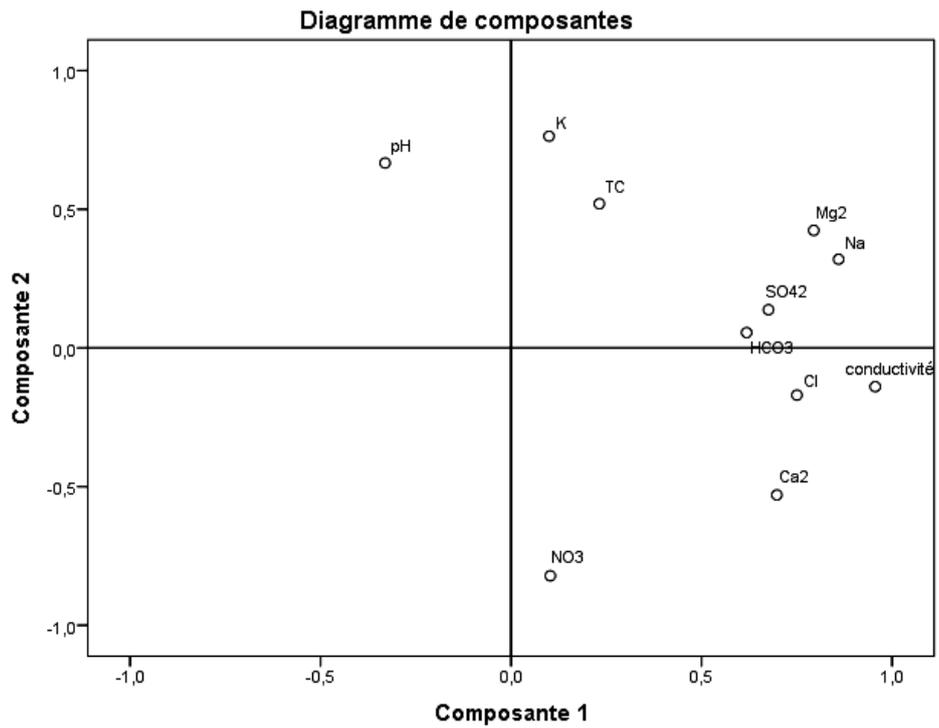


Figure IV.7 : diagramme de composante

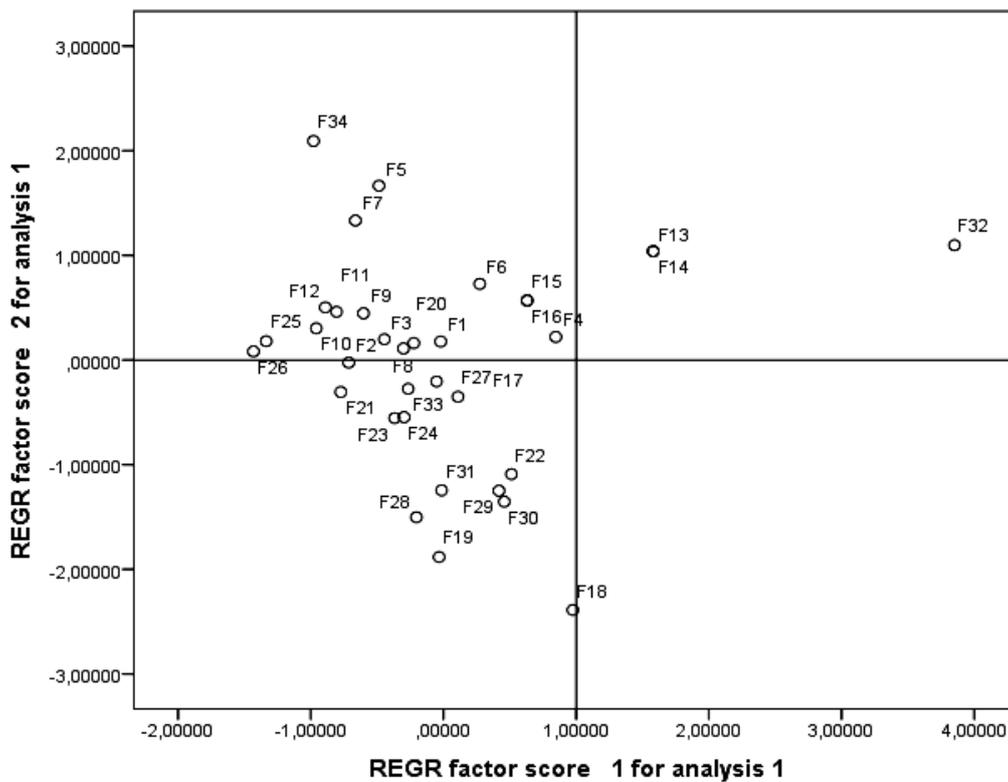


Figure IV.8: diagramme des individus

L'analyse de la projection pour les stations des eaux de surface dans le plan factoriel F1-F2 (figure IV.8) montre qu'on peut subdiviser les points de mesure en trois groupes :

- **Premier groupe** : Caractérisé par une forte minéralisation des forages F32, F13, F14 (nord du sous bassin Oued Dhous et sud du sous bassin Oued Zaiane) et moyennement forte des forages F4, F6, F15, F16. Elle est liée à la lithologie de l'aquifère présentée (figure IV.9).

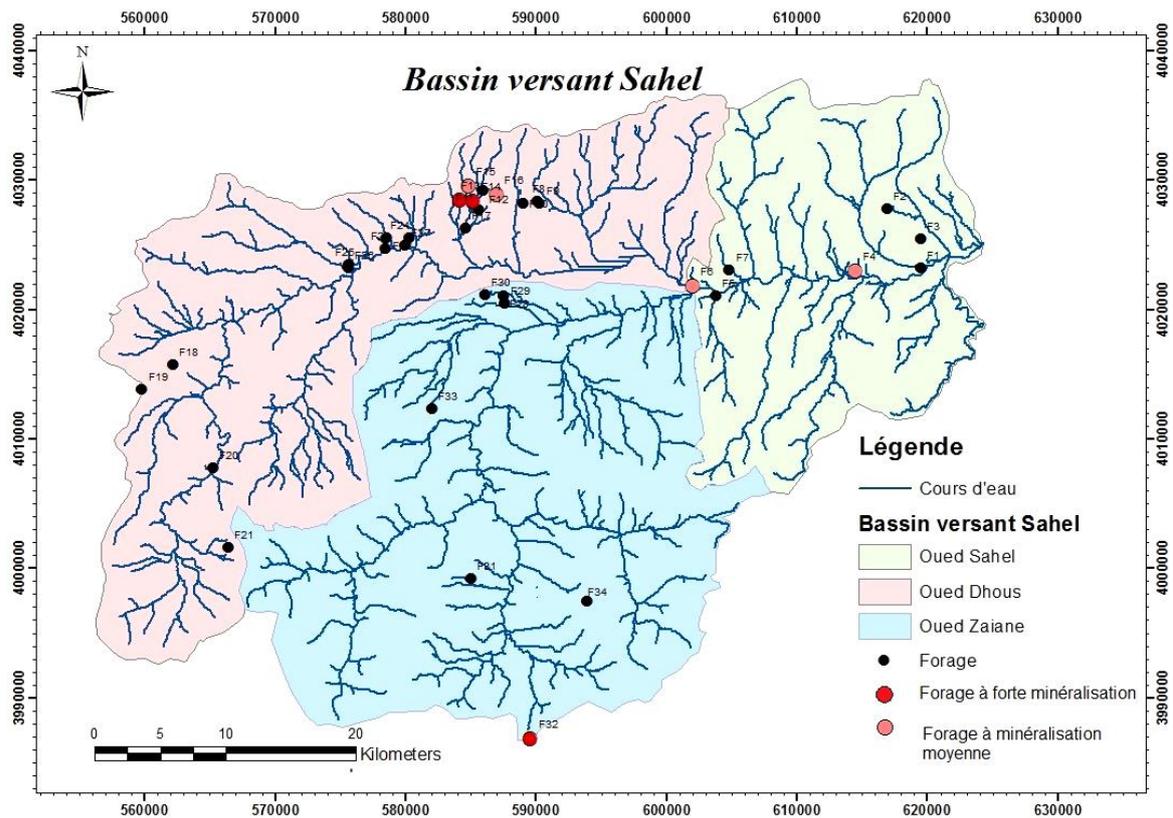


Figure IV.9: carte de minéralisation des forages du bassin versant Sahel

- **2eme groupe** : C'est les régions les plus polluées qui représentent des teneurs élevées de nitrates correspondent aux forages : F18, F19, F22, F28, F29, F30, F31 sur les sous bassin Oued Zaiane et Oued Dhous (figure IV.10). La présence des composés azotés dans les eaux des nappes phréatiques, témoigne d'une pollution organique issue de la dégradation complète ou incomplète de la matière organique par les microorganismes dans les couches superficielles du sol. Le NO_3^- est un bon indicateur des apports superficiels.

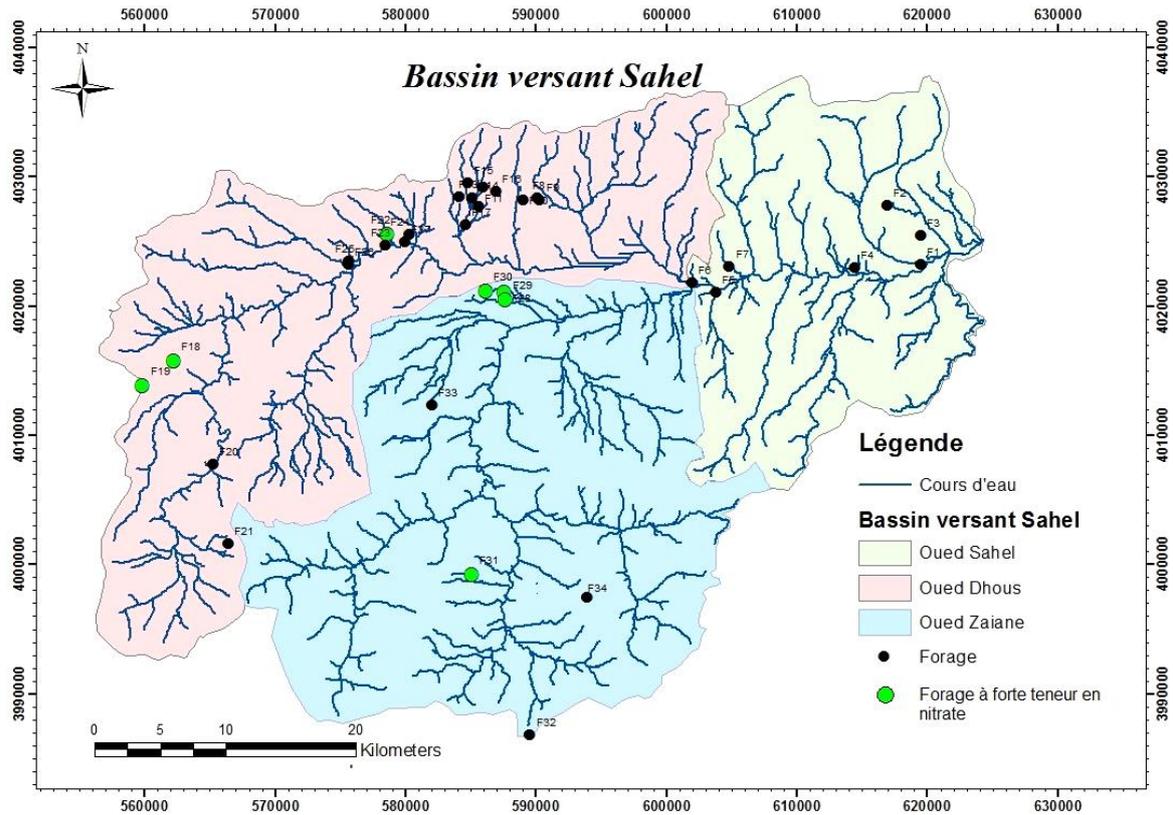


Figure IV.10: carte de concentration de nitrate des forages du bassin versant Sahel

- **3eme groupe** : Ce sont les eaux les moins minéralisés par rapport aux autres groupes.

IV.2.3. Relation entre les éléments majeurs

Pour comprendre le processus hydrogéochimique des nappes, on a eu recours aux diagrammes binaires des principaux éléments majeurs.

IV.2.3.1. Les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-

La figure IV.11 montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. 53% des points se positionnant en dessous de la pente indiquent l'origine carbonatée des ions du calcium avec une faible corrélation (25%). Les 47% des échantillons montrent un excès du calcium ce qui laisse croire que ces éléments ont une deuxième origine qui pourrait être lié aux minéraux argileux et aux évaporites (roches sulfatés).

Sur le diagramme $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs HCO_3^- (fig.12), on constate que 60% des eaux de forages ont une origine calcite ($CaCO_3$) et dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) avec une corrélation de 37%.

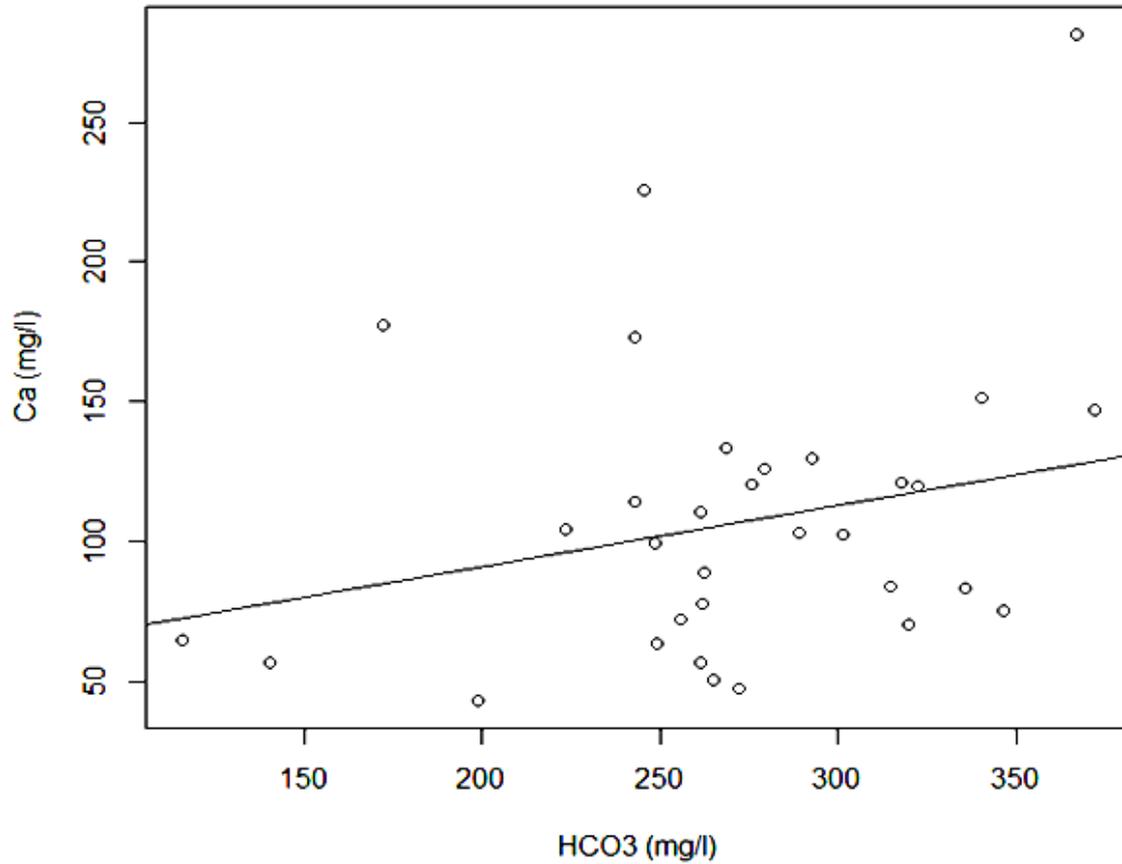


Figure IV.11: corrélation linéaire entre Ca^{2+} et HCO_3^-

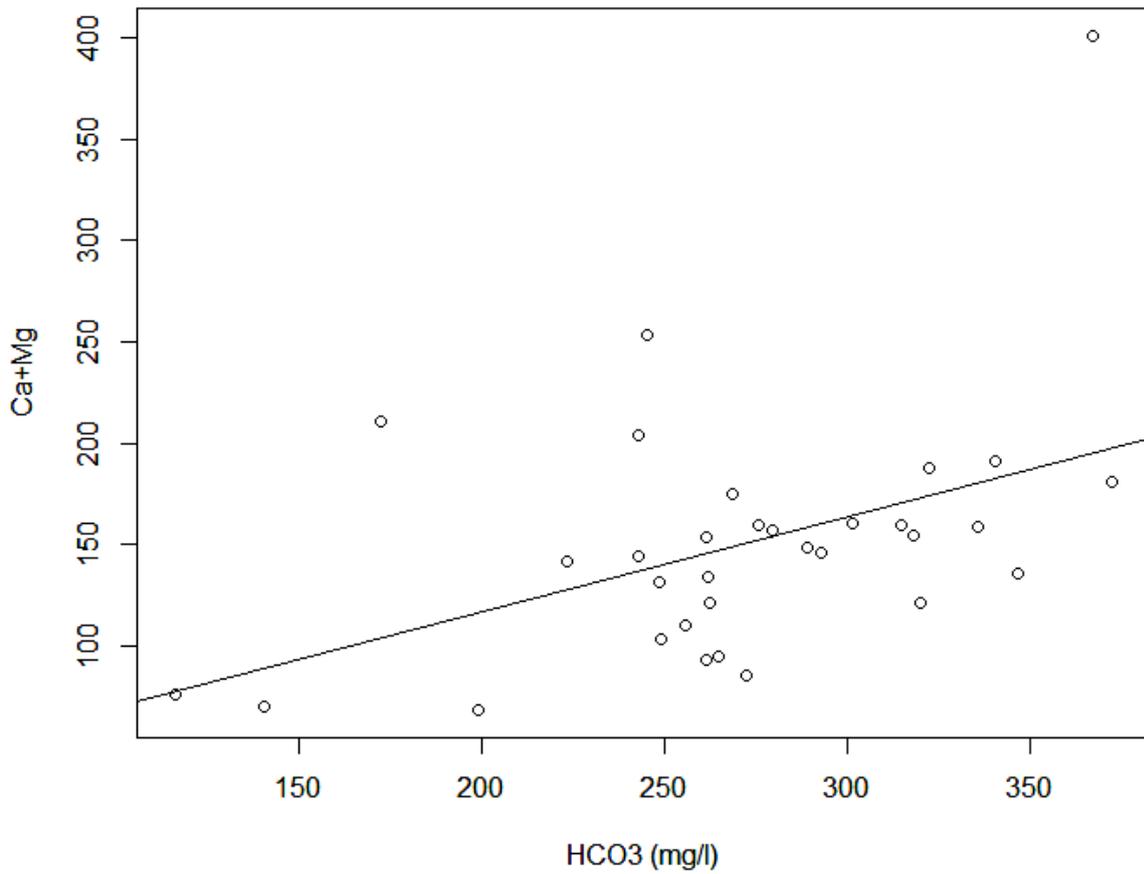


Figure IV.12 : corrélation linéaire entre $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ et HCO_3^-

IV.2.3.2. Les éléments Ca^{2+} et SO_4^{2-}

Le diagramme (Ca^{2+}/SO_4^{2-}) (figure IV.13) montre que la moitié des échantillons ont une origine gypsifère ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) du calcium avec une corrélation de 70%, ce qui confirme l'interprétation du 1^{er} diagramme.

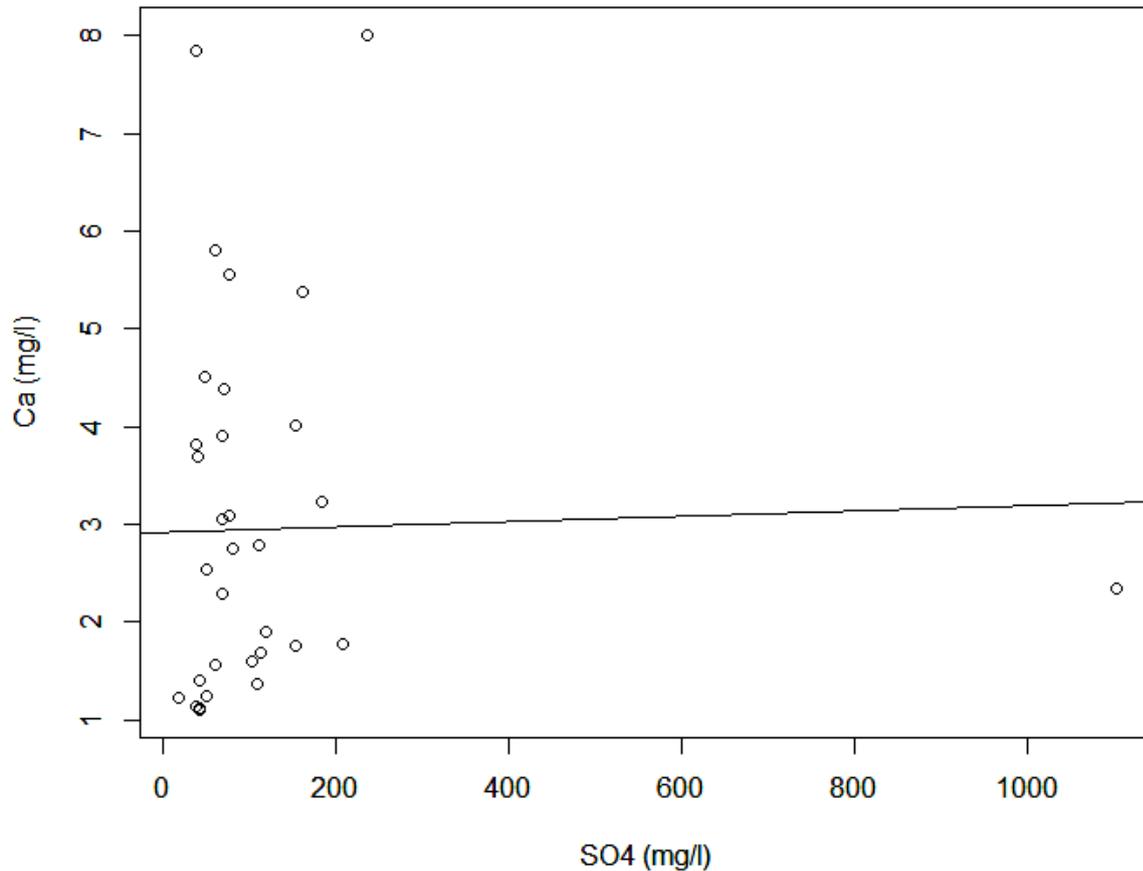


Figure IV.13 : corrélation linéaire entre les éléments Ca^{2+} et SO_4^{2-}

IV.2.3.3. Les éléments Mg^{2+} et SO_4^{2-}

L'examen de cette relation montre un positionnement de 63% des échantillons au dessous de la pente et une bonne corrélation de 60%, qui indique l'origine sulfaté de magnésium (Figure IV.14). Cette relation traduit la dissolution d'un sulfate de magnésium d'origine salifère et confirme aussi l'existence du faciès sulfaté magnésien.

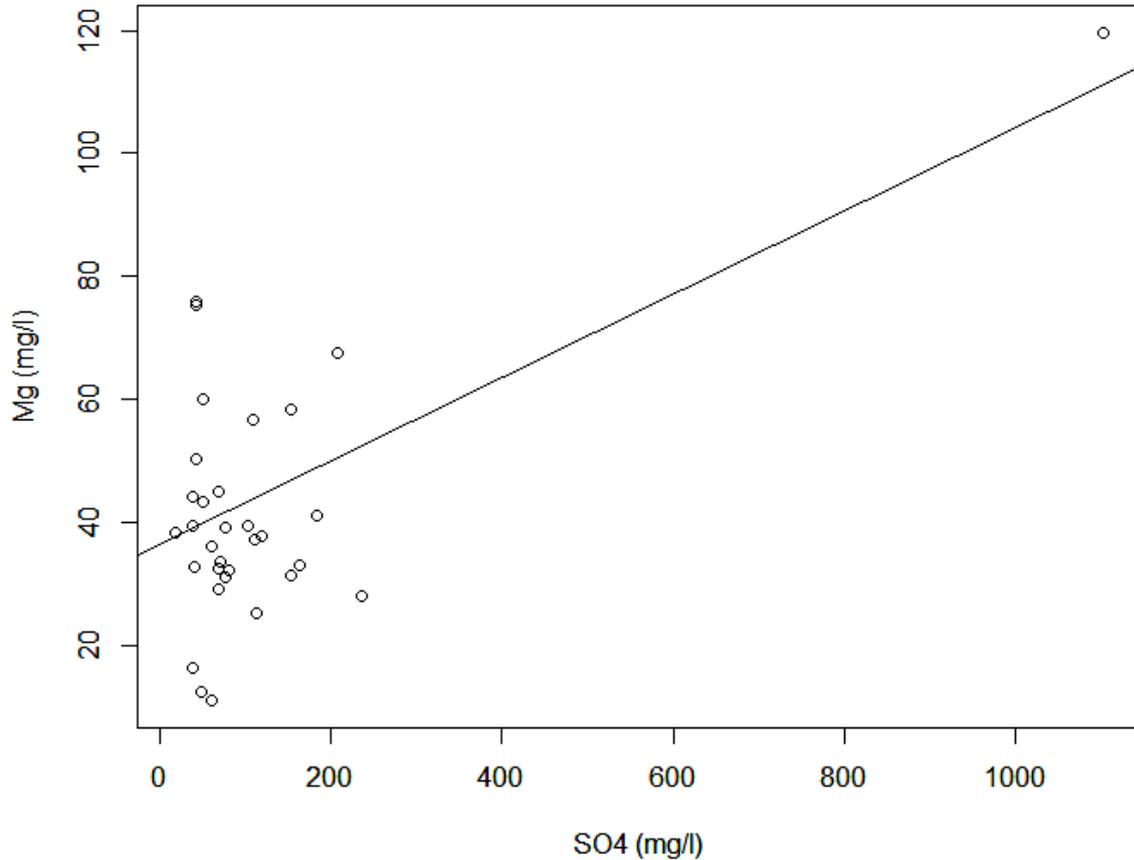


Figure IV.14: corrélation linéaire entre Mg^{2+} et SO_4^{2-}

IV.2.3.4. Les éléments Na^+ et Cl^-

La relation Cl^- et Na^+ a souvent été utilisée pour identifier le mécanisme d'acquisition de la salinité. Dans les eaux naturelles, la présence de Na^+ et Cl^- est liée à la dissolution de l'halite (NaCl) que l'on trouve dans les formations du Trias.

Le graphe de la corrélation linéaire entre Cl^- et Na^+ (figure IV.15) montre une corrélation de 70% et 70% des points se trouvent en dessous de la droite de mélange. Etant 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+} . Ce ci confirme l'origine argileux du Ca^{2+} et Mg^{2+} par processus d'échanges cationiques (interprétation du diagramme de la corrélation linéaire entre Ca^{2+} et HCO_3^-).

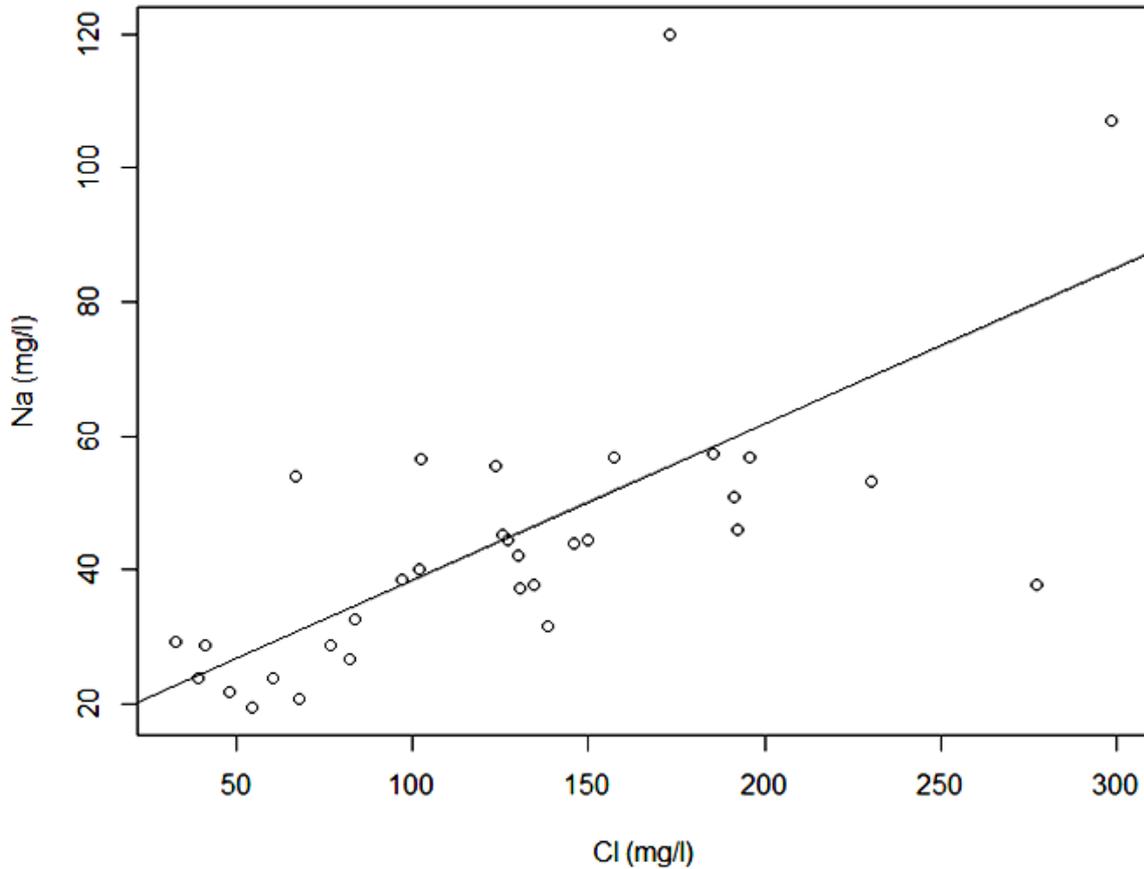


Figure IV.15: corrélation linéaire entre Na^+ et Cl^-

IV.2.3.5. Les éléments cl^- et SO_4^{2-}

La relation entre SO_4^{2-} et Cl^- montre une corrélation de 10% entre ces éléments et une dispersion des points indiquant une dominance des ions du Sulfate par rapport aux ions chlorurés (figure IV.16). L'enrichissement des points en sulfates est lié à la présence des évaporites et dans le substratum marnogypsifère et/ou à une contamination d'origine agricole et cela traduit la dominance du faciès Sulfaté sur le faciès chlorure.

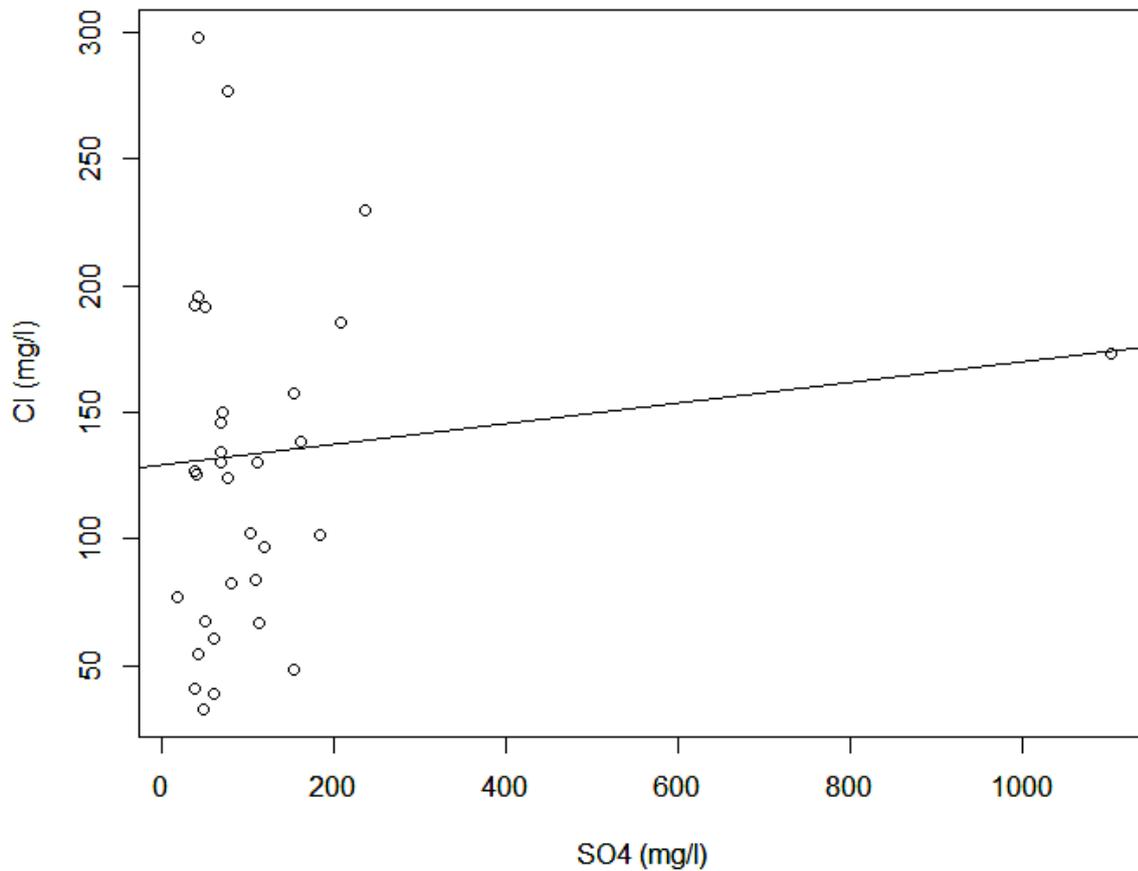


Figure IV.16: corrélation linéaire entre Cl^- et SO_4^{2-}

IV.2.4. Indice de saturation

Les indices de saturation des différents minéraux pour les 34 forages sont déterminés par le logiciel Minteq et présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.4 : évolution des indices de saturation des minéraux du bassin versant Sahel

Forage	IS Minéraux carbonatés			IS Minéraux évaporites		
	Aragonite ($CaCO_3$)	Calcite ($CaCO_3$)	Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$)	Anhydrite ($CaSO_4$)	Gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	Halite ($NaCl$)
F1	0,001	0,151	-0,539	-1,871	-1,578	-6,717
F2	-0,226	-0,075	-0,954	-1,929	-1,633	-7,201
F3	-0,295	-0,145	-0,773	-1,892	-1,6	-7,115
F4	-0,191	-0,042	-0,651	-1,524	-1,238	-6,548
F5	0,095	0,245	-0,063	-1,969	-1,678	-6,783
F6	-0,182	-0,035	-0,586	-1,672	-1,4	-6,62
F7	0,349	0,499	0,388	-1,861	-1,573	-6,974
F8	-0,172	-0,023	-0,462	-2,232	-1,949	-7,249
F9	-0,084	0,064	-0,326	-2,294	-2,013	-7,525
F10	-0,224	-0,076	-0,645	-2,197	-1,917	-7,384
F11	-0,345	-0,198	-0,71	-2,777	-2,505	-7,202
F12	-0,213	-0,067	-0,459	-2,44	-2,17	-7,471
F13	-0,109	0,038	-0,229	-2,328	-2,059	-6,075
F14	-0,109	0,038	-0,229	-2,328	-2,059	-6,075
F15	-0,079	0,068	-0,179	-2,293	-2,023	-6,525
F16	-0,079	0,068	-0,179	-2,293	-2,023	-6,525
F17	-0,243	-0,094	-0,879	-1,979	-1,692	-6,748
F18	-0,1	0,05	-1,132	-1,237	-0,95	-6,49
F19	-0,31	-0,161	-1,378	-1,437	-1,151	-6,926
F20	0,466	0,613	0,438	-1,481	-1,206	-6,957
F21	0,347	0,499	0,014	-1,562	-1,261	-7,524
F22	-0,118	0,029	-0,96	-1,76	-1,489	-6,557
F23	-0,276	-0,128	-1,05	-1,962	-1,68	-6,848
F24	-0,21	-0,061	-1,033	-1,908	-1,623	-6,815
F25	-0,518	-0,372	-1,651	-2,206	-1,94	-7,553

F26	-0,49	-0,343	-1,714	-2,059	-1,789	-7,564
F27	-0,205	-0,057	-0,815	-2,082	-1,805	-6,574
F28	-0,141	0,008	-1,217	-2,105	-1,816	-6,799
F29	-1,074	-0,924	-2,792	-2,105	-1,81	-6,613
F30	-0,076	0,074	-0,796	-2,105	-1,811	-6,613
F31	-0,217	-0,066	-1,066	-2,131	-1,835	-6,797
F32	0,255	0,4	0,227	-0,692	-0,434	-6,317
F33	-0,086	0,062	-0,608	-1,757	-1,481	-6,874
F34	0,052	0,197	-0,053	-2,024	-1,766	-6,993

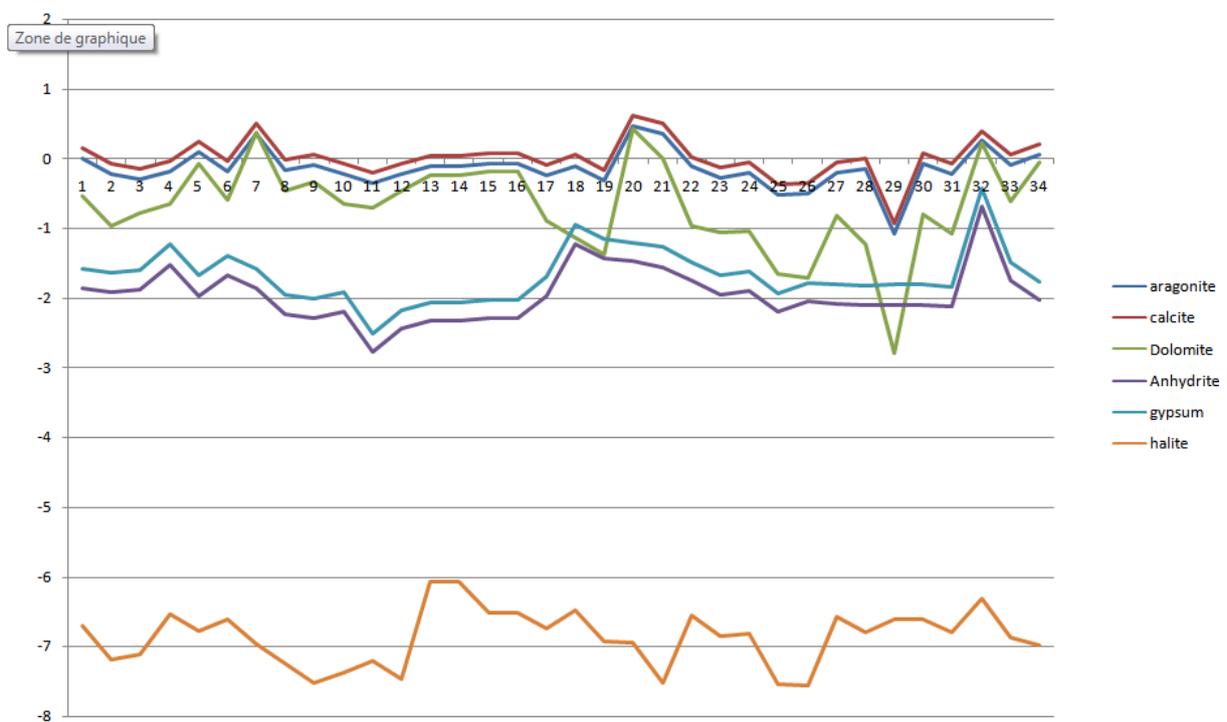


Figure IV.17: évolution des indices de saturation des minéraux du bassin versant Sahel

D'après les indices de saturation vis-à-vis des minéraux considérés du bassin versant Sahel (tableau IV.4), le groupe des carbonates présente des degrés de saturation différents : la dolomite est souvent à l'état de sous saturation avec un indice qui varie entre -2,792 et 0,438, seul les forages F7, F20, F21 et F32 se caractérisent par un IS positive ce qui indique une précipitation de dolomite au niveau de ces forages. Pour l'aragonite on constate ainsi un état de dissolution de ce minéral pour la quasi-totalité des forages. Concernant la calcite, une

moitié des échantillons indiquent une dissolution de ce minéral par la valeur négatif de SI, et l'autre moitié se caractérise par une précipitation de calcite.

Pour le groupe des évaporites, les eaux sont sous-saturées par rapport à l'anhydrite, le gypse et largement sous-saturées vis à vis de l'halite (-7,564 à -6,075). Les minéraux évaporitiques présentent toujours un état de sous-saturation même si les ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} sont à forte concentration.

Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre et la sur saturation. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent.

IV.3. Etude de potabilité des eaux

La potabilité de l'eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais surtout en fonction de son usage [29]. Dans le cadre de cette étude, la potabilité de l'eau a été analysée au regard de l'usage humain et a concerné uniquement les paramètres physiques et chimiques. Une comparaison des teneurs en éléments physiques et chimiques des eaux des différents forages aux normes Algériennes sera effectuée.

IV.3.1. Paramètres physiques

Ils s'agissent du pH, de la température et de la conductivité électrique :

IV.3.1.1. pH

Les valeurs de pH mesurées sur les eaux du système aquifère du bassin versant Sahel (figure IV.18) sont comprises entre 6,84 et 7,9 unités pH. D'après l'OMS il n'y a pas de valeur guide pour le pH, mais un optimum entre 6,5 et 8,5 unités pH. Ces limites sont basées sur des considérations techniques (corrosion). Toutes les valeurs observées pour les 34 forages sont conformes à cet optimum.

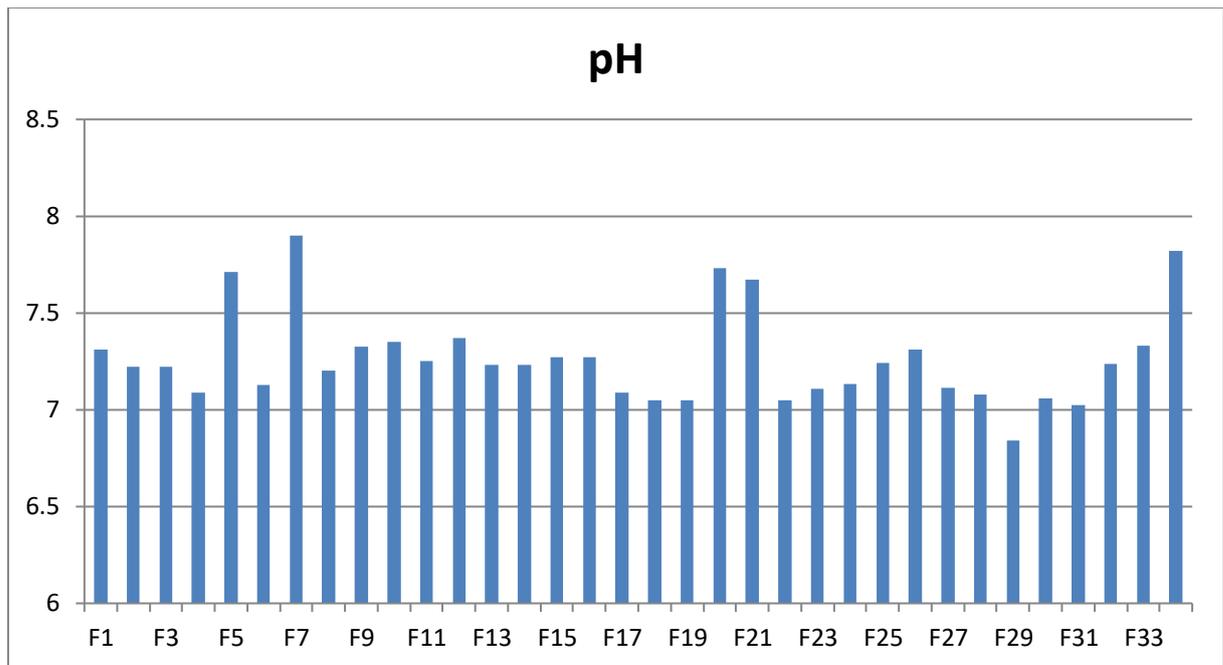


Figure IV.18: variation des valeurs du pH des forages du Sahel

IV.3.1.2. Température

Les valeurs de température pour les eaux du système aquifère (figure IV.19) sont comprises entre 13,8 et 23,35°C. Si, d’après BOUSSELAL [9], la température d’une eau potable doit être comprise entre 22 et 25°C. Tous les échantillons ont des températures acceptables qui sont inférieure 25°C.

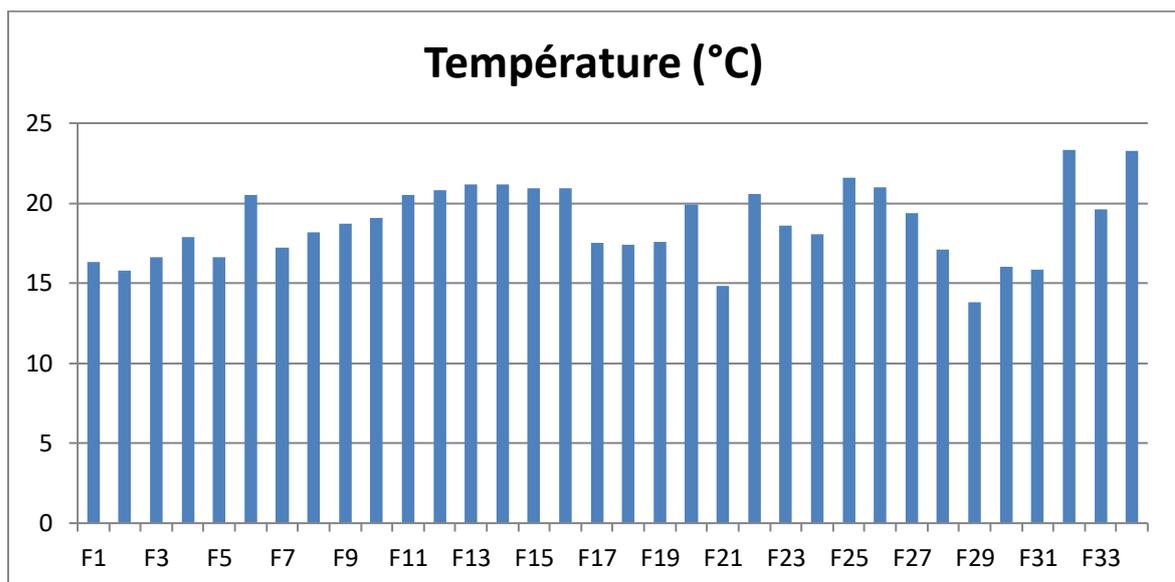


Figure IV.19: variation des valeurs de la température des forages du Sahel

IV.3.1.3. Conductivité

D'après la figure IV.20, on remarque que F1, F4, F13, F14, F15, F16, F18, F19, F22, F29, F30, F32, F33 se caractérisent par des valeurs de conductivité dépassent la norme donnée par l'OMS (1200 $\mu\text{s}/\text{cm}$), d'où 60% des points d'eau examinés de la région ont une qualité acceptable.

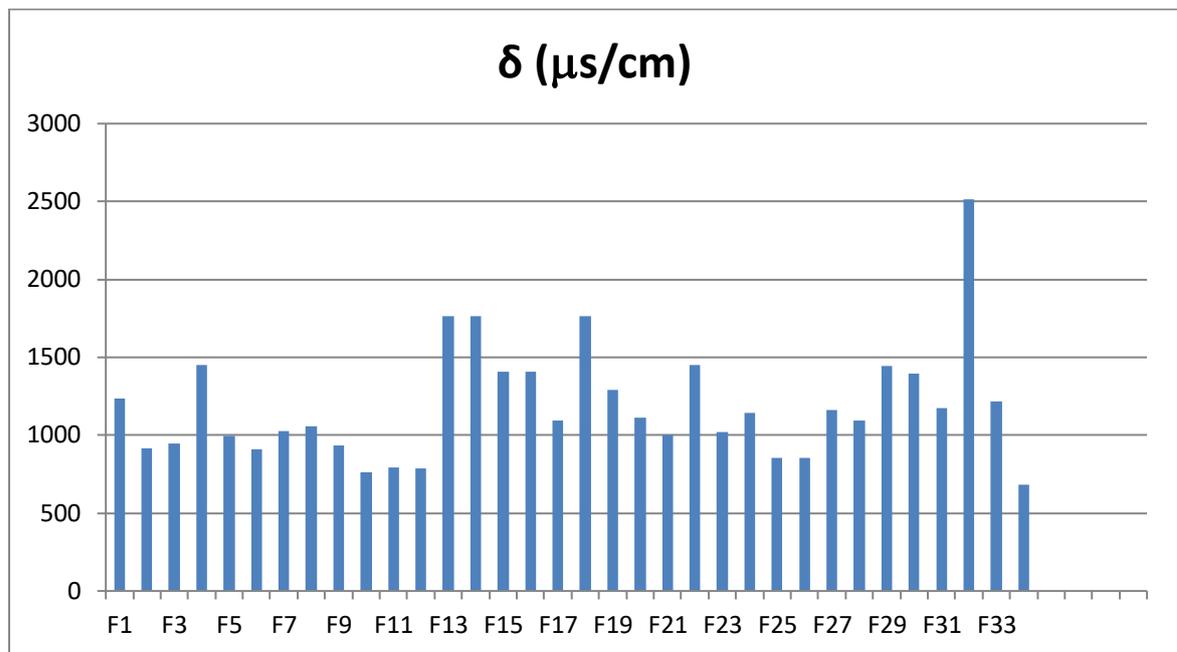


Figure IV.20: variation des valeurs de la conductivité des forages du bassin versant Sahel

Tableau IV.5: les valeurs max et min des paramètres physiques et sa norme

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale	Norme d'OMS
Température (°C)	13,8	23,35	25
pH	6,84	7.82	6,5-8,5
Conductivité($\mu\text{s}/\text{cm}$)	684,5	2515	1200
Dureté (°F)	19,4	120	50

IV.3.2. Paramètres chimiques

IV.3.2.1. Calcium

Les concentrations en Ca^{2+} s'échelonnent entre 42,8 et 281,6 mg/l (figure IV.21). ces concentration dépassent la norme fixée par l'OMS (100 mg/l) pour 47% des forages étudiés.

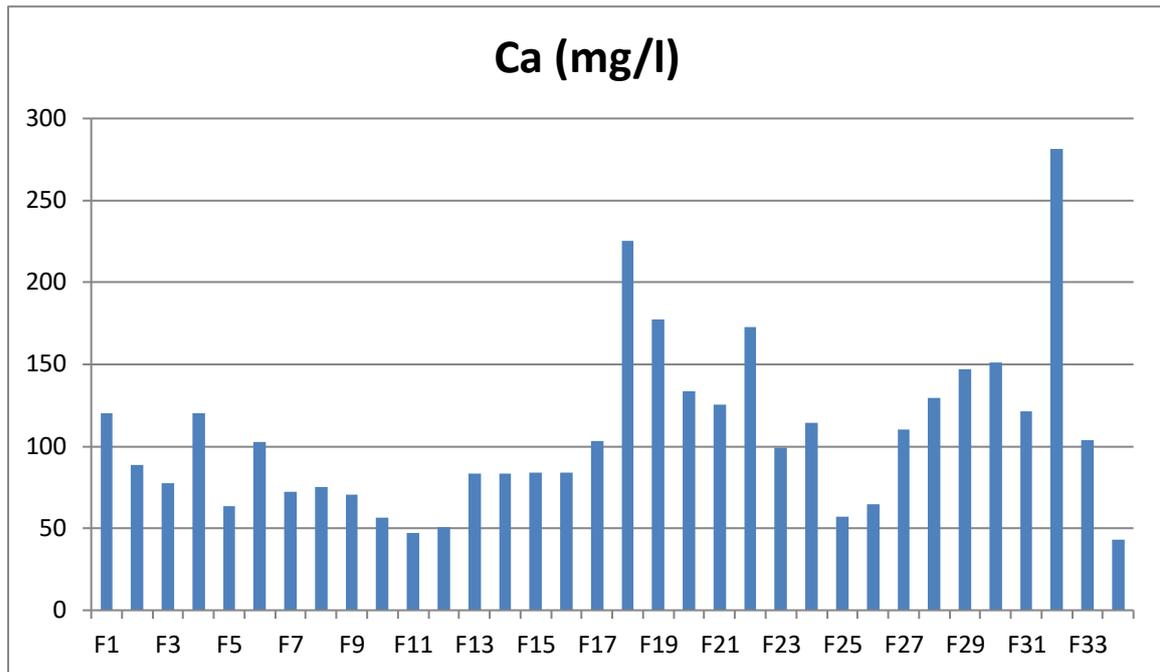


Figure IV.21 : variation des concentrations de Ca des forages du bassin versant Sahel

L'examen des cartes de la répartition spatiale de Ca (figure IV.22) et de la carte d'occupation du sol (figure IV.23) montrent que les concentrations sont importantes dans les parties :

- Centre (x = « 570 500 – 590 000 », y = « 402 0000 – 402 7500 ») et ouest (x = « 559 750 - 570 500 », y = « 399 2500 – 403 0000 ») du sous bassin Oued Dhous à cause des engrais chimique et la décharge publique de cette zone.
- Centre (x = « 580 250 – 590 250 », y = « 401 5000 – 402 0000 ») et sud (x = « 570 500 – 600 000 », y = « 398 7500 – 399 2500 ») du sous bassin Oued Zaiane à cause des engrais chimiques.
- Centre à l'est du sous bassin Oued Sahel (x = « 609 750 – 620 250 », y = « 401 0000 – 402 5000 ») à cause de la chaux des engrais chimiques et les rejets urbains.

Ces concentrations peuvent aussi proviennent de la dissolution des formations sédimentaires du sol (la dissolution des formations carbonatés $CaCO_3$ et des gypses).

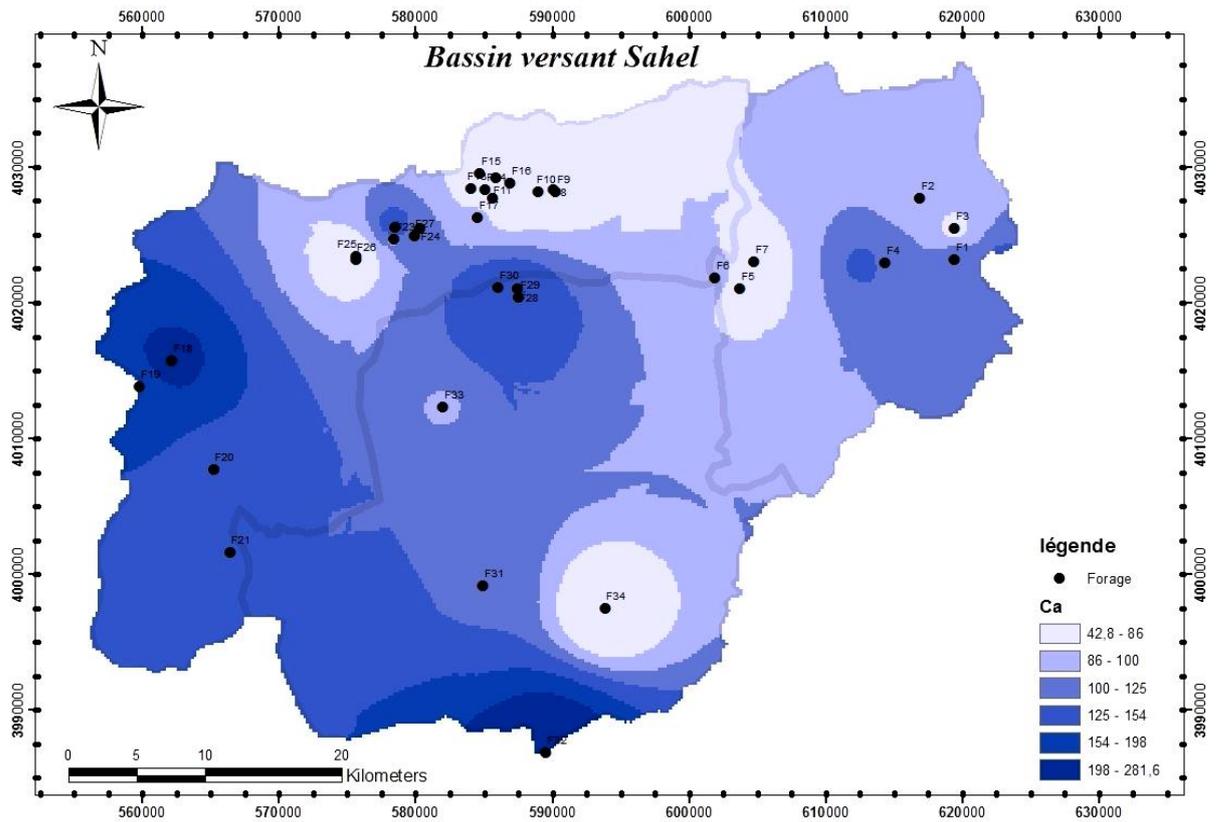


Figure IV.22: carte de la répartition spatiale des concentrations de calcium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

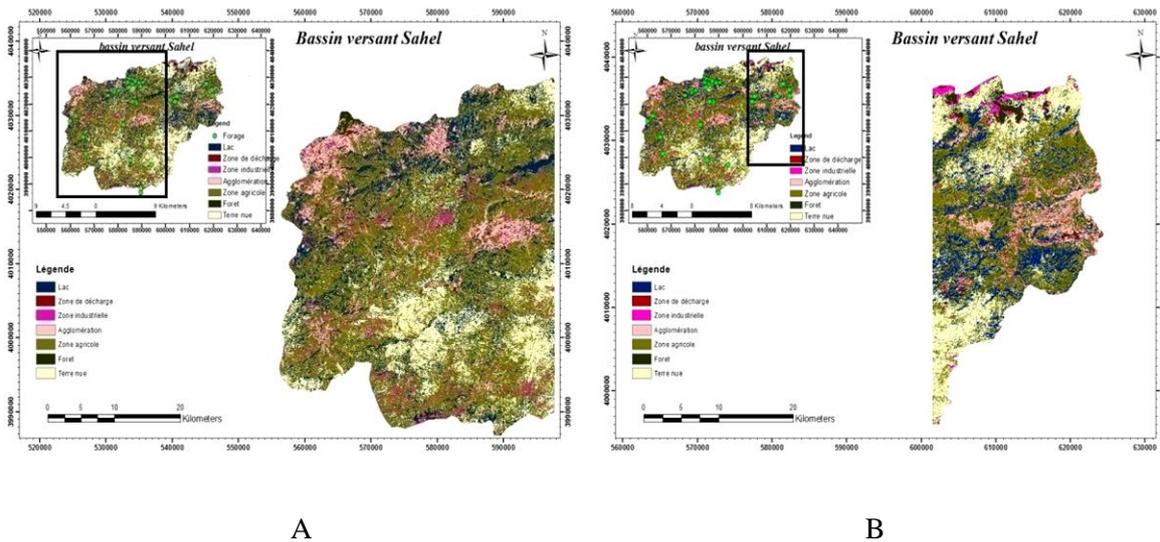


Figure IV.23 : zoom sur les zones à forte concentration de Ca^{2+} sur la carte d'occupation de sol de la partie est (B) et ouest (A) du bassin versant Sahel

IV.3.2.2. Magnésium

Les concentrations en magnésium, varient de 11,17 à 119,64 mg/l (figure IV.24). Pour les forages (F3, F4, F6, F8, F9, F13, F14, F15, F16, F32) ont des concentrations qui ne respectent pas la norme mondiale (50mg/l).

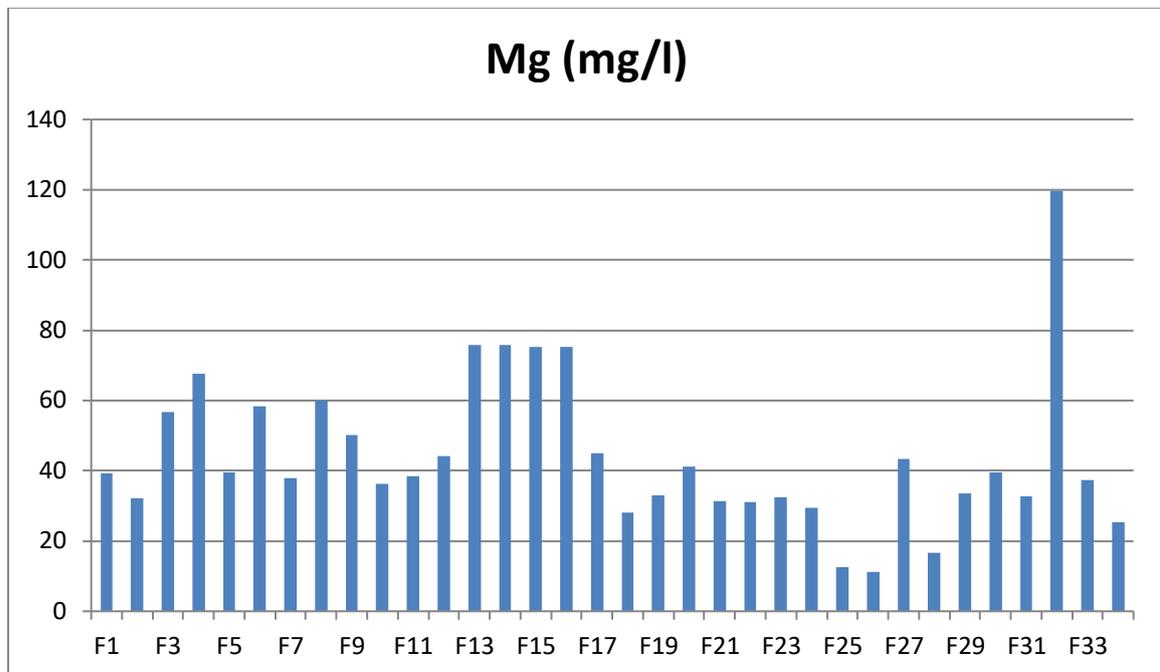


Figure IV.24 : variation des concentrations de magnésium des eaux du bassin versant Sahel

On note que les teneurs élevées (figure IV.25) sont observées dans les parités :

- Nord du sous bassin Oued Dhous (x = « 580 000 – 600 250 », y = « 402 5000 – 403 5000 »)
- sud du sous bassin Oued Zaiane (x = « 570 000 – 600 000 », y = « 398 7500 – 399 2500 »)
- Centre du sous bassin Sahel (x = « 610 000 – 620 000 », y = « 401 7500 – 402 7500 »)

Les ions (Mg^{2+}) proviennent, comme les ions (Ca^{2+}), de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomites), comme peuvent se traduire également par la dissolution des formations salifères et les engrais agricoles comme indiqué dans la carte d'occupation du sol (figure IV.26).

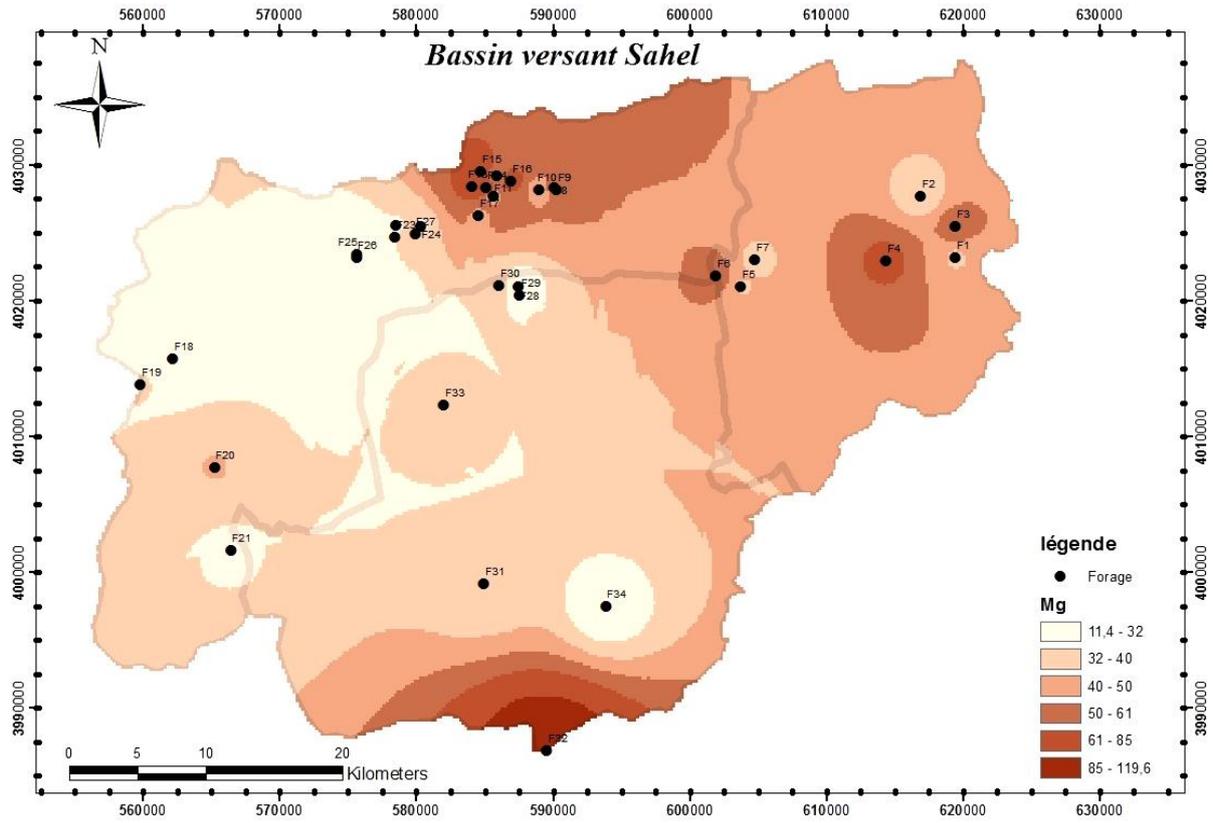


Figure IV.25: carte de répartition spatiale des concentrations de Mg (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

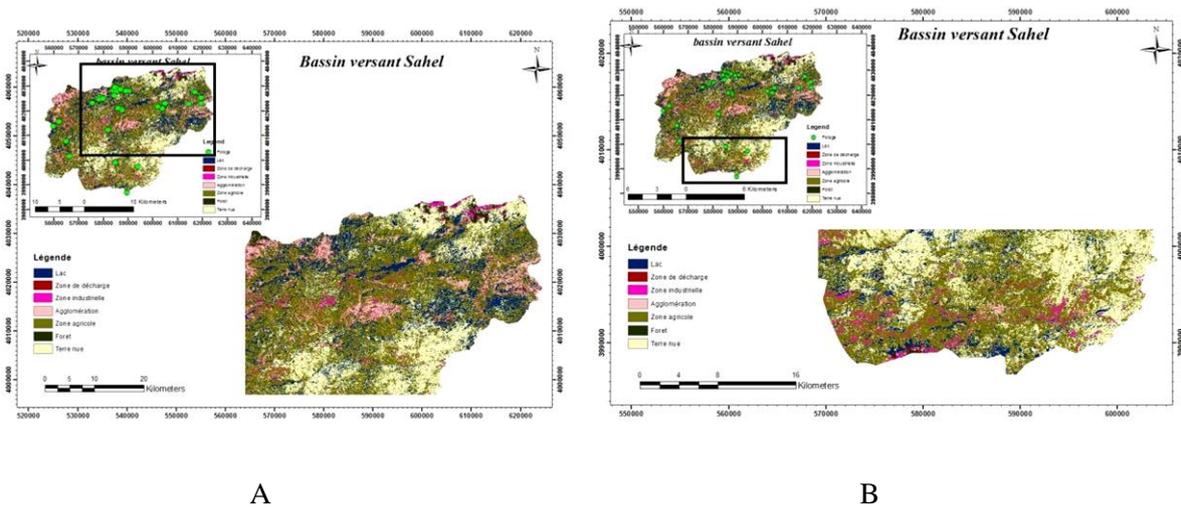


Figure IV.26 : zoom sur les zones à forte concentration de Mg^{2+} sur la carte d'occupation du sol de la partie nord (A) et sud (B) du bassin versant Sahel

IV.3.2.3. Dureté

La dureté totale de l'eau (TH_t) est rattachée principalement à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau. Dans les échantillons d'eau : La TH_t varie entre 19,4°F et 120°F (figure IV.27). Pour 10 forages la dureté dépasse la norme fixée par 40°F.

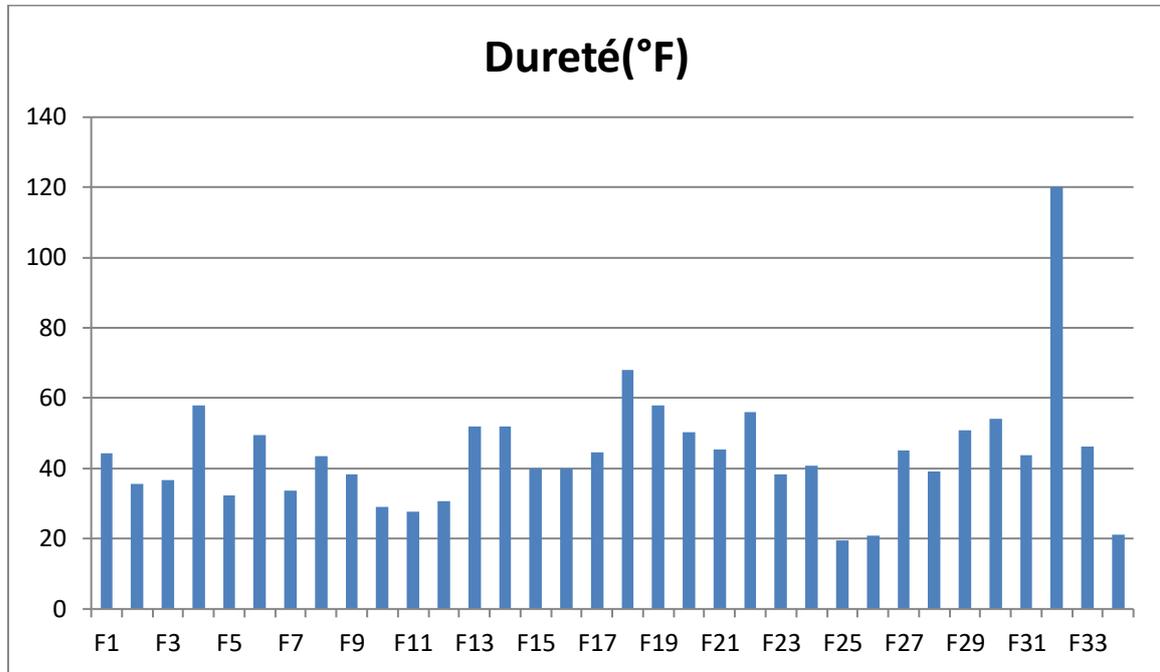


Figure IV.27: variation des valeurs de la dureté des forages du bassin versant Sahel

D'après l'analyse de carte spatiale de la dureté (figure IV.28), on constate 3 classes du TH de l'eau : une eau plutôt dure, une eau dure et une eau très dure. On note que la dureté est élevée le long des 3 sous bassin et atteint son maximum dans la partie sud du bassin versant. Cette valeur élevée est due aux valeurs élevées de Mg^{2+} et Ca^{2+} .

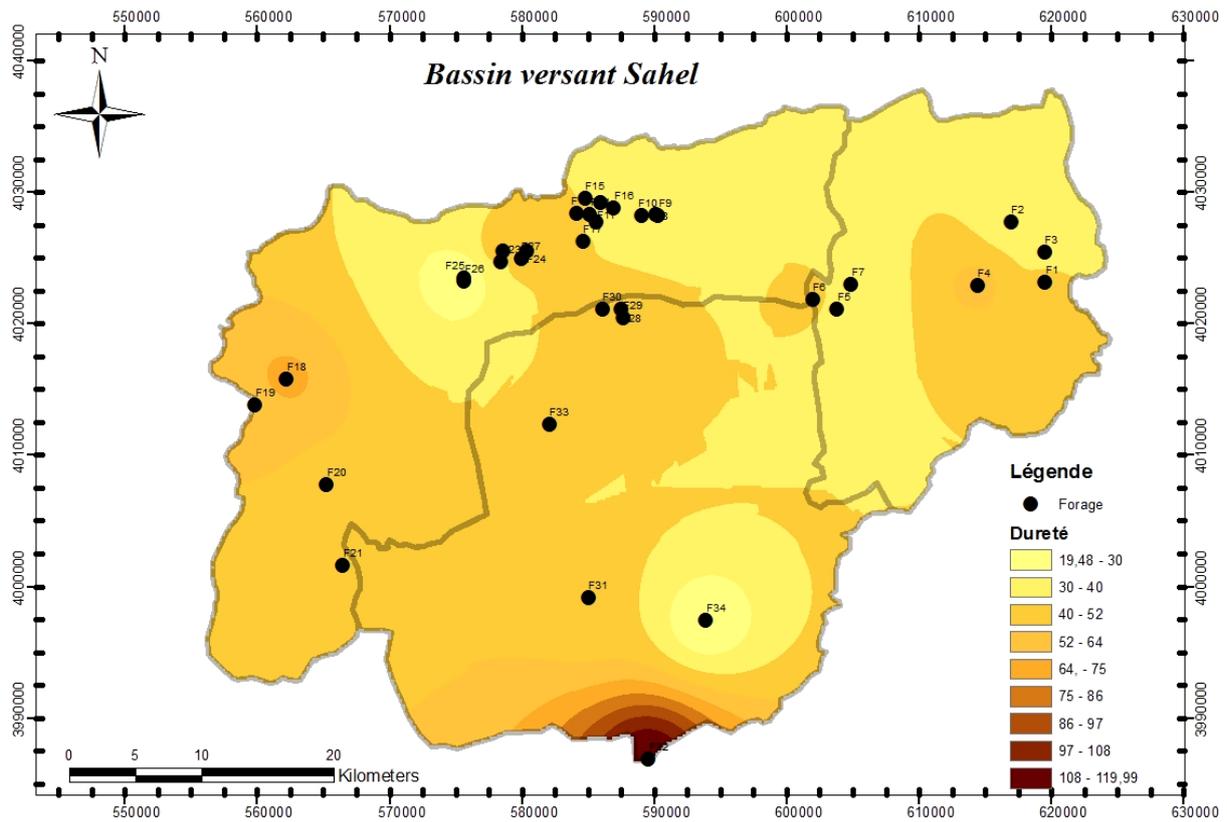


Figure IV. 28: carte de répartition spatiale de la dureté (en °F) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

IV.3.2.4. Sodium

Les concentrations du bassin versant Sahel de Na^+ observées (19,4 et 120 mg/l) (figure IV.29) peuvent être considérée admissibles, elles ne dépassent pas 200 mg/l de la norme algérienne.

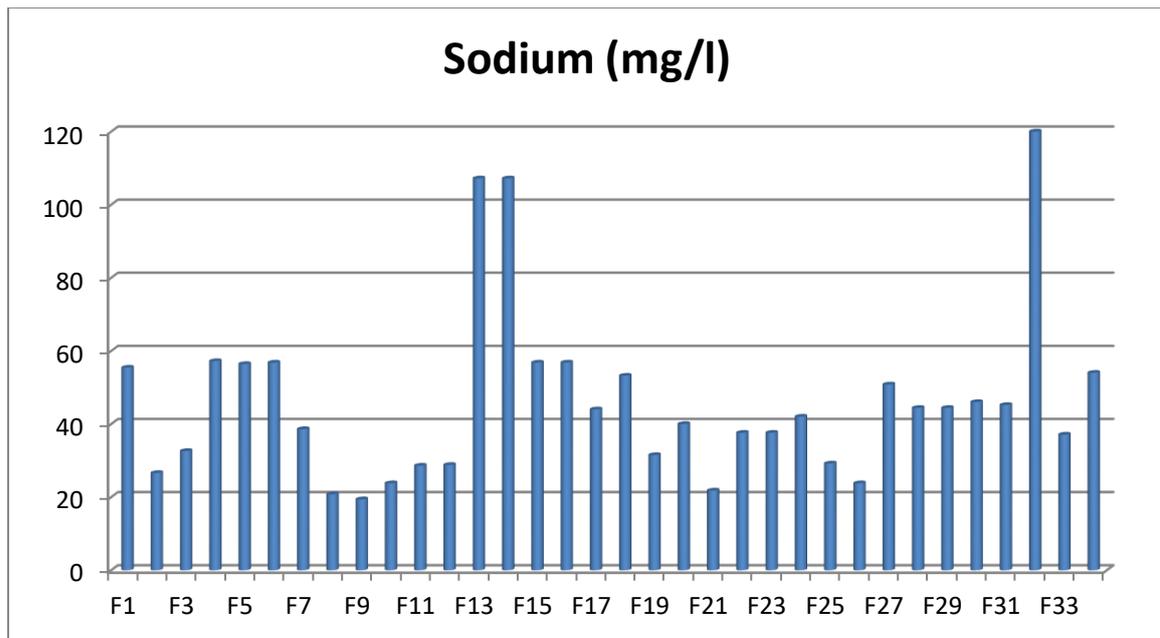


Figure IV.29: variation des valeurs de Sodium des forages du bassin versant Sahel

L'observation de la carte (figure IV.30) montre que les concentrations sont importantes (> 85 mg/l) dans la zone centrale nord du bassin versant Sahel ($x = \ll 580\ 000- 580\ 500 \gg$, $y = \ll 402\ 7500 - 403\ 2500 \gg$) et sud du bassin ($x = \ll 580\ 500 - 590\ 500 \gg$, $y = \ll 398\ 7500 - 399\ 2500 \gg$) mais qui ne dépassent pas la norme.

Ces concentration peuvent se traduire par la dissolution des formations salifères, les teneurs faibles se localisent à l'Ouest (en amont de la nappe), là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées.

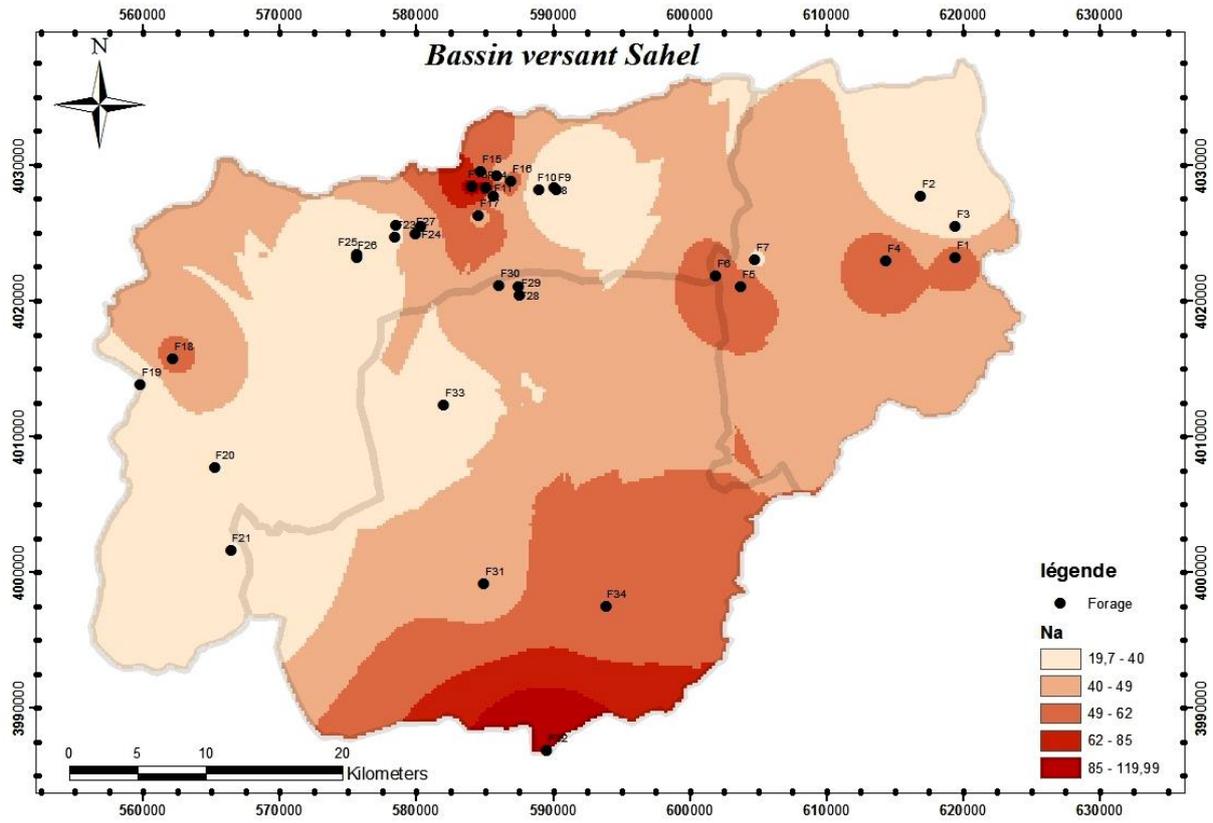


Figure IV.30: carte de répartitions spatiale des teneurs en sodium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

IV.3.2.5. Potassium

Les concentrations de K^+ varient entre 0,6 et 4 mg/l (figure IV.31) ce qui apparait faible en comparant la norme fixée par 20 mg/l.

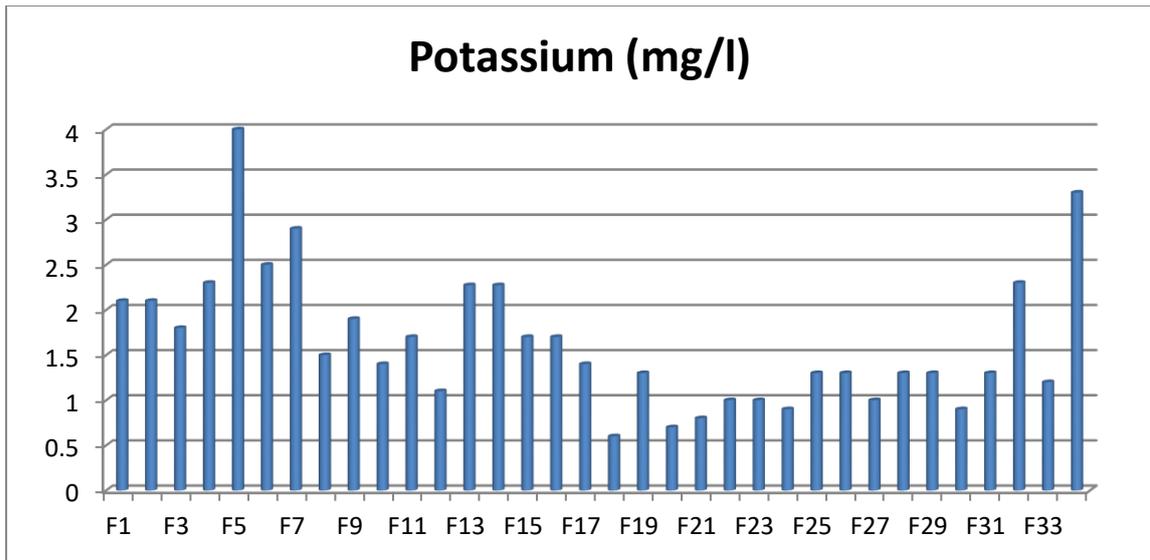


Figure IV.31 : variation des valeurs de potassium des forages du bassin versant Sahel

D’après la carte (figure IV.32), les plus grandes concentrations sont observées dans l’est et le sud-est du bassin versant, ces valeurs restent faibles et se trouvent naturellement dans les eaux souterraines.

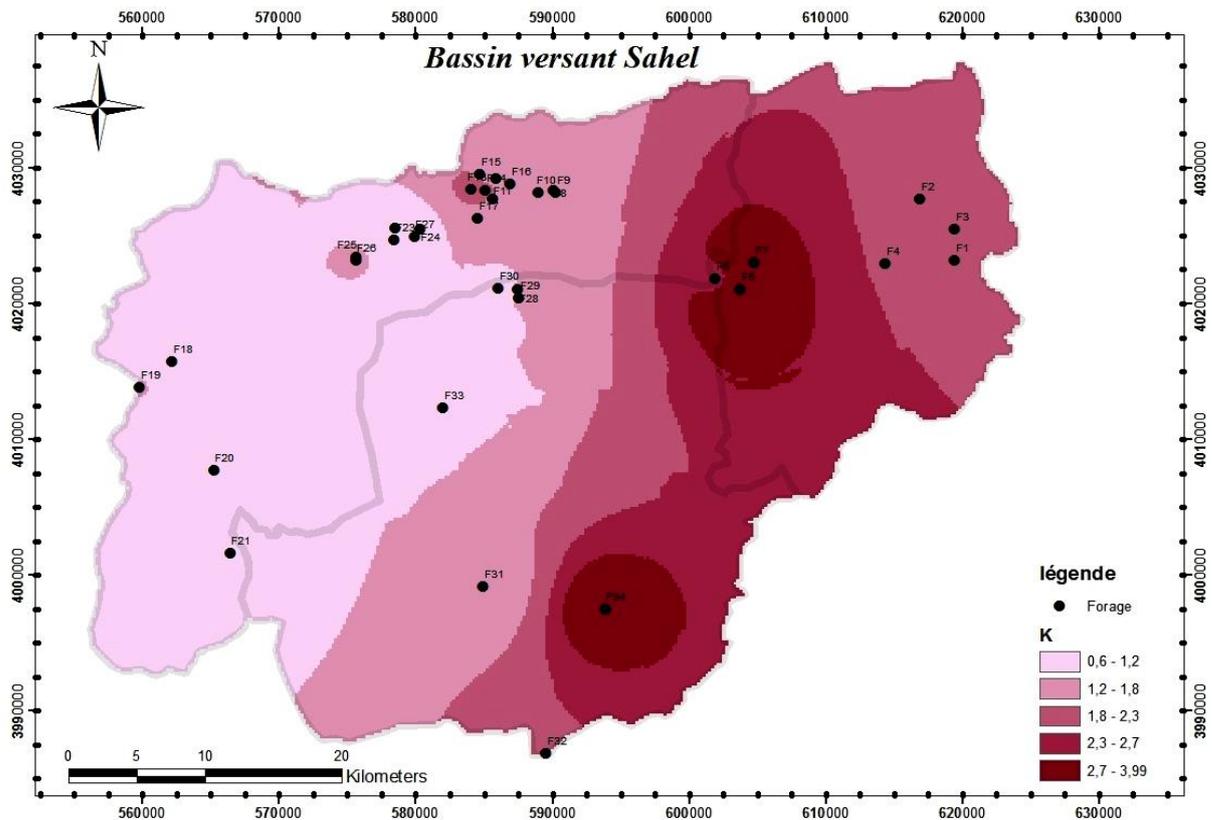


Figure IV. 32: la répartition spatiale des concentrations de potassium (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

IV.3.2.6. Chlorure

Les concentrations les plus fréquentes des eaux souterraines du bassin versant ne dépassent pas 298,2 mg/l (figure IV.33). Cette valeur est dite élevée par rapport aux normes mondiales de l'OMS (250 mg/l), elle concerne 3 forages (F13, F14, F22) les autres forages permet leur utilisation sans danger.

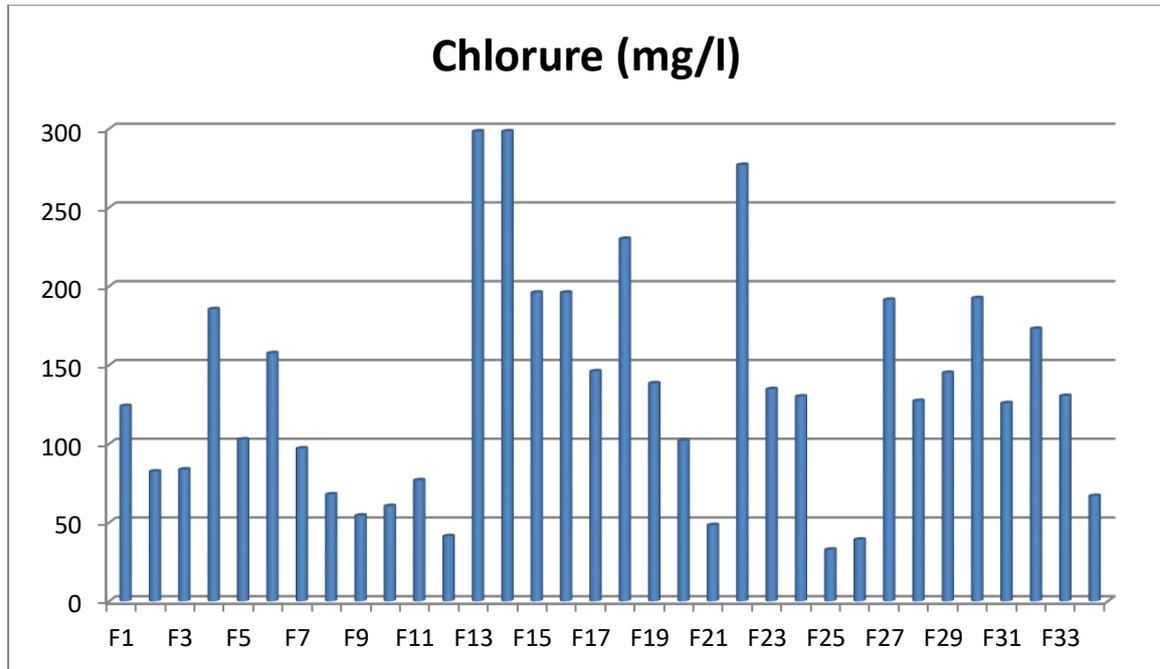


Figure IV.33 : variation des valeurs de chlorure des forages du bassin versant Sahel

La cartographie de la répartition spatiale de cet élément (figure IV.34) montre une élévation remarquable dans la partie Nord bassin versant Sahel (x = « 580 250 – 580 500 », y = « 402 7500 – 403 0000 »).

D'après la carte d'occupation de sol (figure IV.35), ces fortes concentrations peuvent se traduire par la dissolution des formations gypsifères et les activités anthropiques (rejets des eaux usées d'origine domestique, engrais chimique et les décharge public) contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures.

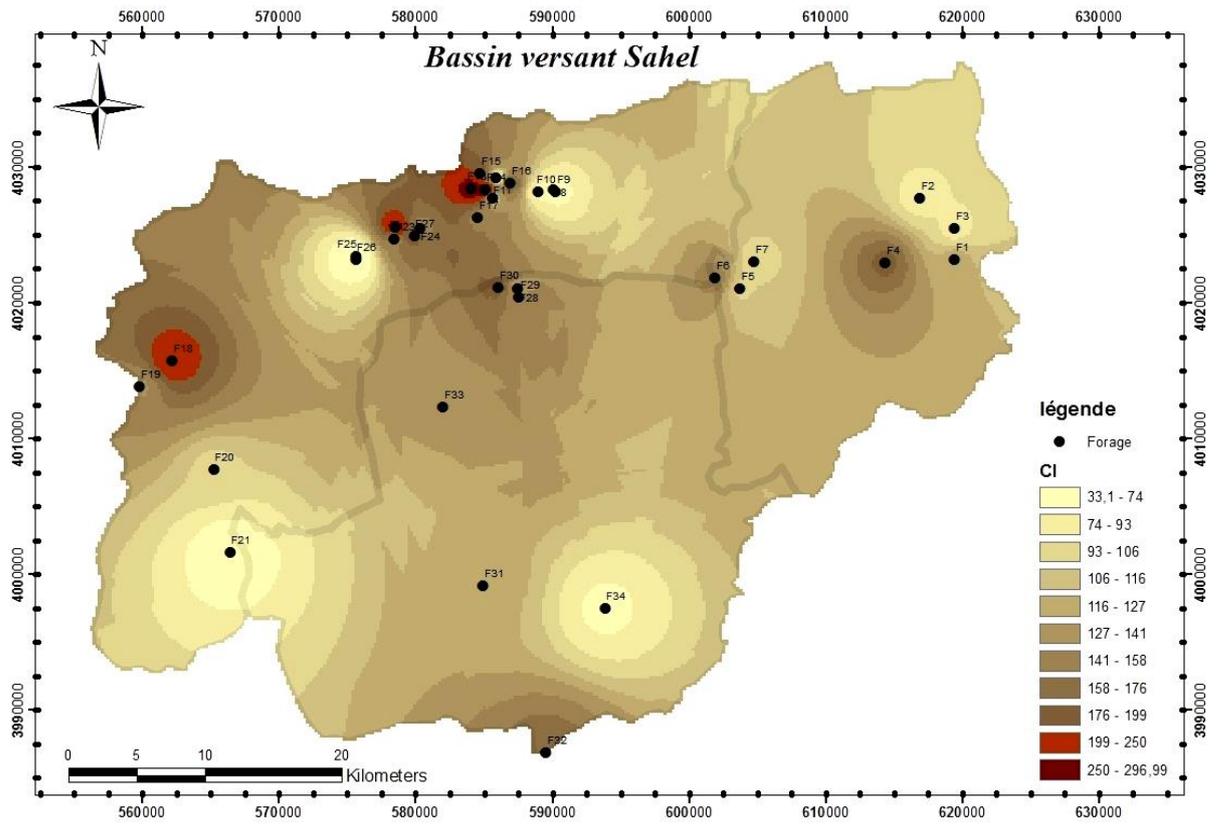


Figure IV.34: la répartition spatiale des concentrations (en mg/l) de chlorure des eaux souterraines du bassin versant Sahel

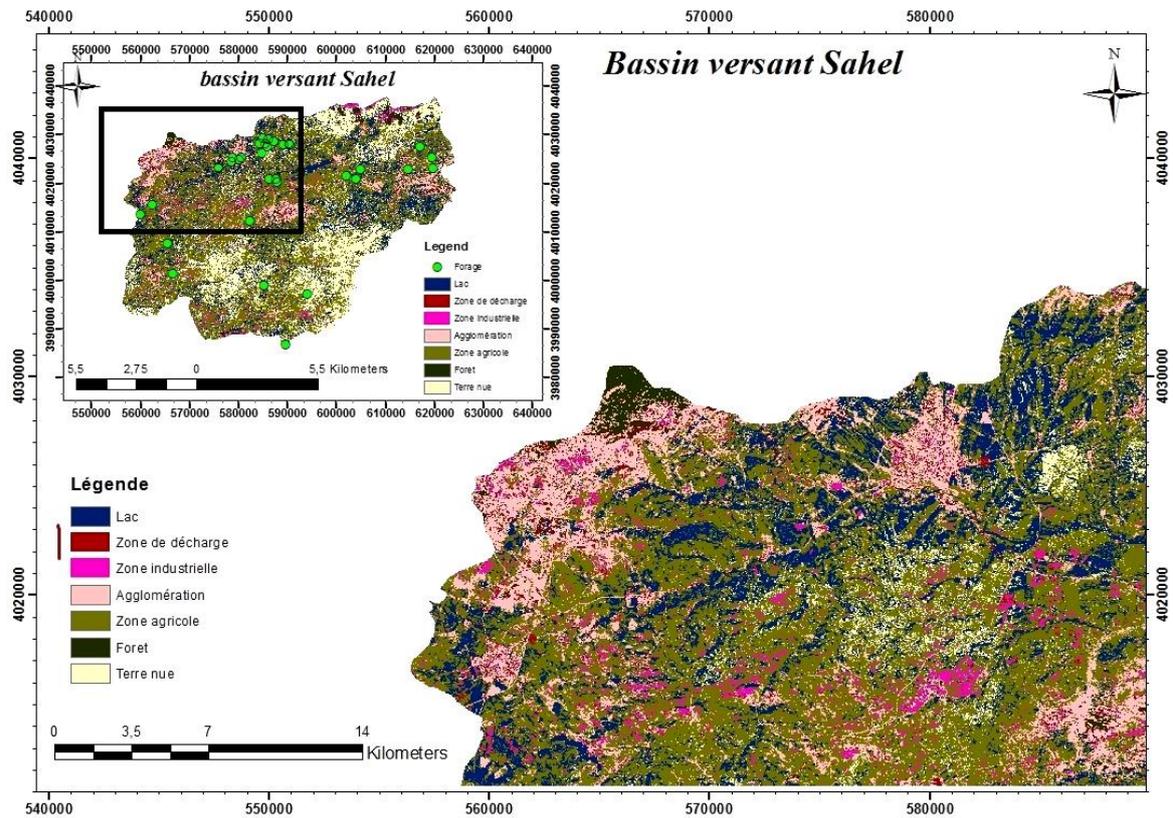


Figure IV.35 : zoom sur la zone à forte concentration de Cl^- sur la carte d'occupation de sol de la partie nord et ouest du bassin versant Sahel

IV.3.2.7. Sulfate

Les teneurs en Sulfate varient entre 18,12 mg/l comme minimum et 1101,9 mg/l comme maximum et dépassent la norme d'OMS de potabilité fixée par 250 mg/l (figure IV.36). La concentration du forage F32 supérieures à la norme peut provoquer des troubles gastro-intestinaux en particulier chez les enfants.

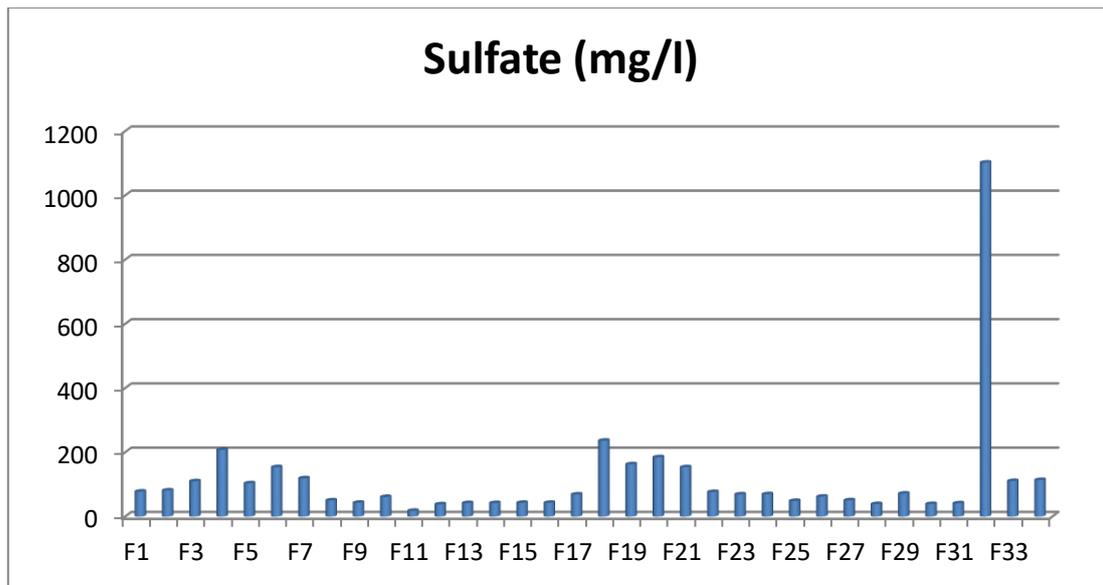


Figure IV.36 : variation des valeurs de sulfate des forages du bassin versant Sahel

D'après l'analyse de la carte de la variation spatiale (figure IV.37) et la carte d'occupation de la région (figure IV.38) on dit que les fortes concentrations sont du enregistrees dans :

- la partie sud du sous bassin Oued Zaiane (longitude « 580 000 - 600 000 » et latitude « 399 5000 – 398 5000 ») due à l'activité agricole de la région.
- l'ouest du sous bassin Oued Dhous (longitude « 560 000 – 560 250 » et latitude « 401 5000 – 401 7500 ») due à la décharge public de Maana de Ain El Aloui.

D'après notre analyse faite sur l'origine des éléments chimiques, on peut dire que ces fortes valeurs peuvent aussi s'expliquer par la dissolution des sels minéraux du gypse et l'anhydrite.

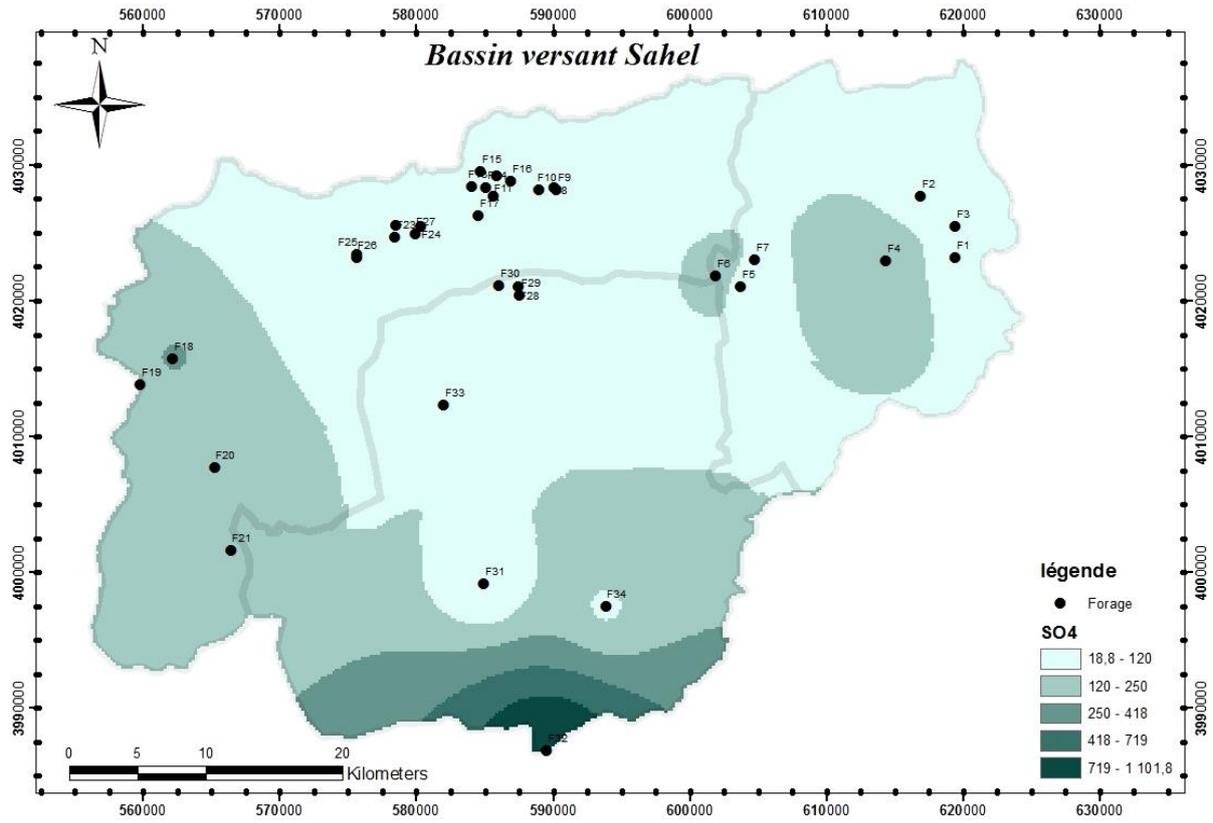


Figure IV.37 : carte de répartition spatiale des teneurs en sulfate (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

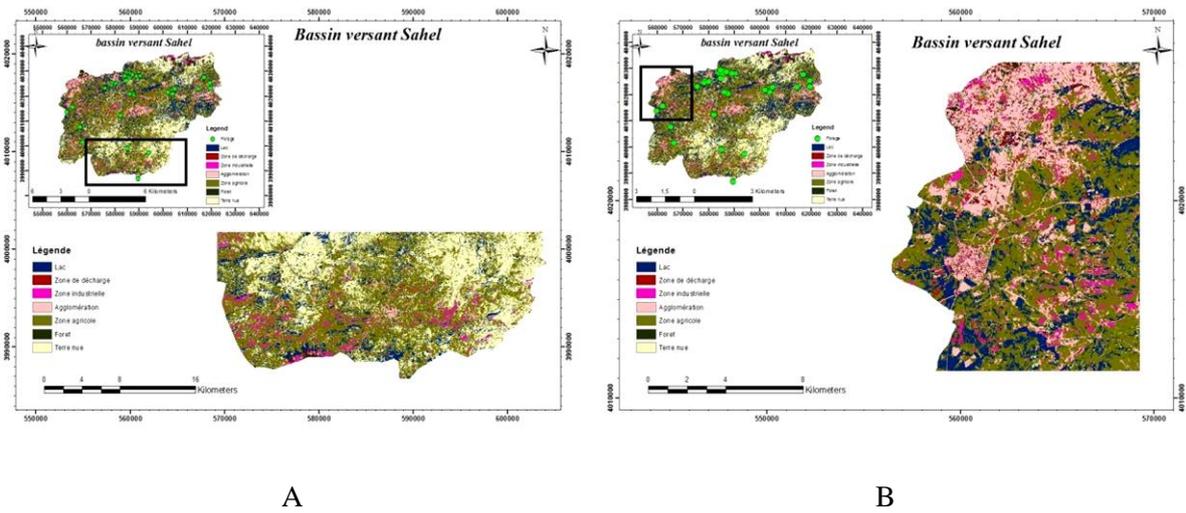


Figure IV.38 : zoom sur les zones à forte concentration de SO_4^{2-} sur la carte d'occupation du sol de la partie ouest (B) et sud (A) du bassin versant Sahel

IV.3.2.8. Bicarbonate

Les teneurs en Bicarbonates observées dans les eaux des 34 forages indiquent des valeurs relativement élevées pour les forages (F4, F6, F8, F9, F13, F14, F15, F16, F29, F30, F31, F32) et dépassant les normes de potabilité de l'OMS, qui fixe les concentrations maximales à (300 mg/l). Sa teneur dans les eaux étudiées est comprise entre (115,9 et 372,1 mg/l) (figure IV.39).

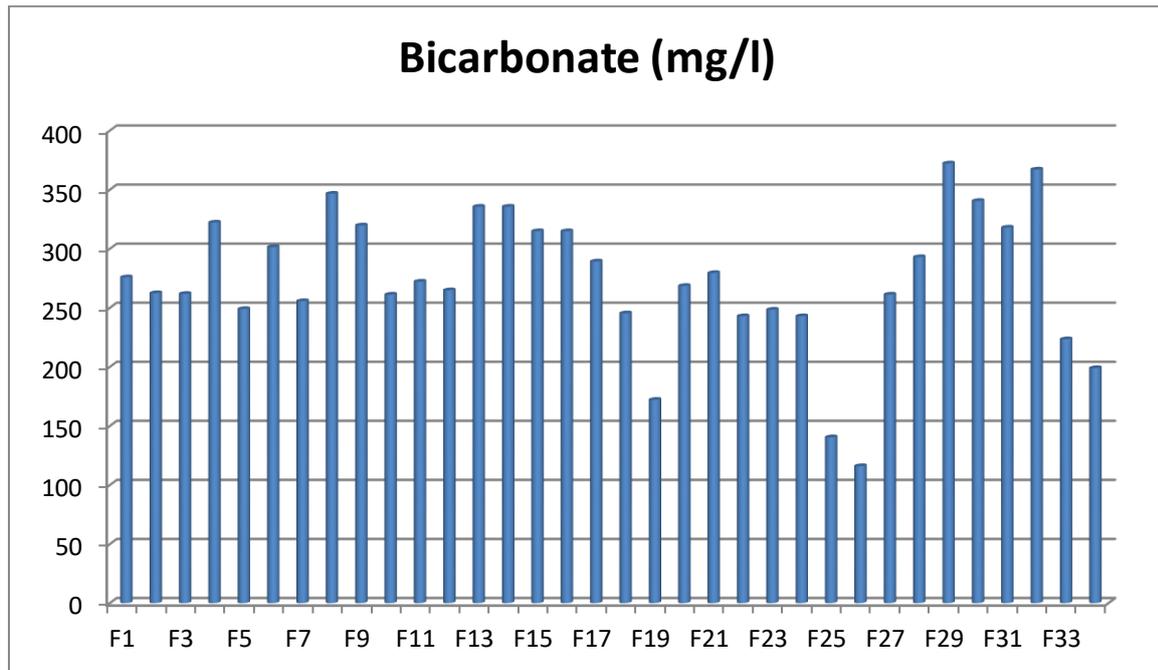


Figure IV.39 : variation des valeurs des bicarbonates des forages du bassin versant Sahel

L'examen de la carte spatiale (figure IV.40) montre que les concentrations les plus importantes sont observées dans les parties :

- Centre sous bassin Oued Dhous ($x = \ll 580\ 250 - 580\ 500 \gg$, $y = \ll 402\ 7500 - 403\ 0000 \gg$) et ($x = \ll 580\ 250 - 590\ 500 \gg$, $y = \ll 402\ 0000 - 403\ 2500 \gg$) ;
- Centre du sous bassin Oued Sahel ($x = \ll 610\ 250 - 610\ 500 \gg$, $y = \ll 402\ 2500 - 402\ 5000 \gg$) ;
- Sud du sous bassin Oued Zaiane ($x = \ll 580\ 250 - 580\ 750 \gg$, $y = \ll 399\ 7500 - 400\ 0000 \gg$).

On note que les cailloutis calcaires (calcite et dolomite) qui existent dans les formations de la nappe peuvent influencées sur la concentration en cet élément.

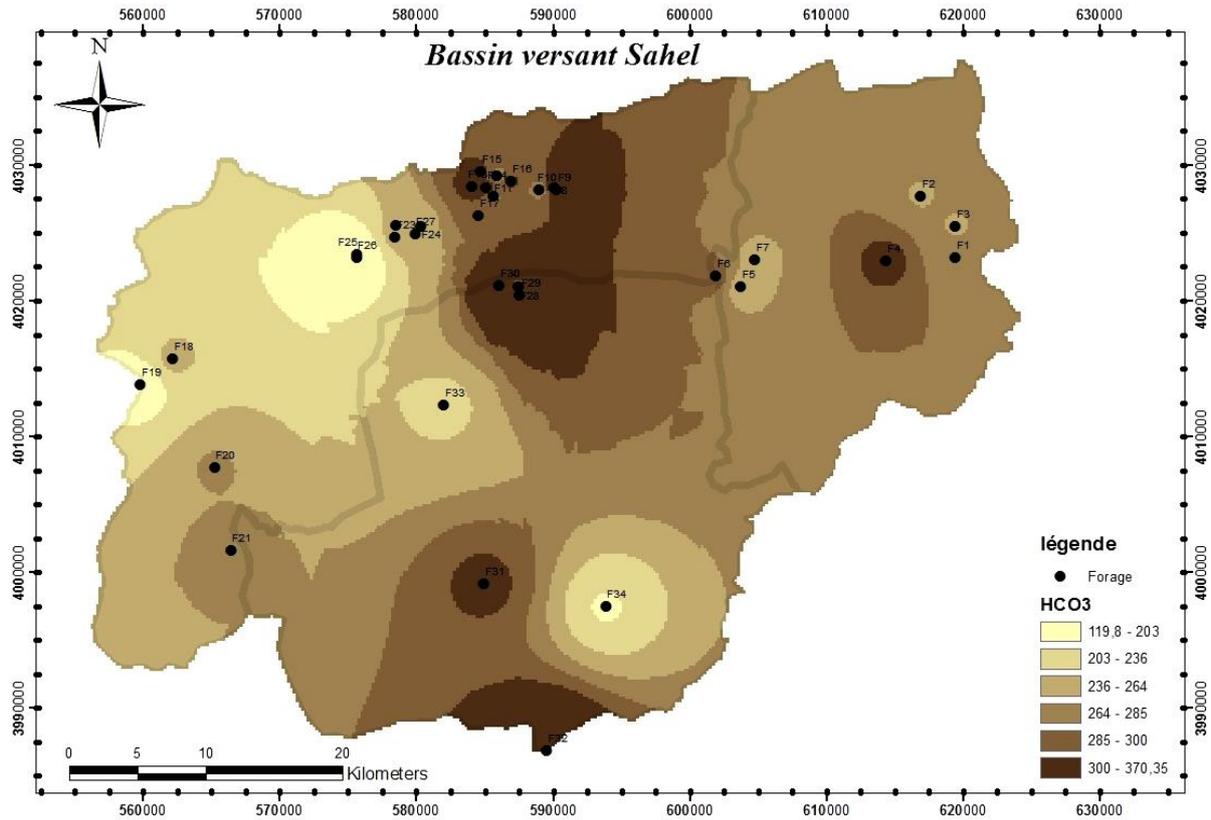


Figure IV.40 : la répartition spatiale des teneurs en bicarbonate (en mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

IV.3.2.9. Nitrate

Les teneurs maximales du nitrate sont observées (110,75 mg/l) qui sont supérieures à la norme de potabilité (45 mg/l) (figure IV.41), là où on a une activité intense de l'agriculture. Les nitrates sont plus nocifs que les sulfates et chlorures, ils peuvent provoquer des troubles graves chez les nourrissons.

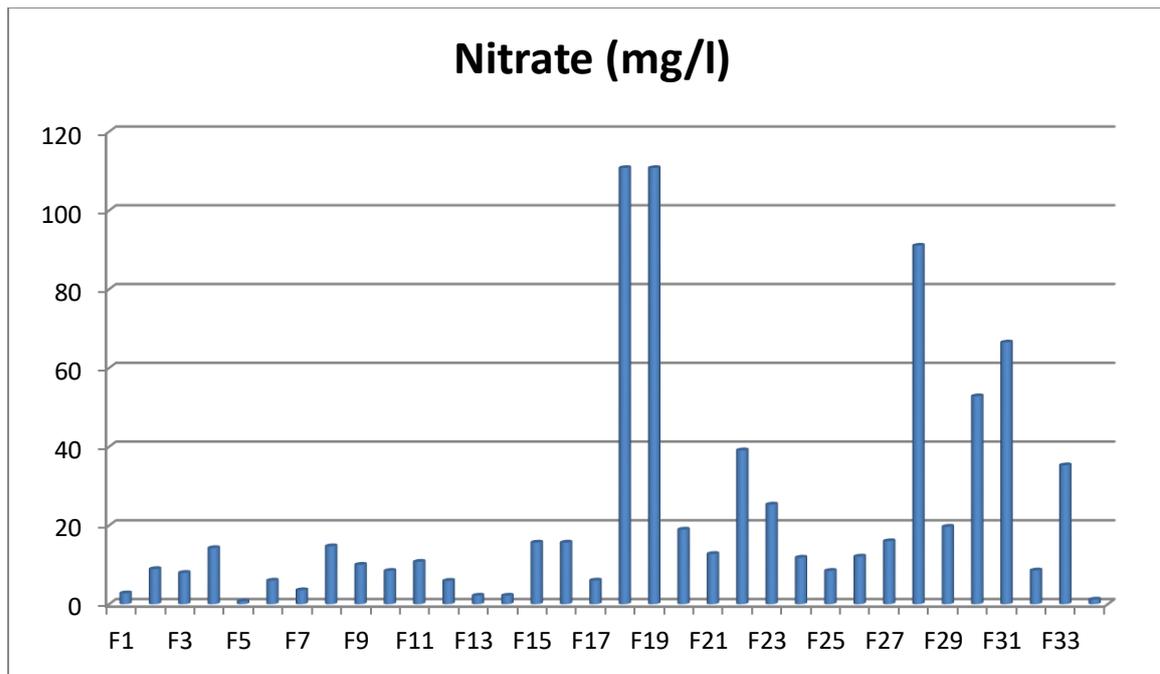


Figure IV.41 : variation des valeurs de nitrate des forages de Sahel

En général, les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines sont faibles (figure IV.42), sauf dans les parties où on a une activité intense de l'agriculture ou d'autre activité anthropique (les rejets urbains) (carte d'occupation du sol figure IV.43).

- Centre du grand bassin versant Sahel ($x = \ll 580\ 250 - 590\ 000 \gg$, $y = \ll 401\ 7500 - 402\ 2500 \gg$)
- Ouest du bassin versant ($x = \ll 550\ 750 - 570\ 000 \gg$, $y = \ll 400\ 2500 - 402\ 7500 \gg$)
- Sud du bassin ($x = \ll 570\ 750 - 580\ 750 \gg$, $y = \ll 399\ 5000 - 400\ 5000 \gg$)

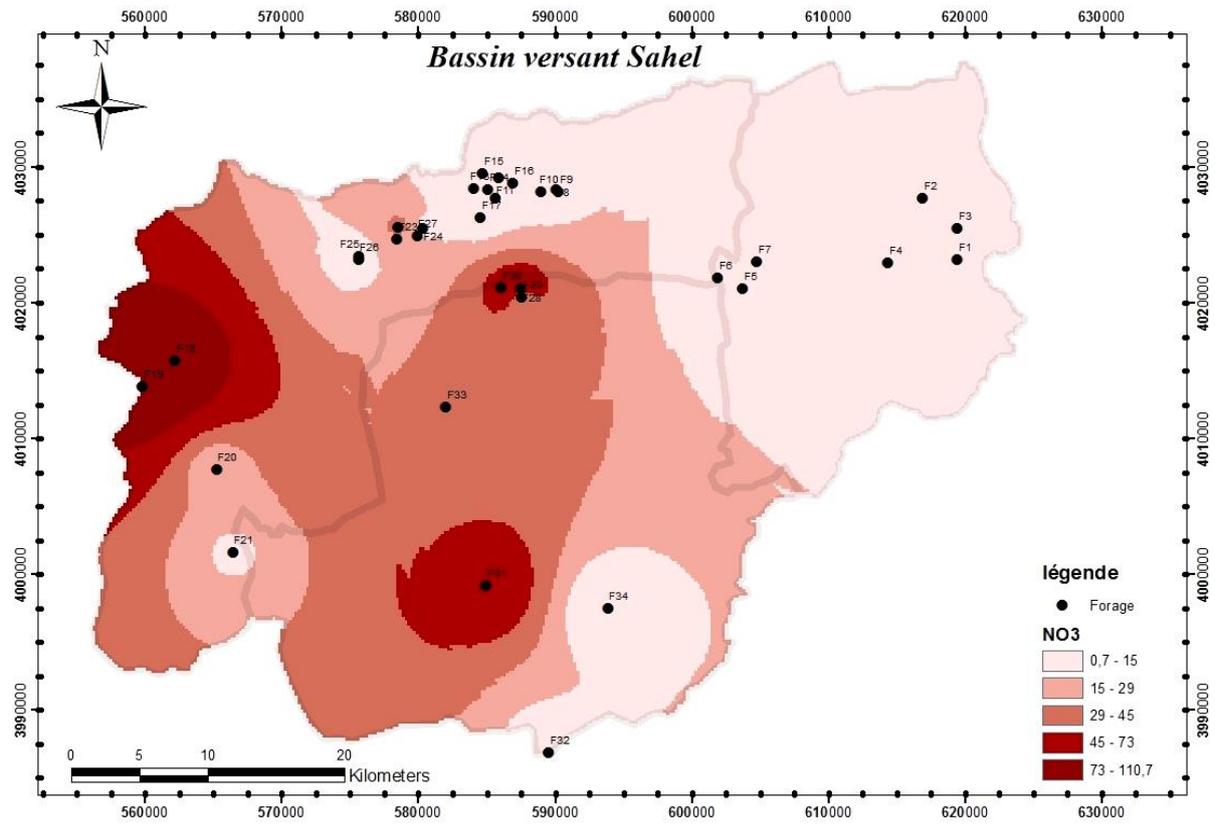


Figure IV.42: répartition spatiale des concentrations de nitrate des eaux souterraines du bassin versant Sahel

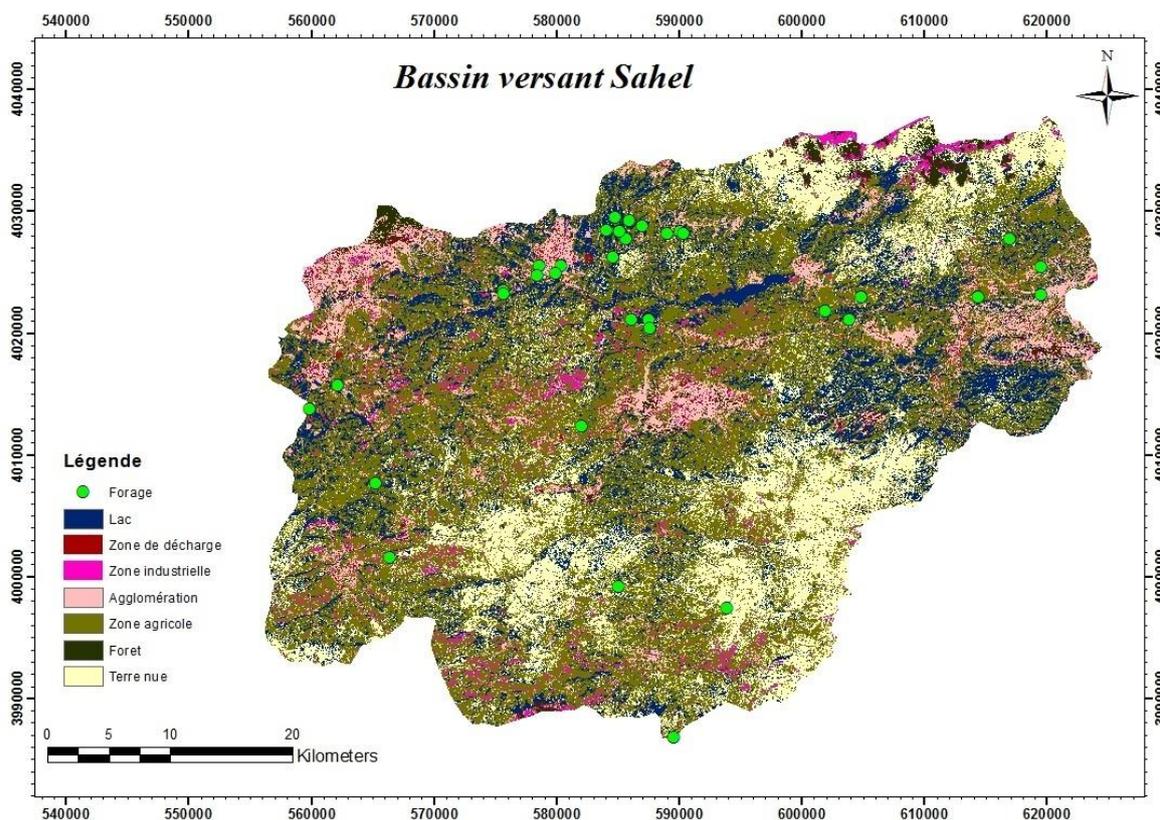


Figure IV.43: carte d'occupation du sol du bassin versant Sahel

Tableau IV.6 : valeurs min et max des éléments majeurs et leurs normes

Forages	Valeur min (mg/l)	Valeur max (mg/l)	Norme d'OMS (mg/l)
Calcium	42,8	281,6	100
Magnésium	11,17	119,64	50
Dureté	68,17	401,24	500
Sodium	19,4	120	200
Potassium	0,6	4	20
Bicarbonate	115,9	372,1	300
Chlorure	32,66	298,2	250
Sulfate	18,12	1101,9	250
Nitrate	0,73	110,75	45

Le tableau suivant exprime d'une façon générale la qualité de l'eau des différents forages du bassin versant Sahel à la consommation humaine :

Tableau IV.7: aptitude des eaux de forages du bassin versant Sahel à l'AEP

Forages	Potabilité des eaux de forages	Les éléments de non potabilité
F1	Non	Conductivité, Ca, TH,
F2	Oui	
F3	Non	Mg,
F4	Non	Conductivité, Mg, TH, HCO3
F5	Oui	
F6	Non	Ca, Mg, TH, HCO3,
F7	Oui	
F8	Non	Mg, TH, HCO3
F9	Non	Mg, HCO3
F10	Oui	
F11	Oui	
F12	Oui	
F13	Non	Conductivité, Mg, TH, Cl, HCO3
F14	Non	Mg, TH, Cl, HCO3
F15	Non	Conductivité, Mg, HCO3
F16	Non	Conductivité, mg, HCO3
F17	Non	Ca, TH
F18	Non	Conductivité, Ca, TH, NO3
F19	Non	Conductivité, Ca, TH, NO3
F20	Non	Ca
F21	Non	Ca, TH
F22	Non	Conductivité, Ca, TH, Cl
F23	Oui	
F24	Non	Ca, TH
F25	Oui	

F26	Oui	
F27	Non	Ca, TH
F28	Non	Ca
F29	Non	Ca, TH, HCO3
F30	Non	Ca, TH, HCO3
F31	Non	Ca, TH, HCO3, NO3
F32	Non	Ca, Mg, TH, SO4, HCO3
F33	Non	Conductivité, Ca, TH, NO3
F34	Oui	

IV.4. Etude de la vulnérabilité des eaux de la nappe du bassin versant Sahel à la pollution

Afin d'apprécier la vulnérabilité des eaux à la pollution, on calcule un indice dit de contamination. Les indicateurs de pollution regroupent les cations (K^+ ; Na^+) et les anions (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) un indice de pollution, calculé à partir des concentrations de ces ions, permet de classer l'eau analysée sur une échelle à 5 niveaux de pollution. Les classes ont été établies à partir des modifications induites par les polluants (tableau IV.8).

Tableau IV.8: classement en vue de la détermination de l'indice de contamination

Classe	1	2	3	4	5
NO_3^-	<13	3 - 8	18 -23	23 - 30	>30
SO_4^{2-}	<25	25 - 50	50 -100	100 - 120	>120
Cl^-	<120	120 - 240	240 - 400	400 - 600	> 600
Na^+, K^+	<80	80 - 160	80 - 160	200 - 300	>300

L'indice le plus élevé correspond à une pollution de très forte vulnérabilité à la pollution. Ce dernier correspond à la somme des numéros de classe déterminé en fonction de la teneur des nitrates, des sulfates, des chlorures, du sodium et du potassium montrés au tableau ci dessous.

- Si $IC < 12$ l'eau est faiblement sensible à la pollution
- Si $13 < IC < 15$ l'eau est moyennement sensible à la pollution

- Si $IC > 15$ l'eau est fortement sensible à la pollution

Les indices de contamination et la vulnérabilité à la pollution des 34 forages étudiés sont regroupés dans le tableau et la carte ci-dessous :

Tableau IV.9: tableau de la vulnérabilité des eaux du forage du bassin versant Sahel à la pollution

Forages	IC	Vulnérabilité à la pollution
F1	7	Faiblement sensible
F2	6	Faiblement sensible
F3	6	Faiblement sensible
F4	9	Faiblement sensible
F5	7	Faiblement sensible
F6	9	Faiblement sensible
F7	7	Faiblement sensible
F8	7	Faiblement sensible
F9	5	Faiblement sensible
F10	6	Faiblement sensible
F11	4	Faiblement sensible
F12	5	Faiblement sensible
F13	8	Faiblement sensible
F14	8	Faiblement sensible
F15	7	Faiblement sensible
F16	7	Faiblement sensible
F17	7	Faiblement sensible
F18	13	Moyennement sensible
F19	13	Moyennement sensible
F20	10	Faiblement sensible
F21	8	Faiblement sensible
F22	12	Faiblement sensible
F23	10	Faiblement sensible
F24	7	Faiblement sensible
F25	5	Faiblement sensible

F26	6	Faiblement sensible
F27	8	Faiblement sensible
F28	10	Faiblement sensible
F29	9	Faiblement sensible
F30	10	Faiblement sensible
F31	10	Faiblement sensible
F32	10	Faiblement sensible
F33	12	Faiblement sensible
F34	7	Faiblement sensible

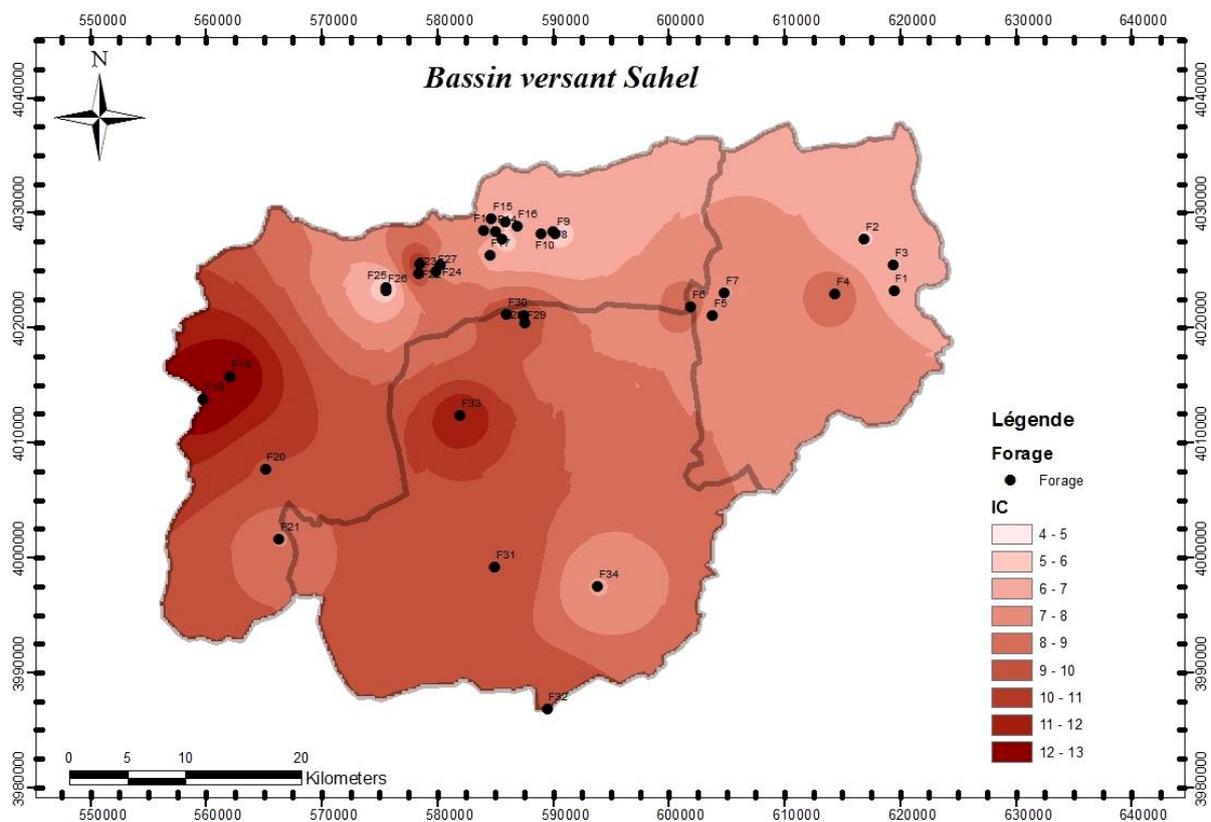


Figure IV.44: carte de la variation spatiale de l'indice de contamination des forages du bassin versant Sahel

L'analyse de la carte de contamination (figure IV.43) montre que toute l'eau du bassin versant est faiblement sensible à la pollution à l'exception de la partie ouest du bassin versant (F18 et F19) qui sont moyennement sensible à la pollution ce qui augmente la possibilité de la pollution de cette région.

IV.5. Conclusion

L'étude hydrochimique de la nappe du bassin versant de la région de Bouira permet de dire que :

Les classifications de Stabler, Schoeller-Berkaloff et Piper, ont montré que les faciès chimiques dominants sont celles bicarbonatés calciques et sulfatés calciques qui à été confirmée par l'étude de l'origine chimique par la relation entre les éléments majeurs.

Les cartes hydrochimiques, montrent une forte concentration en éléments chimiques dans la partie Nord, centre-nord Ouest et est de la nappe, à cause de l'influence de la lithologie des formations sur l'acquisition de la minéralisation et des engrais chimique de l'agriculture.

En fin, on peut dire que la majorité des eaux de la nappe du bassin versant Sahel ne sont pas destinées à l'AEP donc elles peuvent être destiné à l'irrigation ce qui est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V

V.1. Introduction

La qualité des eaux d'irrigation est un paramètre important à considérer, non seulement dans l'étude de l'impact direct sur les produits agricoles, mais aussi dans celle de l'impact indirect sur les sols par modification de leurs propriétés physique et chimique. L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes.

A cet effet et étant donné que la zone d'étude est à vocation agricole, une étude chimique des eaux pour l'irrigation est indispensable pour mettre en évidence le danger que peut présenter certains éléments chimiques pour les plantes et pour les sols. Cette étude chimique est basée sur des normes illustrées sur un diagramme utilisant le SAR et la conductivité électrique en tant que coordonnée de SAR établi par l'équipe du laboratoire américain de salinité.

V.2. Critères d'aptitude de l'eau à l'irrigation

Sept critères peuvent être utilisés pour déterminer l'aptitude d'une eau à l'irrigation :

V.2.1. RSC

Le carbonate de sodium résiduel (RSC), est un paramètre très important dans le contrôle de la qualité des eaux destinées à l'irrigation. Il conditionne fortement l'indice du SAR, et fait augmenter ce dernier quand il augmente, par les processus de fixation des ions carbonatés et bicarbonatés contenus dans l'eau aux ions calcium et magnésium pour précipiter. Ceci va augmenter la concentration en sodium, d'où une augmentation du SAR. La valeur du RSC, ainsi calculée, permet une classification en trois catégories des eaux souterraines (SALEY.A (2018)).

Le calcul du RSC pour tous les forages est illustré sur le tableau suivant :

Tableau V.1: résultat de RSC du bassin versant Sahel

Forages	RSC	Aptitude de l'eau à l'irrigation
F1	-4,71	eau de bonne qualité
F2	-2,79	eau de bonne qualité
F3	- 4,25	eau de bonne qualité

F4	-6,28	eau de bonne qualité
F5	-2,36	eau de bonne qualité
F6	-4,97	eau de bonne qualité
F7	-2,52	eau de bonne qualité
F8	-3,01	eau de bonne qualité
F9	-2,41	eau de bonne qualité
F10	-1,51	eau de bonne qualité
F11	- 1,06	eau de bonne qualité
F12	-1,82	eau de bonne qualité
F13	-4,89	eau de bonne qualité
F14	-4,89	eau de bonne qualité
F15	-5,23	eau de bonne qualité
F16	-5,23	eau de bonne qualité
F17	-4,12	eau de bonne qualité
F18	-9,56	eau de bonne qualité
F19	-8,76	eau de bonne qualité
F20	-5,67	eau de bonne qualité
F21	-4,27	eau de bonne qualité
F22	-7,20	eau de bonne qualité
F23	-3,56	eau de bonne qualité
F24	-4,15	eau de bonne qualité
F25	-1,57	eau de bonne qualité
F26	-2,25	eau de bonne qualité
F27	-4,81	eau de bonne qualité
F28	-3,03	eau de bonne qualité
F29	-4,01	eau de bonne qualité
F30	-5,23	eau de bonne qualité
F31	-3,53	eau de bonne qualité
F32	-17,88	eau de bonne qualité
F33	-4,61	eau de bonne qualité
F34	-0,96	eau de bonne qualité

D'après le tableau précédent (tableau V.2), on peut dire que les eaux du bassin versant Sahel sont de bonne qualité pour l'irrigation.

V.2.2. Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Ce critère met en évidence différentes classes d'eau par la méthode de Richard (CHAIB.W, BOUCHAHM.N, HARRAT.N, ZAHI.F, BOUGHERIRA.N et L. DJABRI (2013)).

Le diagramme de Riverside suivant illustre la classification SAR :

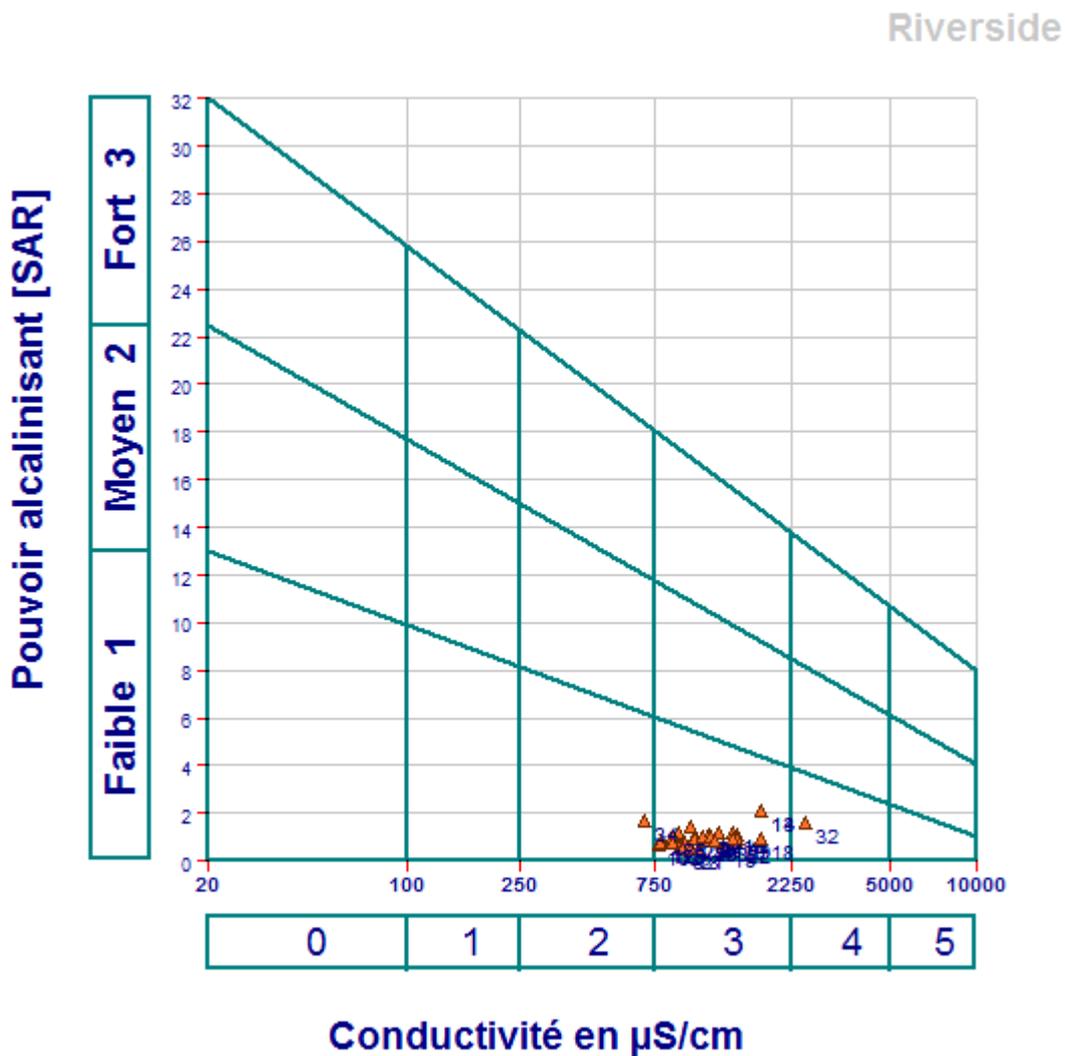


Figure V.1: diagramme de Riverside pour la classification des eaux d'irrigation en fonction de SAR

Après avoir reporté tous les points d'eau sur le diagramme de Richards on a pu dégager la présence des trois classes suivantes :

- C2S1 : cette classe représente l'eau de forage F34. Cette eau convient aux plantes qui présentent une légère tolérance au sel ;
- C3S1 : généralement, ces deux classes renferment des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée, la majorité des forages appartenant à cette classe (32 forages) qui se répartissent dans toute la région du bassin versant Sahel (figure V.2) ;
- C4S1 : elles représentent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Cette classe représente le forage F32 situé dans le sud de sous bassin d'Oued Zaiane.

La classification de Richards a prouvé un risque moyen à fort de salinisation liée aux eaux souterraines mais pouvant être utilisées avec un contrôle de salinisation.

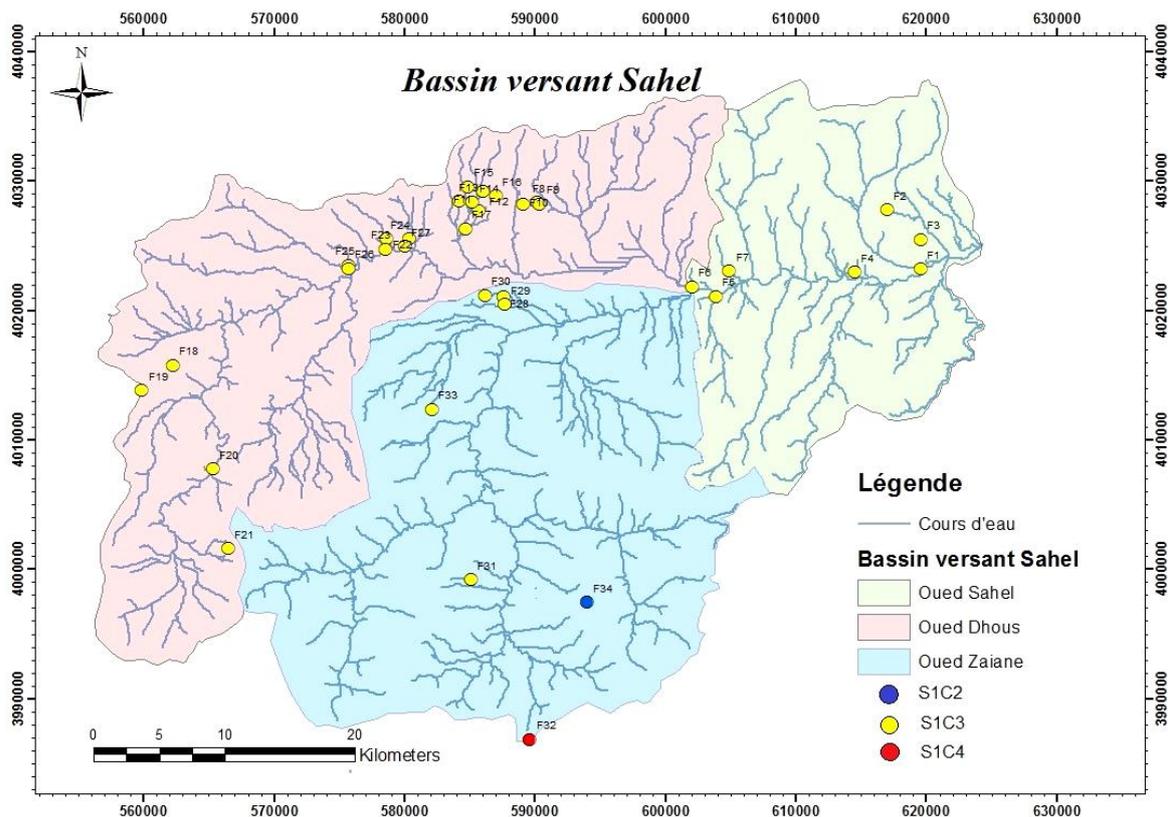


Figure V.2 : répartition spatiale du SAR des eaux du bassin versant Sahel de la wilaya de Bouira

V.2.3. Diagramme de Wilcox

Les eaux du bassin versant Sahel de la région de Bouira, projetées dans le diagramme de Wilcox (figure V.3), permet de constater une répartition de ces eaux en trois groupes (figure V.4) :

- Plus de 88% des eaux sont bonne, ce groupe prend en compte toutes les eaux issues du sous bassin Oued Sahel et une partie du sous bassin Oued Dhous et Oued Zaiane;
- Les eaux du forage F32, captant le sous bassin Oued Zaiane, sont considérées comme médiocre ;
- Enfin près 12% des eaux se présentent comme excellente, avec une tendance vers la classe bonne. Ceci concerne uniquement les forages se trouvant géographiquement dans la partie nord-centre et sud du grand bassin versant, à savoir les forages F10, F11, F12, F34.

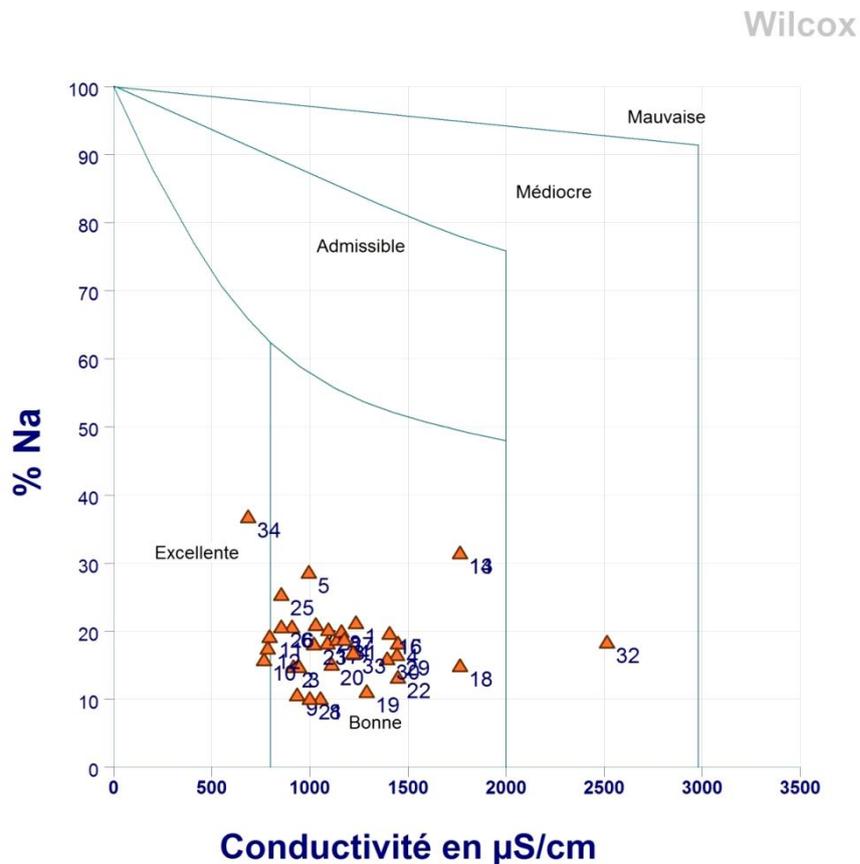


Figure V.3: pourcentage de sodium vs conductivité électrique dans le diagramme de Wilcox des eaux du système aquifère du bassin versant Sahel continental

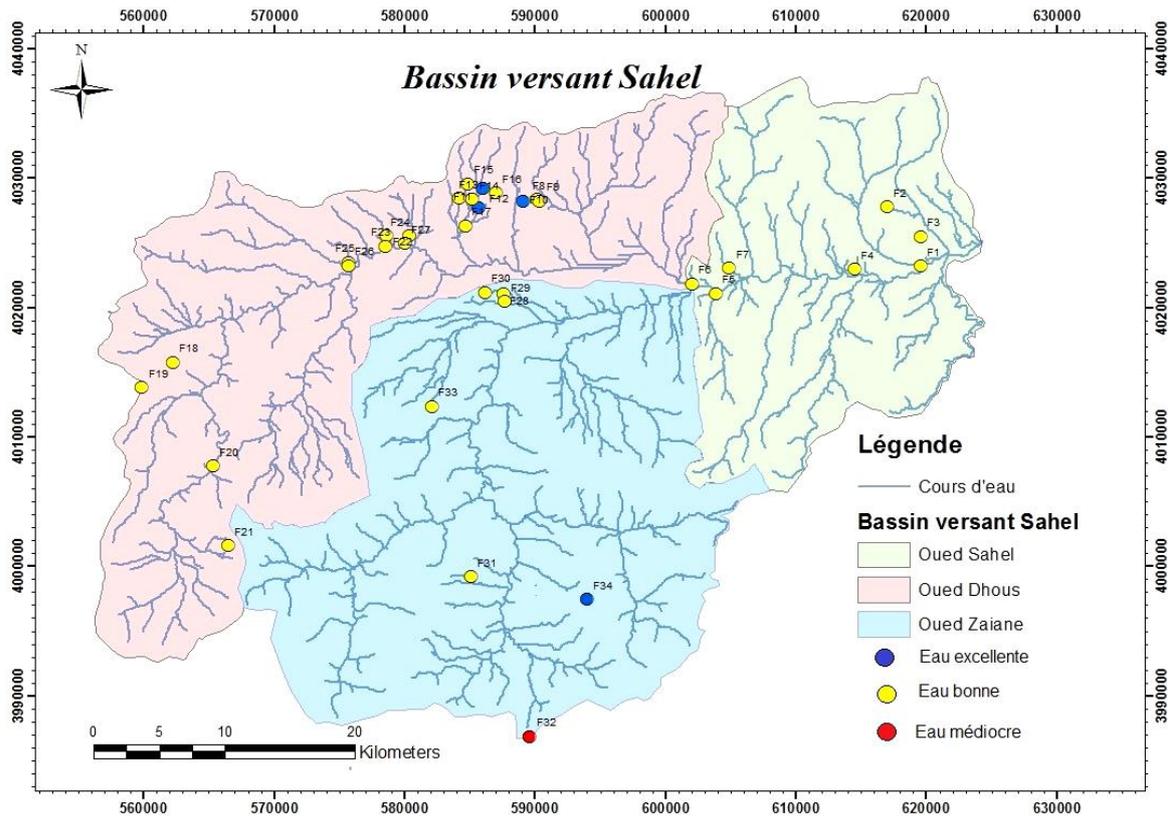


Figure V.4 : répartition spatiale des carbonates de sodium résiduel des eaux du bassin versant Sahel

V.2.4. Ratio d'absorption de magnésium

D'après l'histogramme suivant (figure V.5) on constate que 65% des eaux des forages ont une bonne qualité de l'eau qui ne pose pas de problèmes d'infiltration et le reste des forages ont une qualité moyenne qui peut être utilisé pour l'irrigation mais avec prudence.

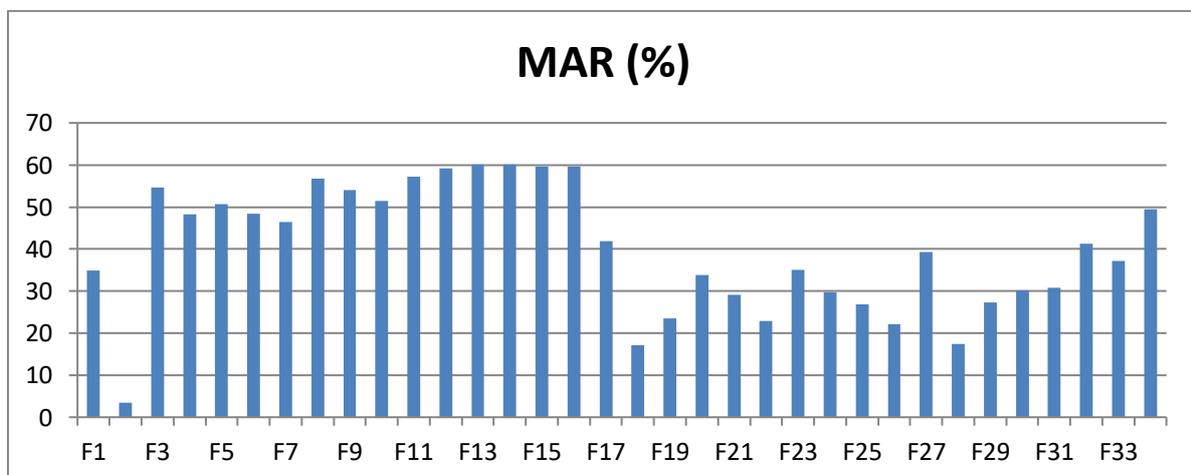


Figure V.5: histogramme de la variation de la valeur de MAR des eaux souterraines du bassin versant Sahel

L'analyse de la carte de la répartition spatiale de MAR (figure V.6) indique des valeurs de qualité moyenne (dans la partie centre et nord du bassin versant ($x = \ll 580\ 000 - 600\ 500 \gg$, $y = \ll 401\ 750 - 403\ 750 \gg$), est et sud-est) à cause de l'activité agricole de cette région qui influe sur la concentration de magnésium). Le reste des eaux souterraines du bassin versant Sahel se caractérise par une bonne qualité de l'eau à l'irrigation.

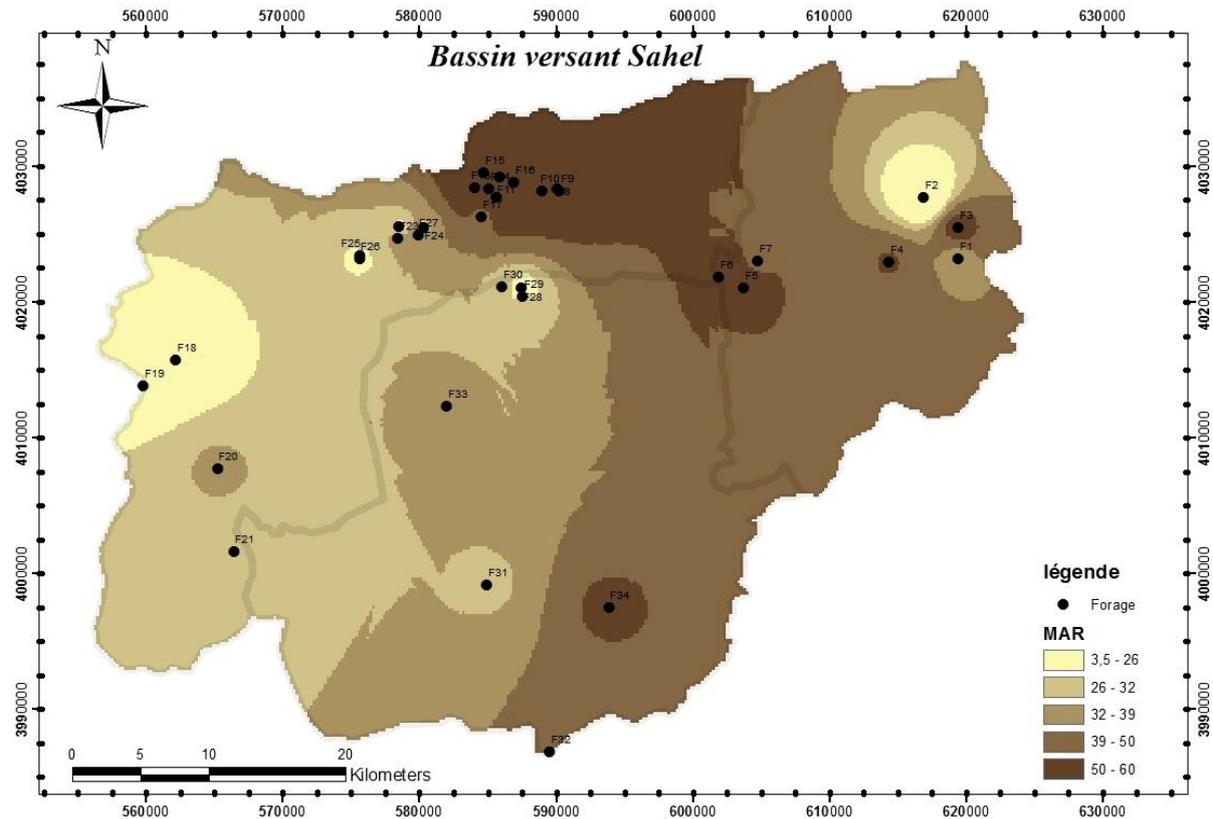


Figure V.6: carte de la répartition spatiale du MAR (%) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

V.2.5. Bicarbonate de sodium résiduel

L'histogramme suivant (figure V.7) montre une variation de moins de 5 méq/l de RSBC pour tous les eaux des 34 forages ce qui indique une bonne qualité de l'eau souterraines qui ne pose pas de problème de bicarbonate et calcium sur le sol à irrigué.

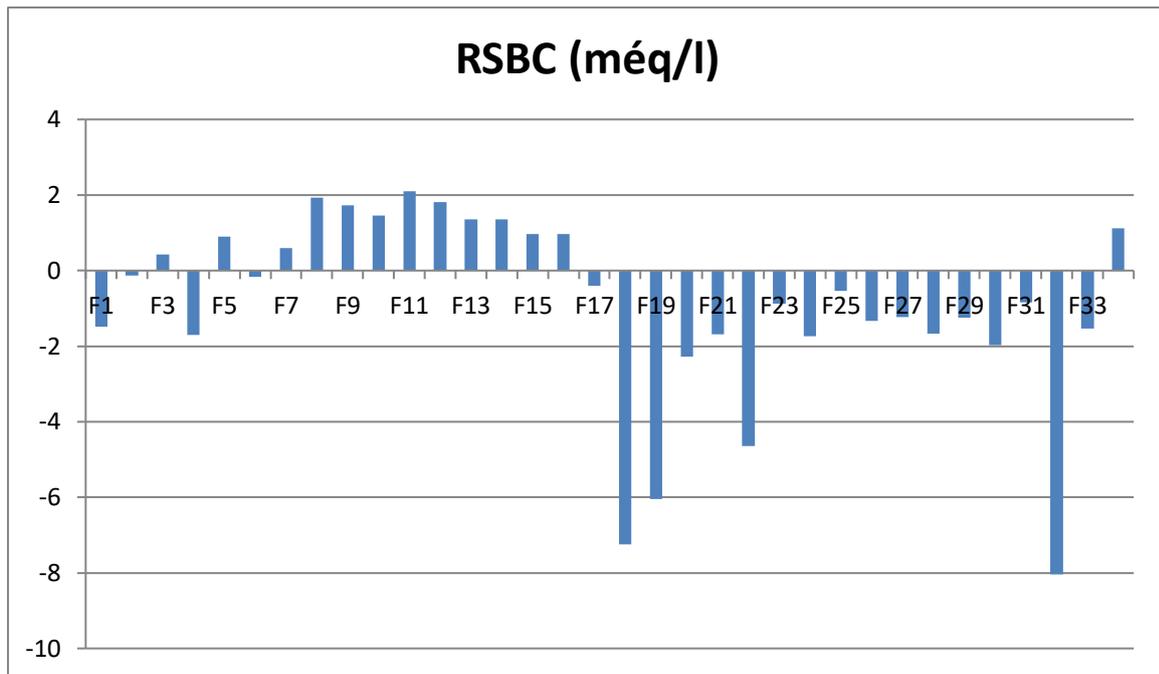


Figure V.7: variation de RSBC des eaux souterraines du bassin versant Sahel

La carte suivante (figure V.8) montre une qualité de l'eau souterraine de la région qui ne pose pas un problème d'irrigation sur le long de toute la surface du bassin versant.

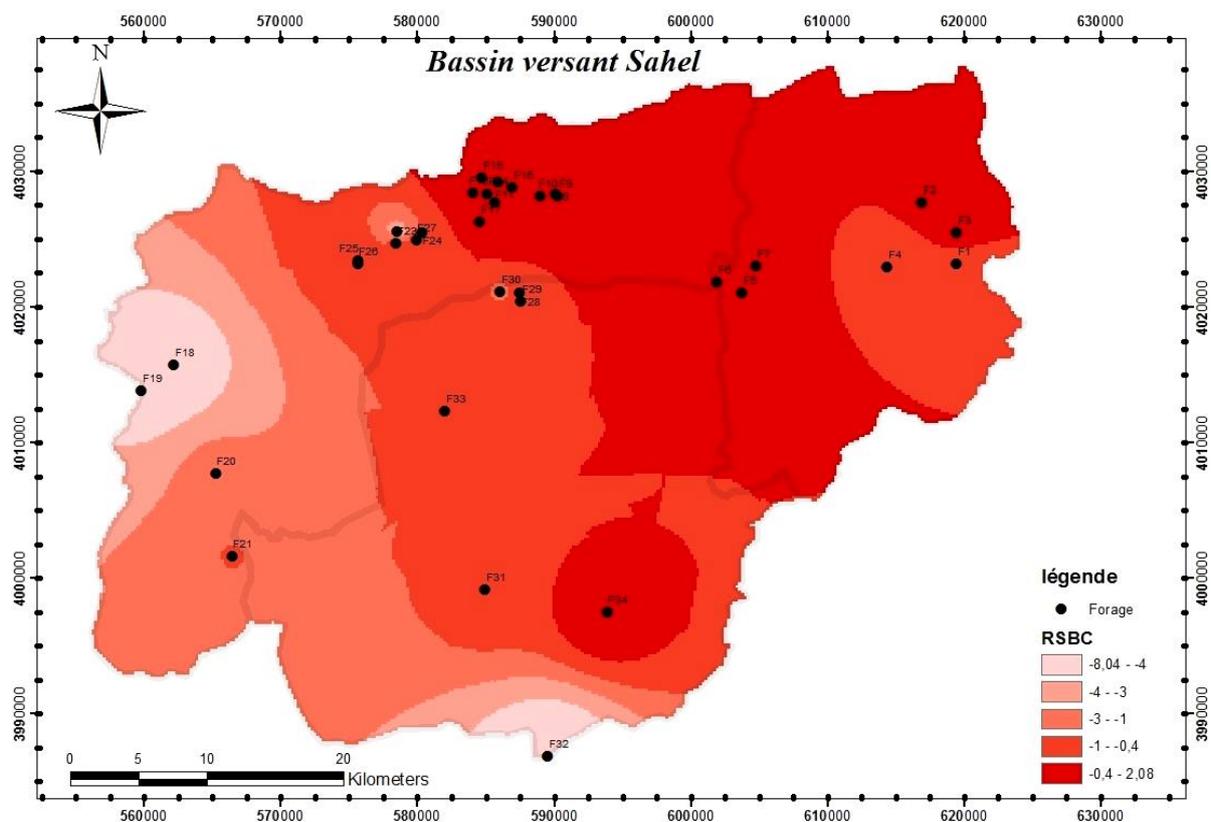


Figure V.8: carte de variation de RSBC (még/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

V.2.6. Indice de perméabilité

D'après l'histogramme suivant (figure V.9) on constate que toutes les eaux des forages on une qualité moyenne à l'irrigation à l'exception du forage F19 qui ne peut pas être utilisé pour l'irrigation et pose un grand problème de perméabilité de sol.

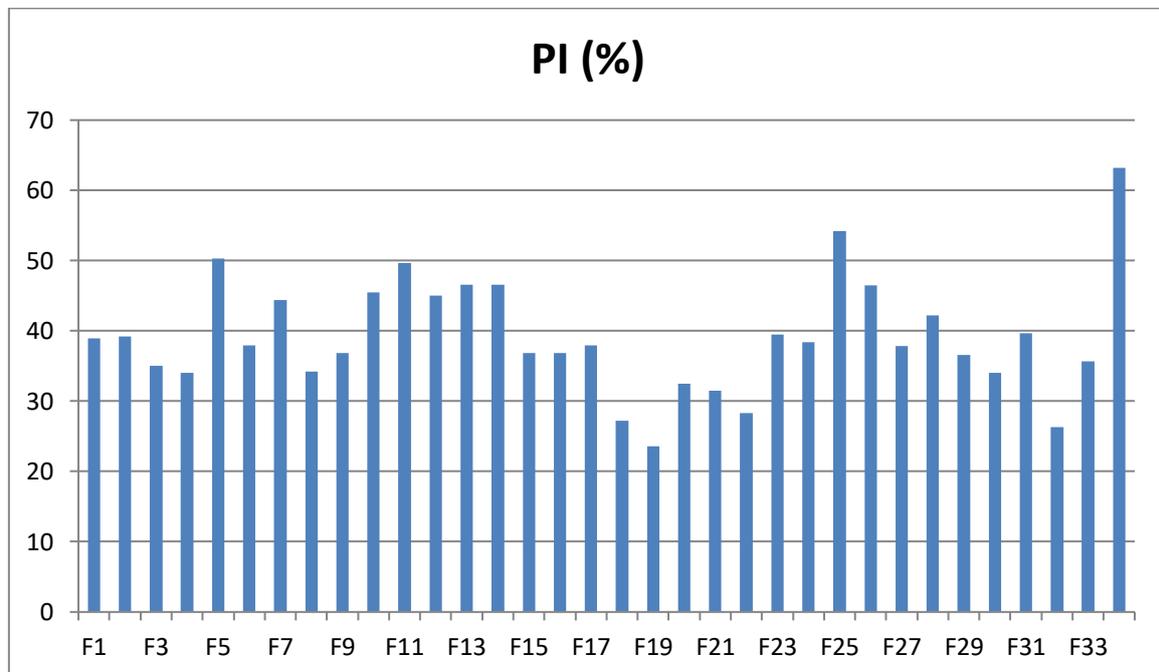


Figure V.9: variation des valeurs de PI des eaux de forages du bassin versant Sahel

L'analyse de la carte de l'indice de perméabilité (figure V.10) nous montre que :

- Les eaux souterraines de la partie ouest et sud du bassin versant Sahel indiquent un grand problème de perméabilité du sol ($PI < 25\%$) à cause des grandes concentrations des éléments de salinité (Na, Ca et Mg) qui augmentent en fonction de l'activité agricole du sol ;
- Les eaux souterraines des autres parties du bassin ne pose pas de problème de perméabilité de sol.

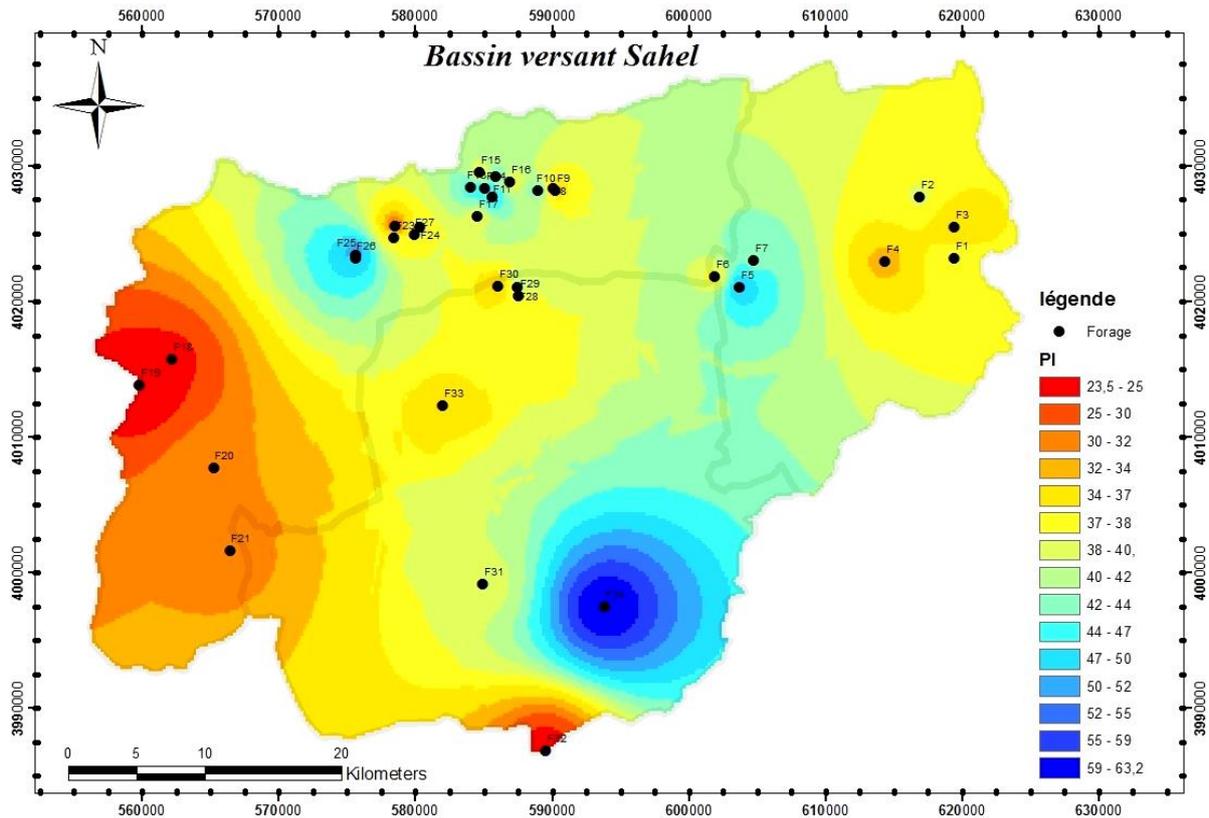


Figure V.10: variation de l'indice de perméabilité (en %) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

V.2.7. Indice de Stuyfzand

D'après la classification du tableau et l'histogramme suivant (figure V.11) on constate que :

- 24 forages (70,6%) se caractérisent par une eau fraîche ;
- 10 forages (29,4 %) se caractérisent par une eau fraîche saumâtre.

Les eaux des 34 forages étudiées peuvent utilisées en irrigation sans aucun problème de chlorure.

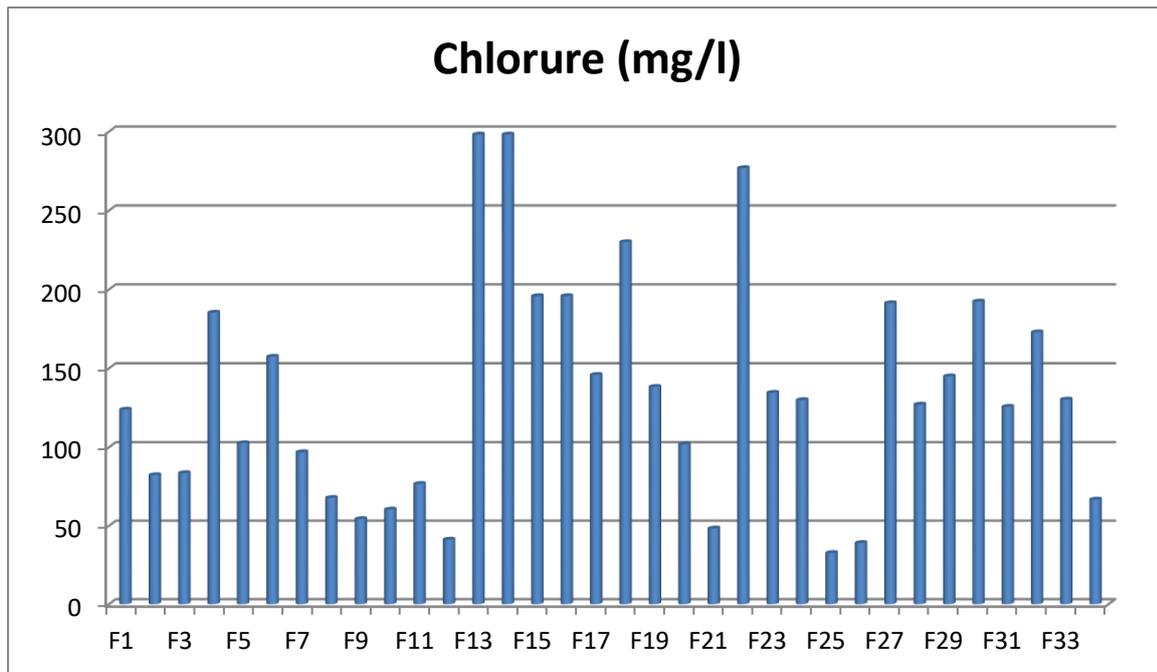


Figure V.11 : variation des valeurs de chlorure des eaux des forages du bassin versant Sahel

La carte suivante figure (V.12) la représentation spatiale du chlorure dans les eaux souterraines du bassin versant Sahel. On remarque que la classe des eaux fraîche saumâtre est dans les parties :

- Nord du bassin versant ($x = \ll 570\ 500 - 590\ 000 \gg$, $y = \ll 401\ 5000 - 403\ 2500 \gg$) ;
- Ouest du bassin versant ($x = \ll 560\ 750 - 550\ 500 \gg$, $y = \ll 401\ 2500 - 402\ 2500 \gg$) ;
- Est du bassin ($x = \ll 610\ 000 - 610\ 750 \gg$, $y = \ll 402\ 0000 - 402\ 50000 \gg$).

Tous ses points partagent une cause commune de l'élévation de cet indice, c'est les engrais des terrains agricoles (carte d'occupation du sol du bassin versant Sahel chapitre IV figure IV.43).

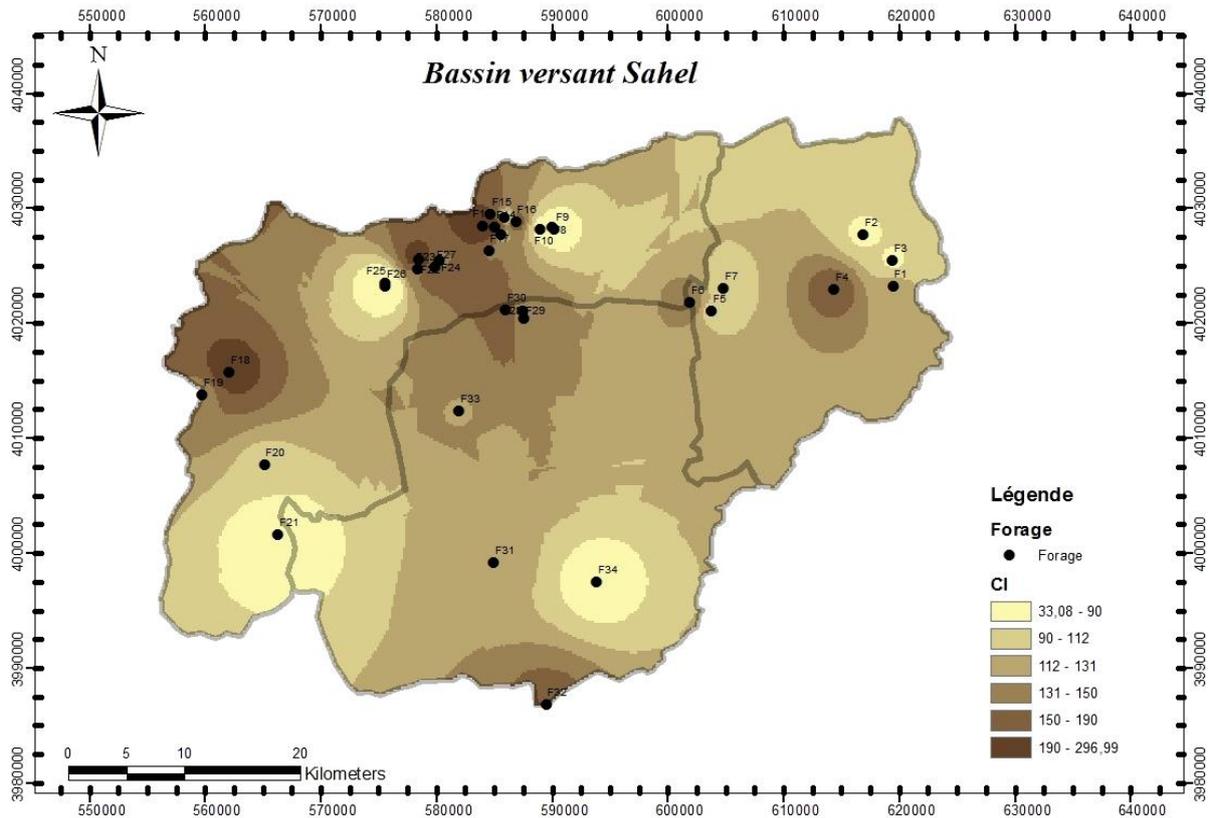


Figure V.12: carte de variation spatiale de chlorure (mg/l) des eaux souterraines du bassin versant Sahel

V.3. Conclusion :

Dans ce chapitre on a évalué l'aptitude des eaux souterraines du bassin versant Sahel à l'irrigation. L'évaluation a été faite par deux diagrammes (Wilcox et SAR) et plusieurs indices (RSBC, MAR, RSC, PI et indice de stuyfzand).

L'interprétation de ces paramètres nous a permis de constater que les forages de cette région peuvent être utilisés pour l'irrigation à l'exception du forage F19 qui influe sur la perméabilité des sols à irriguer.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Notre étude est portée sur le champ captant du bassin versant Sahel, c'est l'une des principales ressources hydriques qui alimente la wilaya de Bouira en matière d'eau potable et d'irrigation. Cette étude a été faite sur 34 points d'alimentation de l'année 2016 étalés sur toute la surface du bassin versant.

L'étude hydrochimique nous a montré une classification variable des eaux des 34 forages qui est réparti en deux faciès : bicarbonatée calcique et magnésienne, Chlorurées et sulfaté calcique et magnésienne.

Suite à l'évaluation de la qualité physico-chimique de ces eaux, on constate que 74% des forages ne répondent pas aux normes de potabilité de l'eau par l'OMS seuls les forages : F2, F7, F5, F10, F11, F12, F23, F25, F26, F34 qui se caractérisent par leurs bonne qualité et ils n'ont subit aucune contamination et peuvent être consommé sans aucun risque.

D'après l'analyse des cartes spatiales des différents éléments chimiques, on remarque que la pollution de la nappe du bassin versant Sahel est concentré dans les parties : Nord-centre, Ouest, Est et Sud du bassin.

La corrélation linéaire entre les éléments chimiques et l'indice de saturation ont prouvé l'origine :

- Calcite et dolomite des cations Ca^{2+} et Mg^{2+}
- Gypsifère des ions Ca^{2+} et SO_4^{2-}
- Salifère des ions Mg^{2+} et SO_4^{2-}
- Evaporite de l'anion SO_4^{2-}

La carte d'occupation du sol de l'ensemble du bassin versant Sahel de la région de Bouira a montré plusieurs autres origines des concentrations élevées des ions, La plus courante est les engrais chimiques qui sont dues à la vacation agricole de cette région. On remarque ainsi à travers cette carte des concentrations élevées au niveau des décharges publiques et des zones d'agglomération (rejets urbains).

D'après la carte de vulnérabilité des eaux souterraines de notre région d'étude à la pollution réalisée par les indices de contamination (IC), on constate pour la plupart des eaux

souterraines une faible vulnérabilité à la pollution à l'exception des forages F18 et F19 qui sont moyennement sensible à la pollution.

Pour la partie aptitude des eaux à l'irrigation, l'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes des les indices : MAR, PI, RSBC, RSC, stuyfzand, SAR et le diagramme de Wilox a montré une qualité bonne à moyenne des eaux de l'aquifère du bassin versant Sahel à l'exception des eaux du forage F19 qui présentent un risque d'imperméabilité de sol.

Pour conclure, on peut dire que plus de 70% des eaux souterraines du bassin versant Sahel utilisées pour la consommation en eau potable sont destinées que pour l'irrigation à l'exception du forage F19 situé dans la partie ouest du bassin versant Sahel.

Enfin on peut dire que, la qualité des eaux souterraines dépend fortement de la qualité des eaux de surface (rivières, plans d'eau, etc.) qui les alimentent. Contribuer à la préservation des nappes, c'est d'abord limiter l'utilisation, en surface, des engrais chimiques qui font contaminer les nappes par infiltration, et arrêter leur épandage à la surface du sol. La protection des eaux souterraines dépend en premier lieu du bon entretien des forages, susceptibles de provoquer des contaminations directes, et de la bonne gestion des prélèvements d'eau qui sont effectués par leur intermédiaire. Mais tous les acteurs du bassin versant sont concernés et doivent s'impliquer dans une gestion globale des ressources en eau. Complétée par une réglementation spécifique, cette gestion globale permet la préservation des eaux souterraines.

REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE

Référence bibliographique

- [1] : SALEY.A (2018) : Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques, thèse de doctorat entre l'Université Paris-Saclay et l'Université Abdou Moumouni.
- [2] : ASHLEY, E. A., M. DHORDA, et AL : (2014) : "Spread of artemisinin resistance in Plasmodium falciparum malaria." *New England Journal of Medicine* 371(5): 411-423.
- [3] : Ayers, R. S. and D. W. Westcot (1985): *Water quality for agriculture*, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- [4] : BELKACEM.M (2016) : estimation des paramètres hydrodynamiques de la nappe d'Ain Djasser W. Batna. Mémoire de master ENSH.
- [5] : BENALLOU. A, (2004) : Analyse physico-chimique des effluents provenant de la laiterie d'Arib. Centre université de Khemis Miliana.
- [6] : BENANDELOUAHID.H (2018) : Balance ionique d'une eau de puits projet de fin d'étude de licence Science et technique génie chimique univ Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès.
- [7] : BOUDIAF.A, HERVE.P, COUTELLE.A et RITZ.J (1999) : découverte d'un chevauchement d'âge quaternaire au sud de la grande Kabylie (Algérie), *Geodinamica Acta* (Paris), 12, 2, 71-80
- [8] : BOUGHAZI.S (2018) : gestion de la ressource en eau du système hydraulique maomacta, école nationale supérieure d'hydraulique ARBAOUI Abdellah, Blida.
- [9] : BOUSELSAL.B., KHERICLI.N, HADJ-SAID.S et BELKSIER.S (2015) : Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale. Cas des eaux des aquifères D'El-oued (SE Algérie). *IJE, Global Climate Change*. Volume, 2-Issue 3, 1014.
- [10] : CHIKHI.T (2016) : Modélisation de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Sahel mémoire master académique université M'sila.
- [11] : CHAIB.W, BOUCHAHM .N, HARRAT.N, ZAHIF , N BOUGHERIRA et L. DJABRI (2013): caractérisation hydrogéochimique des eaux géothermales de la nappe du

continental intercalaire de la région de l'oued righ, Journal Algérien des Régions Arides N°spécial 2013.

[12] : DESBORDES.A (2000) : pollution des eaux souterraines en Picardie. Mém. Maitrise B.G, Fac.Science Amiens, 46P.

[13] : Description (2020) : fr.freedownloadmanager.org.

[14] : HADEF.D (2017) : étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'oued de Boutane région de Khemis-miliana w. Ain Defla mémoire master, univ Khemis-Miliana.

[15] : Etude de la direction départementale des affaires sanitaires et sociales (DDASS) (2008): l'eau potable en France.

[16] : EATON, F. M. (1950): "Significance of carbonates in irrigation waters." Soil science 69(2): 123- 134.

[17] : FORGES.M (1972): Irrigation et salinité. CIHEAM, options méditerranéennes. Pages 40-45.

[18] : GLEIK, P.H (1996) : Water ressources.In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. By S.H.Scheinder, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.

[19] : GOUAIDIA.L (article 2017) : origine de la minéralisation des eaux souterraines d'un aquifère dans une zone semi-aride, cas de la nappe de la Merdja, nord -est Algerien.

[20] : GOUAIDIA.L, GUEFAIFIA.O, BOUDOUKHA.A, ET HEMILA.M. L. (2013) : Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risque de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana, Nord-Est Algérien. Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales, 37, 1 : 81-92.

[21] : GOUAIDIA.L ,MS LAOUAR , DEFAFLIA.N et ZENATI.N (2017) : origine de la minéralisation des eaux souterraines d 'un aquifère dans une zone semi - aride, cas de la nappe de la merdja, nord - est algerien. Article International Journal of Environment & Water ISSN 2052-3408.

[22] : GUILLEMIN. C et ROUXJ.C (1992) : la pollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes n°23.

- [23] : GUPTA.I and A.KSIENSKI (1983): "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 31(5): 785-791.
- [24] : HADEF.D (2017) : étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'oued de Boutane région de Khemis-miliana w. Ain Defla mémoire master, univ Khemis-Miliana.
- [25] : HAISSOUNE.A et IDHSSAINE.A (2013) : caractérisation de la qualité des eaux superficielles et souterraines du bassin de N'FIS, univ CADI AYYAD, mémoire de licence.
- [26] : HAISSOUNE.A (2013) : caractérisation de la qualité des eaux superficielles et souterraines du bassin de n'fis. Mémoire de licence, univ CADI Ayyad.
- [27] : BEAUCHAMPS.J (2006) : cours qualité et pollution des eaux souterraines, univ Picardie Jules Vernes.
- [28] : KHELOUFI.B (2019): étude d'une retenue collinaire et son impact environnemental sur oued El Maled mémoire master.
- [29] : Kouassi AM, Ahoussi KE, Koffi YB, Aké AY, Biémi.J (2012): Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences.
- [30] : L.MOUNI et K.MOUSSACEB (2009) : article étude et caractérisation physico-chimique des eaux de l'oued Soummam.
- [31] : MAHAMAT.B, BESKRI.A (2010) : Caractéristique physico-chimique des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana, Mémoire fin d'étude. Centre université de Khemis Miliana.
- [32] : MAKHOUKH.M (2011) : Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya. Maroc.
- [33] : MARGAT J (1985), article : conservation et protection des eaux souterraines dans les pays développés.
- [34] : MARGAT. J (1994) : L'eau: l'or bleu du XXI^e siècle. Le Coumer de la planète, 7.
- [35] : MILLER, R. W. and R. L. DONAHUE (1995): Soils in our environment, Prentice hall.

- [36] : NDEMBO.L (2009) : apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du mont AMBA. Thèse de doctorat Univ d'Avignon France.
- [37] : OLLAGNIER.S, VITTECOQ.B (2007) : Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006 : Résultats et interprétation.
- [38] : Proceedings of the Moscow Symposium, August (1971); Actes du Colloque de Moscou, Août 1971): IAHS-AISH Publ. No. 103, 1975.
- [39] : RAHMANI.B (2016) : approche hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines dans la zone semi aride. Cas de la nappe moi-plio-quaternaire du synclinal de Djelfa (Algérie centrale). Mémoire de Magister univ Larbi Tebessi.
- [40] : RAHMAN.W and D. Rowell (1979). "The influence of magnesium in saline and sodic soils: a specific effect or a problem of cation exchange?" European Journal of Soil Science 30(3): 535- 546.
- [41] : RHOADES, J. and D. MERRILL (1976) : "Supervisory Soil Scientist and Physicist US Salinity Laboratory." FAO Soils Bulletin (31).
- [42] : RICHARD.L (1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook, vol 60. USDA, Washington, DC, p 160.
- [43] : SANDAO.I (2013) : Etudes hydrodynamique, Hydrochimique et Isotopique des eaux souterraines du bassin versant de la Korama/ Sud Zinder, Niger : Impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niger.
- [44] : SAXENA.R, B. F. VOIGHT, et AL. (2007): "Genome-wide association analysis identifies loci for type 2 diabetes and triglyceride levels." Science 316(5829): 1331-1336.
- [45] : SIMLER.R (2012) : manuel pour diagramme.
- [46] : SKENDRAOUI.H (2018) : cartographie de la potabilité et de l'aptitude à l'irrigation des eaux de la nappe quaternaire de Magra (w. M'sila). Mémoire master école nationale supérieure d'hydraulique ARBAOUI Abdellah.
- [47] : SUAREZ DL, WOOD JD, LESCH SM., (2006): Effect of SAR on water infiltration under a sequential rainirrigation management system. Agric water Manage; 86:150-64.

- [48] : TRAVI.Y. et MUDRY.J. (1997) : Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest
- [49] : UNIES.N (1992) : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. New York, 9.
- [50] : VINCENT.G (2016) : cours introduction à la programmation en R,École d'actuariat, Université Laval.
- [51] : YEBDRI.D (2007) : Contribution à la gestion des ressources en eau superficielle du bassin versant de la Tafna. Journal de l'eau africain (1), 33-47.
- [52] :Wilson.S et DAVIDSON.P (2011) : Groundwaters of Marlborough, édition illustrée, éditeur: Marlborough District Council,.
- [53] : ZERDANE.D (2013) : étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Bouira mémoire de Magister Univ USTHB Algérie.
- [54] : 5eme module informatique, cours (2020) : présentation de logiciel d'analyse de données statistiques SPSS, univ ferhat ABBAS setif1, faculté de médecine.