



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة باجي مختار - عنابة
Université Badji Mokhtar - Annaba

Faculté des Sciences
Département de Biologie
Laboratoire Sol et Développement Durable

Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques

Option : Biologie Végétale

Intitulée :

**Etude géochimique des eaux des principales mares du complexe
humide Guerbès-Sanhadja (Wilaya de Skikda)**

Présentée par : Mme HADJOUJJA Nawel

Devant le jury composé de :

Président : Pr. BENSLAMA Mohamed (Université Badji Mokhtar-Annaba)

Directeur de thèse : Pr. DJAMAI Rachid (Université Badji Mokhtar-Annaba)

Examineur : Pr. LAIFA Aziz (Université Badji Mokhtar-Annaba)

Examineur : Pr. ALAYAT Hacène (Université Chadli Bendjedid - El-Tarf)

Examineur : Pr. HOUHAMDI Moussa (Université 8 mai 1945 - Guelma)

Examineur : Pr. LABAR Sofiane (Université Chadli Bendjedid - El-Tarf)

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier de nombreuses personnes qui sans leur collaboration, je n'aurai jamais pu réaliser ce travail.

*Je tiens à remercier le Professeur **Djamai Rachid** pour son encadrement, ses nombreux conseils, son soutien tout au long de mon travail, pour la confiance qu'il m'a témoigné et pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de diriger ce travail. Je le remercie également pour m'avoir initié dans le domaine de la recherche scientifique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour toute l'attention, la patience et le temps qu'il m'a consacré, malgré ses lourdes responsabilités et ses nombreuses préoccupations et surtout pour son soutien moral, je lui dis « MERCI ».*

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres de jury, qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail et l'évaluer, pour leurs remarques judicieuses qui m'ont permis d'avoir plus de recul sur cette étude.

*Mes vifs remerciements vont au Professeur **Benslama Mohamed**, de l'université d'Annaba, pour avoir accepté de me faire le grand honneur de présider le jury de ma soutenance de thèse.*

Mes vifs remerciements vont également aux autres membres du jury :

*Le Professeur **Alayat Hacène** de l'université Chadli Bendjedid d'El-Tarf pour avoir accepté d'évaluer ce travail en tant que membre examinateur du jury.*

*Le Professeur **Houhamdi Moussade** l'Université 8 mai 1945, Gulema qui a accepté de participer en tant que membre examinateur du jury pour juger ce travail.*

*Le Professeur **Labar Sofiane** de l'université Chadli Bendjedid d'El-Tarf pour avoir examiné cette thèse, je le remercie vivement.*

*Le Professeur **Laïfa Aziz** de l'université Badji Mokhtar d'Annaba pour l'honneur qu'il me fait d'examiner ce travail.*

Remerciements

*Mes sincères remerciements vont également au Professeur **Fadel Djamel** que j'ai eu l'honneur d'avoir comme encadreur pour mon mémoire d'ingénieur et ma thèse de magistère.*

Je tiens également à remercier le staff du département de Biologie et l'ensemble des collègues et amis du laboratoire de recherche « sols et développement durable » de l'Université de Annaba.

*Merci infiniment à **Mr Kheroufi Nacir** et à la circonscription des forêts de Azzaba et de Ben Azzouz pour leur aide sur le terrain.*

*Merci à mes collègues **Dr Fekrache Fadila**, **Mr Boushaba Abderezak** et **Mr Hadeif Azedine** de l'université du 20 août de Skikda pour l'aide précieuse qu'ils m'ont donnée.*

*Un merci particulier à ma collègue **Ksentini Hana** de l'université d'Annaba.*

Dédicaces

Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu ,il est naturel que ma pensée la plus forte aille vers **mes parents** à qui je dois la vie et en témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation. Qu'ils sachent que l'amour qu'ils me donnent continue à m'animer et me permet d'envisager l'avenir comme un défi. Merci pour leurs sacrifices leurs encouragements et leurs affections.

A ma très chère mère Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Je t'aime maman Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A mon très cher père

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une longue et heureuse vie.

Pourriez-vous trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et tous de vos efforts. En ce jour, j'espère réaliser l'un de vos rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, en particulier mes frères Mehdi et Nassim et ma très chère sœurs Yasmine des frères et sœur comme on ne peut trouver nulle part ailleurs, pour leur affection, compréhension et patience. Puisse nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

Aucune dédicace ne peut exprimer la profondeur des sentiments fraternels et d'amour, d'attachement que j'éprouve à votre égard. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection en souvenirs de notre indéfectible union qui s'est tissée au fil des jours. Puisse dieu vous protéger, garder et renforcer notre fraternité

A mon très cher époux

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à mon époux Qui n'a jamais cessé de me soutenir pour que je puisse finir mes études et avoir une bonne formation et surtout être la meilleur et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes gratitude.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement à toi. Depuis que je t'ai connu, tu n'as cessé de me soutenir et de m'épauler. Tu me voulais toujours le meilleur. Ton amour ne m'a procuré que confiance et stabilité. Tu as partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, aux moments les plus difficiles de ma vie, tu étais toujours à mes côtés, Je te remercie de ne m'avoir jamais déçu. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect. Je remercie le bon dieu qui a croisé nos chemins. Puisse le bon dieu nous procure santé et longue vie.

A ma belle-famille

Ma belle-mère "ma Bariza" et ma belle-sœur khadidja qui est devenu une sœur à présent vous m'avez accueilli les bras ouverts. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon grand respect et mon estime envers vous. Pour vos conseils et votre soutien moral. sans oublier Taha ,Kenzi et le petit bout de choux Mehdi J'implore dieu qu'il vous apporte bonheur et santé .

A ma tante Nadjet et mes très chères cousins.

A une famille au sein de laquelle je me suis toujours senti chez moi et qui m'ont toujours considéré comme un des leurs avant et surtout durant toutes les années d'études. Les expressions me trahissent, et ne peuvent exprimer mon attachement, mon amour et ma gratitude pour vous. Qu'il me soit permis de vous exprimer à travers ce travail, mon respect et ma vive reconnaissance.

A mon cher cousin Hichem ,son épouse Sihem , ma chère cousine Nelly et son époux Karim ainsi que mon cousin Mohamed et sa femme Meriem merci de m'avoir aidé inlassablement, j'espère que cet œuvre pourra vous exprimer mon profond respect .

A mes petits cœurs : Racim, Ounssousa,Iheb,Hanine,Safia ,Raslan,Acil et said

A mon regrette oncle AissaSaid ,

Tonton "SI Said " Comment t'oublier ?ta bonté reste encore gravée dans ma mémoire, j'imagine quelle serait ta joie aujourd'hui, j'aurai voulu que tu assiste à l'aboutissement de ces années de dur labeur qui ont débuté sur le bureau que tu m'as installé dans la chambre qui m'a accueilli chez toi, merci Tonton, Dieu en a décidé autrement. Que Dieu t'accorde la paix éternelle et t'accueille dans son paradis.

Oncle Hamid

Je ne trouverai jamais l'expression forte pour vous exprimer mon affection. Trouvez ici l'assurance de mon profond respect et de mon fidèle attachement ainsi que ma reconnaissances pour ton aide précieuses tout au long de mon travaille sur le terrain merci.

A mes tantes

Qu'il me soit permis de vous exprimer à travers ce travail, mon respect et mon affection.

A la mémoire de mes grands-parents oncles et tante que vous reposiez dans le paradis du seigneur

Dédicaces

A la mémoire de Tonton Mohamed qui m'a aidé et encouragé durant des années et qui a son tour nous a quitté, merci pour tous repose en paix. Je dédie ce travail a tata Fela, Toufik ,Magda et les petits Aris et Sabil ,a Nora Lydia ,Lotfi sans oublier Reda et Tarek

A mes amies Rym, Lyly, Djamila, Karima, Meriem, Hana, Ahlem,,Dalila. Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes penées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont accompagnée soutenue et qui ont participé de près ou de loin pour que ce travail de doctorat voie enfin le jour.

A toute ma famille et tous mes amis ; A tout ce que j'aime et qui m'aime ... Je dédie ce travail.

Il me serait difficile de vous citer tous, vous êtes dans mon cœur, affectueusement.

ملخص

سهل قرباز هو منطقة ساحلية في شمال شرق الجزائر ،خصائصها الجيولوجية المرتبطة بمناخ البحر الأبيض المتوسط أدت إلى تهيئة ظروف مواتية لتخزين مخزون كبير من المياه.

لإدارة جيدة لهذه المياه، سيكون من الضروري فهم جيد لطريقة تشغيل طبقات المياه الجوفية.

تُظهر الدراسة الهيدروكيميائية لطبقات المياه الجوفية في سهل Guerbès أن المياه تحتوي على سحنة كلوريد الصوديوم. أما التمدن القوي الذي لوحظ في الجزء الجنوبي ، فيعود في نفس الوقت إلى الجيولوجيا وإلى أصل بشري (أنشطة زراعية ، مياه الصرف الصحي ...) وبمرور الوقت ، زادت محتويات النترات لتصل إلى قيم تتجاوز معايير القابلية للشرب (44ملغ / لتر) تصل إلى حد أقصى يبلغ حوالي 96.96 ملغ / لتر.

تم تنفيذ نهج متعدد التخصصات دمج الجيولوجيا والمناخ والكيمياء الجيولوجية والتحليل الإحصائي متعدد المتغيرات لتمييز العمليات والعوامل التي تسيطر على اكتساب تمعدن المياه في مجمع قرباز-سناهجة الرطب. الهدف من دراستنا هو تجميع البيانات الفيزيائية الكيميائية وتفسيرها باستخدام العديد من تقنيات الدراسات وطرق العرض:

توضح المخططات البيانية التي تصف التركيب الكيميائي للمياه ، بما في ذلك الرسم البياني Durov Piper ومخطط Stiff ، أفضل الأيونات السائدة. يوضح إسقاط نتائج التحليلات في هذه الرسوم البيانية اثنين من الوجوه الكيميائية: كلوريد الصوديوم.

من أجل شرح آليات اقتناء المعادن، استخدمنا برنامج "Diagramme" الرسم البياني " لتحديد مؤشرات التشبع (IS) لبعض المعادن المحددة والتي تجعل من الممكن تقييم تشبع الماء فيما يتعلق من المعادن المختلفة وتم إضافة الرسم البياني ريتشاردز لتصنيف مياه الري، وهذه المياه مقبولة بشكل عام لري المحاصيل التي تتحمل الملوحة في التربة المصروف جيدا.

يتم تحديد محتوى الصوديوم لمياه الري بواسطة SAR والتي تعتبر معلمة مهمة جدا ويعبر عن محتوى الصوديوم أو الخطر القلوي لتقدير نوعية المياه المستخدمة لأغراض الري.

تحليلات عاملية على وجه الخصوص في تحليل العناصر الأساسية (ACP)، والتي تسمح لنا بمراقبة العلاقات بين المتغيرات والعينات المختلفة ولكن أيضًا العلاقة بين الأفراد والعوامل وبين المتغيرات والعوامل.

الكلمات المفتاحية: الجيوكيمياء، القلوية، المياه، المستنقعات الرطبة، البرك، قرباز - سناهجة

Abstract

The plain of Guerbes is a coastal region of North-East Algeria, its characteristics the geological conditions associated with the Mediterranean climate have led to the establishment of favorable conditions for the storage of a large water reserve. For a good management of these waters, it will be necessary to have a good understanding of the mode of operation of aquifers.

The hydrochemical study of the water tables in the Guerbès plain show that the waters present a chloride-sodium facies. As for the strong mineralization observed in the southern part, it would be due at the same time to the geology and to an anthropic origin (agricultural activities, waste water ...). Over time, the nitrate contents have increased reaching values which exceed the drinkability standards (44mg / l) reaching a maximum of around 96.96mg / l.

A multi-disciplinary approach integrating geology, climate, geochemistry and multivariate statistical analysis was undertaken to characterize the processes and factors that control the acquisition of water mineralization at the Guerbes-Sanhadja wet complex. The objective of our study is to synthesize the physicochemical data and to interpret them using several techniques of studies and methods of presentation:

Diagrams describing the chemical composition of the waters, including the Durov, Piper diagrams and the Stiff diagram, had better demonstrate the dominant ions. The projection of the results of the analyzes in these diagrams shows two chemical facies chloride-sodium.

In order to explain the mechanisms of mineralization acquisition, we used the "Diagram" software to determine the saturation indices of some specific minerals and which make it possible to evaluate the saturation of the water with respect to of different minerals and the Richards diagram for the classification of irrigation water has been added, these waters are generally acceptable for the irrigation of salt-tolerant crops on well-drained soils.

The sodium content of irrigation water is determined by the SAR, which is considered a very important parameter it expresses the sodium content or the alkaline hazard for the determination of the quality of water used for irrigation purposes.

Factorial analyzes with in particular the PCA (Principal Component Analysis), which allow us to observe the relationships between the different variables and samples but also the correlation between individuals and factors and between variables and factors.

Key words: geochemistry, alkalinity, waters, ponds wetlands, Guerbes-Sanhadja

Résumé

La plaine de Guerbès est une région côtière du Nord-Est algérien, ses caractéristiques géologiques auxquels s'associe le climat méditerranéen ont permis l'installation des conditions favorables à l'emmagasinement d'une réserve d'eau importante. En vue d'une bonne gestion de ces eaux, il faudra une bonne compréhension du mode de fonctionnement des aquifères.

L'étude hydrochimique des nappes de la plaine de Guerbès montrent que les eaux présentent un faciès chloruré-sodique. Quant à la forte minéralisation observée dans la partie Sud, elle serait due à la fois à la géologie et à une origine anthropique (activités agricoles, eaux usées...). Dans le temps, les teneurs en nitrates ont augmenté atteignant des valeurs qui dépassent les normes de potabilité (44mg/l) atteignant un maximum de l'ordre de 96,96mg/l.

Une approche pluridisciplinaire intégrant la géologie, le climat, la géochimie et une analyse statistique multi variable a été entreprise pour caractériser les processus et les facteurs qui contrôlent l'acquisition de la minéralisation des eaux du complexe humide Guerbès-Sanhadja. L'objectif de notre étude est de synthétiser les données physico-chimiques et les interpréter en utilisant plusieurs techniques d'études et méthodes de présentation :

Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi lesquels les diagrammes de Piper de Durov ainsi que le diagramme de Stiff, démontrent mieux les ions dominants. La projection des résultats des analyses dans ces diagrammes montre deux faciès chimiques chloruré-sodique.

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel « Diagramme » pour déterminer les indices de saturation (IS) de quelques minéraux spécifiques et qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux et on a rajouté à cela le diagramme de Richards pour la classification des eaux d'irrigation, ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés.

La teneur en sodium des eaux d'irrigation est déterminée par le SAR qui est considéré comme un paramètre très important il exprime la teneur en sodium ou le danger alcalin pour la détermination de la qualité de l'eau utilisée à des fins d'irrigation.

Les analyses factorielles avec en particulier l'ACP (Analyse en Composantes Principales), qui permettent d'observer les relations entre les différents variables et échantillons mais aussi la corrélation entre les individus et les facteurs et entre les variables et les facteurs.

Mots clés : géochimie, alcalinité, eaux, mares, zones humides, Guerbès- Sanhadja

REMERCIEMENTS

DEDICACES

ملخص

ABSTRACT

RESUME

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LA GÉOCHIMIE DES EAUX	5
1. RAPPELS DES CONCEPTS DE BASE DE LA GÉOCHIMIE.....	5
1.1. PRINCIPES DE BASE DE LA GÉOCHIMIE.....	6
1.2.ADSORPTION.....	6
1.3.ECHANGES IONIQUES	6
1.4.INDICE DE SATURATION	7
1.5.GÉOCHIMIE DES CARBONATES.....	7
2. PRINCIPALES RÉACTIONS GÉOCHIMIQUES DES EAUX	10
CHAPITRE II. CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	12
1. GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPLEXE DES ZONES HUMIDES DE GUERBÈS- SANHADJA.....	12
2. SITUATION ET DONNÉES GÉOGRAPHIQUES	13
3. EXTENSION ET LIMITES DU DOMAINE LITTORAL	14
4. GÉOLOGIE.....	16
4.1. LES TERRAINS METAMORPHIQUES	17
4.2. LES TERRAINS SEDIMENTAIRES	17
4.2.1. Le Crétacé supérieur.....	17
4.2.2. Le Nummulitique.....	17
4.2.3. Le Néogène.....	18
4.2.4. Le Quaternaire.....	18
4.3. LES ROCHES INTRUSIVES ET VOLCANIQUES.....	18

5. PÉDOLOGIE.....	20
5.1. CLASSE DES SOLS PEU EVOLUES	20
5.1.1. Groupe d'apport alluvial.....	20
5.1.2. Sols d'apport colluvial.....	20
5.1.3. Groupe d'apport alluvial-colluvial.....	20
5.2. CLASSE DES VERTISOLS	21
5.2.1. Sous-classe des vertisols à drainage externe possible.....	21
5.2.2. Sous-classe des vertisols à drainage externe nul ou réduit.....	21
5.3. CLASSE DES SOLS CALCIMAGNESIQUES.....	21
5.4. CLASSE DES SOLS FERSIALITIQUES.....	21
5.5. CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES.....	22
5.4.1. Sous-groupe à pseudogley de surface	22
5.4.2. Sous-groupe à pseudogley.....	22
6. OCCUPATION DES SOLS.....	22
6.1. LE DOMAINE FORESTIER.....	26
6.2. LE DOMAINE AGRICOLE.....	26
6.3. CAS PARTICULIERS DES ZONES HUMIDES ET LEUR TYPOLOGIE	27
6.3.1. Les aulnaies.....	29
7. HYDROLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE.....	29
7.1. HYDROLOGIE	29
7.1.1 Les étangs.....	30
7.2. LES LAGUNES	33
7.3. LES COURS D'EAU ET RIPISYLVES.....	34
8. LES UNITÉS ÉCOLOGIQUES, LES HABITATS ET LA FLORE	35
8.1. LES MILIEUX TERRESTRES.....	35
8.1.1. La subéraie.....	35
9. CARACTÉRISATION DU CLIMAT DE LA RÉGION DE SKIKDA	38
9.1. VARIATIONS MOYENNE MENSUELLE DE LA VITESSE DU VENT.....	38

9.2. VARIATIONS MOYENNE MENSUELLE DE L'HUMIDITE	39
9.3. VARIATIONS MOYENNE MENSUELLE DE L'EVAPORATION	39
9.4. VARIATIONS DE LA TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE	40
9.5. VARIATIONS MOYENNES MENSUELLES DES PRECIPITATIONS.....	40
9.6. DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE	41
9.7 QUOTIENT PLUVIO-THERMIQUE DE EMBERGER.....	42
9.8. LE BILAN HYDRIQUE	43
• <i>Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....</i>	<i>44</i>
• <i>Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....</i>	<i>44</i>
• <i>Estimation des réserves facilement utilisables.....</i>	<i>45</i>
CHAPITRE III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	47
1. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE.....	56
• DOSAGE DES ANIONS :.....	60
• DOSAGE DES CATIONS :.....	61
2. MÉTHODES D'ÉTUDE.....	61
2.1. TRAITEMENT STATISTIQUE.....	61
2.2. DIAGRAMMES INTERPRETATIFS	62
2.3. INDICE DE SATURATION (IS)	65
2.4. TAUX DE SODIUM ADSORBE (SAR)	66
2.5. DIAGRAMME DE RIVERSIDE (1954).....	68
CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	70
IV.1.DISCUSSION DES RÉSULTATS	70
1. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	70
1.1. TEMPERATURE (T °C)	70
1.2. CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (CE).....	71
1.3. POTENTIEL D'HYDROGENE (PH)	74
1.4. POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION (EH).....	76
2. DÉTERMINATION DES PRINCIPAUX FACIÈS HYDRO CHIMIQUES	77

2.1. FORMULE IONIQUE.....	77
2.2. DIAGRAMMES INTERPRETATIFS	78
2.2.1. Diagramme de Piper.....	78
2.2.2. Diagramme de Durov.....	82
2.2.3. Diagramme de Stiff.....	85
3. INDICE DE SATURATION (IS).....	90
4. TAUX DE SODIUM ADSORBÉ (SAR).....	96
IV.2. APPROCHE STATISTIQUE.....	103
1. STATISTIQUES DESCRIPTIVES	104
2. STATISTIQUES ÉLÉMENTAIRES	105
3. MATRICE DE CORRÉLATION.....	109
4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)	112
5. RELATIONS ENTRE FACTEURS ET INDIVIDUS	117
6. RELATIONS FACTEURS ET PARAMÈTRES	119
CONCLUSION.....	120
CHAPITRE V. DISCUSSION GÉNÉRALE	122
CONCLUSION GÉNÉRALE	130
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	135
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Localisation du complexe de zones humides de Guerbès-Sanhadja.....	13
Figure 2 Carte géologique de la région de Sanhadja / Extrait de la carte géologique de l'extrême Nord-Est algérien (D'après Vila, 1980).	19
Figure 3 Proportions des unités paysagères du complexe humide Guerbès-Sanhadja (Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda)	23
Figure 4 Les différents types de sols dans la région de Guerbès-Sanhadja (CF/ DGF de Skikda)	24
Figure 5 Les unités écologiques du complexe humide Guerbès-Sanhadja (CF/ DGF de Skikda)	25
Figure 6 Disposition générale des zones humides Guerbès-Sanhadja (CF/ DGF de Skikda)	28
Figure 7 Réseau hydrographique du complexe humide Guerbès-Sanhadja.....	35
Figure 8 Occupation des sols du complexe humide Guerbès-Sanhadja.....	37
Figure 9 Variations moyennes mensuelles des données climatiques à la station de Skikda pour la période 2005-2016.	41
Figure 10 Diagramme pluvio-thermique à Skikda (2005/2016).	42
Figure 11 Climagramme d'Emberger de la station de Skikda (2005/2016).....	43
Figure 12 Graphiques du bilan d'eau (Thornthwaite, station de Skikda 2005/2016)	46
Figure 13 Vue de la mare de Bnimhamed (BM)	48
Figure 14 Vue d'Oued El Kebir (K).....	49
Figure 15 Vue de la mare de Msawsa (M)	50
Figure 16 Vue de la mare de Chichaya	51
Figure 17 Vue de la mare de Hadj Taher (HT)	52
Figure 18 Vue de la mare de Sidi Makhoulf (SM).....	53
Figure 19 Vue de la mare de Zaouia (Z)	54

Figure 20 Vue de la mare d'Ain Nechma (AN)	55
Figure 21 Valise multi-paramètres de terrain étanche portatif à microprocesseur de type HI 9024 C	58
Figure 22 Échantillons acheminés au laboratoire.....	58
Figure 23 Analyse des éléments chimiques au laboratoire	60
Figure 24 Location des points d'échantillonnage.....	61
Figure 25 Différents faciès hydro chimiques du diagramme de Piper	63
Figure 26 Diagramme de Riverside (Richards, 1954).....	68
Figure 27 Variations de la température des eaux durant les trois campagnes.....	71
Figure 28 Variations de la conductivité électrique (CE) des eaux durant les trois campagnes.	74
Figure 29 Variations du pH des eaux durant les trois campagnes.....	75
Figure 30 Variations d'Eh des eaux durant les trois campagnes.....	76
Figure 31 Diagramme de Piper	79
Figure 32 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 29 Février 2012	80
Figure 33 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 13 Janvier 2013	81
Figure 34 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 28 Mai 2014	82
Figure 35 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 29 Février 2012.....	83
Figure 36 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 13 Janvier 2013	84
Figure 37 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 28 Mai 2014	85
Figure 38 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 29 Février 2012.....	87
Figure 39 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 13 Janvier 2013	88
Figure 40 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 28 Mai 2014	89
Figure 41 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (29 Février 2012).	93
Figure 42 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (13 Janvier 2013).....	94

Figure 43 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (28 Mai 2014).....	95
Figure 44 Diagramme de Riverside (Richards, 1954).....	97
Figure 45 Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme deRichards (1954)	101
Figure 46 Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme deRichards (1954)	101
Figure 47 Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme deRichards (1954)	102
Figure 48 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel(campagne 29 Février 2012).	113
Figure 49 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne 29 Février 2012).....	113
Figure 50 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (13 Janvier 2013).	114
Figure 51 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (13 Janvier 2013).....	115
Figure 52 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (28 Mai 2014).	116
Figure 53 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (28 Mai 2014).....	116
Figure 54 Schéma explicatif synthétique de la pollutionmarine	128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Caractéristiques de la géographie physique de la région	14
Tableau 2 Répartition spatiale de la population communale dans le complexe de zones humides de Sanhadja.....	14
Tableau 3 Surfaces du domaine littoral /communes	15
Tableau 4 Couverture forestière et statut juridique du complexe humide Guerbès-Sanhadja.	26
Tableau 5 La population active à l’agriculture dans le complexe humide Guerbès-Sanhadja	26
Tableau 6 Répartition de la surface agricole totale [SAT] dans le complexe humide Guerbès-Sanhadja	27
Tableau 7 Les superficies d’occupation du sol dans la zone Guerbès-Sanhadja en 2003 et 2016.....	38
Tableau 8 Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent de la station de Skikda (2006/2016).....	39
Tableau 9 Les moyennes mensuelles de l’humidité à la station de Skikda (2005/2016).....	39
Tableau 10 Les moyennes mensuelles de l’évaporation de la station de Skikda (2006/2016).	39
Tableau 11 Les moyennes mensuelles de la température de la station de Skikda (2005/2016).	40
Tableau 12 Les moyennes mensuelles des précipitations de la station de Skikda (2005/2016).	40
Tableau 13 Bilan hydrique d’après Thornthwaite (Station de Skikda, 2005/2017).....	45
Tableau 14 Les principales mares (figure 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,20).....	47
Tableau 15 Faciès hydrochimiques et contextes géologiques(Banton et Bangoy, 1999).....	64
Tableau 16 Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol (d’après Richards, 1954).	67

Tableau 17 Les classes issues du diagramme de Riverside (Clemant et Galand, 1979).....	68
Tableau 18 Interprétation des classes du diagramme de Riverside (selon Durand, 1982 ; Clemant et Galand, 1979).....	69
Tableau 19 Relation conductivité-minéralisation des eaux de surface du complexe des zones humides de Sanhadja.....	73
Tableau 20 Classification hydrochimique des eaux selon la formule ionique.....	78
Tableau 21 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja (29 Février 2012).	93
Tableau 22 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja (13 Janvier 2013).	94
Tableau 23 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja (28 Mai 2014).	95
Tableau 24 Les classes issues du diagramme de Riverside (Clemant et Galand, 1979).....	97
Tableau 25 Interprétation des classes du diagramme de Riverside selon Durand (1982) (Clemant et Galand, 1979)	98
Tableau 26 Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).	99
Tableau 27 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959) (29 Février 2012).....	100
Tableau 28 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959) (13 Janvier 2013).....	100
Tableau 29 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959) (28 Mai 2014).....	100
Tableau 30 Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne 29 février 2012).	106
Tableau 31 Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne 13 janvier 2013). ...	107
Tableau 32 Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne 28 mai 2014).....	108

Tableau 33	Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 29 février 2012)...	110
Tableau 34	Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 13 janvier 2013)..	110
Tableau 35	Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 28 mai 2014).	111
Tableau 36	Corrélation entre individus et facteurs (campagne 29 Février 2012)	117
Tableau 37	Corrélation entre individus et facteurs(campagne13 Janvier 2013).....	118
Tableau 38	Corrélation entre individus et facteurs(campagne 28 Mai 2014).....	118
Tableau 39	Corrélation entre variables et facteurs(campagne 29 Février 2012).....	119
Tableau 40	Corrélation entre variables et facteurs(campagne13 Janvier 2013)	119
Tableau 41	Corrélation entre variables et facteurs(campagne 28 Mai 2014)	120

Introduction générale

Introduction générale

La Numidie, située dans le Nord-Est algérien, est réputée pour ses zones humides qui sont réparties en deux grands complexes séparés par l'Oued Seybouse: la Numidie orientale composée des complexes d'Annaba et d'El-Kala et la Numidie occidentale représentée par le complexe de Guerbès-Senhadja (Samraoui et de Bélair, 1997).

La plaine de Guerbès contient des zones humides d'importance internationale qui sont autant d'exemples représentatifs, rares et parfois uniques en Afrique du Nord et au-delà dans toute la région méditerranéenne (Samraoui et de Bélair, 1997; Boumezbeur, 2001).

La région de Guerbès-Sanhadja qui englobe le complexe de zones humides du même nom, est un site renfermant d'importantes potentialités et valeurs historiques, culturelles, scientifiques, économiques et touristiques. Ce patrimoine justifie l'intérêt qu'il suscite en matière de recherche, de conservation et de développement d'activités économiques et agricoles. Vestige d'une grande étendue marécageuse qui recouvrait les terrasses de la vallée de l'oued El Kébir, ce milieu renferme des écosystèmes rares, riches et spécifiques aux zones humides. La disponibilité de l'eau en a fait depuis quelques décennies, une convoitise pour une agriculture intensive qui s'est développée y compris sur des aires dunaires défrichées. Il s'en est suivi des pompages intenses qui accentuent la modification du milieu. Sous les effets du déboisement, de l'usage de fertilisants agricoles et de la consommation irraisonnées de l'eau, les écosystèmes originels de cette plaine se voient progressivement remplacés par des activités agricoles peu regardantes sur la valeur patrimoniale environnementale du milieu car très rentables.

Les zones humides jouent un rôle important à différents niveaux, elles participent à la régulation des microclimats, elles sont déterminantes pour la gestion de l'eau, elles régulent les débits et les crues des fleuves, entre le cours d'eau et les zones adjacentes (recharge / décharge des nappes, dissipation des forces érosives), entre les eaux de surface et les eaux souterraines et elles épurent les eaux des bassins versants en dégradant les excès de nutriments de la matière organique et des pesticides (Zahi, 2014).

Les zones humides sont détruites à un rythme sans précédent, elles sont privées de leur eau par des pompages excessifs ou par la construction des barrages, elles sont même

complètement drainées au profit de l'agriculture. Durant la colonisation, cela a été le cas pour de nombreuses zones humides en Algérie (Boumezbeur, DGF 2008).

L'existence d'une continuité de différents milieux (fluviaux, lacustres et marins) s'est traduite par la mise en place d'un ensemble d'écosystèmes complémentaires et interactifs de type continental, lacustre et marin ainsi que par une longue ceinture de forêts humides formant parfois de vastes aulnaies et des ripisylves le long des deux oueds principaux (El Kébir et Magroun) et leurs nombreux affluents.

La diversité biologique, attestée par le nombre d'espèces identifiées, dénote de la complexité des écosystèmes supportant plusieurs habitats naturels. La diversité des habitats et des niches écologiques héberge à son tour une faune et une flore uniques, issues de différents faciès biogéographiques.

Proche de grands ensembles universitaires (Annaba, Constantine, Skikda et El Tarf, Guelma) le site commence à susciter la curiosité et l'intérêt des scientifiques, manifestés par de nombreux projets de travaux. En matière d'éducation environnementale, ce site constitue un support pédagogique de grande valeur pour la promotion de l'éducation environnementale au profit des élèves de l'Education nationale des Wilayas limitrophes. Actuellement sous utilisée, cette région est un véritable laboratoire vivant qui peut être un moyen de promotion de la recherche scientifique dans tous ses aspects liés à l'environnement.

Les potentialités économiques qu'offre la région de Guerbès-Sanhadja sont importantes ; elles sont d'ordre aussi bien agricole que touristique. Elle constitue une aire de prédilection pour l'élevage bovin ainsi que pour une agriculture stratégique et durable plus conservatrice de l'environnement. Les débouchés de ces deux activités ainsi que ceux du tourisme sont générateurs d'emplois et constituent une alternative de développement socio-économique durable pour la région.

L'Afrique du Nord est une région typiquement semi-aride où les ressources en eau sont susceptibles d'évoluer spectaculairement sous l'influence de fluctuations climatiques ou d'actions humaines (Cudennec *et al.*, 2007). Un diagnostic hydrologique qui met en évidence les caractéristiques du complexe des points de vue de ses potentialités hydriques et de son fonctionnement hydrologique. L'état de conservation des zones humides et de leur fonctionnalité, et l'identification des facteurs responsables de leur détérioration seront identifiés. Ils serviront de détermination des actions d'urgences à entreprendre dans la perspective d'une réhabilitation.

Les ressources en eau des nappes phréatiques du pourtour méditerranéen, et plus particulièrement celles du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord, connaissent de plus en plus une dégradation qualitative et quantitative (Custodio et Bruggeman, 1987; Vengosh et Rosenthal, 1994 ; Edmunds et Droubi, 1998; Vengosh et *al.*, 1999).

L'objectif principal de ce travail est d'essayer de comprendre, décrire et expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables de l'état chimique actuel des eaux et la dégradation de la qualité des eaux de surface du complexe humide Guerbès-Sanhadja.

Plusieurs méthodes d'étude ont été utilisées dans ce travail entre autres l'analyse en composantes principales (ACP) et l'approche géochimique. La prédiction de l'aspect géochimique des eaux s'appuie sur l'utilisation des rapports ioniques caractéristiques, parmi les critères géochimiques qui peuvent aider à l'identifier l'intrusion de l'eau de mer en zones côtières. On utilise notamment les rapports ioniques Na^+/Cl^- , des mesures de concentrations en chlorures pour expliquer l'origine des anomalies de salinité dans l'eau et de distinguer les zones à influence marine des zones à influence évaporitique. L'utilisation du logiciel « Diagramme » pour déterminer l'état de saturation des eaux par les principales espèces chimiques sous l'effet de l'évaporation.

Les six chapitres de ce document précédés par une introduction qui décrit les objectifs visés et l'approche méthodologique utilisée, sont organisés de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente un aperçu bibliographique sur la géochimie des eaux.
- Le deuxième chapitre est réservé à la description de l'éco-complexe de Guerbès-Sanhadja, et aux caractéristiques de cette zone d'étude (climatologie, pédologie, géologie, hydrologie, géographie et cadre biotique)
- Le troisième chapitre décrit le matériel et les méthodes utilisées pour la réalisation de cette étude et dans lequel nous présenterons le travail de terrain effectué sur les eaux du complexe humide Guerbès-Sanhadja, les campagnes d'échantillonnages, les techniques analytiques réalisées au laboratoire et les outils de traitement des données.
- Le quatrième chapitre traitera les résultats obtenus et leur discussion en vue d'une meilleure compréhension du comportement hydro-chimique des eaux du complexe humide Guerbès-Sanhadja. Et pour cela il sera divisé en deux volets : discussion des

résultats et le second sera une approche statistique des résultats obtenus à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de déterminer les différentes sources de variabilité de la chimie des eaux, en utilisant le logiciel « Xlstat »

- Le cinquième chapitre fera l'objet d'une discussion générale des résultats obtenus pour une ample compréhension des différentes relations entre les ions.

Nous terminerons par une conclusion générale et les perspectives de ce travail.

Chapitre I. Généralités sur la géochimie des eaux

Chapitre I. Généralités sur la géochimie des eaux

Le présent chapitre a été mené afin d'expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables de l'état chimique actuel de la qualité des eaux du complexe humide Gerbès-Sanhadja. On note particulièrement, l'alcalinité résiduelle et les processus de changement de phases (précipitation-dissolution de minéraux alcalins et échange cationiques). En vue d'atteindre l'objectif visé par cette étude, nous avons abordé cette partie par la présentation des principaux concepts de l'hydrogéochimie des eaux de surface du complexe humide Gerbès-Sanhadja.

1. Rappels des concepts de base de la géochimie

Dans la nature, on distingue trois grandes familles de roches : sédimentaires, magmatiques et métamorphiques. Ces roches peuvent être cohérentes (granite), meubles (sables et galets), plastiques (argiles) et liquides (pétrole). Elles sont constituées d'un assemblage de différents éléments en grains appelés minéraux. Plusieurs centaines d'espèces minérales sont connues dans la nature, chacune d'entre elles est définie par sa structure cristalline et sa composition chimique (formule structurale du minéral). Toutes les formes cristallines connues dérivent de sept mailles élémentaires ou systèmes cristallins. Chacune de ces mailles élémentaires est définie par sa géométrie et ses axes de symétrie (Bouchaib, 2007).

Les minéraux sont habituellement classés en deux grands groupes : les silicates et les minéraux non silicatés. Les silicates très abondants, constituent en poids presque 90% de la croûte terrestre. Les silicates les plus communs sont :

- Le quartz : SiO_2 ,
- Les feldspaths qui regroupent deux familles (feldspaths potassiques : l'orthose) et les plagioclases (albite et anorthite),
- Les micas regroupent deux variétés dont les micas noirs (biotite) et les micas blancs (muscovites),
- Les pyroxènes, qui forment une très grande famille avec plusieurs variétés,
- Les amphiboles, formant également une très grande famille.

Les minéraux non silicatés sont volumétriquement très réduits par rapport aux silicates.

Leur concentration locale donne naissance à des gisements de substances utiles ou déminerais souvent, d'un très grand intérêt économique : calcite, gypse, pyrite, fluorine, barytine, halite, malachite, blende, etc...

1.1. Principes de base de la géochimie

Dans certaines conditions de température, pression, déficit en sels et l'état hydrique du sol, il se produit une dissociation des minéraux qui engendrent dans l'eau du sol des groupement ioniques. De cette mise en solution des sels, résultent différents phénomènes tels que l'adsorption et l'échange ionique (Bouchaib, 2007).

1.2. Adsorption

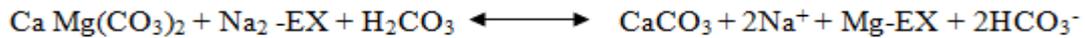
L'adsorption est par définition un phénomène de surface. Par action des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les ions ou les molécules des différentes phases, certains cations et anions se trouvent fixés sur la surface des éléments solides du milieu.

Dans la nature, les argiles et les colloïdes présentent de grandes surfaces spécifiques et sont électriquement chargés. Leur charge globale est le plus souvent négative. Quand ces particules se trouvent en présence de solutions renfermant des ions, ceux-ci vont être attirés par ces particules, une partie y sera adsorbée. Les colloïdes et les argiles fortement chargés fixent préférentiellement les ions bivalents.

La facilité avec laquelle un ion adsorbé peut être remplacé par un autre, ou l'ordre observé pour les cations alcalins et alcalino-terreux est : $Na^+ < K^+$, $Mg^{+2} < Ca^{+2}$. Plus un ion est gros, plus il est difficile de lui en substituer un plus petit. Les énergies de liaisons entre ions adsorbés et support sont assez faibles, si la composition de la solution change, des ions primitivement fixés peuvent être désorbés et remplacés par d'autres, c'est le phénomène d'échange ionique ou de base.

1.3. Echanges ioniques

Ce phénomène très connu, se produit souvent sur les argiles de l'aquifère par fixation des alcalino-terreux (Ca^{+2} et Mg^{+2}) et libération de sodium (Na^+) : (Dolomite) (Calcite)



Durant son transit, l'eau de l'aquifère chargée de minéraux dissous se trouve en contact avec des complexes échangeurs de cations. Ceux-ci sont des alumino-silicates formés de couches ou feuillets, dont la cohésion est assurée par l'existence de cations et d'eau interfoliaires. La surface des feuillets est chargée négativement, favorisant ainsi la possibilité d'échange de cations avec ceux de la solution du sol.

1.4. Indice de saturation

La détermination de la saturation d'un minéral vis-à-vis d'une eau est définie par l'indice de saturation (IS), il est exprimé par l'équation suivante :

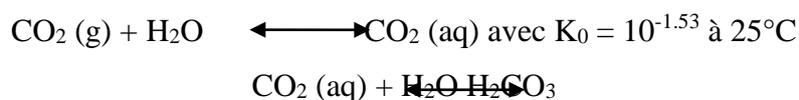
$$\text{IS} = \text{Log (PAI/Ks)}$$

C'est le rapport de l'activité ionique (PAI) au produit de solubilité (Ks) à une température donnée. Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter, et permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères.

Quand (IS) est positif, il signifie que la solution est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation. Par contre, quand (IS) est négatif, la solution est sous-saturée vis à vis du minéral qui a tendance à la dissolution.

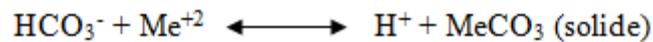
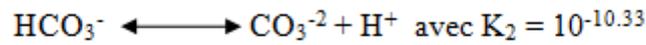
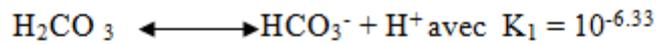
1.5. Géochimie des carbonates

Dans tous les cas, le point de départ du système des carbonates est la chaîne des réactions suivantes:

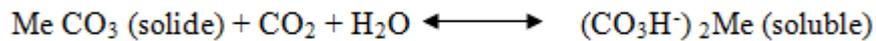


L'eau agressive chargée en acide carbonique est ensuite saturée par des cations le plus

souvent alcalino-terreux, pour donner les bicarbonates qui circulent dans la zone noyée.



qui se résument en terme de bilan à :



Le cation Me^{2+} est en général Ca^{+2} , mais peut aussi être Mg^{+2} , Fe^{+2} et parfois 2Na^+ dans les saumures alcalines continentales. Lorsque la matrice contient de la dolomite, le cristal composite $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ peut se trouver engagé dans un processus de dissolution incongruente au cours duquel, le cristal entier est dissous avant que la calcite ne précipite dans le cas des systèmes dans lesquels, la calcite a atteint la saturation, tandis que la solution reste sous-saturée par rapport à la dolomite. Certes, tout apport extérieur d'ions calcium, par exemple à l'occasion de la dissolution du gypse, augmentera l'état de saturation en calcite et favorise la dissolution incongruente de la dolomite.

Nous notons toutefois, que les sols peuvent contenir des carbonates solides y compris lorsque la roche-mère est composée de silicates, puisque l'hydrolyse des aluminosilicates, peut conduire à la formation de calcite secondaire (recristallisation), comme dans le cas suivant (Bustillo, 2005 ; Bouchaib, 2007):



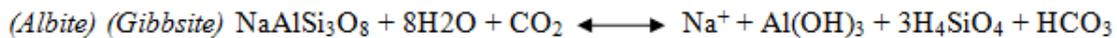
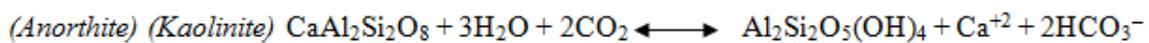
L'hydrolyse des silicates provoque ainsi l'augmentation locale du pH, selon le mécanisme suivant:



La montée du pH induit alors la formation et la dissociation acide de H_2CO_3 selon le schéma réactionnel suivant:

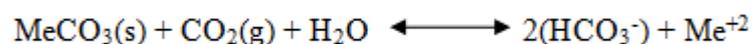


D'autres mécanismes d'interactions peuvent se produire; ainsi l'altération des silicates peut conduire à la kaolinite, à la gibbsite et aux bicarbonates (Bouchaib, 2007 ;Violette,2010):



Tous ces mécanismes réactionnels peuvent donc participer à la production de fortes teneurs en carbone inorganique total dissous (CITD), composé d'espèces aqueuses (CO_2 (aq) et H_2CO_3) et ioniques (HCO_3^- et CO_3^{2-}). Toutes ces formes de carbone peuvent entrer en réactions d'échanges chimiques et isotopiques avec le CO_2 gazeux de la zone non saturée du sol, ou de la fraction carbonatée de l'aquifère.

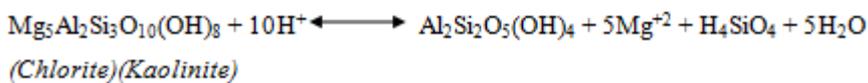
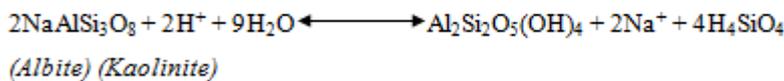
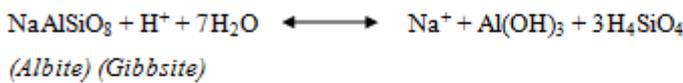
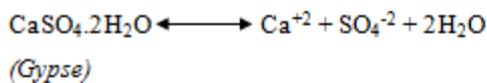
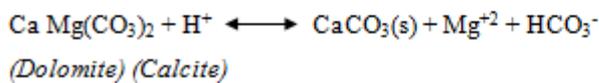
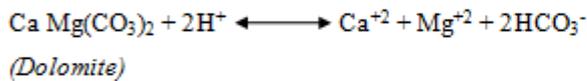
A l'issue des réactions précédentes, qui gouvernent la chimie des carbonates, se résument en termes de bilan à la réaction:

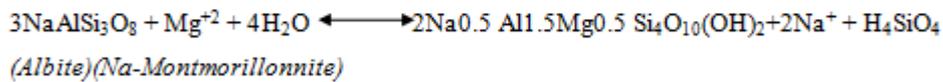
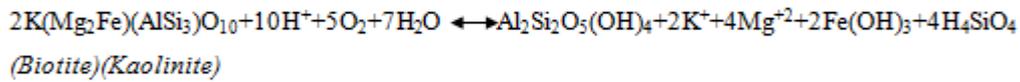
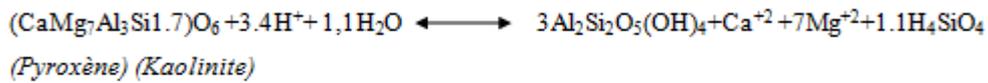
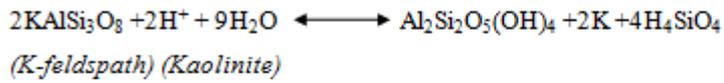
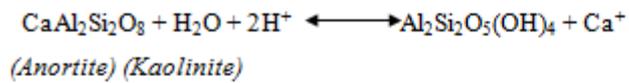


2. Principales réactions géochimiques des eaux

L'altération ou transformation chimique est par définition, la mise en solution des éléments chimiques de la roche-mère. Les minéraux constitutifs de la roche sont attaqués par des eaux riches en acide carbonique. Cette attaque provoque une hydrolyse des minéraux et la mise en solution de leurs éléments chimiques.

Ces transformations chimiques correspondent aussi bien à des dissolutions qu'à des néoformations de phases minérales et peuvent jouer un rôle prépondérant dans la formation de résidu sec. Ces altérations ont évidemment une influence considérable sur la perméabilité, et la porosité des fissures et des sédiments. Elles varient selon les secteurs en fonction de la composition minéralogique de la roche. Dans ce qui suit, nous rapporterons les principales réactions d'altérations produites lors des interactions eau – sol, influençant ainsi la chimie des eaux.





Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

1. Généralités sur le complexe des zones humides de Guerbès-Sanhadja

Les zones humides de la Numidie algérienne sont d'une grande valeur pour la biodiversité (Samraoui et de Bélair, 1997 ; Metallaoui et Houhamdi, 2008). La Numidie, située dans le Nord-Est algérien, est réputée pour ses zones humides qui sont réparties en deux grands complexes séparés par l'Oued Seybouse: la Numidie orientale composée des complexes d'Annaba et d'El-Kala renferme un grand nombre de sites humides exceptionnels possédant une grande diversité des écosystèmes marins, lacustre et forestières caractérisés par une richesse animale et végétale élevée. Ces zones humides s'étendent sur une superficie de 156000 ha et la Numidie occidentale est représentée par le complexe de Guerbès-Sanhadja et le lac Fetzara (Houhamdi, 1998).

Le complexe de Guerbès-Sanhadja est une grande plaine littorale d'une superficie de 42100 ha et la surface de la zone humide proprement dite avoisine 20000 ha (Toubal et *al.*, 2014). Le massif dunaire continental de la plaine de Gerbès est le réservoir hydrique d'environ 40 hectomètres cubes, qui génère une multitude de dépressions et de vallées formant lacs et garaets, de quelques hectares de superficie à plusieurs dizaines d'hectares (Joleaud, 1936). A l'Est et au Sud de ce massif, l'oued El Kébir et ses affluents, aux nombreux méandres (en raison de la faible pente), alimentent une série de collections d'eaux naturelles ou artificielles (petits barrages ou retenues collinaires). Le contact dunes-plaines alluviales a formé des forêts humides (aulnaies) pouvant atteindre 180 ha (Boumezbeur, 2001).

Les altitudes de la zone se situent entre 0 et 200 mètres. 48,5 % des terres ont une pente inférieure ou égale à 3 % et le reste à 12,5 % (Joleaud, 1936). Les altitudes diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche de la plaine de Guerbès et deviennent nulles au niveau des vallées de oued El-Kebir Ouest, oued Magroun et les dépressions hydromorphes (Metallaoui, 2010). Les principales unités lithologiques sont essentiellement formées de dépôts éoliens et alluviaux (Joleaud, 1936).

2. Situation et données géographiques

Le complexe des zones humides de Guerbès-Sanhadja couvre la partie littorale Est de la wilaya de Skikda. Il est encadré par les collines dunaires côtières au Nord, le massif côtier de Chetaïbi à l'Est et la partie interne de la plaine alluviale au Sud. Cet ensemble de 42 000 ha se partage entre trois sous bassins versants. Ce sont les sous bassins côtiers Kébir-Magroun appelés sous bassin de oued El Kébir qui couvre l'essentiel de la surface de la zone humide soit 23000 ha, celui de Kébir-Hammam et enfin celui du côtier Fil-Fila.

Du point de vue de la géographie physique et humaine, la zone de Guerbès-Sanhadja empiète sur trois communes : El Marsa, Ben Azzouz et Djendel dont les caractéristiques sont celles du tableau 1.

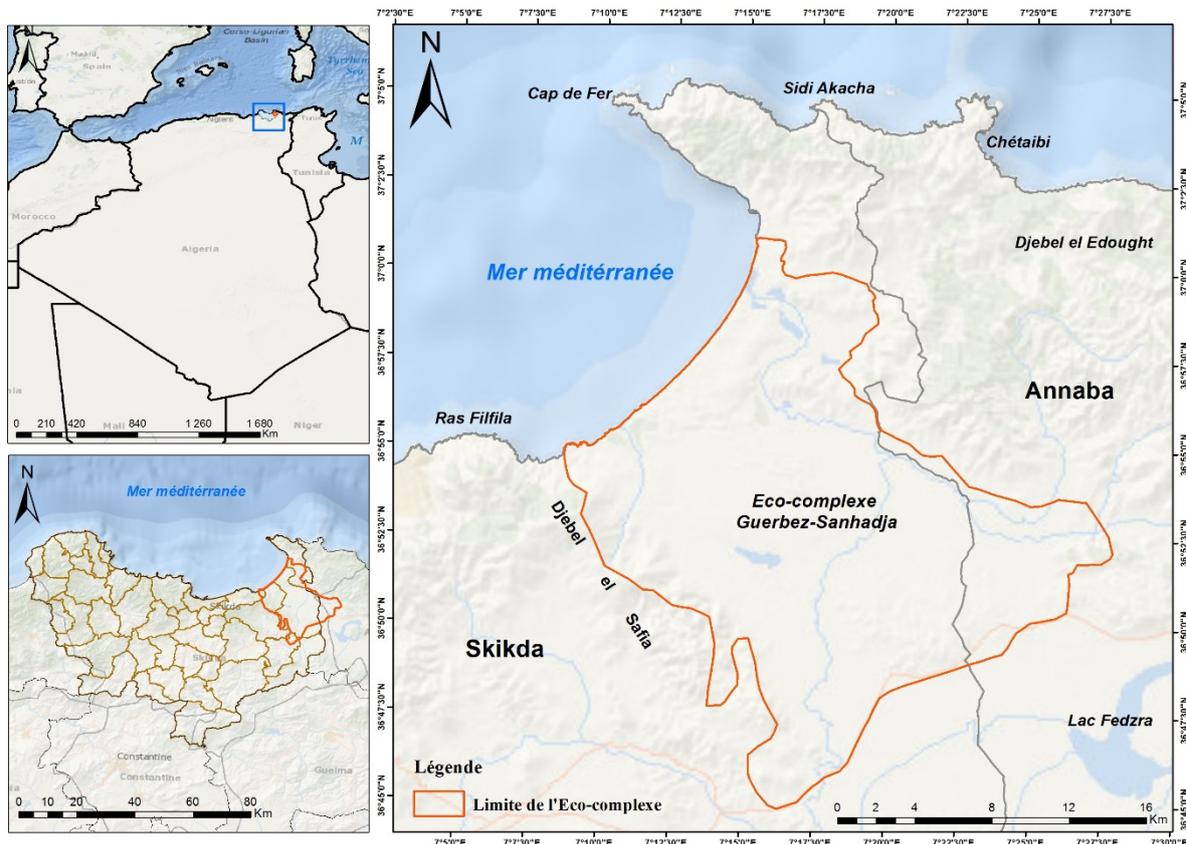


Figure 1 Localisation du complexe de zones humides de Guerbès-Sanhadja.

Tableau 1 Caractéristiques de la géographie physique de la région b

Communes	Surfaces (km ²)	Population 1998	Linéaire côtier (km)
La Marsa	114,4	5 899	37,22
Ben Azzouz	239,9	24 969	7,26
Djendel	213,7	7 831	9,33

(Source :DPAT de la wilaya de Skikda)

Tableau 2. Répartition spatiale de la population communale dans le complexe de zones humides de Sanhadja

Communes	Agglomérations	Population	Taux d'accroissement
Ben Azzouz	Ben Azzouz	4495	2.01
	Boumaiza	4867	1.98
	Zaouia	3952	2.10
	Ain Nechma	2450	1.99
	El-Hamma	2278	2.09
	Zone éparse	11539	1.05
	La Marsa La Marsa	3133	1.60
	Zone éparse	2861	1.60
	Djendel Guerbes	1492	2.02
La Marsa	La Marsa	3133	1.60
	Zone éparse	2861	1.60
Djendel	Guerbes	1492	2.02

(Source : APC Ben Azzouz, Azzaba)

3. Extension et limites du domaine littoral

Le domaine littoral dans la région de Guerbès est limité, côté mer par le plateau continental et côté terre par une ligne comme définie par l'article 7 de la loi n°: 02-2002 du 05 février 2002.

Dans les communes de Djendel, Ben Azzouz et El Marsa, la limite du domaine littoral englobe l'intégralité du complexe de zones humides Guerbès-Sanhadja au sens de la loi. La profondeur de la limite du domaine littoral à ce niveau est la plus importante, elle est de 22,7 kilomètres. La profondeur minimale est de 800 m. Cette appartenance en plus du fait que le complexe des zones humides de Guerbès-Sanhadja soit classé « Ramsar » traduit l'impérative nécessité de le protéger et de le promouvoir.

La commune de Ben Azzouz est entièrement dans ce domaine juridique. Le fait que seulement 8% de sa superficie concentrent toute sa population constitue un facteur de pression indéniable (tableau2). Les principales menaces se concentrent dans son chef lieu et dans les agglomérations de Boumaïza, Ain Nechma, El Hamma et dans le village agricole.

Tableau 3 Surfaces du domaine littoral /communes

Communes	Surfaces de la commune (km ²)	Surfaces du domaine littoral (km ²)	% Surfaces du domaine littoral/surface de la commune	Linéaire côtier (km)
El Marsa	114,4	76,70	67,04	37,22
Ben Azzouz	239,9	209,4	87,28	7,26
Djendel	213,7	56,95	26,65	5,15

Les limites physiques du domaine littoral pour les trois communes considérées définies selon les termes de la loi sont les suivantes :

Commune de ElMarsa

- **Au Nord** : le plateau continental.
- **A l'Est** : Chaabet Sidi Akkacha (limite administrative de la commune)
- **A l'Ouest** : oued El Kébir (limite administrative de la commune)
- **Au Sud** :
 - La limite du complexe de zones humides Guerbès-Sanhadja, dont une partie se situe dans la wilaya de Annaba, de coordonnées géographiques :
 - Longitude : 7° 8' à 7° 25' E.
 - Latitude : 36° 46' à 37° N.
 - La piste passant par Koudiet Marmouda jusqu'à Sidi Makhoulf ;
 - La limite administrative de la commune.

Commune de Ben Azzouz

Le domaine littoral de la commune de Ben Azzouz est limité comme suit :

- **Au Nord** : le plateau continental.
- **A l'Est** : limite administrative de la commune.
- **A l'Ouest** : oued El Kébir (limite administrative de la commune).

➤ **Au Sud :**

- La limite du complexe de zones humides Guerbès-Sanhadja, dont une partie se situe dans la wilaya de Annaba, de coordonnées géographiques :
 - Longitude : 7° 8' à 7° 25' E.
 - Latitude : 36° 46' à 37° N.

Commune de Djendel Saadi –Mohamed.

Le domaine littoral de cette commune est limité comme suit :

➤ **Au Nord :** le plateau continental.

➤ **A l'Est :** oued El Kébir (limite administrative de la commune)

➤ **A l'Ouest :** limite administrative de la commune.

➤ **Au Sud :**

- La limite du complexe de zones humides Guerbès-Sanhadja, dont une partie se situe dans la wilaya de Annaba, de coordonnées géographiques :
 - Longitude : 7° 8' à 7° 25' E.
 - Latitude : 36° 46' à 37° N.

4. Géologie

Les travaux géologiques sur le Nord-Est algérien de Joleaud (1936), Hilly (1957) et Vila (1980), ainsi que la carte géologique de la Tunisie dressée en 1951 par Gastanyaffirment que les systèmes géologiques représentées dans l'extrême Nord-Est algérien sont constitués par des terrains du Secondaire (Crétacé), du Tertiaire (le Nummulitique et le Néogène), le Quaternaire est représenté par le Pliocène et l'Holocène. Le Quaternaire

marin contient surtout les formations dunaires. Toutefois les formations Quaternaires continentales dominent les plaines et les vallées dressées par oued El Kebir Est, oued El Kebir Ouest et la Seybouse.

A l'ouest du bassin de Guerbès, la série stratigraphique du Djebel Safia présente des séries telliennes Jurassiques et Crétacés avec des calcaires massifs. Plus au Nord, la région de Dem El Bagrat est composée de flyschs massyliens peu métamorphosés qui avaient primitivement été assimilés à la série de Djebel Safia (Vila, 1980). Le centre de la zone de Guerbès est constitué par des dépôts quaternaires.

Au Sud, le massif de Boumaiza, Berrahal est le prolongement du socle de l'Edough, que Vila (1980) interprète comme un massif cristallin externe et un substratum des séries telliennes de Djebel Safia. On retrouve successivement du Sud-Est au Nord-Ouest, le massif cristallin de l'Edough, les grès Numidiens et les flyschs Mauritanien.

Les études géologiques montrent que le terrain de l'extrême Nord-Est algérien a été formé dans des ères et des périodes géologiques différentes ; le Secondaire (Crétacé), le Cénozoïque représenté par le Tertiaire (Nummulitique ; Néogène) et le Quaternaire par l'Holocène et le Pliocène. On peut distinguer trois types de terrains :

4.1. Les terrains métamorphiques

Ils sont très développés dans le djebel l'Edough (Joleaud 1936) ; on distingue quatre séries cristallophylliennes (gneiss glanduleux, gneiss schisteux, micaschistes granifères avec cipolins et gneiss feuilletés). Le plus probable c'est que ces formations sont du Paléozoïque et peuvent être anté-sibériennes aussi, mais les gneiss et les micaschistes de l'Edough sont de l'Éocène supérieur.

4.2. Les terrains sédimentaires

Ce type de terrain a été formé durant le Crétacé supérieur, le lias-Crétacé inférieur (cas de djebel Safia), le Nummulitique et le Quaternaire qui constituent les seuls systèmes représentés dans le secteur du complexe des zones humides Guerbès-Sanhadja.

4.2.1. Le Crétacé supérieur

Il se présente sous l'aspect des marnes et de calcaire inocérâmes, et les grès du Crétacé sont beaucoup représentés dans le djebel Safia.

4.2.2. Le Nummulitique

On distingue la nappe de flysch Oligocène et la nappe du flysch numidien, dont le premier affleure au Nord-Ouest de la dépression de la vallée de oued El-Kébir Ouest au lieu dit " Si Ali ben Ali", dans le vallon de oued Bouksaiba (Flan Drin, 1955 in Bazri, 1999). Le deuxième flysch est très répandu au djebel Laharta, Kef Siada, au Nord-Ouest de la dépression alluviale de Koudiet Eddib, Si Ali ben Ali, Koudiet Berrel et Ras-Etamra. Ce deuxième flysch est caractérisé par un changement rapide de la granulométrie ; il est constitué par des couches de grès quartzeux (quelques Dm² à quelques m²).

4.2.3. Le Néogène

Il est représenté par trois temps ; le Miocène supérieur, le Pliocène inférieur et le Pliocène supérieur ; le premier existe sous forme des dépôts continentaux argilo-détritiques des cuvettes inférieures et le troisième est représenté par les fonds de vallée, sous forme de marnes gris-jaunâtres et d'alluvions terminaux du remblaiement Néogène.

4.2.4. Le Quaternaire

C'est la période durant laquelle la majeure partie du terrain d'étude a été formé, on distingue deux types de dépôt : les dépôts Quaternaires marins (plage actuelle et dunes littorales) et des dépôts Quaternaires des versants et des fonds de vallée. Les trois étapes qui permirent l'apparition de ces deux types de dépôts sont :

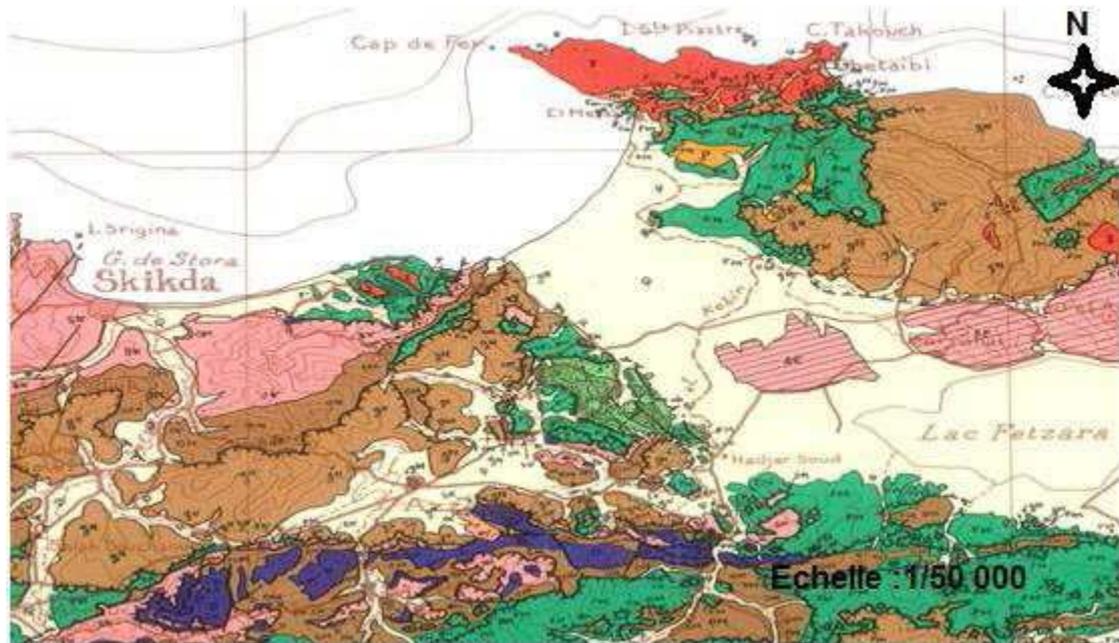
1^{ère} étape (Post-Pliocène) : Correspond à la dégradation des grès nummulitiques pour donner des particules de sables lapidifiés par un ciment calcaire et donne naissance à des grès dunaires et des dunes.

2^{ème} étape Pléistocène : Correspond à l'apparition des terrasses qui s'étalent vers les côtes (50, 30 et 20 m).

3^{ème} étape (Néo-Pléistocène) : Correspond à la mise en place des dunes littorales, les limons des Garâts et les bas-fonds inter-dunaires.

4.3. Les roches intrusives et volcaniques

Ce type de terrain se répartit géographiquement au voisinage du littoral actuel : djebel Fil-Fila ; Cap de Fer, djebel l'Edough.



Légende :

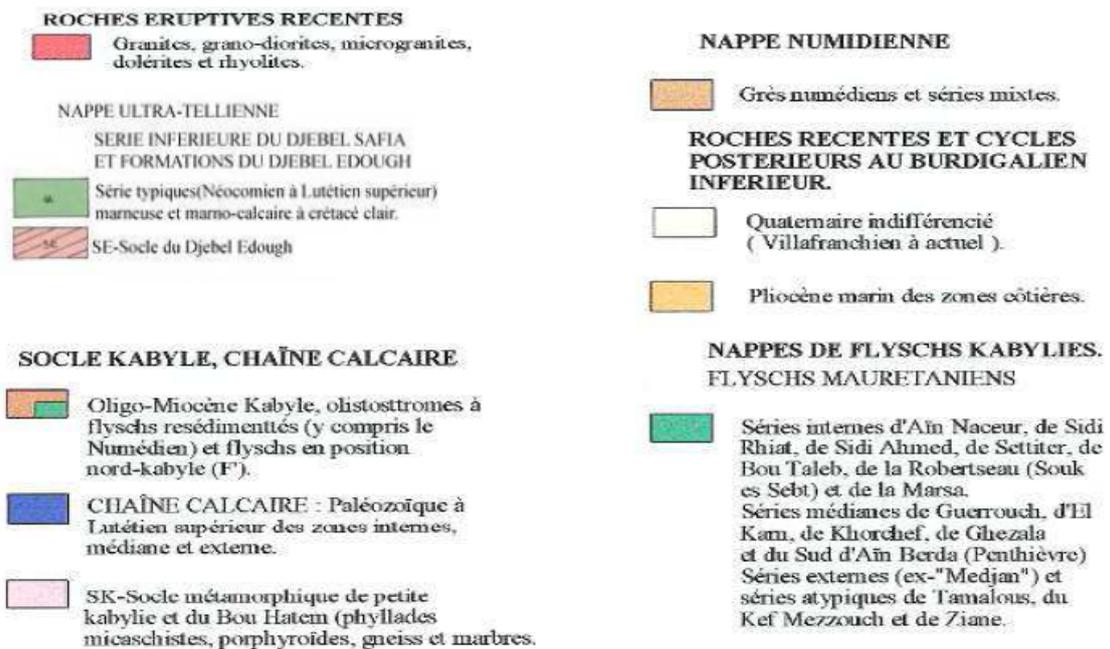


Figure 2. Carte géologique de la région de Sanhadja / Extrait de la carte géologique de l'extrême Nord-Est algérien (D'après Vila, 1980).

5. Pédologie

La synthèse agro-pédologique a pour but de caractériser et de répartir les différentes catégories des sols caractérisant le périmètre d'étude (les terres de la commune de Ben Azzouz) et se présentent comme suit (Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda).

5.1. Classe des sols peu évolués

Le caractère commun de cette classe est le faible degré d'évolution et d'altération ; la matière organique est peu abondante. Cette classe occupe une superficie de 10084 ha, cependant 03 groupes ont été définis à savoir :

5.1.1. Groupe d'apport alluvial

Ce sont les sols des dépôts récents de vallée, formés sur des alluvions calcaires ; ils se localisent le long des lits majeurs de l'oued El-Kébir. Ils sont rajeunis souvent par des dépôts de matériaux neufs en période d'inondation et se caractérisent par la présence d'une nappe phréatique.

5.1.2. Sols d'apport colluvial

Ce sont des sols situés sur le piémont et bénéficiant de matériaux solubles ou insolubles, transportés le long des pentes ; ils sont caractérisés par l'inexistence de la nappe et peuvent être constitués de matériaux grossiers au pied des pentes ou de matériaux fins à une distance des pentes formées sur des colluvions calcaires ou non calcaires ; ils sont généralement très aérés, on les rencontre à l'Est de Boumaïza.

5.1.3. Groupe d'apport alluvial-colluvial

Ce sont des sols d'apports mixtes formés sur des alluvions et colluvions calcaires ou non calcaires ; les sols peu évolués sont des sols profonds à texture fine à très fine, pour les sols d'apport alluviaux et colluviaux. Une texture moyenne à grossière des sols d'apport mixte reste bonne pour l'ensemble des cultures. L'hydromorphie est nulle ou très réduite, elle est en fonction de la teneur en argile.

5.2. Classe des vertisols

Elle est localisé à l'Est de Ben Azzouz, et occupe une superficie de 6402 ha ; ce sont des sols dont la teneur en argile est élevée (40 à 70 %) et la fraction organique est réduite de (1 à 2 %). L'homogénéisation complète du profil, jusqu'à 80cm, est liée au mouvement verticale provoqué par les alternances de gonflement et de retrait des argiles. On distingue deux sous-classes :

5.2.1. Sous-classe des vertisols à drainage externe possible

Ils se localisent à l'Est de Ben Azzouz et au Sud de Ain Nechma, et couvrent une superficie totale de 1183 ha. Ils sont localisés sur des pentes et offrent ainsi un certain drainage externe ; ils sont formés sur des colluvions peu ou pas calcaires et sur des alluvions fines calcaires. Ces sols ont une texture fine à très fine, l'hydromorphie est fonction du niveau argileux du profil.

5.2.2. Sous-classe des vertisols à drainage externe nul ou réduit

Ce sont des sols profonds, présentant une texture fine à très fine, et se sont formés sur des alluvions peu ou pas calcaires et sur des terrains à faible pente ou l'action de l'hydromorphie qui a un rôle très important dans la pédogenèse de ces sols, surtout, durant les périodes pluvieuses ; cette sous-classe occupe une superficie de 608 ha.

5.3. Classe des sols calcimagnésiques

Ils sont localisés autour du village de Ain Nechma, et couvrent une superficie de 842 ha ; ces sols sont formés sur des colluvions calcaires du glaciaire, et sont caractérisés par une quantité insuffisante de calcaire actif, et un taux d'argile élevé avec une texture très fine dans tout le profil.

5.4. Classe des sols fersialitiques

Ces sol ont été décrits dans la zone située au Nord-Ouest de Boumaïza, et couvrent une superficie de 332 ha ; ils sont caractéristiques des climats méditerranéens (humides et sub-humides). Ce sont en général, des sols anciens formés sur des matériaux calcaires ou non

calcaires, bien drainés, formés sur des roches composées de schistes et de micaschistes, la texture est fonction de la profondeur.

5.5. Classe des sols hydromorphes

Les sols de cette classe ont été décrits dans plusieurs endroits et sont localisés dans des dépressions à submersion temporaire ou permanente ; ils occupent une superficie totale de 1869 ha, et appartiennent à la sous-classe des sols minéraux ou peu humifères à pseudogley, cependant deux sous-groupes ont été définis.

5.4.1. Sous-groupe à pseudogley de surface

C'est le cas des sols situés sur des alluvions fins ou calcaires, ayant une texture très fine argilo-limoneuse à très argileuse.

5.4.2. Sous-groupe à pseudogley

Ils sont situés à l'Ouest de Boumaiza, ce sont des sols formés sur des alluvions fins peu calcaires à texture moyenne en surface et très fine en profondeur.

6. Occupation des sols

La carte d'occupation élaborée présente une grande diversité thématique, ainsi les classes les plus dominantes sont :

- Pelouses et prairies (9501 ha)
- Cultures maraichères (6793 ha)
- Sol nu (5288 ha)
- Zones inondables cultivées (2323 ha)

Ces 04 classes montrent clairement la vocation agricole de la zone et l'extension de la superficie agricole au profit du couvert végétal. Ce dernier est présenté en 03 classes essentielles du point de vue superficie et sont :

- Maquis à oléastre et lentisque (4964 ha)
- Maquis à bruyère et myrte (2515 ha)
- Chêne-liège (1881 ha)

La zone de Guerbès-Sanhadja est entrain de perdre sa subéraie suite à des incendies, alors que les sols nus, issus de la dégradation par défrichement mais aussi à cause des incendies des formations du massif dunaire, essentiellement composé de chênes kermès, ont augmenté de superficie. La figure montre également le recul rapide des ripisylves et des aulnaies en raison des pressions de coupes et de défrichement qui y sont menées pour être remplacées par des zones de cultures (Figure 3).

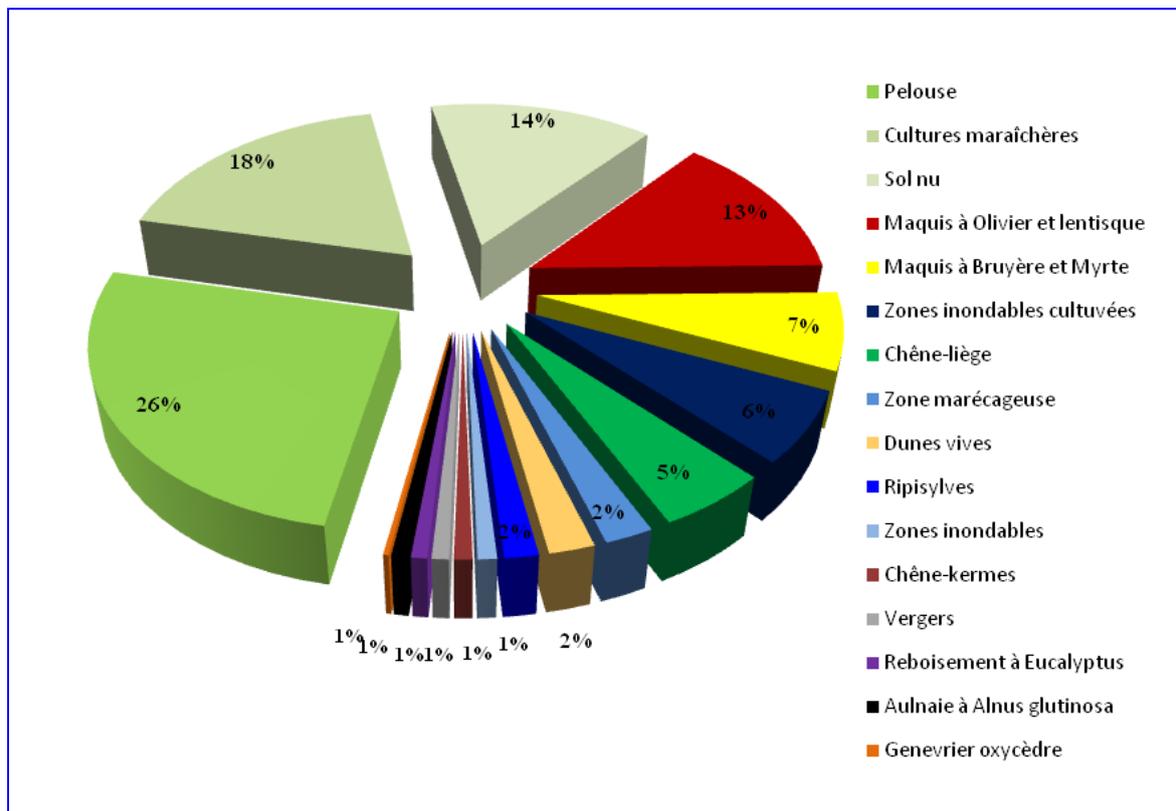


Figure 3 Proportions des unités paysagères du complexe humide Guerbès-Sanhadja (Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda)

Les sols revêtent une importance particulière de par leur position d'interface entre le substrat géologique et la végétation. Ils peuvent être affectés par les activités humaines, notamment les modifications de la couverture végétale.

Dans le secteur d'étude, les conditions pédologiques sont surtout dépendantes des rapports avec l'eau : sols hydromorphes dans les dépressions à submersion temporaire ou permanente (1869 ha), alluvions actuelles dans les marécages et sols peu évolués d'apport alluvial en bordure des oueds (Toubal et al., 2014).

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

Les sols alluviaux à hydro mull (en pédologie, horizon caractéristique d'un sol hydromorphe) portent des frênaies-aulnaies (Géhu-Franck et *al.*, 1988 in Toubal *et al.*, 2014), tandis que des groupements forestiers se développent sur les sols bruns plus ou moins lessivés, parfois à tendance podzolique, de la partie occidentale du terrain d'étude (Figure 4).

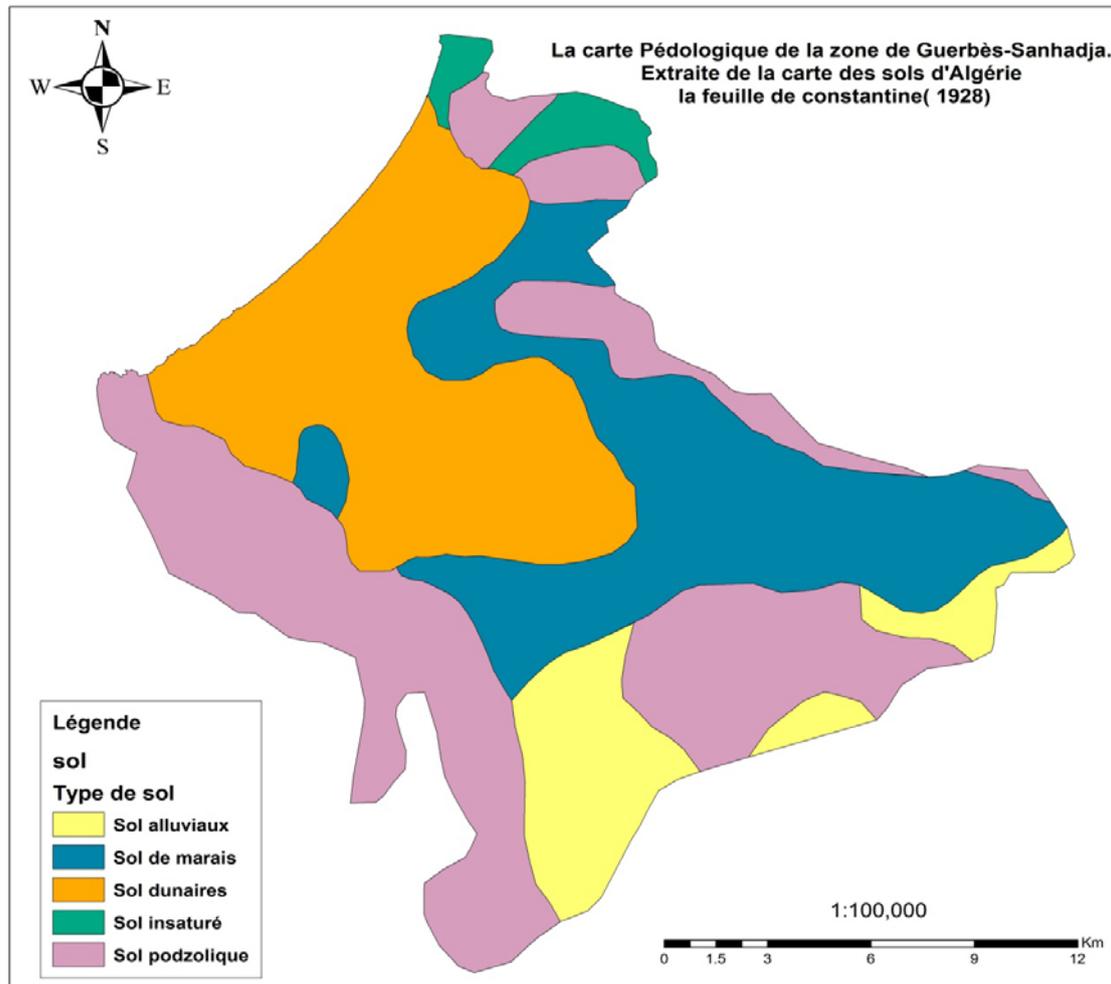


Figure 4. Les différents types de sols dans la région de Guerbès-Sanhadja (CF/ DGF de Skikda)

6.1. Le domaine forestier

La couverture forestière est constituée essentiellement de chêne liège et de maquis. Les trois communes supportant le complexe représentent 9360 hectares de l'espace forestier.

Tableau 4 Couverture forestière et statut juridique du complexe humide Guerbès-Sanhadja

Communes	Superficie [ha]	Statut juridique		Etat physique	Essence dominante
		Domanial [%]	Privé [%]		
Ben Azzouz	2532.81	97	3	Dégradé	Maquis à olivier et lentisque
La Marsa	4196	95	5	Bon	Maquis à bruyère et myrte
Guerbes	2631.19	88	12	Moyen	Chêne liège

(Source : CF/ DGF de Skikda)

6.2. Le domaine agricole

Le secteur de l'agriculture soit l'un des plus gros pourvoyeurs d'emplois dans les trois communes du complexe de Sanhadja [52% du total de main d'œuvre] permanents et saisonniers dans la région.

Tableau 5 La population active à l'agriculture dans le complexe humide Guerbès-Sanhadja

Communes	Population active	% Population active dans l'agriculture
Ben Azzouz	6751	67.04
La Marsa	1722	65.5
Guerbes	610	70
Total	9083	67.50

(Source : PDAU Ben Azzouz, La Marsa Djendel)

Tableau 6 Répartition de la surface agricole totale [SAT] dans le complexe humide Guerbès-Sanhadja

Communes	Terres Labourables		Productions permanents			S.A.U	Parcours et Pacages	Terres Improductives	S.A.T
	Cultures herbacées	Terre au repos	Prairies Naturelles	Vignobles	Arbres fruitiers				
Ben Azzouz	7331	3419	0	24	627	11401	3354	380	15135
La Marsa	1099	652.31	0	0	45	1796.3	641	662	3099.31
Guerbes	3734	97.79	21	206.5	593.25	4652.5	1769	635	7056.54

(Source : direction des statistiques agricoles et des enquêtes économiques de Skikda)

6.3. Cas particuliers des zones humides et leur typologie

Le classement Ramsar de plusieurs sites d'intérêt international pour les oiseaux d'eau attire notre attention sur les zones humides. Il est difficile de les classer, car la plupart d'entre-elles constituent une richesse patrimoniale supplémentaire et appartiennent à la fois à plusieurs types d'écosystèmes. Cependant, nous distinguerons quatre types de zones humides : les aulnaies ou nechâas, les étangs ou garâas, les lagunes et enfin les cours d'eau et ripisylves. Le nombre total de sites correspondant à la définition de la convention de Ramsar inventorié dans la région de Guerbès est de 36.

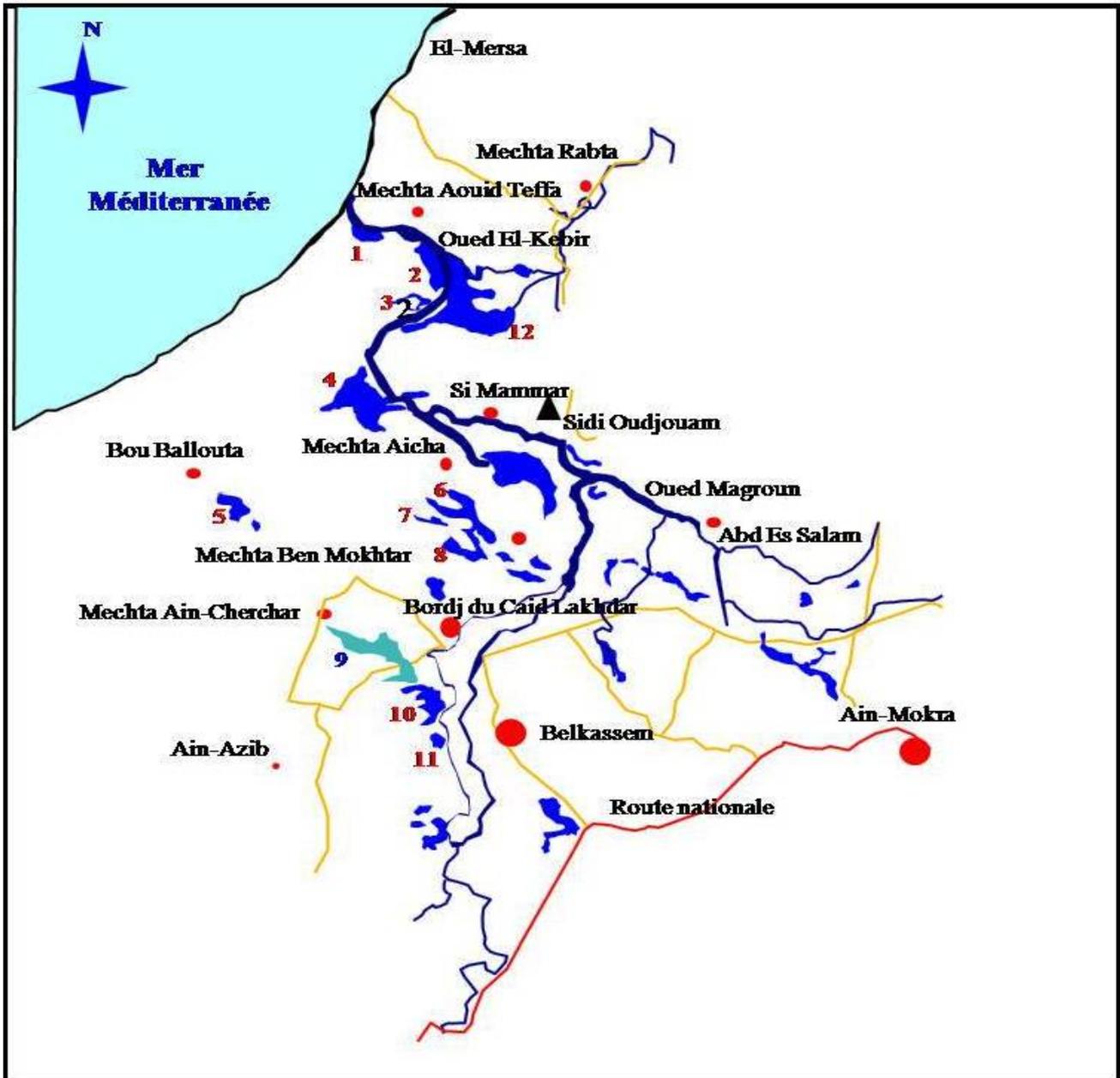


Figure 6 Disposition générale des zones humides Guerbès-Sanhadja (CF/ DGF de Skikda)

6.3.1. Les aulnaies

Tous ces sites sont dominés par l'Aulne, les Saules, les Fougères et les Cypéracées.

Demnat Ataoua (280 ha). Cette aunaie, de direction SE-NW, occupe une vallée dunaire, sur la rive gauche de l'oued El Kébir Ouest. Texture sablonneuse en surface, tourbeuse en profondeur. Elle est remarquable par sa dimension et sa biodiversité élevée. Elle est alimentée par une source au SE et par la nappe phréatique dunaire.

Khellalba (75 ha environ). Cette formation s'étend en longueur au contact dune-plaine alluviale marécageuse. Texture sablo-tourbeuse. Elle est exclusivement alimentée par le phréatique dunaire et les inondations de l'oued El Kébir.

Laouledj (50 ha environ). Elle s'étale de part et d'autre de la route Ben Azzouz-Kef Fatima, à l'Est du lac Sidi Freitis. Texture sablo-tourbeuse.

Nechaâs Haoua (3 à 4 ha). Au contact dunes-lagune Haoua (rive gauche de l'oued El Kébir), trois petites aunaies se sont constituées. Sol sablonneux en surface, alluvionnaire en profondeur, accompagné d'un lit tourbeux, favorable au développement d'aunaies. Alimentation hydrique par la nappe dunaire et les inondations de la lagune.

Nechas Chichaya (de l'ordre de 50 à 60 ha). Ces deux aunaies se sont formées dans la partie haute des vallées dunaires de deux étangs, portant ce nom. Surmontées par des dunes déforestées, les sables mobiles ont tendance à les envahir. L'horizon tourbeux peut varier de quelques cm à plus d'un mètre. (Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda)

7. Hydrologie et hydrogéologie

7.1. Hydrologie

Les ressources en eau en Algérie proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. Les bassins versants sont regroupés en trois zones (ANRH, 1993) :

- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au Nord de l'Algérie ont un apport moyen annuel estimé à 11 milliards de m³. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques.
- Les bassins endoréiques occupant les hautes plaines dont les eaux se perdent en grande partie par évaporation dans les chotts. L'écoulement annuel moyen est estimé à 700 hm³.
- Les bassins sahariens apportent en moyenne 650 hm³ par an. L'écart pluviométrique moyen montre un déficit accentué d'Est en Ouest. L'Est algérien est la partie la plus humide avec une moyenne pluviométrique de 530 mm par an. Le centre occupe la seconde place avec 480 mm. Enfin, l'Ouest est plus sec avec une moyenne annuelle de 260 (Alili, 1993).
- Dans la région de Guerbès-Sanhadja on trouve :

7.1.1 Les étangs

Sidi Makhoulf (40 ha environ). En fonction de la pente SE-NW, le sol sablo-tourbeux devient argilo-tourbeux. Il est entièrement alimenté par le phréatique dunaire. Eau libre à hydrophytes (dont nupharaie), scirpaie à héliophytes et hygrophytes, aulnaie (voir plus haut).

Chichaya (40 ha environ). Sol et alimentation hydrique identiques à ceux de Sidi Makhoulf. Eau libre à divers hydrophytes, dont des Ptéridophytes aquatiques et des Polygonacées, parsemée de touradons, occupés par le Saule et certaines Fougères, et de Scirpes.

El Guelb (15 ha). Il forme un marais en hiver, une prairie en été, dominé par quelques hydrophytes, la scirpaie et les Cypéracées. Texture argileuse.

Ouaja (20 ha). Ce marais à texture argileuse, partiellement tourbeuse, comporte une saulaie, une surface d'eau libre temporaire suivant les années, creusé de canaux et de bassins par les riverains. Eau libre à hydrophytes (dont nupharaie) et amphiphytes, scirpaie, cariçaie et pelouse humide.

Mtaïba (5 ha environ). Sol argileux dominé par la junçaie et, lors de la période hivernale, eau libre à hydrophytes et amphiphytes.

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

Bechna (0.5 ha). Formation tourbeuse sur dépression dunaire. Elle est dominée par une isoetaie.

Linaires (2 ha environ). Ce sont un ensemble de 3 bassins, creusés par les riverains dans une dépression dunaire, comportant malgré les perturbations, de nombreuses hydrophytes (y compris une nupharaie) et amphiphytes rares. Texture sablo-tourbeuse.

Bouina (20 ha environ). Véritable complexe dunaire, comportant une surface d'eau libre à nupharaie, une junçaie, une scirpaie, de nombreuses Ptéridophytes et une frênaie-ulmaie. Texture sablo-tourbeuse.

Larguèche (2 ha environ). Texture sablo-tourbeuse, située dans une petite vallée dunaire. Elle comporte à la fois une petite aunaie, une scirpaie, une ptéridaie, une cariçaie et une surface d'eau libre à Potamots et nupharaie.

Garaat Hadj Tahar (80 ha). Eau libre à nupharaie, potamaie, Polygonacées, Ptéridophytes aquatiques, Scirpes, rives à aunaies, ulmaies, fraxinaies. Cet étang s'étend en longueur du SW au NE au contact entre dunes et plaine alluvionnaire d'un ancien lit de l'oued El Kébir (oued Maboun). Texture sablo-tourbeuse au Nord, argilo-tourbeuse au Sud.

Les Oliviers (2 ha). Eau libre à hydrophytes et amphiphytes, scirpaie, pelouse humide et végétation ripicole à Orme, Frêne et Saule blanc. Texture argileuse avec un faible horizon tourbeux.

Emifor (quelques ares). Un bassin sur texture sablo-argileuse, très artificialisé. Quelques hydrophytes.

Nouar Ezzouaoua (probablement près de 100 ha). Ancien marais, partiellement aménagé, sur texture colluvionnaire argileuse. Se présente comme une prairie/maquis inondable, parsemée de bassins artificiels. L'une comme les autres présentent une flore à base de scirpaies, cariçaies, tamaricaies et d'un maquis résiduel.

Sidi Lakhdar 1 (autour de 40 ha). Il est constitué par un ensemble de bassins, mis en place sur le cours d'un oued dans une vallée orientée SE-NW. Texture argileuse lourde au SE

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

devenant progressivement argilo-sablonneuse au SE à proximité du massif dunaire. Hydrophytes et amphiphytes se partagent les plans d'eau. Une prairie humide, riche en renonculacées, fabacées et nano-juncacées, est bordée d'une végétation ripicole à Aulnes, Frênes, Peupliers et Saules.

Sidi Lakhdar 2 (20 ha). Petit estuaire de l'oued précédent, formant plans d'eau, marais et prairie humide sur texture limono-sablonneuse. Hydrophytes, cypéracées et juncacées se partagent les plans d'eau et les marais, tandis que la prairie humide est occupée par diverses graminées, fabacées et orchidées. La végétation rupicole est constituée de Chêne-liège, Tamaris, Frênes, Saules et Aulnes.

Sidi Freitis (autour de 40 ha). Ce lac est installé dans une vallée dunaire et alimentée exclusivement par des sources et le phréatique dunaire. Ce site comporte principalement une ériçaiie à Ptéridophytes, cypéracées et orchidées, une surface temporaire d'eau libre à nupharaie, potamaie et isoetaie, des prairies humides et une végétation rupicole à Saule cendré, Frêne, Aulne et Peuplier. Il présente la plus grande biodiversité de la région, soit 140 taxons. Texture sablo-tourbeuse.

Dissia (1 ha). Petit bassin artificiel dans un creux dunaire, naguère plans d'eau entouré de Saules et de Bruyère à balais.

Boumaïza (près de 70 ha). Cet ancien marais est parsemé d'une vingtaine de puits artificiels, riches en hydrophytes et amphiphytes, les rives comportant diverses juncacées et cypéracées. La plus grande part de cette dépression, située sur la rive droite de l'oued El Kébir, est formée d'une prairie humide à graminées et fabacées. La texture est argileuse lourde et d'origine alluvionnaire et colluvionnaire.

Aïn Magroun (9 ha). Ce site est la résultante d'un bassin artificiel, situé dans une vallée marécageuse, sur la rive droite de l'oued Maboun, un bras mort de l'oued El Kébir. Texture argileuse lourde. Formations végétales d'hydrophytes et d'hygrophytes dans le plan d'eau et sur les rives.

Aïn Nechma (au moins 100 ha). Chabaâs (affluents de l'oued El Kébir), prairies humides et bassins artificiels se partagent ce site, à proximité d'un maquis résiduel à Oléo-lentisque.

Texture lourde, à dominante de gypse colluvionnaire. Ce site est le siège d'une biodiversité originale à tamaricaie, juncacées, cypéracées et polygonacées.

Louhat (38 ha environ). Situé au Sud de la route Ben Azzouz-Oued El Aneb, il est alimenté par les collines méridionales de Ben Azzouz, sa texture est argileuse. Plan d'eau temporaire riche en hydrophytes et hygrophytes, prairie humide occupée par poacées et fabacées.

Khédidja (5 ha). Situé à l'Est du marais précédent, dans une vallée sablo-argileuse (grès et sables de Numidie) et très artificialisé, ce site épouse le lit d'une chabaâ. Le plan d'eau temporaire comporte de nombreuses hydrophytes et est entouré d'une prairie humide.

Khémissa (10 ha). Dans la même position géographique que la précédente, ce site peut comporter un plan d'eau important, par suite des aménagements opérés par les riverains. Mêmes caractéristiques pédologiques et géomorphologiques que Khedidja. Hydrophytes et amphiphytes se partagent le plan d'eau et les rives, particulièrement les butomacées.

Bordj du Cantonier (1 à 2 ha). Ce site est situé dans un talweg à proximité de la route, citée plus haut ; il est constitué de bassins artificiels, où dominant les hydrophytes, une scirpaie, une junçaie et de nombreuses poacées et fabacées. Texture argileuse lourde.

El Azla (0.5 ha). Il est formé de 2 bassins, à proximité du village du même nom. Texture argileuse. Ce site est notamment occupé par la scirpaie et les polygonacées. Sa végétation rupicole est marquée par le Tamaris, le Peuplier et le Laurier rose.

7.2. Les marres

La partie terminale de la plaine avec les garaet (marres) Haoues et Beni M'Hamed(respectivement 260 ha et 380 ha environ). Ces sites sont constitués des alluvions de l'oued El Kébir et des colluvions des collines méridionales et septentrionales. Tous deux sont occupés par les halophytes, les juncacées et sur les rives de la tamaricaie. Ils sont en majeure partie à sec en été. Durant l'hiver, ils sont un lieu de refuge ou de passage de nombreux oiseaux hivernants.

Oued El Kébir (1 à 2 ha). Une petite lagune a pris naissance à proximité de l'embouchure de l'oued El Kébir. L'eau libre est occupée par une ruppiacée et ses rives par des juncacées et une verbénacées. La texture est sablo-tourbeuse.

La Marsadelle(près de 10 ha). Ce « lac » est très variable suivant les années et peut s'assécher totalement ; il épouse le lit d'une chabaâ, qui trouve sa source dans les collines méridionales. Prairie humide à renonculacées et poacées et eau libre à nupharaie et myriophyllées se partagent cet habitat.

7.3. Les cours d'eau et ripisylves

El Kébir. La ripisylve est dans son amplitude, tributaire de l'habitat et de l'agriculture. Frênes, Peupliers et Saules occupent cet habitat, accompagné de lythracées et de diverses lianes.

Maboun 1. Ce site se situe à proximité du pont reliant Ben Azzouz à Aïn Nechma. La ripisylve, naguère riche en Ormes, Frênes et Saules, s'est appauvrie comme l'eau libre riche en hydrophytes et amphiphytes. Il s'agit d'un bras mort de l'oued El Kébir.

Maboun 2. Ce site, à proximité du pont à la sortie de Ben Azzouz en direction de Dem El Begrat, présente une richesse spécifique inattendue, rassemblant nupharaie, scirpaie, junçaie et Ptéridophytes aquatiques. Ses rives sont occupées par le Frêne, l'Orme et l'Olivier.

El Aneb 3. Cet affluent, rive droite de l'oued El Kébir, présente par endroits une véritable ripisylve d'Ormes, de Frênes et de divers Saules. Quant à l'eau libre, au milieu de nombreuses hydrophytes, se trouve *Trapa natans* (connue seulement au lac Oubeïra).(Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda)

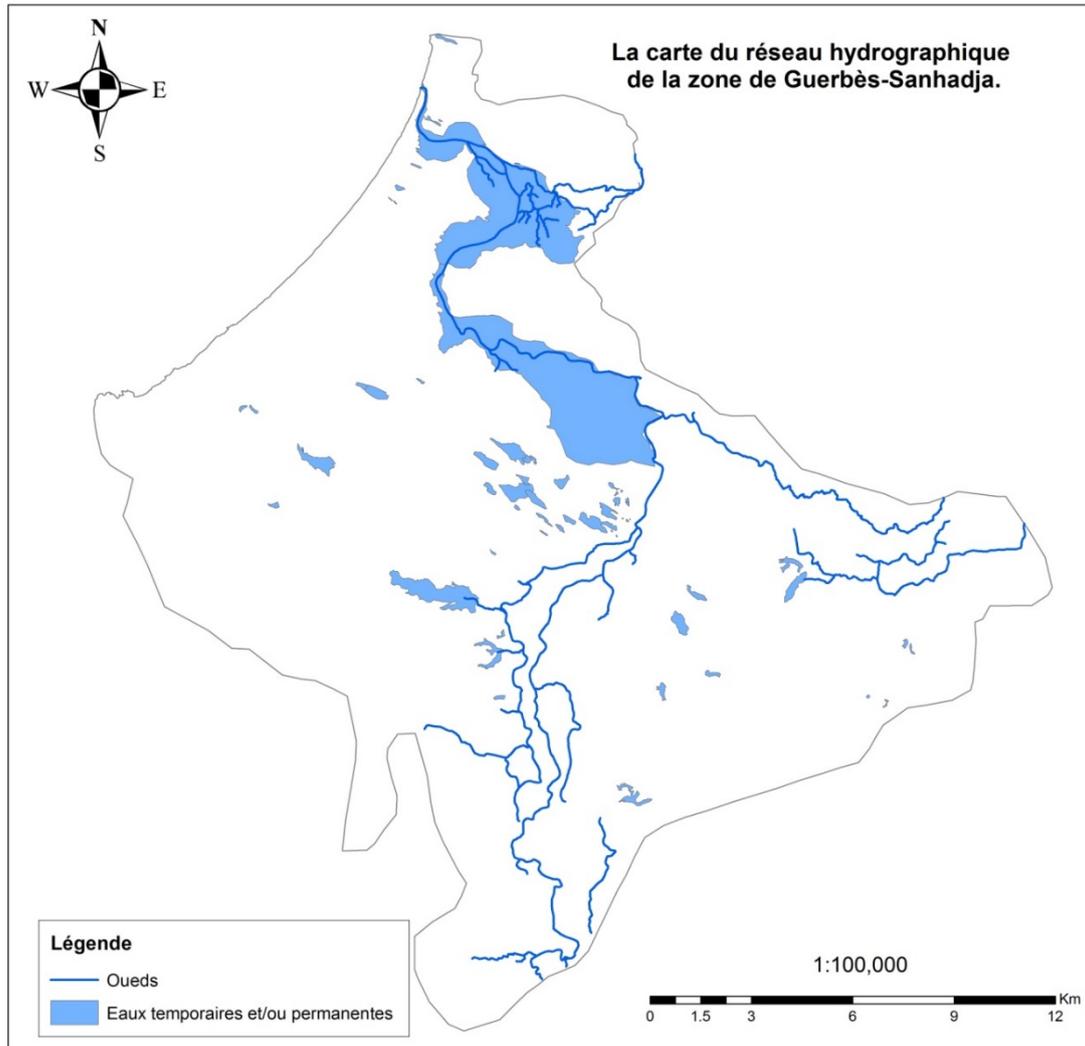


Figure 7 Réseau hydrographique du complexe humide Guerbès-Sanhadja
(Modifié par HADJOUJIA ,2020)

8. Les unités écologiques, les habitats et la flore

8.1. Les milieux terrestres

8.1.1. La subéraie

La forêt de Guerbès réputée pour sa subéraie (*Quercus suber*) est en régression devant l'habitat humain, l'agriculture et la plantation irrationnelle de diverses essences introduites telles que des Eucalyptus, des Mimosas et des Acacias. Quand la subéraie existe encore, comme au Sud-Ouest de Dem El Begrat, une grande biodiversité floristique la caractérise avec une succession dans l'année, de diverses espèces vivaces ou annuelles.

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

- En automne : *Scilla numidica*, *S. autumnalis*, divers *Narcissus*, *Leucojum autumnale*, *Spiranthes spiralis*
- Au printemps : *Gladiolus byzantinus*, *Ophrys tenthredinifera*, *Romulea bulbocodium*, *Simethis planifolia*, *Anthericum liliago*, *Allium paniculatum*, *Eryngium dichotomum*,
- En été : de nombreuses Ombellifères comme l'assez rare *Daucus gracilis*, *Magydaris pastinacea*, *Elaeoselinum asclepium*, *Daucus reboudii* (endémique N.A.) ou *Kundmannia sicula*...

La subéraie : inondée par endroit avec passage de sable. *Quercus suber*, *Daphne gnidium*, *Erica arborea*, *Cistus salvifolius*, *Asphodelus aestivus*, *Fedia cornucopiae*, *Hyoseris radiata*, *Cyclamen africanum*, *Bellis annua*, *Anagalis arvensis*, *Cynoglossum cheirrifolium*, *Clematis flamula*, *Poa annua*, *Lythrum junceum*, *Biscutella didyma*, *Carx elata*, *Myrtus communis*, *Geranium molle*, *Anograma leptophylla*, *Cytisus triflorus*, *Anthoxanthum odoratum*, *Linum usitatissimum*, *Rubus ulmifolius* (Extrait du plan de gestion CF/ DGF de Skikda)

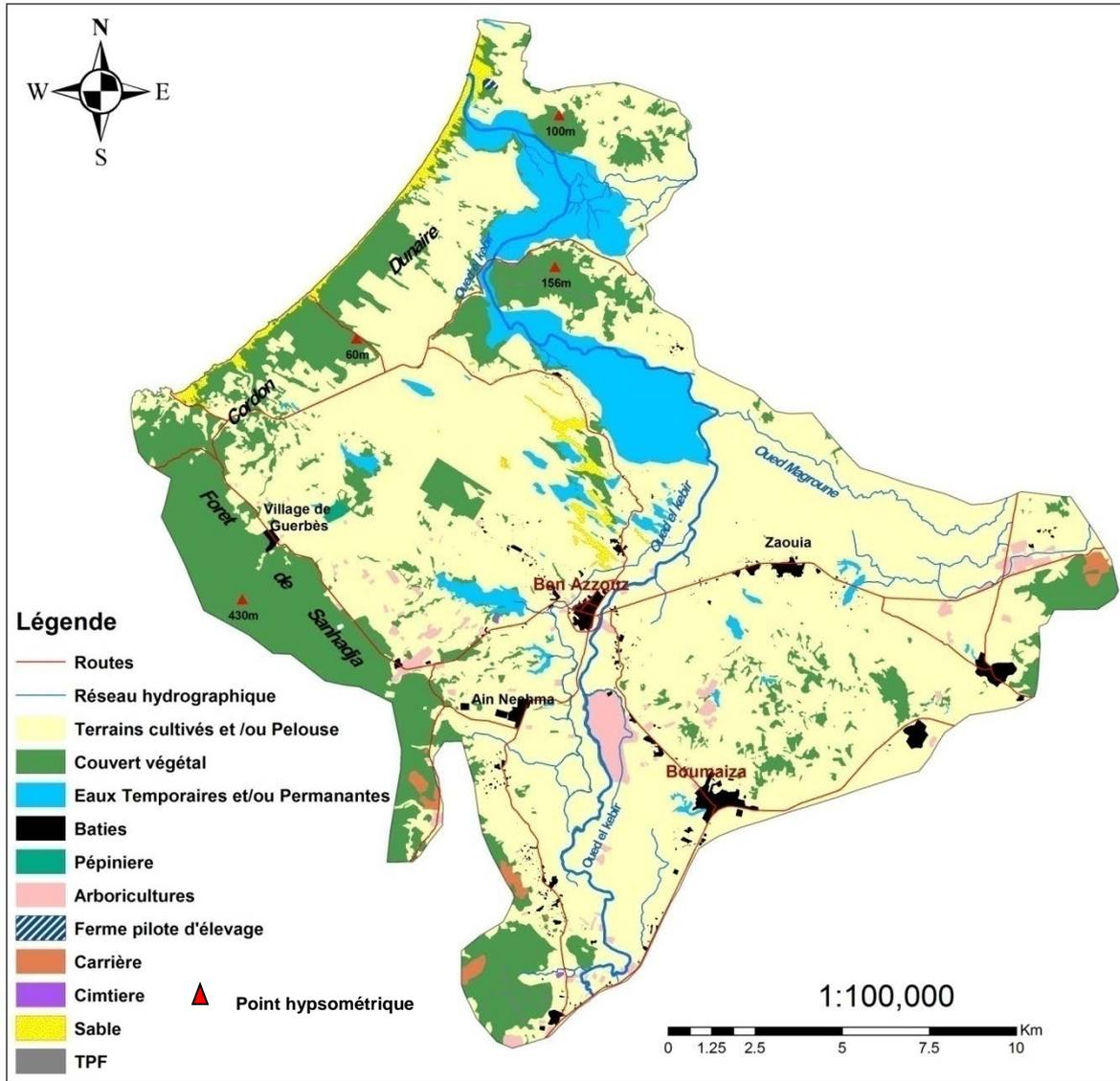


Figure 8 Occupation des sols du complexe humide Guerbès-Sanhadja.

(Modifié par HADJOUJJA ,2020)

Tableau 7 Les superficies d'occupation du sol dans la zone Guerbès-Sanhadja en 2003 et 2016.

Unités	Superficies en ha 2016	Superficies en ha 2003
Arboricultures	664,28	469,39
Bâties	518,98	460,27
Carrières	162,03	152,88
Cimetières	6,02	6,02
Couvert végétal	7543,67	8902,36
Eaux temporaires et/ou permanentes	2888,73	2888,73
Pépinières	28,37	28,37
Sables	440,64	440,64
Terrains cultivées et/ ou pelouse	24687,36	23653,57
Fermes pilote d'élevage	15,73	/
TPF	44,90	/

Source : CF/ DGF de Skikda

9. Caractérisation du climat de la région de Skikda

Pour étudier le climat de la région du complexe humide Guerbès-Sanhadja ,nous avons choisi les données disponibles sur la station météorologique de Skikda. Les données climatiques prises en considération pour l'étude du climat de la zone d'étude portent sur 11 ans et concernent les moyennes mensuelles de la période 2005-2016.

9.1. Variations moyenne mensuelle de la vitesse du vent

Le vent représente l'un des facteurs les plus déterminants du régime pluvieux, sur la région de Skikda le vent de direction Nord-Ouest dans la force est assez constante, les moyennes du vent au cours des années 2005/2016 et oscillent entre 3.2 et 3.91 (tableau 4).

Tableau 8 Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent de la station de Skikda (2006/2016).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyennes (en m/s)	3.68	3.89	3.61	3.21	3.2	3.2	3.2	3.91	3.2	3.31	3.48	3.62

9.2. Variations moyenne mensuelle de l'humidité

L'humidité relative est le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la température mesurée au thermomètre sec exprimé en %. A la station de Skikda (2005/2016), les moyennes varient de 71.50 % en printemps au mois d'avril à 65.95 % en printemps au mois de mai (tableau 5).

Tableau 9 Les moyennes mensuelles de l'humidité à la station de Skikda (2005/2016).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyennes (en %)	70.65	69.33	70.7	71.50	65.95	70.05	69.03	69.65	69.85	67.64	67.89	71.25

9.3. Variations moyenne mensuelle de l'évaporation

Les valeurs de l'évaporation sont celles mesurées à l'aide de l'évaporomètre réalisées au niveau de la station de Skikda (2005/2016). Le tableau 5 présente les moyennes de l'évaporation, les maximales ont eu lieu au mois Juillet (88.52 mm) et les minimales en Janvier (47.98 mm).

Tableau 10 Les moyennes mensuelles de l'évaporation de la station de Skikda (2006/2016).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyennes (en mm)	47.98	46.13	55.76	56.25	62.04	73.45	88.52	86.64	74.9	72.25	62.6	83.15

9.4. Variations de la température moyenne mensuelle

L'analyse de la courbe de variation de la température moyenne mensuelle, sur une période de 11 ans (2005-2016), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (mai- septembre) avec des températures allant de 16.99 à 25.7°C. Les valeurs les plus basses, qui varient de 12.95 à 14.01 °C, sont observées durant la période hivernale (décembre – avril), avec un minimum pendant le mois de février (12.95°C). L'influence de la température sur la qualité chimique se fait sentir pendant la période d'été, où on a une concentration des éléments par évaporation.

Tableau 11 Les moyennes mensuelles de la température de la station de Skikda (2005/2016).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyennes (en °C)	13.24	12.95	14.01	16.99	19.45	22.73	25.78	26.28	23.94	21.68	17.19	13.89

9.5. Variations moyennes mensuelles des précipitations

L'étude pluviométrique présente un intérêt considérable en hydro-climatologie, car elle permet de décrire le régime d'écoulement. La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 11 ans (2005-2016), montre que le mois de décembre est le plus pluvieux, avec 124.67 mm, alors que le mois de juillet est le plus sec, avec 1.583 mm (figure 9).

Tableau 12 Les moyennes mensuelles des précipitations de la station de Skikda (2005/2016).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Moyennes (en mm)	105.57	108.45	96.83	48.60	38.55	9.75	1.58	15.92	56.62	76.71	95.08	124.67

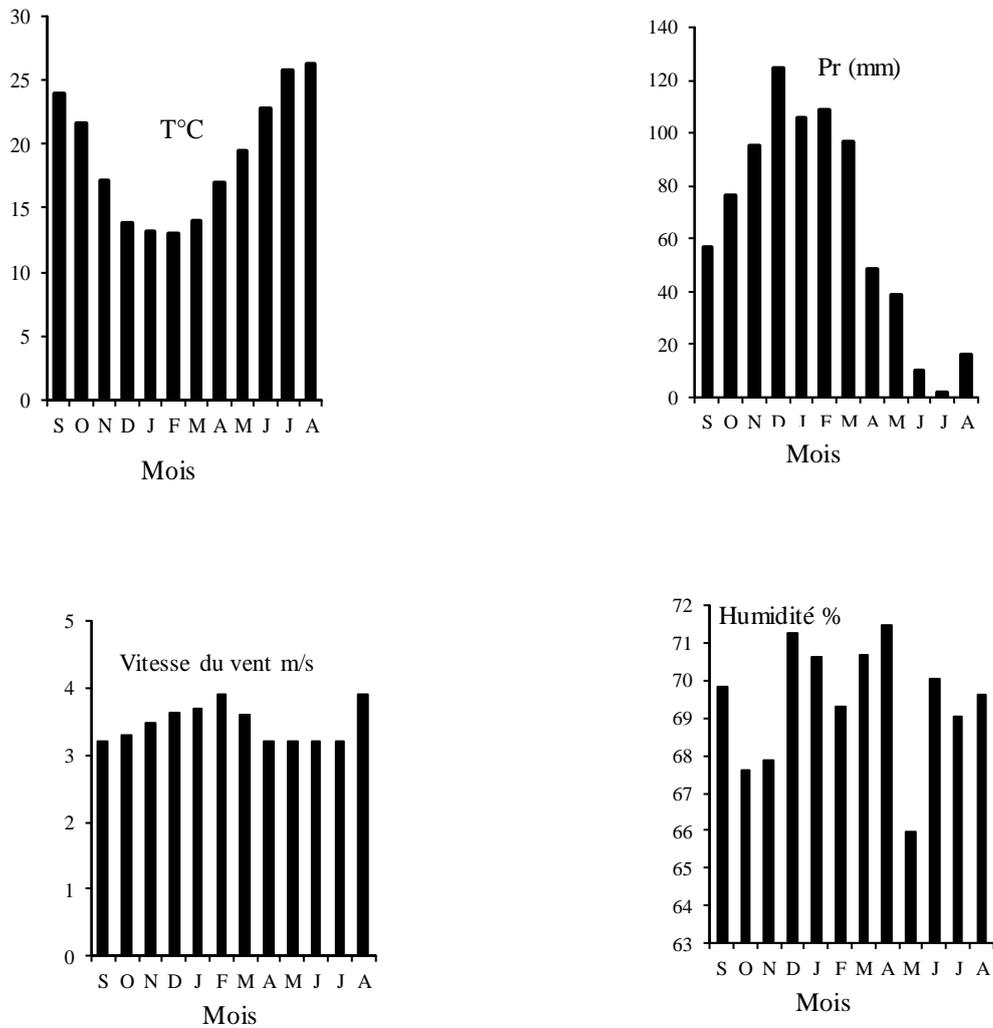


Figure 9 Variations moyennes mensuelles des données climatiques à la station de Skikda pour la période 2005-2016.

9.6. Diagramme pluvio-thermique

Selon Gaussen (1953), un mois est dit sec si, le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades. Cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes pluvio-thermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes (température

et précipitations). Le diagramme de Gaussen (figure 10) permet de mettre en évidence une saison humide débutant du mois de septembre et qui se termine au mois de mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'août.

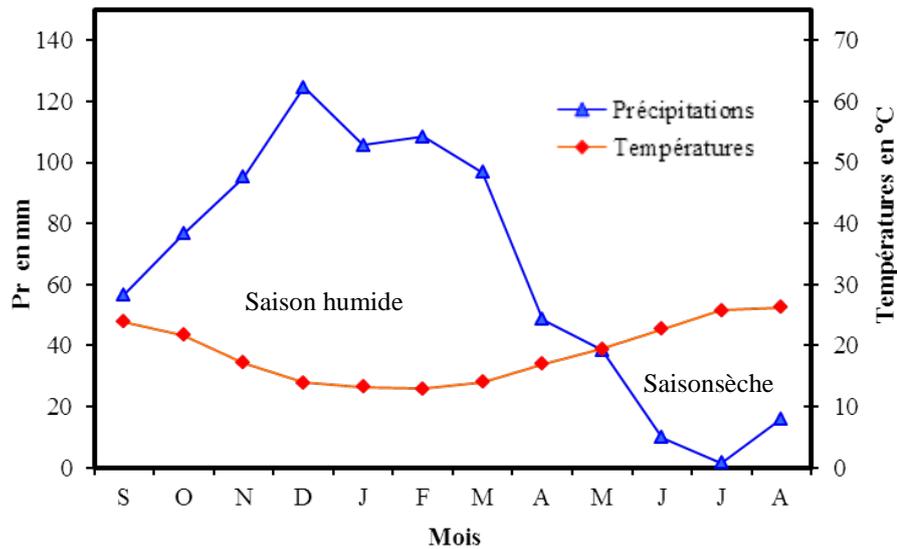


Figure 10 Diagramme pluvio-thermique à Skikda (2005/2016).

9.7 Quotient pluvio-thermique de Emberger

C'est la classification bioclimatique la plus utilisée dans la région méditerranéenne. Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q. Ce quotient dépend des précipitations moyennes annuelles et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{1000 \cdot P}{2 \cdot \left(\frac{M+m}{2}\right) (M - m)}$$

Avec :

Q : quotient pluviométrique d'Emberger

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud, en degrés Celsius

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid, en degrés Celsius

P : cumul pluviométrique annuel, en millimètres

Le quotient d'Emberger est défini par la formule:

$$Q = 75.29$$

$$Q_2 = \frac{2000 p}{(M^2 - m^2)}$$

Avec :

Q_2 : quotient pluviométrique modifié d'Emberger

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud, en degrés Celsius (°C)

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid, en degrés Celsius (°C)

P : Précipitations moyennes annuelles millimètres (mm)

Le quotient d'Emberger est défini par la formule: $Q_2 = 75.29$

Le report de notre station sur la figure 11 permet de dire que le climat de la région de Skikda est de type tempéré méditerranéen à étage bioclimatique sub-humide.

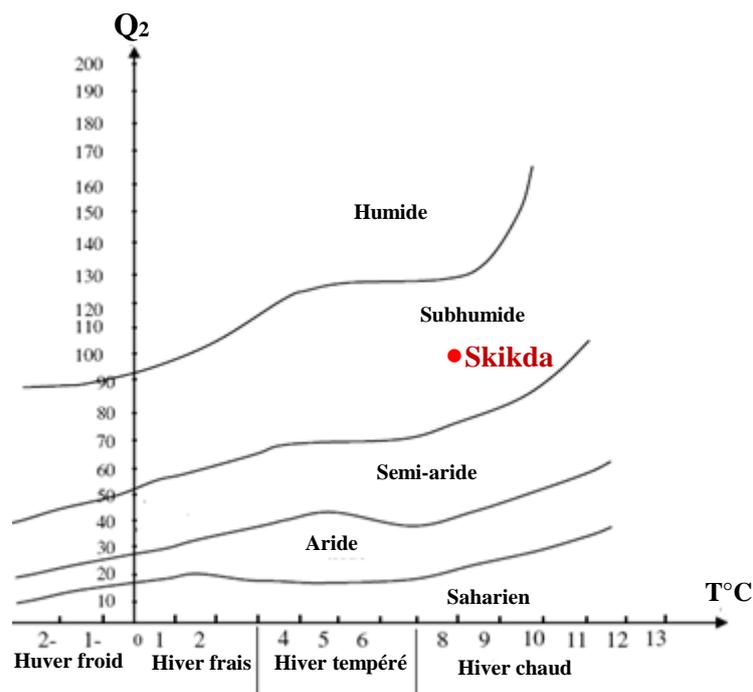


Figure 11 Climagramme d'Emberger de la station de Skikda (2005/2016)

9.8. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitations ou neige avant de retourner à l'atmosphère. Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule de Thornthwaite :

$$P = ETR + R + I$$

ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm)

I : infiltration,

P : précipitation,

R : ruissellement.

Elle est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU); celle-ci peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

Le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :

1^{er} cas: $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$ on a alors un excédent.

2^{ème} cas: $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

- ***Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)***

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU. En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle. Cette estimation se fera à partir de la formule de Thornthwaite.

- ***Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)***

On appelle évapotranspiration potentielle, exprimé en hauteur de lame d'eau ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on a appliqué les formules de Thornthwaite. Les données température qu'on dispose sont celles de la station de Skikda, elles sont utilisées pour l'estimation de l'ETP.

D'après le tableau 9 la valeur maximale de l'ETP est au mois de juillet (150.7) et la valeur minimale est au mois de février (26.4).

- **Estimation des réserves facilement utilisables**

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle.

La profondeur de la nappe (cas des eaux souterraines).

Le climat de la région.

Le type de la couverture végétale (Ghrieb, 2011).

Tableau 13 Bilan hydrique d'après Thornthwaite (Station de Skikda, 2005/2017).

	T	ETP	Pr	BH	RFU	ETR	DA	Exc.
S	23.9	107.7	56.608	-51.1	0.0	56.6	51.1	0.0
O	21.7	83.6	76.617	-7.0	0.0	76.6	7.0	0.0
N	17.2	46.8	95.083	48.3	48.3	46.8	0.0	0.0
D	13.9	28.8	124.68	95.8	100.0	28.8	0.0	44.2
J	13.2	28.2	105.58	77.4	100.0	28.2	0.0	77.4
F	13	26.4	108.45	82.1	100.0	26.4	0.0	82.1
M	14	37.3	96.833	59.5	100.0	37.3	0.0	59.5
A	17	58.4	48.608	-9.8	90.2	58.4	0.0	0.0
M	19.5	84.1	38.55	-45.6	44.6	84.1	0.0	0.0
J	22.7	115.5	9.75	-105.8	0.0	54.4	61.1	0.0
J	25.8	150.7	1.583	-149.2	0.0	1.6	149.2	0.0
A	26.3	146.5	15.925	-130.6	0.0	15.9	130.6	0.0
Annuel		914.0		-135.8		515.1	398.9	263.2

- **Interprétation du bilan hydrique**

L'établissement du bilan hydrique nous permet de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, Def, Exc) qui nous aide à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface. Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement. Dès que, la RFU diminue, il y a un épuisement du stock au point où la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA).

Chapitre II. Caractéristiques de la zone d'étude

La figure 6 présente le graphisme du bilan d'eau (Thornthwaite) qui illustre les résultats du tableau 13 de la station de Skikda.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.7 mm) et son minimum au mois de janvier (28.20 mm). La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (48.3 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois de mars, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm), c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en mars, avec un maximum au mois de février (82.1 mm) et un minimum au mois de décembre (44.2 mm). L'excédent est égal à (209.03 mm). L'ETR est de l'ordre de (515.1mm). Le déficit agricole (DA) débute au mois de juillet et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

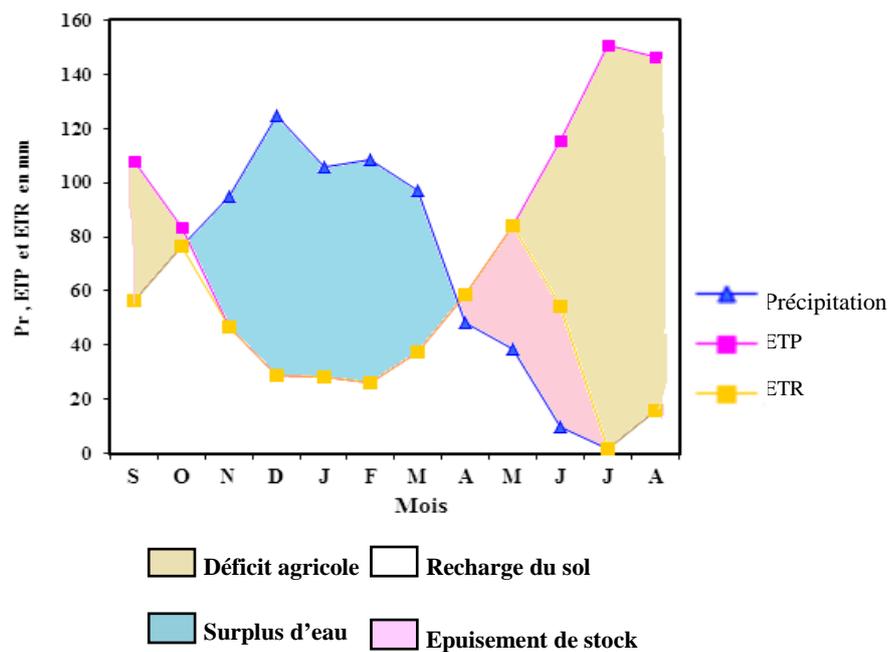


Figure 12 Graphiques du bilan d'eau (Thornthwaite, station de Skikda 2005/2016)

Chapitre III. Matériel et méthodes

Chapitre III. Matériel et méthodes

En générale le mécanisme naturel de la chimie des eaux dépend principalement de la nature des formations géologiques, des milieux traversés et du temps de séjour des eaux en effet l'interaction eau/roche est responsable de la modification des teneurs des éléments majeurs constitutifs tels que : potassium, magnésium, calcium, sodium, chlorure, sulfate, carbonate et bicarbonate...etc. Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs, climatiques, anthropiques, les échanges entre l'aquifère et les eaux de surface.

Pour cette étude dans l'éco complexe de Guerbès-Sanhadja, l'échantillonnage des eaux a été fait de manière à couvrir toute la zone afin d'avoir une bonne idée sur la qualité physico-chimique des eaux. Les campagnes de prélèvements ont porté sur trois cycles hydrologiques et ont fait l'objet d'analyses détaillées sur 3 années (2012,2013 et 2014) à raison d'un prélèvement par an.

Les zones cibles ont été choisies de manière aussi contrastées que possible du point de vue de leur situation géographique et des activités qui s'y exercent mais aussi l'importance de la superficie (tableau 14).

Tableau 14 Les principales mares (figure 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,20)

N°	Principales mares	Superficies (ha)	Coordonnées	Nombre d'échantillons
1	Bnimhamed (BM)	1100	36°56 ,53'N 7°14,162'E	3 (BM1, BM2, BM3)
2	Oued El Kebir (K)	/	/	1 (K1)
3	Msawssa(M)	392	36°56 ,06' N 7°14,71'E	1 (M1)
4	Chichaya (CH)	50	36°53 ,85'N 7°18 ,19'E	2 (CH1,CH2)
5	Hadj Taher (HT)	112	36°51 ,78' N 7°15,36' E	5 (HT1, HT2, HT3, HT4, HT5)
6	Sidi Makhoulf (SM)	11	36°53,09'N 7°18 ,36'E	2 (SM1,SM2)
7	Zaouia (Z)	12	36°52' N 07°21'E	3 (Z1,Z2,Z3)
8	Ain Nechma (AN)	01	36°50 ,27' N 7°15,96' E	2 (AN1,AN2)



Figure 13 Vue de la mare de Bnimhamed (BM)



Figure 14 Vue d'Oued El Kebir (K)



Figure 15 Vue de la mare de Msawsa(M)



Figure 16 Vue de la mare de Chichaya



Figure 17 Vue de la mare de Hadj Taher (HT)



Figure 18 Vue de la mare de Sidi Makhlouf (SM)



Figure 19 Vue de la mare de Zaouia (Z)



Figure 20 Vue de la mare d' Ain Nechma (AN)

Concernant les paramètres physiques ils ont été mesurés in situ et l'analyse chimique des échantillons a été réalisée au laboratoire, concerne les ions majeurs : (Calcium (Ca^{++}), Magnésium (Mg^{++}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+), Chlorures (Cl^-), Carbonates (CO_3^{--}), Bicarbonates (HCO_3^-), Sulfates (SO_4^{--}), Nitrites (NO_2^-), Nitrates (NO_3^-) et Ammonium (NH_4^+). Pour synthétiser les données physico-chimiques et les interpréter plusieurs techniques d'études et méthodes de présentation ont été mises en œuvre :

- Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi lesquels le diagramme de Piper qui permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leurs évolutions et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès et les processus géochimiques responsables ainsi que le diagramme de Stiff qui a été utilisé parce qu'il démontre mieux les ions dominants qui caractérisent l'empreinte de l'encaissant. Le logiciel Rockworks15 a été utilisé pour traiter l'ensemble des données.

Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.

- Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel « Diagramme » pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques et qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux et on a rajouté à cela le diagramme de Richards pour la classification des eaux d'irrigation.
- Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales), qui permettent d'observer les relations entre les différents variables et échantillons mais aussi la corrélation entre les individus et les facteurs et entre les variables et les facteurs.

1. Echantillonnage et analyse

Trois campagnes de prélèvements (29 Février 2012, 13 Janvier 2013, 28 Mai 2014) pour un total de 57 échantillons, ont été effectuées afin d'étudier la qualité des eaux de surface. Les analyses effectuées se rapportent aux eaux de surface des différentes mares du complexe humide Guerbès-Sanhadja.

Les prélèvements sont répartis de la façon suivante :

- *sortie 1* (le 29 Février 2012) : 19 points ont été choisis, soit 19 échantillons, ils sont bien répartis et couvrent la totalité des huit principales mares (figure 24).
- *sortie 2* (le 13 Janvier 2013) : 19 points ont été choisis, soit 19 échantillons, ils sont bien répartis et couvrent la totalité des huit principales mares (figure 24).
- *sortie 3* (le 28 Mai 2014) : 19 points ont été choisis, soit 19 échantillons, ils sont bien répartis et couvrent la totalité des huit principales mares (figure 24).

Lors du prélèvement :

- *Mesures in situ* : Quatre paramètres physico-chimiques (le potentiel d'hydrogène, le potentiel de redox, la température et la conductivité électrique) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une valise multi-paramètres de terrain étanche portatif à microprocesseur de type HI 9024 C muni d'une électrode (Figure 21), et la conductivité avec un conductimètre portatif multi gamme étanche équipé d'un dispositif de compensation automatique de température.



Figure 21 Valise multi-paramètres de terrain étanche portatif à microprocesseur de type HI 9024 C

Le prélèvement des échantillons d'eau a été effectué à une profondeur d'environ 50 cm. Les volumes d'eau prélevés sont ensuite transvasés dans des bouteilles en plastique de 500 ml préalablement lavées puis rincées trois fois avec l'eau à prélever.



Figure 22 Échantillons acheminés au laboratoire

Des glacières ont été utilisées pour la conservation des échantillons qui ont été acheminés au laboratoire (Figure 22) filtrés avant d'être analysés, afin d'empêcher d'une part l'action des micro-organismes sur la solution et d'autre part pour retirer les éléments solides en suspension pouvant interagir ultérieurement avec les sels solubles de la solution en suite des analyses chimiques ont été effectués concerne les ions majeurs :

- *Analyse des éléments chimiques* : Les analyses chimiques ont été effectuées sur les principaux éléments responsables à la minéralisation des eaux, appelés couramment les éléments majeurs ; les cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et les anions (chlorures, sulfates, carbonates, bicarbonates, nitrates et ammonium). Au total 57 échantillons appartenant à des eaux de surface ont été analysés par des méthodes d'analyses internationales (Figure 23) :



Figure 23 Analyse des éléments chimiques au laboratoire

- **Dosage des anions :**

- Chlorures (Cl^-) : analysés par titrimétrie à l' AgNO_3 .
- Sulfates (SO_4^{2-}) : par gravimétrie au BaCl_2 .
- Carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) : par titrimétrie avec l'acide sulfurique H_2SO_4 .
- Nitrates (NO_3^-) : par spectrophotomètre. La méthode utilisée pour le dosage est celle de la méthode au salicylate de sodium (Rodier, 1978).
- Nitrites (NO_2^-) : par spectrophotomètre. La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Zambelli (Rodier, 1978).

• Dosage des cations :

- Calcium (Ca^{++}) et Magnésium (Mg^{++}) : déterminés par complexométrie à l'EDTA,
- Sodium (Na^+) et potassium (K^+) : mesurés par spectrophotométrie à flamme.
- Ammonium (NH_4^+) par spectrophotométrie. . La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Nessler (Rodier, 1978).

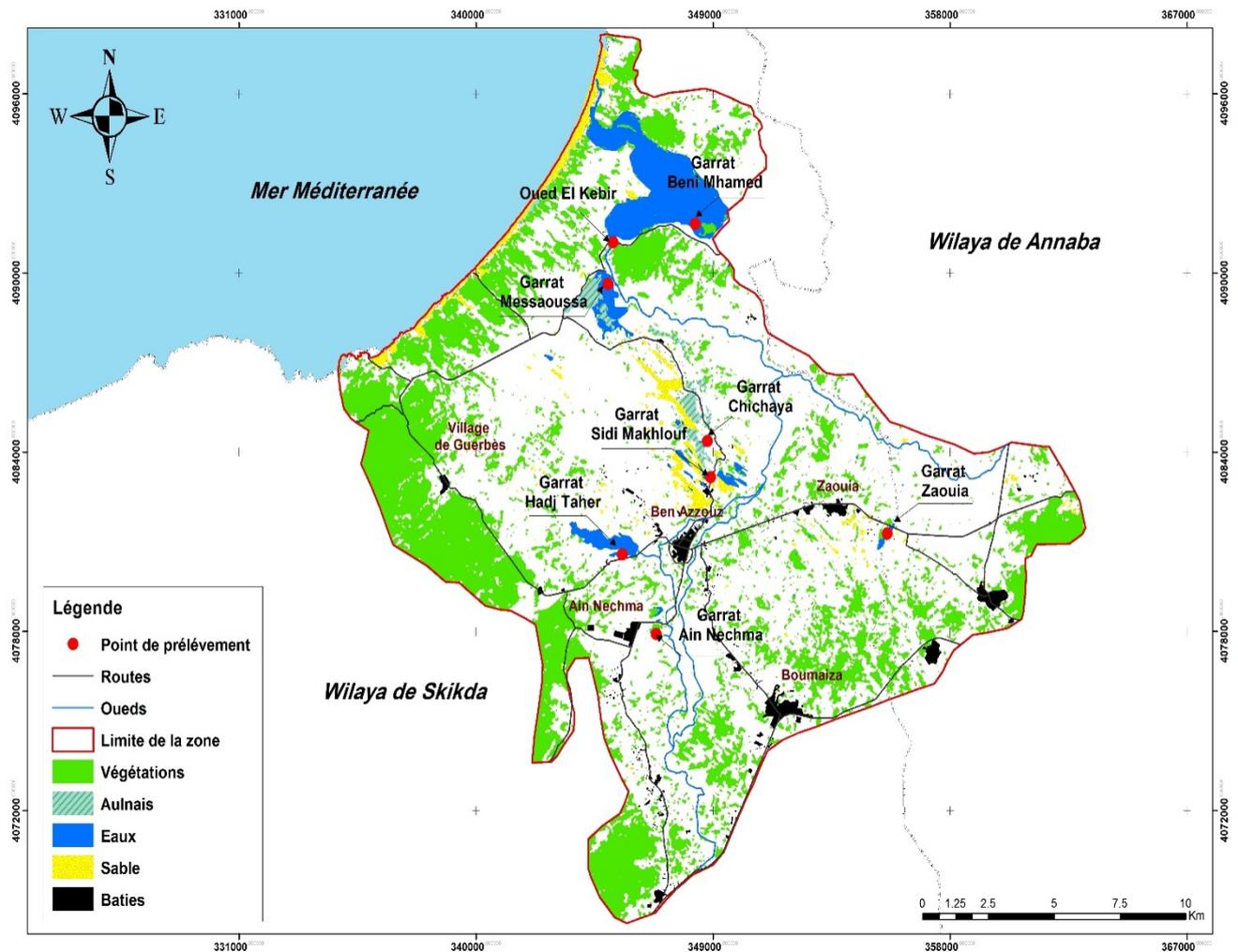


Figure 24 Location des points d'échantillonnage

2. Méthodes d'étude

2.1. Traitement statistique

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques étaient

significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du chimisme, la plupart du temps une/ou plusieurs liaisons plus ou moins fortes entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse en multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objet est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des trois campagnes analysées a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel Xlstat (Version 2015).

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'étude globale des eaux permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation (NdemboLongoj, 2009).

L'intérêt de cette technique réside sur le fait qu'elle permet de réduire à quelques plans factoriels la majeure partie de la variance exprimée par les descripteurs. Le premier axe F1 est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale. Le second axe F2, indépendant du premier, est celui qui exprime la plus grande partie de la variance résiduelle et ainsi de suite (Mudry et Blavoux, 1986).

2.2. Diagrammes interprétatifs

L'interprétation des éléments majeurs en termes de faciès chimique s'avère précieuse quand il s'agit de distinguer des groupes d'eau de chimisme et de minéralisation (salinité) différents au sein d'un aquifère. On peut également identifier des relations entre ces familles notamment en cas de mélange entre des eaux douces et salines, l'outil le plus fréquemment utilisé est le diagramme de Piper, basé sur les concentrations équivalentes (en meq/l) et relatives par rapport à la somme des cations voire anions.

Il comporte deux diagrammes triangulaires pour les cations et anions ainsi qu'un losange qui combine la somme des cations monovalents ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), celle des cations bivalents ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$), les bicarbonates et carbonates ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$) et enfin les chlorures, sulfates et nitrates ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{--} + \text{NO}_3^-$). C'est le losange qui est utilisé pour différencier les faciès hydro chimiques rencontrés. (Figure 25)

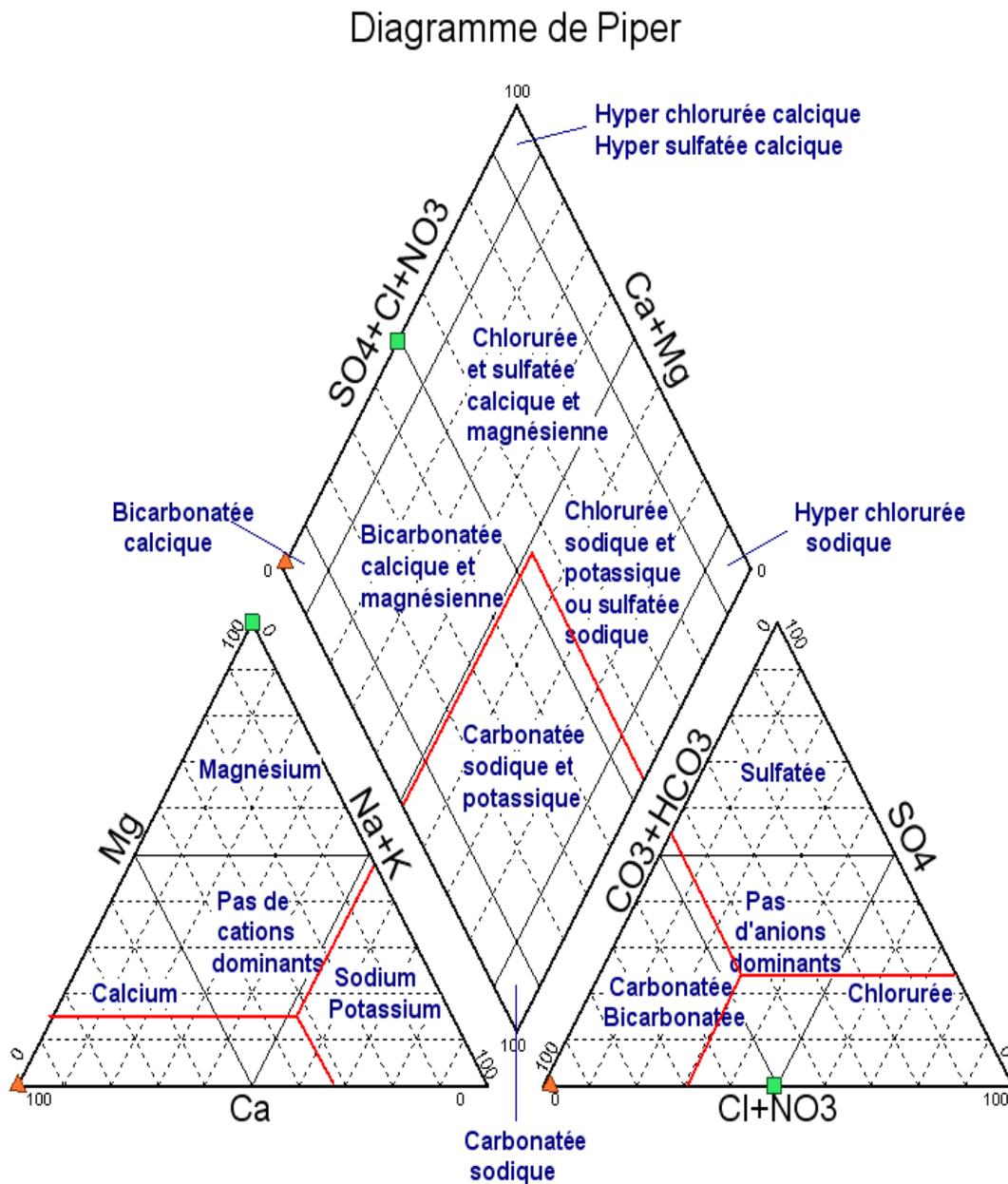


Figure 25 Différents faciès hydro chimiques du diagramme de Piper

Tableau 15 Faciès hydrochimiques et contextes géologiques (Banton et Bangoy, 1999)

Faciès hydrochimiques	Environnement géologique et géochimique
Bicarbonaté-calcique et/ou magnésien	Faciès fréquents dans les eaux douces continentales et dans les environnements calcaires. La présence de formations dolomitiques est à l'origine de la tendance magnésienne.
Bicarbonaté-sodique et/ou potassique	Faciès fréquents dans les environnements riches en formations volcaniques. Un faciès bicarbonaté sodique se trouve aussi dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange Ca^{++} contre Na^+ sur des argiles).
Sulfaté	Faciès fréquents dans les environnements riches en minéraux évaporitiques (gypse $[\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}]$) ou minéraux sulfurés (pyrite $[\text{FeS}_2]$).
Chloruré-sodique	Faciès fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite $[\text{NaCl}]$). Faciès rencontrés également dans les secteurs pétrolifères et certaines zones d'activités volcaniques. L'eau de mer et les eaux salines issues des intrusions marines sont de faciès $\text{Na}^+\text{-Mg}^{++}\text{-Cl}^-$ mais peuvent évoluer dans les aquifères côtiers, vers un faciès alcalino-terreux chloruré par échange cationique.
Chloruré-calcique	Faciès rencontrés dans des milieux riches en minéraux argileux contaminés par une solution saline de type $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ (dissolution d'halite ou intrusion marine). Les interactions eau-roche se manifestent alors par des échanges cationiques entre ions bivalents (Ca^{++} et Mg^{++} relâchés dans la solution) et monovalents (Na^+ et K^+ adsorbés sur les argiles). Des saumures profondes de type $\text{Ca}^{++}\text{-Na}^+\text{-Cl}^-$ sont présents dans la plupart des boucliers cristallins du monde (Canada, Scandinavie, Russie...) et leur origine a été discutée dans la littérature (Leybourne et Goodfellow, 2007).

Mais il y a aussi d'autres outils utilisés dans cette étude :

➤ **Diagramme de Durov (1948) :**

Construit sur la base des teneurs relatives (en meq/l) des ions majeurs en solution permettent de visualiser la distribution des compositions des échantillons. Ce graphique permet de distinguer facilement les échantillons de $(\text{Na}^+\text{-Ca}^{++})\text{-HCO}_3^-$ de ceux de type $(\text{Na}^+\text{-Ca}^{++})\text{-Cl}^-$, respectivement nommés le type bicarbonaté et chloruré (Gasscoyne et Kamineni, 1994 ; Toth, 1999).

Le pourcentage des cations majeurs (Ca^{++} , Na^+ , K^+ et Mg^{++}) et des anions majeurs (Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- et CO_3^{--}) sont tracés respectivement sur deux triangles distincts, puis projetés sur une grille carrée unique à la base de chaque triangle et la minéralisation de chaque échantillon.

➤ **Diagramme de Stiff :**

La typologie des eaux passe exclusivement par la détermination des hydrofaciès. D'après Jaekli (1970), les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et, en tenant compte de la classification des ions (formule ionique). La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagramme 2, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2007). Dans le cadre de ce travail, le diagramme de Stiff a été utilisé parce qu'il démontre mieux les ions dominants qui caractérisent l'empreinte de l'encaissant. L'objectif de ce travail étant la mise en évidence de la relation eau-roche. La représentation de Stiff consiste à construire, pour chaque échantillon, un diagramme sous forme de polygone qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés. La distinction entre les échantillons se base sur la géométrie du polygone qui donne une idée sur les espèces dominantes et la parenté chimique.

2.3. Indice de saturation (IS)

L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé soit par l'indice de saturation [$IS = \log(PAI/K_s)$], où PAI est le produit d'activité des ions concernés et K_s le produit de solubilité du minéral considéré (Bouhlassa et al., 2008). Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976; Droubi et al., 1978).

Un indice de saturation nul signifie que l'eau est en équilibre avec le minéral étudié. L'eau sera sous saturée si $IS < 0$ (dissolution du minéral) et sursaturée si $IS > 0$ (précipitation du minéral) (Peter-Borie et al., 2009). Le calcul de l'indice de saturation IS des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant le logiciel «Diagramme».

2.4. Taux de sodium adsorbé (SAR)

Pour maintenir les conditions d'infiltration adéquates dans les sols irrigués, il faut veiller à empêcher les complexes d'échange du sol de se charger en Na^+ . On exprime le danger de sodicité d'une eau d'irrigation par le SAR (Sodium Absorption Ratio),

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

Où Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++} sont exprimés en meq/l.

Le sodium échangeable a une incidence marquée sur les propriétés physiques et chimiques des sols. A mesure que la teneur en eau échangeable augmente, le sol a tendance à se disperser, il devient moins perméable à l'eau et ne prête guerre aux pratiques culturales (Ouyssse, 2005). L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. Le calcul de ce paramètre va nous permettre d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol et l'altération de ses qualités physiques (Berrouch, 2011)

Le sodium est considéré comme un des facteurs importants de la qualité de l'eau, notamment en raison de son action sur le sol. Il exerce ses principaux effets sur le sol, puis un effet secondaire sur la croissance des végétaux, imputable à la dégradation des conditions physiques du sol. L'étude des terrains salés dans l'ex. URSS a montré qu'il existait une relation entre le taux de sodium échangeable d'un sol en équilibre avec sa solution saline et celui de cette solution. Cependant, cette relation est donnée sous la formule suivante :

$\text{Sodium Adsorption Ratio, SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$	(Résultats en meq/l)
--	----------------------

Le SAR est le sodium adsorption ratio, rapport de la concentration en ions Na^+ , à la racine carrée de la demi-somme des concentrations correspondantes en Ca^{++} et Mg^{++} déterminées sur la solution extraite du sol saturé en eau (concentrations en méq/litre). Il demeure un indice de caractérisation de l'alcalinité déterminée à partir de la pâte saturée. Servant (1978), le SAR est utilisé pour classer les eaux d'irrigations.

Dans la littérature on ne parle pas de concentration en sodium, mais plutôt d'une valeur qui tient compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium. Il s'agit du ratio d'adsorption du sodium par le sol, le SAR (*Sodium Adsorption Ratio*).

Le SAR est calculé selon la formule proposée par Gapon (1933) rapporter par Richard (1954).

Le sodium agit au niveau de la défloculation du sol argileux, ce qui entraîne une diminution de la macroporosité (air) et du taux d'infiltration de l'eau. À l'aide du SAR, on divise les eaux d'irrigation en quatre classes. La classification est basée principalement sur l'effet du sodium sur les paramètres physiques du sol (tableau 16). Par ailleurs, le SAR ne prend pas en compte les modifications de la teneur en (Ca^{++}) de l'eau survenant par précipitation ou dissolution pendant ou après une irrigation. Le sodium qui constitue un facteur important de la salinité, reste constamment soluble et en équilibre avec le sodium échangeable. Les agents extérieurs ont peu d'influence sur la dissolution ou la précipitation du sodium, qu'il soit concentré par les prélèvements de la plante entre deux arrosages, dilué par l'eau appliquée ou lessivée par drainage (Marlet et Job, 2006) ; de plus l'alcalinisation a des répercussions secondaires sous forme de dégradation physique du sol (Saïdi, 2005).

Tableau 16 Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol (d'après Richards, 1954).

Noms des classes	Classes	Interprétations
Classe S1	0 < SAR ≤ 10 bas taux de sodium	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
Classe S2	10 < SAR ≤ 18 taux moyen de sodium	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage. Eau utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité.
Classe S3	18 < SAR ≤ 26 haut taux de sodium	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigeant la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et fort lessivage. L'addition de matière organique, d'amendements chimiques est souvent nécessaire.
Classe S4	SAR > 26 très haut taux de sodium	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

Source : Durand (1982)

2.5. Diagramme de Riverside (1954)

Les classes de potabilité des eaux d'irrigation (C1S1,...C5S4) correspondent dans le diagramme de Richards (figure 15) au SAR (en ordonnées pour la lettre S) et à la conductivité (en abscisses pour la lettre C). Ainsi la classe C1S1 (coin bas à gauche) est considérée comme excellente car elle correspond à des valeurs minimales du SAR et de la conductivité ; en revanche, la classe C5S4 (coin haut à droite) est la plus mauvaise, car les valeurs du SAR et de la conductivité sont à leur maximum. La figure 26 et les tableaux 17 et 18 donnent, respectivement, le diagramme de Riverside, les classes issues du diagramme de Riverside et l'interprétation de chaque classe.

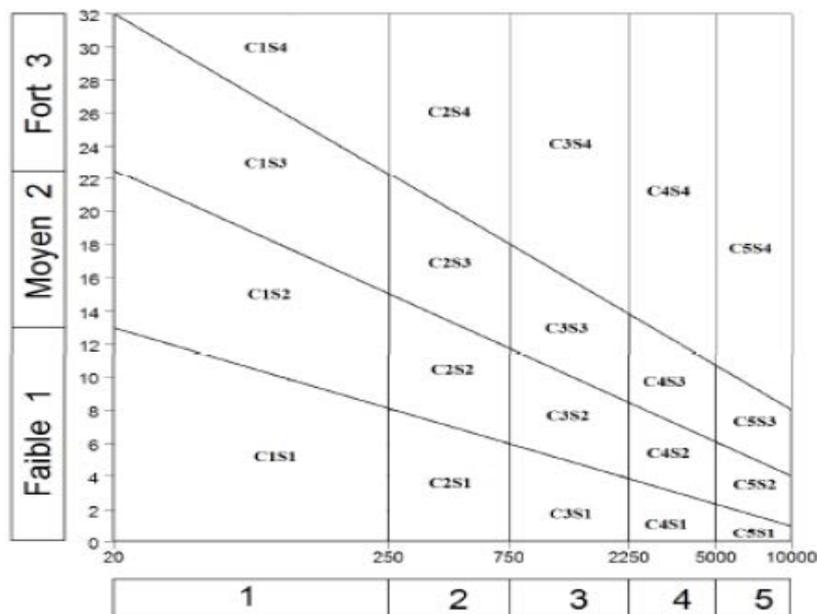


Figure 26 Diagramme de Riverside (Richards, 1954).

Tableau 17 Les classes issues du diagramme de Riverside (Clemant et Galand, 1979)

	Classes CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				
	C1 0 – 250	C2 250 – 750	C3 750–2250	C4 2250 – 5000	C5 5000 – 10000
S1 0 – 10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10 – 18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18 – 26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 > 26	C1S4	C2S4	C3S4	C4S4	C5S4

Tableau 18 Interprétation des classes du diagramme de Riverside (selon Durand, 1982 ; Clemant et Galand, 1979)

Interprétation des Classes	
	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité très mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
	Eau déconseillée pour l'irrigation.

(Selon : Clemant et Galand, 1979 ; Durand, 1982)

- **Conclusion**

Afin d'étudier la qualité des eaux de surface des différentes mares du complexe humide Guerbès-Sanhadja. (Mares permanentes), 57 échantillons ont été prélevés durant trois campagnes (29 Février 2012, 13 Janvier 2013 et 28 Mai 2014)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV.1. Discussion des résultats

L'interaction eau-roche est responsable de la modification des teneurs des éléments majeurs constitutifs (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure, sulfate et bicarbonate, etc...). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs (climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface) mais il ne faut pas omettre que la nature des formations géologiques des milieux traversés et le temps de séjour des eaux agit sur le chimisme naturel des eaux.

Le présent chapitre a été mené afin de connaître le régime, l'origine, le mécanisme du chimisme, les faciès chimiques des eaux ainsi que les principaux processus intervenant dans la minéralisation et de déterminer leurs origines mais aussi l'évolution des éléments chimiques et de caractériser la qualité des eaux de surface du complexe humide Guerbès-Sanhadja et principalement la géochimie des eaux superficielles des principales mares de ce dernier.

1. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres mesurés sur le terrain sont la température (T °C), le potentiel d'hydrogène (pH), de la conductivité électrique (CE) et le potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

1.1. Température (T °C)

La température de l'eau est un paramètre très important, elle régit les activités chimiques, bactériologiques et l'évaporation de l'eau. Elle varie en fonction de la saison et de la profondeur. La température moyenne des eaux du complexe humide Guerbès-Sanhadja (figure 27) varie entre 15.8 et 24.2 °C avec une moyenne de 19.1°C pour la première campagne (29 février 2012). Une légère diminution de la température marquée en janvier elle varie entre 14.7 et 19.8 °C avec une moyenne de 16.68 °C pour la deuxième campagne (13 janvier 2013) et on note une augmentation entre 19.21 et 27.13 °C pour une moyenne de 22.46°C concernant la troisième campagne (28 mai 2014) ce changement de température d'une campagne à l'autre est due principalement à l'influence du climat sur la zone au moment des prélèvements des échantillons, elle varie en fonction de la saison et de la profondeur.

Mais également l'influence de la saison indiquant un équilibre thermique entre l'eau et l'atmosphère.

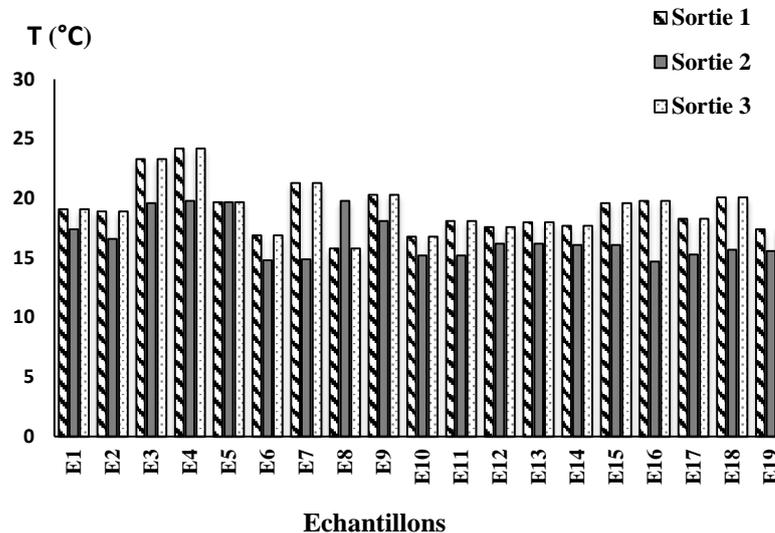


Figure 27 Variations de la température des eaux durant les trois campagnes

1.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. Pour cela, nous avons effectué des mesures de la conductivité électrique durant les trois campagnes (29 février 2012, 13 janvier 2013 et 28 mai 2014).

29 février 2012 : durant cette campagne, la conductivité électrique est comprise entre 165 et 1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne d'ordre de 779.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les résultats montrent la présence de quatre secteurs de faibles valeurs de la conductivité électrique ($< 326 \mu\text{S}/\text{cm}$). Il s'agit de la zone de BniMhamed (BM1), BniMhamed (BM2), BniMhamed (BM3) et oued El Kebir (K1). Par contre, les fortes valeurs ($> 610 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont localisées à SidiMakhlouf (SM2), SidiMakhlouf (SM1), Zaouia (Z3), Chichaya (CH1), Zaouia (Z1), Zaouia (Z2), Msawsa (M1),

Hadj Taher (HT1), Chichaya (CH1), Hadj Taher (HT4), Hadj Taher (HT5), Hadj Taher (HT2), Hadj Taher (HT3), Ain Nechma (AN1) et Ain Nechma (AN2) où la conductivité atteint son maximum (1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

- **13 janvier 2013** : durant cette campagne, la conductivité électrique est comprise entre 352 et 1270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne d'ordre de 667 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les résultats montrent la présence de quatre secteurs de faibles valeurs de la conductivité électrique ($<352 \mu\text{S}/\text{cm}$). Il s'agit de la zone Sidi Makhoulf (SM2), Zaouia (Z3), Zaouia (Z2) et Sidi Makhoulf (SM1). Par contre, les fortes valeurs ($> 481 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont localisées dans Chichaya (CH2), Ain Nechma (AN2), Msawsa (M1), Hadj Taher (HT3), Hadj Taher (HT4), Hadj Taher (HT5), Chichaya (CH1), Ain Nechma (AN1), Hadj Taher (HT1), Hadj Taher (HT2), Zaouia (Z1), Bni Mhamed (BM3), Bni Mhamed (BM1), Bni Mhamed (BM2) et oued El Kebir (K1) où la conductivité atteint son maximum (1270 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- **28 mai 2014** : durant cette campagne, la conductivité électrique est comprise entre 213 et 13410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne d'ordre de 1768 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les résultats montrent la présence de cinq secteurs de faibles valeurs de la conductivité électrique ($<454 \mu\text{S}/\text{cm}$). Il s'agit de la zone Hadj Taher (HT5), Bni Mhamed (BM3), Sidi Makhoulf (SM1), Bni Mhamed (BM2), oued El Kebir (K1). Par contre, les fortes valeurs ($>494 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont localisées dans Sidi Makhoulf (SM2), Ain Nechma (AN1), Zaouia (Z1), Zaouia (Z3), Msawsa (1), Hadj Taher (N3), Zaouia (Z2), Hadj Taher (N1), Ain Nechma (AN2), Hadj Taher (N2), Hadj Taher (N4), Chichaya (CH2), Bni Mhamed (BM1) et Chichaya (CH1) où la conductivité atteint son maximum (13410 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

La conductivité augmente en hautes et basses eaux sous l'effet d'une minéralisation importante suite au lessivage des terrains évaporitiques en hautes eaux et à une évaporation importante en basses eaux. D'après le tableau 19, les valeurs enregistrées témoignent d'une minéralisation moyenne à importante (Rodier, 2009).

Tableau 19 Relation conductivité-minéralisation des eaux de surface du complexe des zones humides de Sanhadja

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Appréciations	Garâtes correspondantes		
		Sortie01	Sortie02	Sortie03
CE < 100	Minéralisation très faible	/	/	/
100 < CE < 200	Minéralisation faible	E8 (K1)		E8 (K1)
200 < CE < 333	Minéralisation moyenne	E4(BM2), E5 (BM3)	E16(SM2)	E4(BM2), E5 (BM3),
333 < CE < 666	Minéralisation moyenne accentuée	E3(BM1), E15(SM1), E16(SM2),	E2(AN2), E6(CH1), E7(CH2), E12(HT3), E13(HT4) E14(HT5), E15(SM1) E18(Z2), E19(Z3),	E3(BM1), E15(SM1), E16(SM2)
666 < CE < 1000	Minéralisation importante	E6(CH1), E7(CH2), E9(M1), E10(HT1) E13(HT4), E14(HT5), E17(Z1), E18(Z2), E19 Z3),	E1(AN1), E9(M1), E10(HT1) E11(HT2), E17(Z1)	E6(CH1), E7(CH2), E9(M1), E10(HT1) E13(HT4), E14(HT5), E17(Z1), E18(Z2), E19(Z3),
CE > 1000	Minéralisation élevée	E1(AN1), E2(AN2), E11(HT2), E12(HT3),	E3(BM1), E4(BM2), E5(BM3), E8(K1)	E1(AN1), E2(AN2), E11(HT2), E12(HT3),

L'évolution de la conductivité électrique dans la nappe superficielle est bien visible à l'échelle des saisons où les fortes valeurs s'observent en période d'été, elles atteignent 1768 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mai 2014 alors que les faibles valeurs se manifestent en période de crue, elles sont de l'ordre de 667 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Janvier 2013. Par ailleurs, l'évolution de la minéralisation de la nappe superficielle dans l'espace montre une très grande variation.

On peut dire que les fortes minéralisations se manifestent surtout dans le secteur Ouest et Sud-Ouest où se concentre l'agglomération et où l'activité agricole est plus intense, ce qui

explique ces fortes valeurs de conductivité électrique dans ces zones qui ont une origine anthropique (Figure 28).

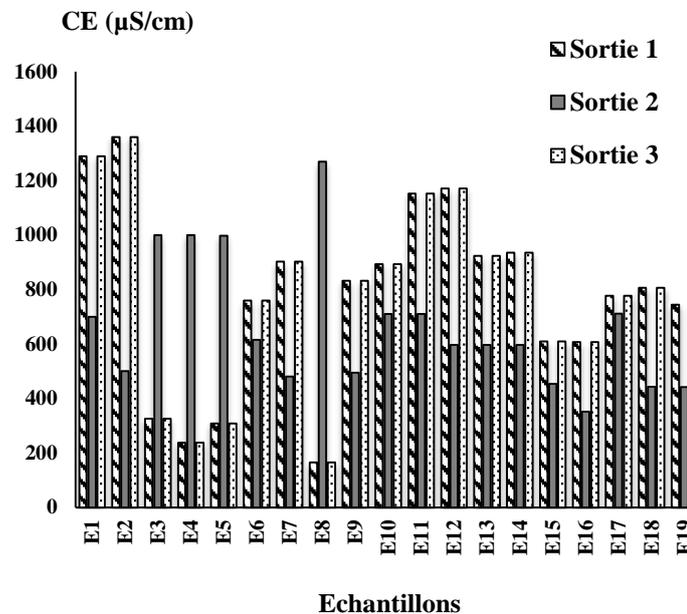


Figure 28 Variations de la conductivité électrique (CE) des eaux durant les trois campagnes.

1.3. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est défini selon la concentration des ions H^+ contenus dans la solution, Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique ; il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Azzaouai, 1999 ; ElBlidi et al., 2003). Le système carbonate (CO_2 , $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{2-}$) doit théoriquement jouer un rôle dominant dans la fixation du pH de l'eau (Groleau et al., 2008).

Les valeurs élevées du pH peuvent résulter d'une consommation du CO_2 ou un dégazage qui entraînent une augmentation relative de l'ion CO_3^{2-} . En effet, la réaction d'hydratation du CO_2 libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux conduit à une consommation de CO_2 et induit par conséquent une augmentation du pH (Ahmed Salem, 2012).



Chapitre IV. Résultats et discussion

Les valeurs du pH sont comprises 7.18 et 8.47 avec une moyenne de 7.63 pour la campagne du 29 février 2012, pour les valeurs les plus élevés il s'agit de la zone d'Ain Nechma (AN1), Ain Nechma (AN2), BniMhamed (BM1) et BniMhamed (BM2) qui varie entre 8 et 8.47 (figure 29).

Des valeurs entre 6.53 et 7.28 avec une moyenne de 6.75 pour la deuxième campagne du 13 janvier 2013 et pour les valeurs les plus élevés, il s'agit de la zone d'Ain Nechma (AN1) et Ain Nechma (AN2) qui varie entre 7.08 et 7.28.

Et entre 7.31 et 10.10 avec une moyenne de 8.47 pour la troisième campagne du 28 mai 2014, pour les valeurs les plus élevées il s'agit de la zone d'Ain Nechma (AN1), Ain Nechma (AN2), BniMhamed (BM1) et BniMhamed (BM2) qui varient entre 8 et 9.34. Cette variation du pH dans l'espace est due essentiellement à la géologie des formations, Le pH caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé. D'une manière générale les eaux des zones marécageuses présentent un pH oscillant entre 6.53 et 10.10 proche de la neutralité,

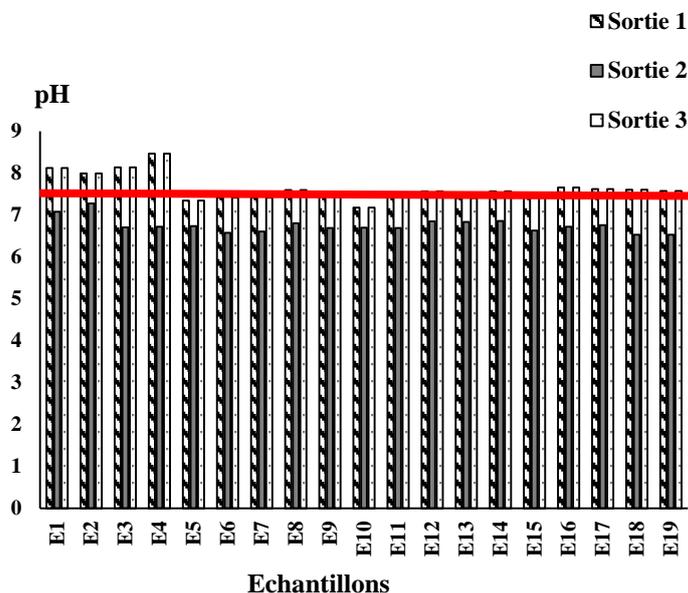


Figure 29 Variations du pH des eaux durant les trois campagnes.

1.4. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Le potentiel redox (Eh) permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau, la direction des réactions chimiques (oxydation, réduction) et l'évolution de la composition chimique des eaux naturelles au cours des échanges avec les autres phases de leur environnement.

Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominant. Quand les concentrations d'oxygène diminue, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox. L'évolution de ce paramètre dans le temps, elle met en évidence des valeurs faibles du potentiel d'oxydoréduction qui correspondent aux périodes de basses eaux et les valeurs élevées s'observent en période des hautes eaux (figure 30).

Les valeurs faibles du potentiel d'oxydo-réduction correspondent aux périodes de basses eaux et atteignent -162.7 mV en mai 2014. Les valeurs élevées s'observent en période des hautes eaux, les plus fortes valeurs atteignent 91 mV en février 2012 et 72 mV en janvier 2013. Ceci est dû aux apports des précipitations qui régénèrent l'eau.

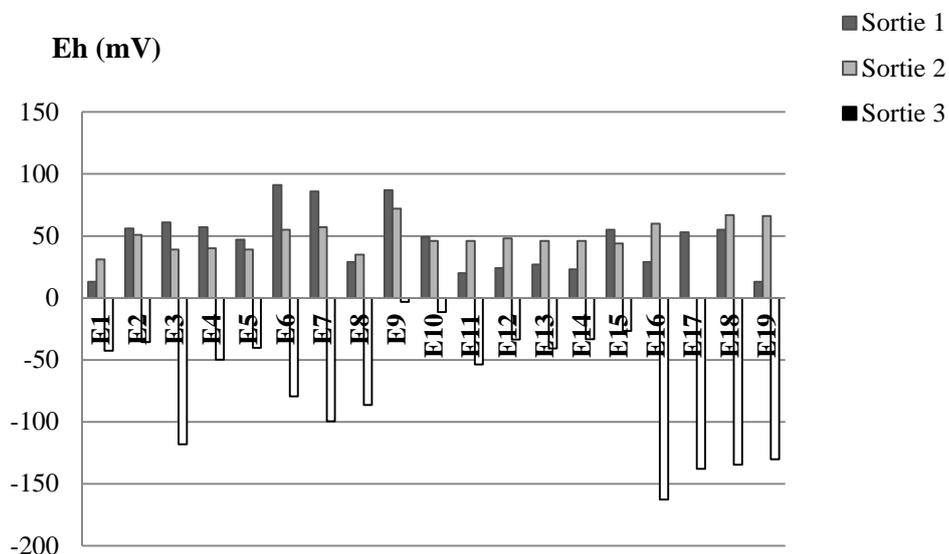


Figure 30 Variations d'Eh des eaux durant les trois campagnes

2. Détermination des principaux faciès hydro chimiques

L'interprétation des résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- était nécessaire pour bien identifier les faciès hydro chimiques et avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux des différentes mares de Guerbès-Sanhadja . Pour atteindre cet objectif, on a eu recours à la formule ionique pour le calcul des quantités en réaction et la classification des ions et au diagramme de Piper pour la représentation graphique des résultats. La réalisation de ce dernier a été faite grâce au logiciel « Diagramme », conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004).

2.1. Formule ionique

La formule ionique consiste à calculer le pourcentage de chaque ion (r %) par rapport à la somme des autres ions (C) :

$$r\% = (c * 100) / C$$

Avec ;

c: concentration de l'ion considéré en meq/l ;

C : somme des ions en meq/l ;

Cette formule a pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction (en meq/l) des groupes anions et cations et permet de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux et de les classer selon la même origine. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 20 Classification hydrochimique des eaux selon la formule ionique.

Types d'eaux	Campagnes	Faciès chimiques	Effectifs	Pourcentage
Eaux de surface	29 Février 2012 (19 échantillons)	chloruré-sodique	3	15.79%
		bicarbonaté-sodique	16	84.21%
	13 Janvier 2013 (19 échantillons)	chloruré-sodique	19	100%
	28 Mai 2014 (19 échantillons)	chloruré-sodique	18	94.73%
bicarbonaté –sodique		1	5.26%	

2.2. Diagrammes interprétatifs

2.2.1. Diagramme de Piper

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global, qui donne les compositions totales en éléments majeurs et les faciès chimiques des eaux (figure 31). Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

L'interprétation des résultats d'analyses hydrochimiques, correspondant aux périodes d'observation, a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux de notre zone d'étude, leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles qui sont à l'origine de ces faciès.

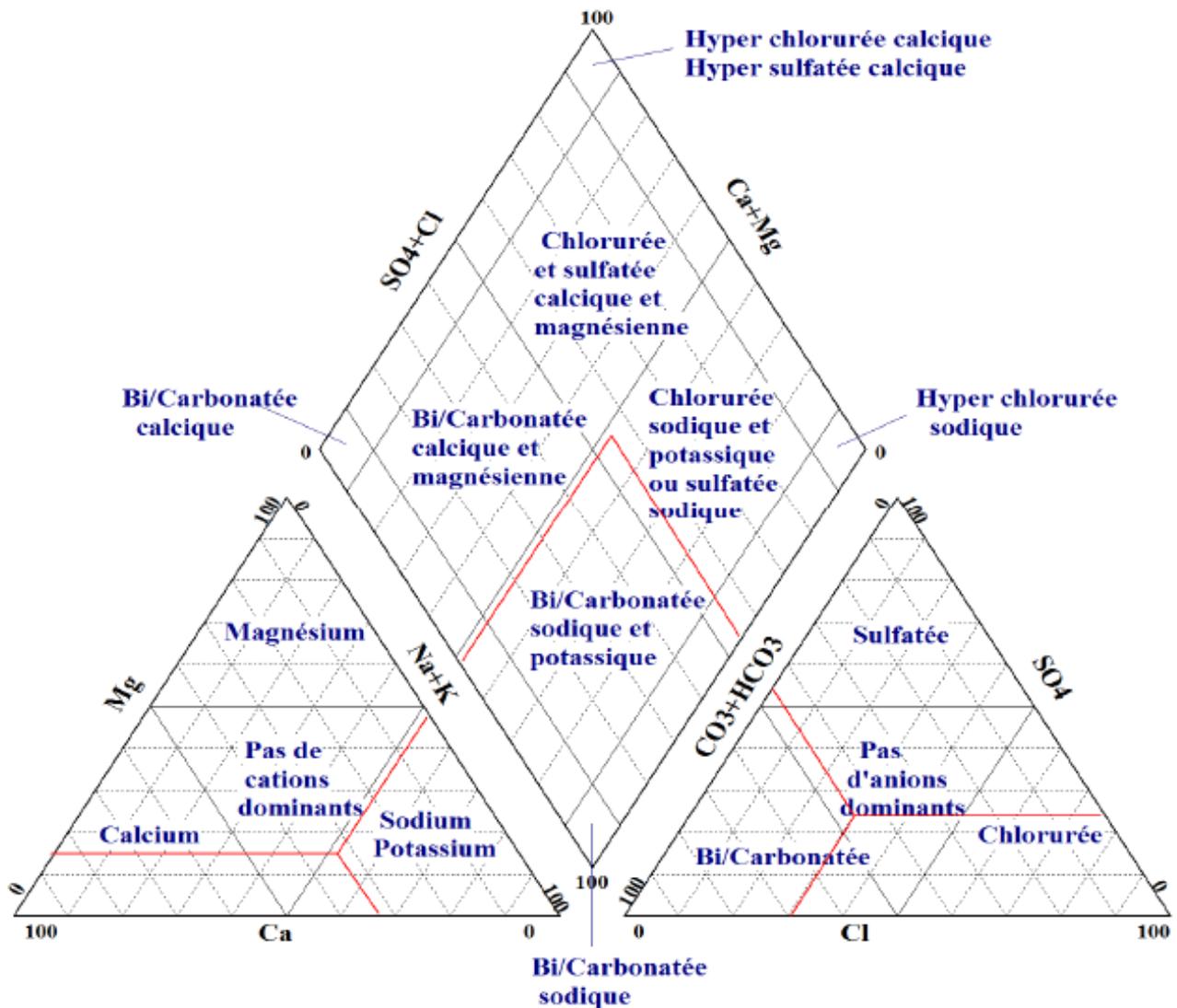


Figure 31 Diagramme de Piper

Des diagrammes de Piper ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimiques des eaux. En comparant les trois diagrammes de Piper, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé dans les trois campagnes.

La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper, montre que les eaux échantillonnées sont en générale de faciès chloruré-sodique ce dernier est fréquent dans les milieux riches en évaporites (halite [NaCl] d'origine marine).

Des points d'eau situés à proximité de la mer, celle-ci influence sur la chimie des eaux ce qui se traduit par cette tendance chlorurée-sodique. (Figure 32, 33,34)

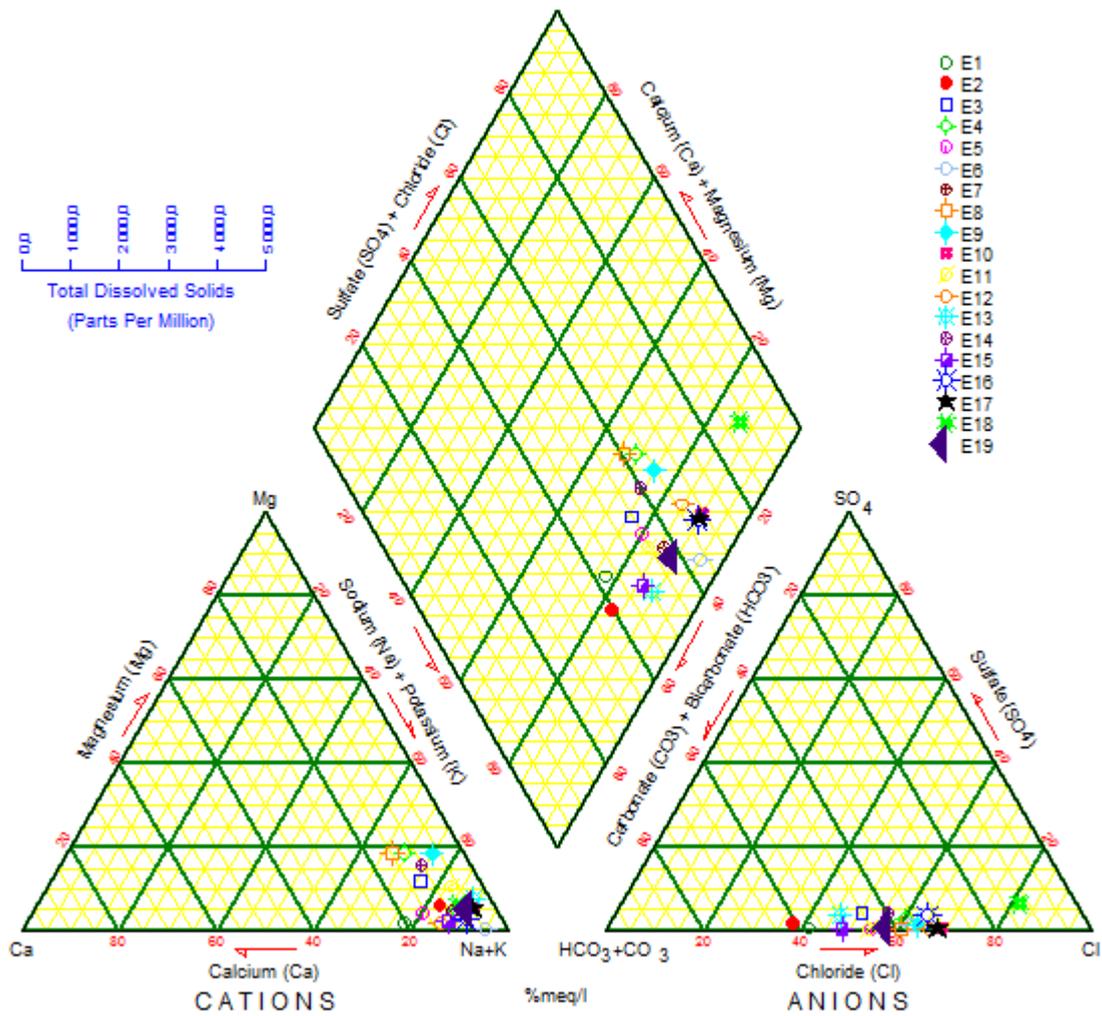


Figure 32 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 29 Février 2012

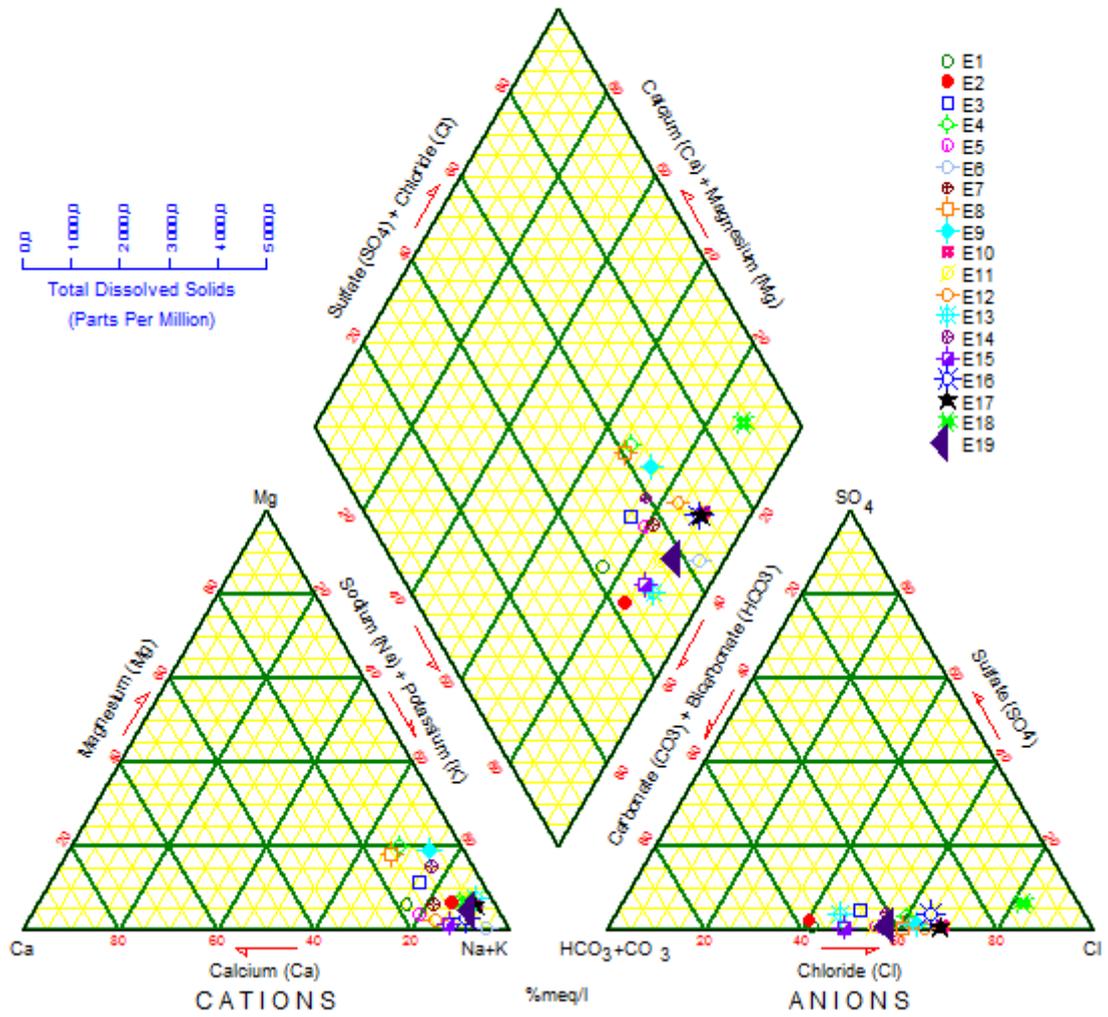


Figure 33 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 13 Janvier 2013

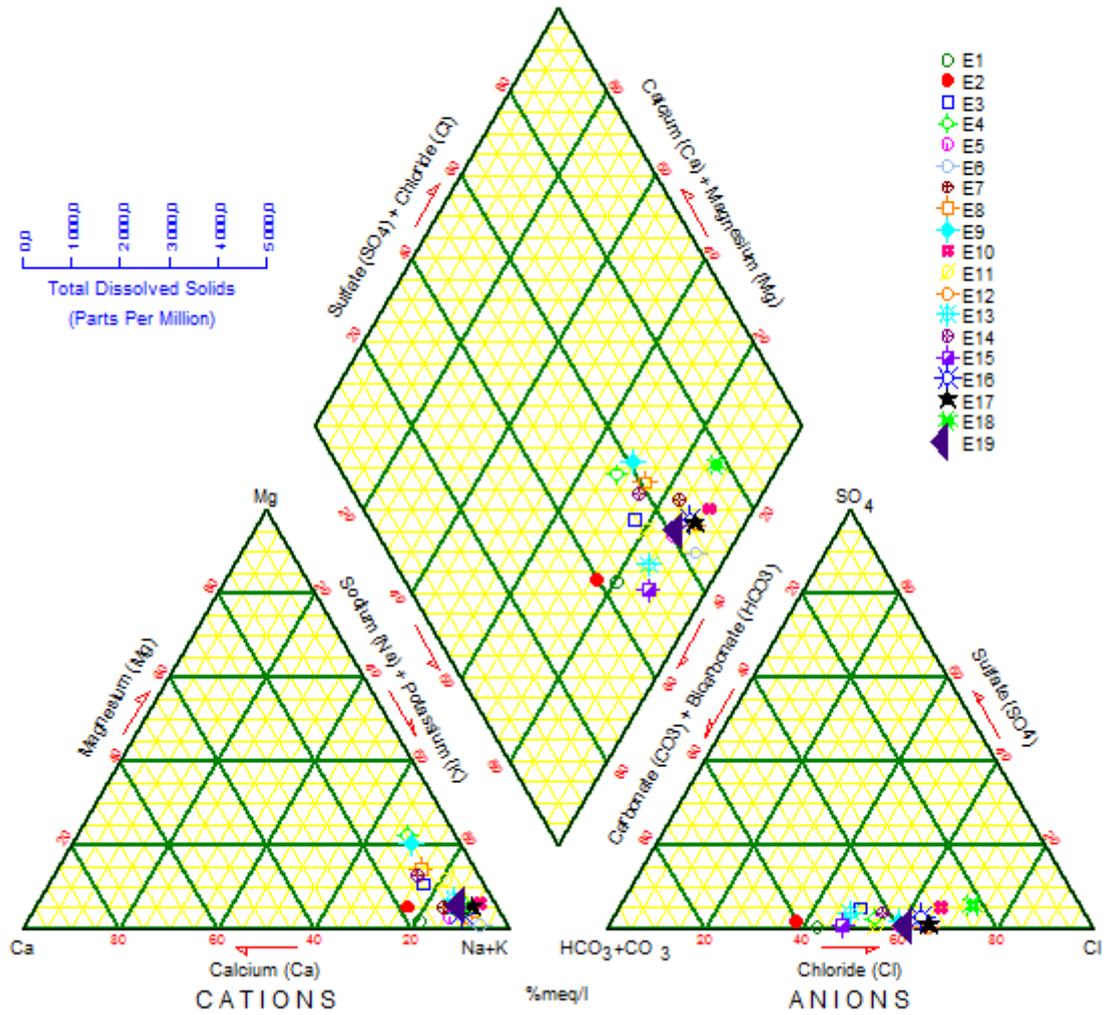


Figure 34 Diagramme de Piper des eaux prélevées le 28 Mai 2014

2.2.2. Diagramme de Durov

Le diagramme de Durov (1948), construit sur la base des teneurs relatives (en meq/l) des ions majeurs en solution permet de visualiser la distribution des compositions des échantillons. Ce graphique permet de distinguer facilement les échantillons de $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}) - \text{HCO}_3^-$ de ceux de type $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}) - \text{Cl}^-$, respectivement nommés le type bicarbonaté et chloruré (Gasscoyne et Kaminen, 1994 ; Toth, 1999).

Le pourcentage des cations majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ et Mg^{2+}) et des anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-}) sont tracés respectivement sur deux triangles distincts, puis projetés sur une grille carrée unique à la base de chaque triangle et la minéralisation de chaque échantillon.

Des diagrammes de Durov ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimique des eaux. En comparant les trois diagrammes de Durov, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé entre les trois campagnes. Les eaux de la zone humide Guerbès-Sanhadja ont un faciès chimique chloruré-sodique (Cl^- - Na^+). (Figure 35,36,37)

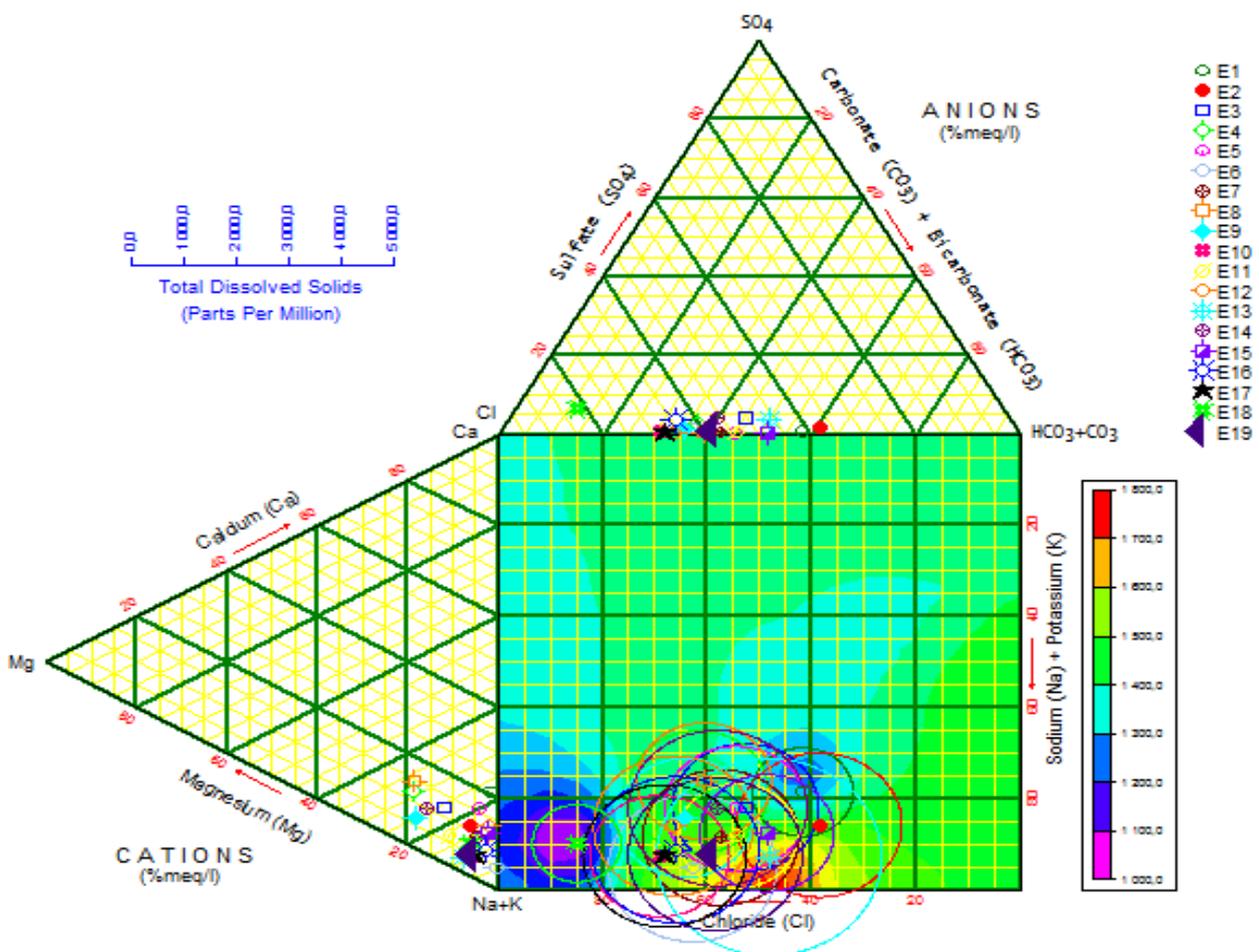


Figure 35 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 29 Février 2012

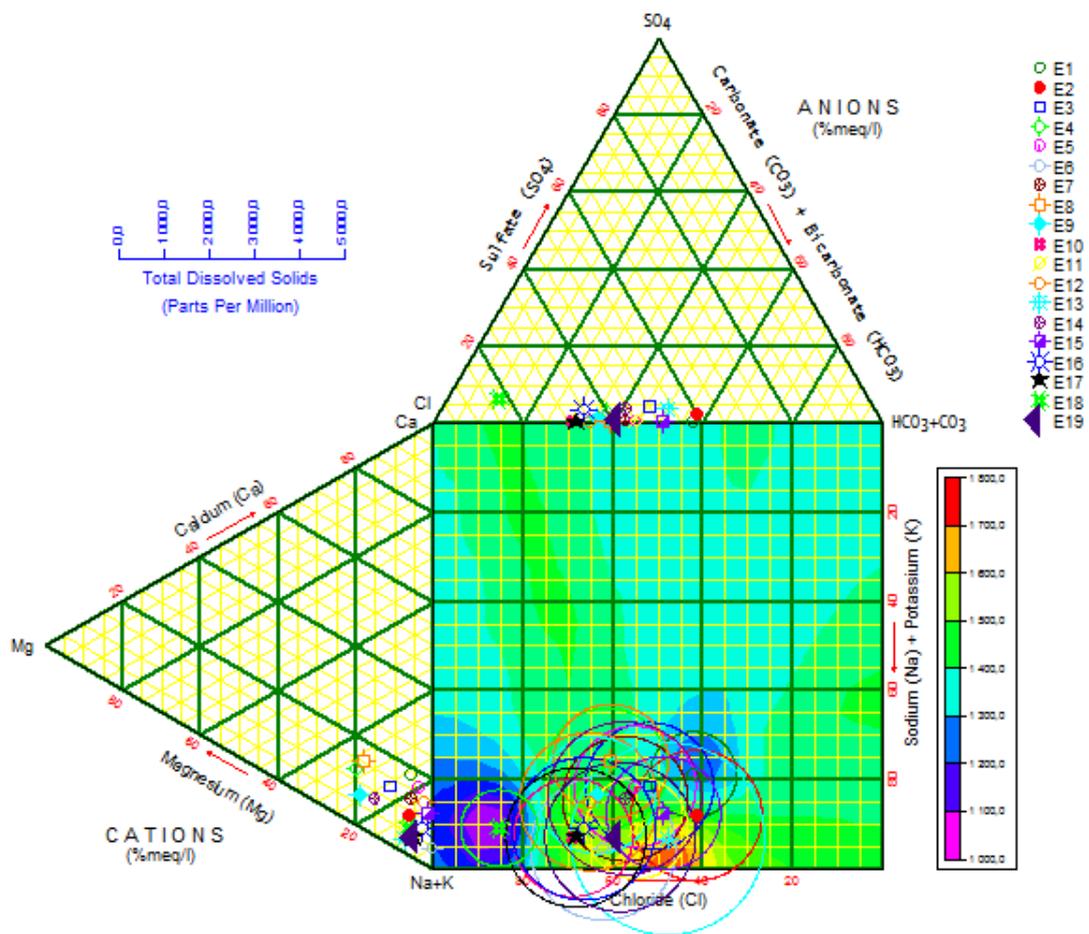


Figure 36 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 13 Janvier 2013

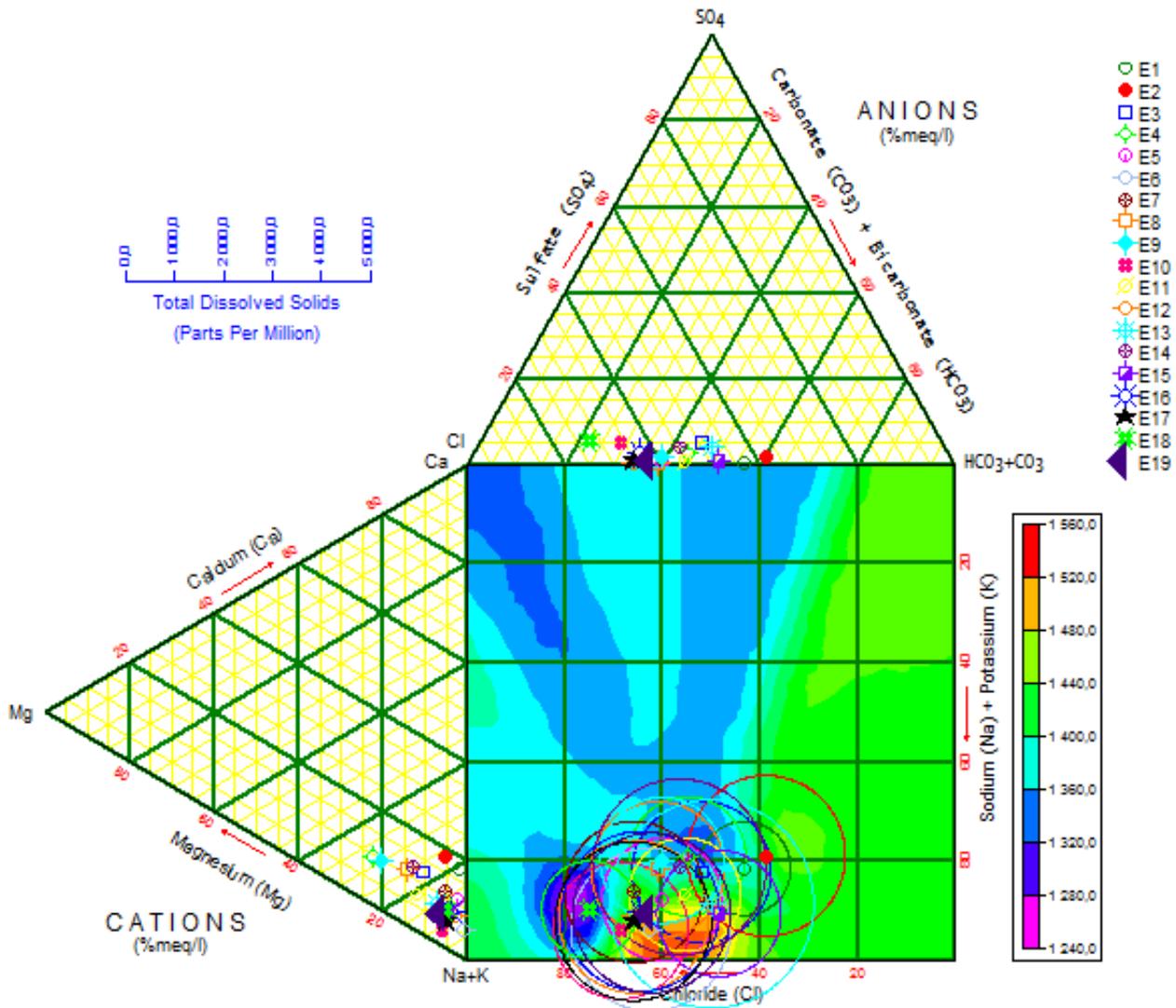


Figure 37 Diagramme de Durov des eaux prélevées le 28 Mai 2014

2.2.3. Diagramme de Stiff

La typologie des eaux passe exclusivement par la détermination des hydrofaciès. D'après Jaekli (1970), les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique). La réalisation de ces diagrammes a été faite en

utilisant le logiciel Diagramme 2, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2007). Dans le cadre de ce travail, le diagramme de Stiff a été utilisé parce qu'il démontre mieux les ions dominants qui caractérisent l'empreinte de l'encaissant. L'objectif de ce travail étant la mise en évidence de la relation eau-roche.

La représentation de Stiff consiste à construire, pour chaque échantillon, un diagramme sous forme de polygone qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés (figure 38, figure 39 et figure 40). La distinction entre les échantillons se base sur la géométrie du polygone qui donne une idée sur les espèces dominantes et la parenté chimique.

Les trois axes du diagramme de Stiff sont respectivement, de haut en bas, Na-Cl, Ca-HCO₃, Mg-SO₄ (figure 38, figure 39 et figure 40).

On a procédé au report des résultats d'analyses des trois campagnes sur le diagramme de Stiff et on a trouvé que le faciès des eaux de la nappe superficielle est de type chloruré-sodique représenté par la majorité des points échantillonnés (figure 38, figure 39 et figure 40). L'existence de ces deux éléments (Na⁺ et Cl⁻) est liée d'une part à la dissolution des formations évaporitiques riches en halite (halite [NaCl] d'origine marine).

Le second faciès est bicarbonaté-sodique excepté un point d'eau E3, E13 et E16 pour les trois campagnes où il recèle un faciès plutôt sulfaté sodique. Les minéraux carbonatés [(Ca, Mg)(CO₃)₂] et évaporitiques (SO₄²⁻, Na⁺ et Cl⁻) sont d'origine lithologique durant les trois périodes. En plus de leur origine lithologique, les chlorures sont d'origine anthropique issue du lessivage des sols agricoles par les eaux d'irrigation en période de basses eaux.

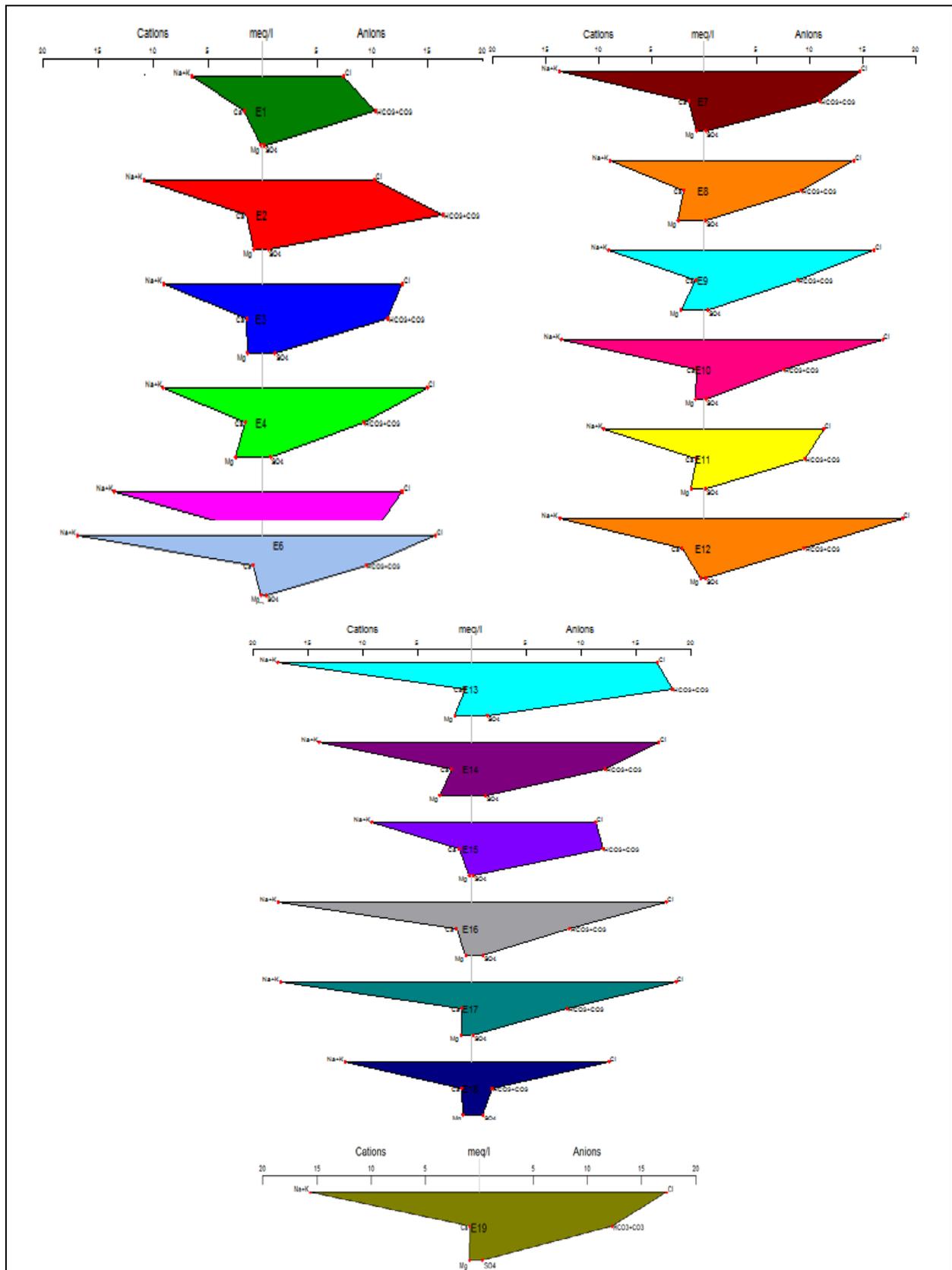


Figure 238 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 29 Février 2012

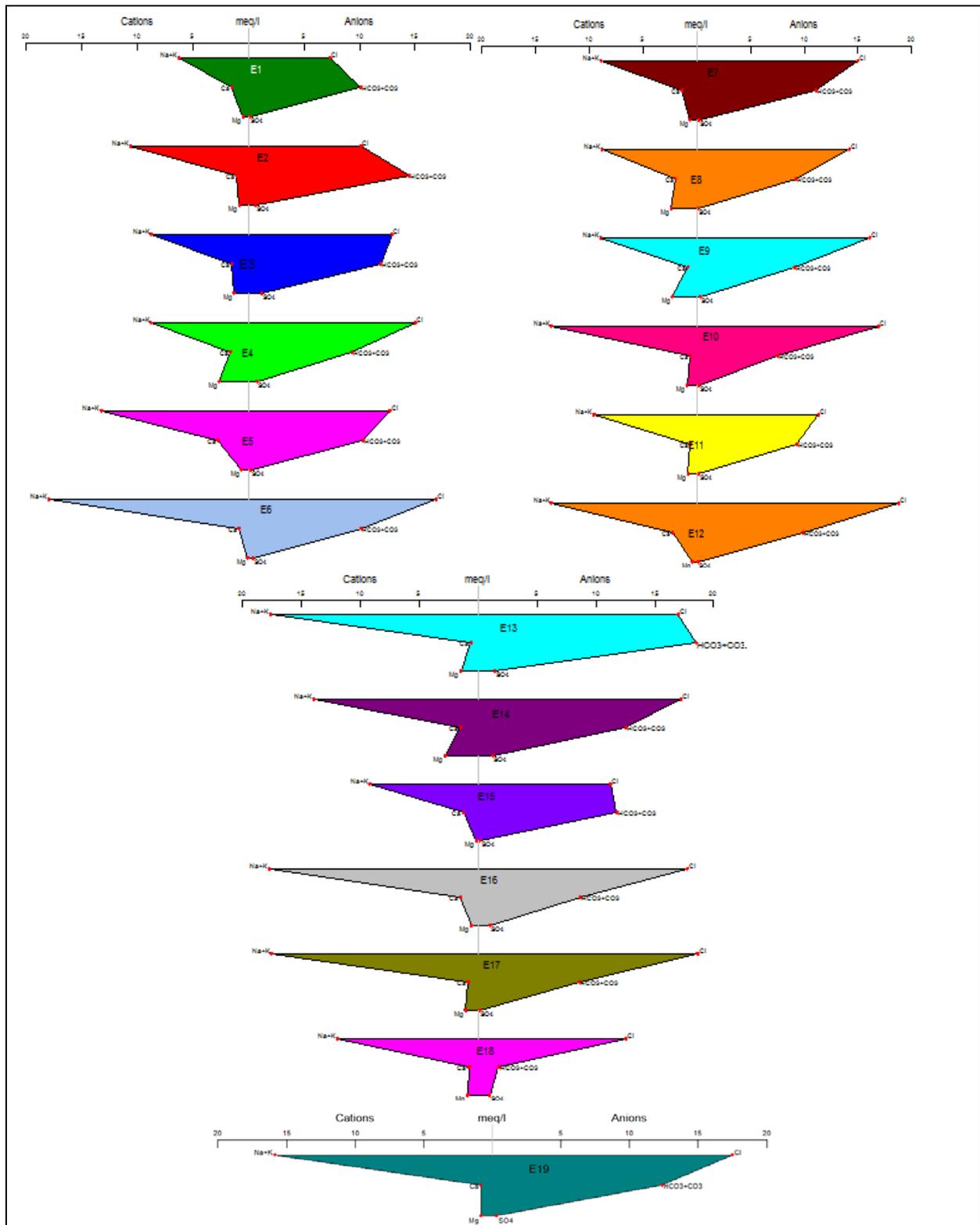


Figure 249 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 13 Janvier 2013

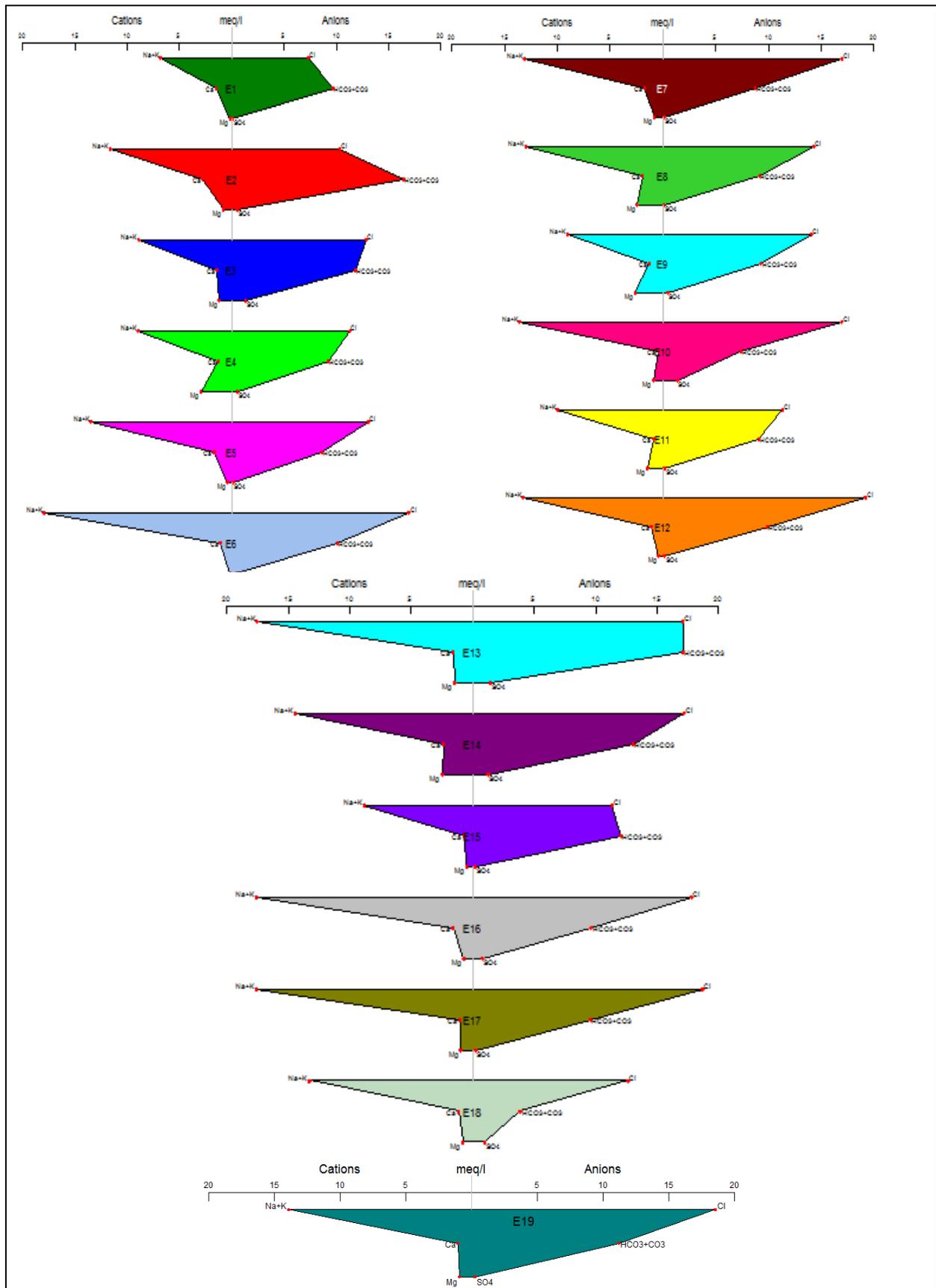


Figure 40 Diagramme de Stiff des eaux prélevées le 28 Mai 2014

3. Indice de saturation (IS)

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel « Diagramme » pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques. Les trois campagnes ont fait l'objet de cette application. Les indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

La connaissance des saturations des eaux vis-à-vis de certains minéraux permet de dire sous quelles formes chimiques certains éléments sont transportés dans les solutions.

L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les IS sont définies par (Chapelle, 1993) :

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{KI}\right)$$

Avec :

PAI : Produit d'Activité Ionique.

KI : Produit de solubilité de l'espèce minérale considérée.

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976 ;Droubi *et al.*, 1978).

La valeur $IS = 0$ indique un état d'équilibre entre l'eau et le minéral (saturation). Une valeur négative signifie une sous-saturation et positive la sursaturation. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, cela signifie que le minéral a tendance à la dissolution (Ait Brahim, 2012).

Les résultats obtenus indiquent une sous- saturation par rapport à l'halite (NaCl), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'aragonite (CaCO_3), la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et l'anhydrite (CaSO_4) dans la zone d'étude. La majorité des échantillons sont sous- saturées par rapport à la calcite (CaCO_3), à l'exception de (E17) et (E18) qui correspondent à la zone de Zaouia(Z1) et Zaouia(Z2) qui sont sursaturés.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite, de calcite et aragonite. Alors que les minéraux évaporitiques, en l'occurrence, l'halite, le gypse et l'anhydrite, tendent à la dissolution. Par conséquent une dissolution possible de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge de sels dans les eaux.

Première campagne (29 février 2012) :

- Pour la calcite (CaCO_3), les échantillons E8, E16, E17 et E18 sont sursaturés, cela signifie que le minéral a tendance à se précipiter, par contre le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour l'aragonite (CaCO_3), les échantillons E16 et E17 sont sursaturés cela signifie que le minéral a tendance à se précipiter, le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, les échantillons E8, E16, E17 et E18 présentent un minéral qui a tendance à se précipiter, le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour l'anhydrite (CaSO_4), les échantillons E17 et E18 présentent un minéral qui a tendance à se précipiter par contre le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour le gypse ($\text{CaCO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$) et l'halite (NaCl) tous les échantillons sont sous-saturés donc en dissolution et cette dernière peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux. La dissolution de l'halite est confirmée à travers la relation proportionnelle entre les ions chlorures et sodium.

Deuxième campagne (13 Janvier 2013)

- Tous les minéraux sont en dissolution mis à part l'échantillon E7 qui est en état de précipitation vis-à-vis de l'aragonite. La dissolution peut contribuer à l'acquisition de

la charge saline des eaux. La dissolution de l'halite est confirmée à travers la relation proportionnelle entre les ions chlorures et sodium.

Troisième campagne (28 Mai 2014)

- Pour la calcite (CaCO_3), les échantillons E1,E2,E3,E4,E8,E13, E14 et E16 sont sursaturés, cela signifie que le minéral à tendance à se précipiter, le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour l'aragonite(CaCO_3), les échantillons E1, E2, E3, E4 et E14sont sursaturés, le minéral à tendance à se précipiter par contre le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, les échantillons E2,E3,E4,E8,E9, E13 et E14sont sursaturés, cela signifie que le minéral à tendance à se précipiter par contre le reste des échantillons sont sous-saturés car le minéral est en dissolution.
- Pour le gypse($\text{CaCO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$), l'anhydrite(CaSO_4) et l'halite(NaCl) tous les échantillons sont sous-saturés, par conséquent une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux. La dissolution de l'halite est confirmée à travers la relation proportionnelle entre les ions chlorures et sodium.

En générale pour les trois campagnes, le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite, calcite et aragonite. Alors que les minéraux évaporitiques, en l'occurrence, l'halite, le gypse et l'anhydrite, tendent à la dissolution.

En définitive, les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minéraux calcites et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux. (Tableaux 21, 22 et 23 ; figures 41,42 et 43).

Tableau 21 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja(29 Février 2012).

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	-1,03	-1,18	-2,95	-3,04	-3,26	-6,00
E2	AN2	-1,10	-1,24	-2,31	-2,51	-2,73	-5,65
E3	BM1	-1,47	-1,62	-2,86	-2,21	-2,44	-5,61
E4	BM2	-1,17	-1,32	-2,06	-2,34	-2,57	-5,56
E5	BM3	-0,88	-1,03	-2,23	-2,95	-3,19	-5,46
E6	CH1	-0,69	-0,84	-2,30	-2,87	-3,10	-5,21
E7	CH2	-0,41	-0,55	-1,01	-3,06	-3,29	-5,39
E8	K1	0,08	-0,06	0,36	-3,00	-3,23	-5,59
E9	M1	-2,48	-2,63	-4,44	-2,94	-3,18	-5,52
E10	HT1	-2,39	-2,54	-4,65	-3,32	-3,55	-5,32
E11	HT2	-1,51	-1,66	-2,75	-3,41	-3,65	-5,64
E12	HT3	-1,36	-1,51	-3,46	-2,95	-3,19	-5,28
E13	HT4	-2,17	-2,31	-3,87	-2,48	-2,71	-5,22
E14	HT5	-1,52	-1,66	-2,76	-2,07	-2,30	-5,32
E15	SM1	-1,66	-1,81	-3,95	-3,28	-3,51	-5,65
E16	SM2	1,59	0,44	0,91	-2,26	-2,48	-5,20
E17	Z1	0,16	0,02	0,50	-0,02	0,50	-5,20
E18	Z2	0,05	-0,10	0,19	-0,10	0,19	-5,28
E19	Z3	-0,15	-0,29	-0,14	-0,29	-0,14	-5,54

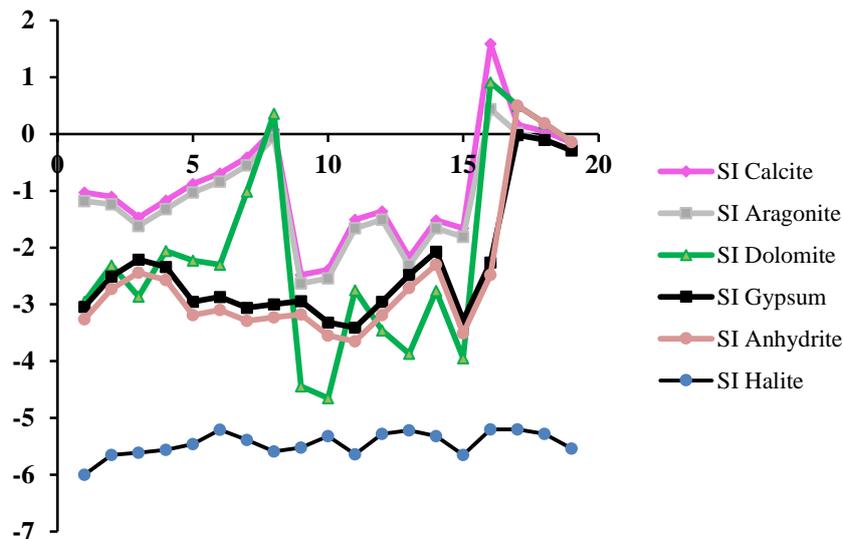


Figure 41 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (29 Février 2012).

Tableau 22 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja(13 Janvier 2013).

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	-0,57	-0,72	-1,59	-3,31	-3,55	-6,03
E2	AN2	-0,22	-0,37	-0,54	-2,70	-2,94	-5,65
E3	BM1	-0,68	-0,83	-1,36	-2,32	-2,56	-5,65
E4	BM2	-0,76	-0,90	-1,24	-2,47	-2,70	-5,58
E5	BM3	-0,52	-0,66	-1,59	-2,84	-3,08	-5,47
E6	CH1	-1,20	-1,35	-3,42	-3,00	-3,25	-5,21
E7	CH2	-0,90	1,05	-2,13	-3,05	-3,30	-5,56
E8	K1	-0,57	-0,72	-1,00	-3,32	-3,56	-5,60
E9	M1	-1,13	-1,28	-1,79	-3,07	-3,32	-5,53
E10	HT1	-1,43	-1,58	-2,68	-3,46	-3,71	-5,32
E11	HT2	-1,29	-1,44	-2,44	-3,47	-3,72	-5,64
E12	HT3	-0,56	-0,71	-1,85	-3,09	-3,34	-5,28
E13	HT4	-0,84	-0,99	-1,27	-2,72	-2,96	-5,23
E14	HT5	-0,64	-0,79	-1,00	-2,35	-2,59	-5,32
E15	SM1	-0,90	-1,05	-2,66	-3,25	-3,50	-5,66
E16	SM2	-0,92	-1,07	-2,26	-2,40	-2,65	-5,20
E17	Z1	-1,11	-1,27	-2,13	-3,64	-3,89	-5,18
E18	Z2	-2,61	-2,76	-5,15	-2,59	-2,83	-5,50
E19	Z3	-1,21	-1,36	-2,43	-3,14	-3,39	-5,25

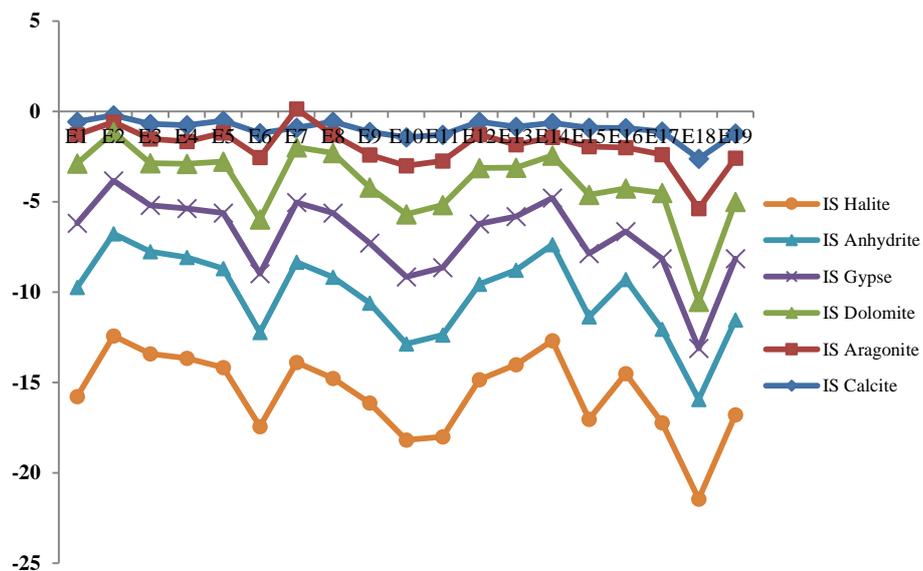


Figure 42 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (13 Janvier 2013).

Tableau 23 Indices de saturation des minéraux du complexe humide Guerbès-Sanhadja(28 Mai 2014).

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	0,38	0,23	-0,15	-3,63	-3,87	-5,99
E2	AN2	0,96	0,81	1,45	-2,46	-2,70	-5,62
E3	BM1	0,75	0,60	1,55	-2,31	-2,54	-5,65
E4	BM2	0,75	0,60	2,00	-3,00	-3,23	-5,78
E5	BM3	-0,25	-0,40	-1,05	-3,18	-3,42	-5,45
E6	CH1	-0,19	-0,34	-1,19	-2,94	-3,18	5,21
E7	CH2	-0,05	-0,19	-0,33	-3,21	-3,44	-5,36
E8	K1	0,12	-0,03	0,36	-3,34	-3,59	-5,42
E9	M1	-0,17	-0,31	0,05	-2,78	-3,01	-5,59
E10	HT1	-1,04	-1,19	-1,76	-2,76	-3,01	-5,33
E11	HT2	-0,35	-0,49	-0,43	-3,34	-3,58	-5,63
E12	HT3	-0,11	-0,26	-0,62	-3,34	-3,58	-5,29
E13	HT4	0,14	-0,01	0,29	-2,30	-2,54	-5,23
E14	HT5	0,32	0,17	0,68	-2,16	-2,41	-5,31
E15	SM1	-0,28	-0,42	-0,64	-3,38	-3,62	-5,68
E16	SM2	0,11	-0,04	-0,05	-17,01	-2,73	-5,21
E17	Z1	-0,13	-0,28	-0,23	-3,21	-3,45	-5,18
E18	Z2	-0,90	-1,05	-1,88	-2,45	-2,69	-5,46
E19	Z3	-0,08	-0,23	-0,18	-3,18	-3,42	-5,28

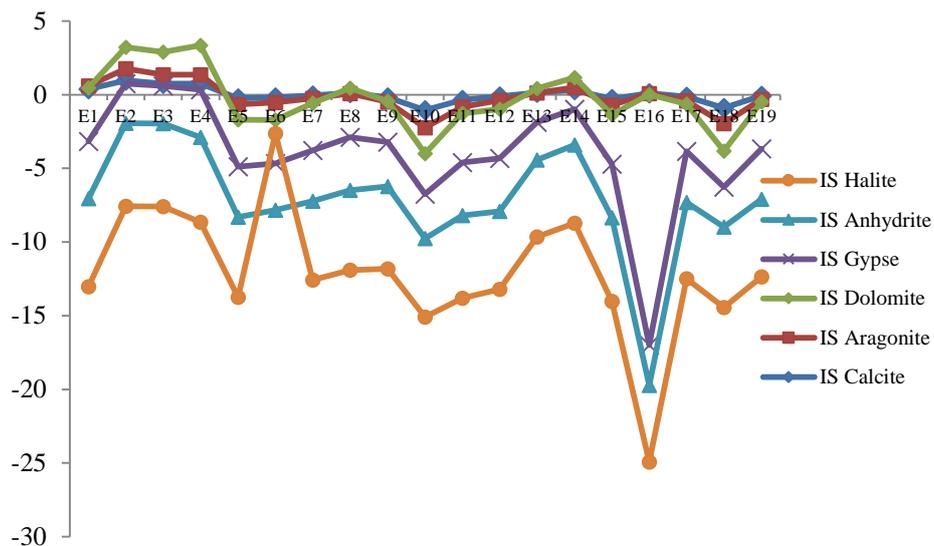


Figure 43 Indice de saturation (IS) des minéraux dans l'eau (28 Mai 2014).

4. Taux de sodium adsorbé (SAR)

La teneur en sodium des eaux d'irrigation est déterminée par le SAR qui est considéré comme un paramètre très important (Brindha et Kavitha, 2014) exprime la teneur en sodium ou le danger alcalin pour la détermination de la qualité de l'eau utilisée à des fins d'irrigation. La salinité élevée réduit l'activité osmotique des plantes et empêche l'eau d'atteindre les branches et feuilles des plantes il en résulte une faible production (Deepali et al., 2010). Parmi les sels dissous dans l'eau, le sodium (Na) requiert plus d'attention. De fortes concentrations en sodium peuvent être dommageables pour la plante en place en modifiant les conditions physiques du sol (Glover, 1996). En outre, l'eau d'irrigation à forte teneur en Na^+ et faible en Ca^{2+} favorise l'échange d'ions par saturation de Na^+ , détruit la structure du sol due à la dispersion des particules d'argiles (Todd, 1980) affectent aussi sa fertilité (Subba Rao, 2006).

Dans le but d'étudier la qualité des eaux pour l'irrigation, nous avons fait recours à la méthode de Richards (1954). Il met en évidence différentes classes d'eaux définisseur la base du taux de sodium adsorbé (S.A.R) et sur la concentration en sels solubles de l'eau représentée par la conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm à 25°C). Le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR qui est défini par la relation :

$$\text{Sodium Adsorption Ratio, SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \quad (\text{Résultats en meq/l})$$

La méthode la plus utilisée pour qualifier les eaux d'irrigation est une représentation graphique de la conductivité électrique en fonction du SAR.

➤ Diagramme de Riverside (1954)

Les classes de potabilité des eaux d'irrigation (C1S1,...C5S4) correspondent, dans le diagramme de Richards (figure 43) au SAR (en ordonnées pour la lettre S) et à la conductivité électrique (en abscisses pour la lettre C). Ainsi la classe C1S1 (coin bas à gauche) est considérée comme excellente car elle correspond à des valeurs minimales du SAR et de la conductivité électrique ; en revanche, la classe C5S4 (coin haut à droite) est la plus mauvaise, car les valeurs du SAR et de la conductivité sont à leur maximum. La figure 44 et les tableaux

14 et 25 donnent, respectivement le diagramme de Riverside, les classes issues du diagramme de Riverside et l'interprétation de chaque classe.

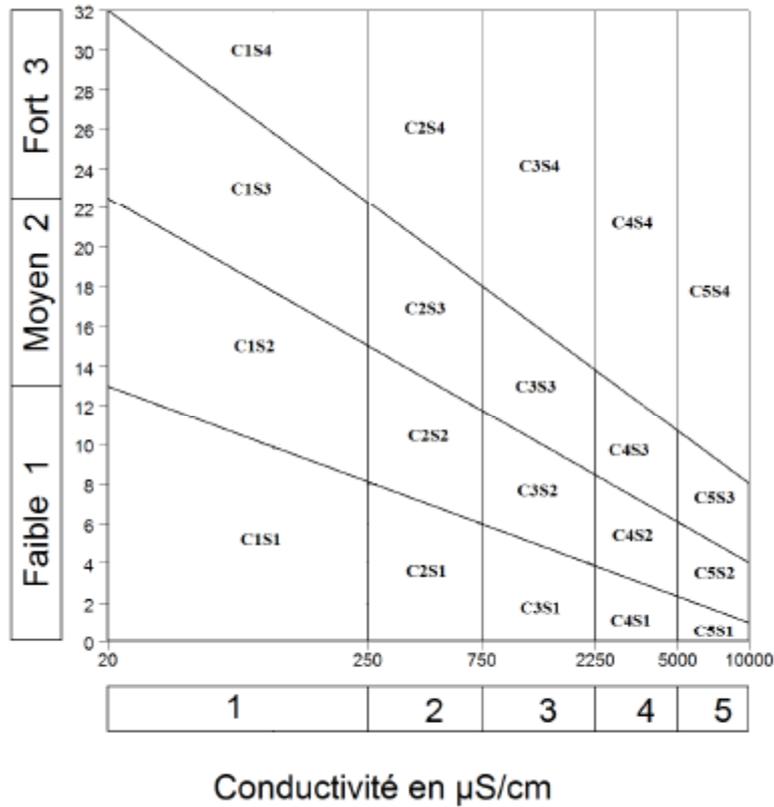


Figure 44 Diagramme de Riverside (Richards, 1954).

Tableau 24 Les classes issues du diagramme de Riverside (Clemant et Galand, 1979)

	Classes CE ($\mu\text{S/cm}$)				
	C1 0 – 250	C2 250 – 750	C3 750–2250	C4 2250 – 5000	C5 5000 – 10000
S1 0 – 10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10 – 18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18 – 26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 > 26	C1S4	C2S4	C3S4	C4S4	C5S4

Tableau 25 Interprétation des classes du diagramme de Riverside selon Durand (1982) (Clemant et Galand, 1979)

Interprétation des Classes	
	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité très mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
	Eau déconseillée pour l'irrigation.

(Clemant et Galand, 1979 ; Durand, 1982)

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (figure 45, figure 46 et figure 47), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, on a pu dégager la présence des six classes d'eaux qui sont les suivantes :

- **C1 S1** : eau considérée comme excellente car elle correspond à des valeurs minimales du SAR et de la conductivité électrique.
- **C2S1** : eau bonne pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes ; moyennement tolérantes aux sels et sur les sols ayant une bonne perméabilité. Cette catégorie est présente uniquement au niveau des mares E3, E4, E5, E9, E10 et E11 avec trois échantillons pour la première campagne (figure 45) et sept pour la deuxième (figure 46).
- **C3S1, C3S2** : en général, eaux admissibles et convenant à l'irrigation de cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Cette classe représente la majorité des eaux avec 72 %.

- **C4S1, C4S2** :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 d'eau apparaît surtout durant la deuxième campagne (2013), elle représente 25 %.
- **C4S3** : eau de mauvaise qualité, ne convient généralement pas à l'irrigation, mais peut être utilisée sous certaines conditions pour des sols très perméables avec un bon lessivage et aux plantes très tolérantes aux sels (choux, betterave...). Cette classe apparaît durant la deuxième campagne au niveau de deux (02) échantillons.
- **C4S4** :eau mauvaise, les valeurs du SAR et de la conductivité électrique sont à leur maximum.

Enfin, d'après la classification de Richards, nous remarquons une légère dégradation de la qualité des eaux durant la troisième campagne (2014) dans les mares E7,E8,E9, E18 et E19 et aussi pour les eaux de l'exutoire de l'oued El Kebir.

Tableau 26 Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).

	29 Février 2012	13 Janvier 2013	28 Mai 2014	Etat d'utilisation
C1S1	10.52%	0%	10.52%	
C2S1	5.26%	0%	5.26%	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
C2S2	10.52%	42.10%	10.52%	
C2S3	5.26%	26.31%	10.52%	
C2S4	0%	5.26%	5.26%	
C3S1	0%	0%	0%	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
C3S2	26.31%	21.05%	31.57%	
C3S3	36.84%	0%	26.31%	
C4S1	0%	0%	0%	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
C4S2	0%	0%	0%	
C4S3	0%	0%	0%	Inutilisable.

Tableau 27 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959)(29 Février 2012).

SAR	Classes d'eaux	Nombre d'échantillons
<10	Excellentes	7
10-18	Bonnes	7
18-26	Douteuses	4
>26	Inappropriées	1

Tableau 28 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959) (13 Janvier 2013).

SAR	Classes d'eaux	Nombre d'échantillons
<10	Excellentes	7
10-18	Bonnes	7
18-26	Douteuses	3
>26	Inappropriées	2

Tableau 29 Classification des eaux selon le SAR (Richards, 1954 ; Todd, 1959)(28 Mai 2014).

SAR	Classes d'eaux	Nombre d'échantillons
<10	Excellentes	8
10-18	Bonnes	6
18-26	Douteuses	2
>26	Inappropriées	3

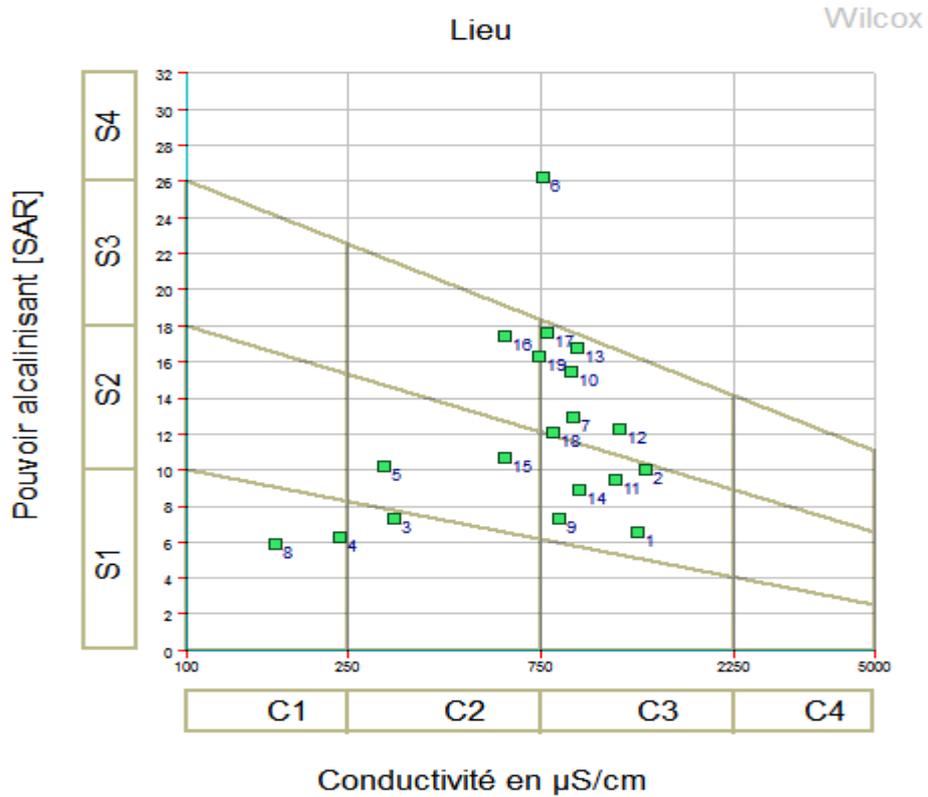


Figure 45 Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (29 Février 2012).

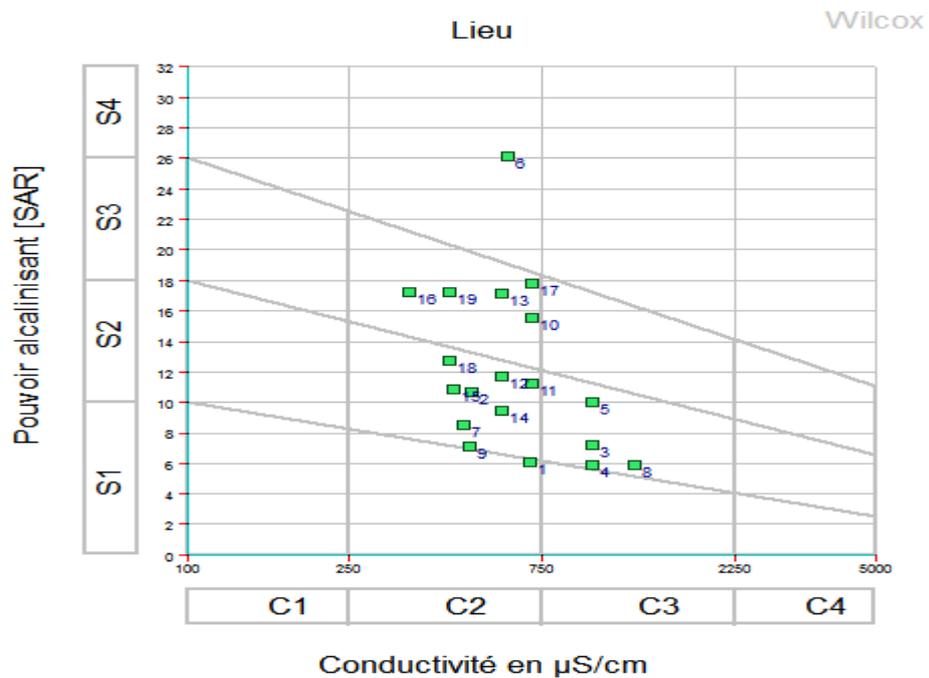


Figure 46 Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (13 Janvier 2013).

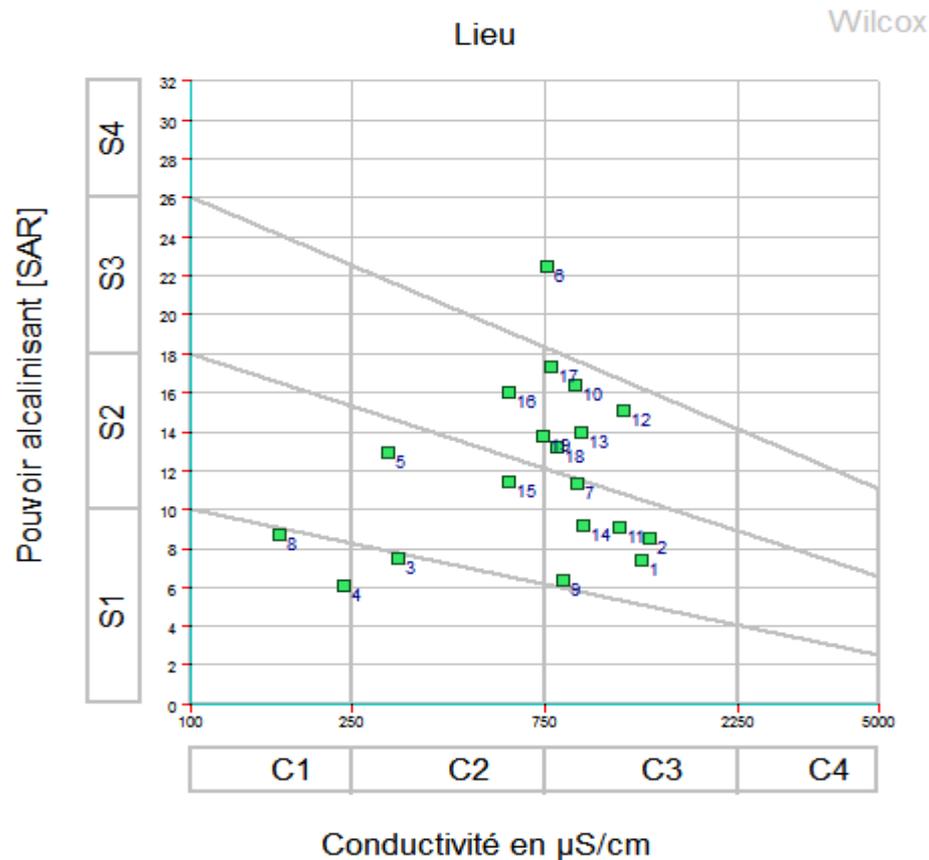
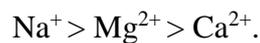


Figure 47 Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (28 Mai 2014).

Conclusion

Les eaux du complexe Guerbès-Sanhadja ont des conductivités électriques élevées et caractérisées par une dominance des chlorures pour les anions et le sodium pour les cations. L’ordre d’importance décroissant pour respectivement les anions et les cations est le suivant :



La richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sont liés à la dissolution et des formations carbonatées environnantes.

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, a montré que les eaux superficielles du complexe humide Guerbès-Sanhadja subissent des variations chimiques et sont influencées par plusieurs processus géochimiques combinés qui sont les réactions d'échanges de bases ; mais également la concentration par évaporation et le phénomène de dilution par mélange avec les eaux de pluie ainsi que la dissolution/précipitation des minéraux carbonatés et évaporitiques.

IV.2. Approche statistique

La composition chimique des eaux est fonction de plusieurs facteurs notamment la nature géologique des formations à travers lesquelles l'eau a circulé et séjourné, les variations saisonnières du climat et les éventuelles actions anthropiques. Dans le but de déterminer les paramètres pouvant influencer le comportement chimique des eaux, nous avons utilisé l'analyse en composantes principales.

Après avoir fait les diverses mesures physico-chimiques des échantillons prélevés, le traitement statistique le plus approprié est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité de tous les paramètres confondus. L'utilisation de l'ACP pour l'étude de la chimie des eaux, permet de différencier les groupes ayant des caractéristiques chimiques similaires, leurs variations (facteurs) suivant les axes principaux mais surtout les modes d'acquisition de la minéralisation.

L'analyse en composantes principales (ACP) est employé pour étudier le comportement chimique des eaux. Avec les observations des N variables, on construit la matrice ($N \times N$) des coefficients de corrélations linéaires entre les couples des variables. L'analyse en composantes principales se propose de trouver les vecteurs propres de cette matrice ainsi que leurs valeurs propres (une matrice $N \times N$ à N valeurs et vecteurs propres). Les vecteurs propres sont les "facteurs" ou "composantes principales" de l'ACP. La valeur propre, relative à chaque vecteur propre, représente la variance de l'ensemble des observations expliquée par ce vecteur. L'ACP, classe les valeurs propres par ordre décroissant. Le premier vecteur propre, relatif à la valeur propre la plus importante, est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale du nuage de points. Le second, indépendant du premier (donc perpendiculaire dans

l'espace à N dimensions) et relatif à la deuxième valeur propre la plus importante, exprime la plus grande partie de la variance résiduelle, et ainsi de suite. A partir des vecteurs propres de la matrice des corrélations sont calculées les coordonnées des observations sur les axes factoriels (composantes principales). C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

L'ACP peut être calculé à partir de la matrice des covariances ou bien à partir de celle des corrélations. Dans le premier cas, la méthode favorise les paramètres dont les mesures donnent des valeurs élevées, au détriment des autres paramètres. Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverse tels que le pH mesuré en unité pH, c'est-à-dire logarithmique, ou bien les éléments majeurs (mg/l) ou les concentrations, il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice des corrélations qui éliminent ces inconvénients (Ouardi, 2006).

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les 3 campagnes d'échantillonnage (29 Février 2012, 13 Janvier 2013, 28 Mai 2014). Le but de cette analyse statistique (ACP) est de faire dégager les associations qui peuvent éventuellement exister et de ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport aux autres et nous permet aussi d'avoir une idée préalable sur les éléments et les sites de pollution. Nous avons effectué une ACP sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel XL stat (version 2015), sur un ensemble de 15 paramètres physico-chimiques obtenus à partir de 19 points d'eau pour chaque campagne, ce sont donc au total 57 échantillons et les variables qui ont fait l'objet du traitement sont: CE, pH, Eh, T°C, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻.

1. Statistiques descriptives

L'étude statistique de la répartition spatiale des éléments chimiques présente les valeurs minimales, moyennes et maximales, ainsi que le coefficient de variation (tableaux, 25, 26, 27). L'homogénéité d'une série se traduit par les valeurs proches de la moyenne. La dispersion autour de la moyenne est évaluée à l'aide du coefficient de variation (en %) qui est

le rapport de l'écart type à la moyenne. Une série homogène présente des valeurs du coefficient de variation inférieur à 50% (Chabour, 2006).

Classement des différents paramètres en fonction de leur coefficient de variation :

Première campagne (29 Février 2012) :

- Faible coefficient de variation : CE, Eh, Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- .
- Moyen coefficient de variation : pH, T°C , NH_4^+ , Ca^{2+} , SO_4^{--} , CO_3^{--} .
- Fort coefficient de variation : Cl^- , NO_3^- , NO_2^-

Deuxième campagne (13 Janvier 2013) :

- Faible coefficient de variation : CE, pH, Eh, T°C , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{--}
- Moyen coefficient de variation : Mg^{2+} , Ca^{2+}
- Fort coefficient de variation : NH_4^+ , SO_4^{--} , NO_3^- , NO_2^-

Troisième campagne (28 Mai 2014) :

- Faible coefficient de variation : pH, T°C , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{--}
- Moyen coefficient de variation : CE, Eh, Mg^{2+} , NO_3^-
- Fort coefficient de variation : NH_4^+ , SO_4^{--} , NO_2^-

1*La moyenne et écart-type des variables sont représentés sur les tableaux 26, 27 et 28. On note une variabilité importante pour les paramètres :

1^{ère} : Campagne : T°C , NH_4^+ , Ca^{++} , Cl^- , CO_3^{--} , NO_3^- , NO_2^- et conductivité électrique (CE).

2^{ème} : NH_4^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} , Ca^{++} , Mg^{++} , NO_3^- , NO_2^-

3^{ème} : CE, Eh, Na^+ , NH_4^+ , Mg^{++} , SO_4^{--} , NO_3^- , NO_2^-

2. Statistiques élémentaires

***Éléments majeurs :**

La moyenne et écart-type des variables sont représentés sur les tableaux 26, 27 et 28.

Campagne 01 :

Les teneurs en sodium s'inscrivent entre 145 et 411 mg/l, la teneur moyenne est de 285.36 mg/, observe une très grande variabilité pour les chlorures la valeur moyenne de 519, 686 mg/l Son coefficient de variation corrobore très bien cette observation. On remarque que les

concentrations en sulfates et en carbonates sont relativement faibles vis-à-vis des bicarbonates et des chlorures, Les chlorures et les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux, On observe aussi une très grande variabilité pour le calcium, la valeur moyenne de 26,78 mg/l. Les concentrations en magnésium sont très variables et comprises entre 1 et 36mg/l, la valeur moyenne est de 13.79 mg/l. La teneur moyenne en potassium est de 6.13 mg/l, c'est en fait l'ion le moins abondant. Il montre une variabilité avec une valeur minimale de 3 mg/l et un maximum de 11 mg/l.

Tableau 30 Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne 29 février 2012).

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coefficients de V %
CE	165,000	1360,000	779,053	343,669	50,40487
pH	7,180	8,470	7,635	0,324	4,243615
Eh	13,000	93,000	50,263	25,335	11,24607
T°C	15,800	24,200	19,100	2,148	77,27273
NH ₄ ⁺	0,001	0,055	0,022	0,017	41,2968
Ca ⁺⁺	13,000	53,000	26,789	11,063	74,33853
Mg ⁺⁺	1,000	36,000	13,795	10,255	29,07894
Na ⁺	145,000	411,000	285,368	82,982	75,41799
K ⁺	3,000	11,000	6,316	2,237	21,66982
Cl ⁻	260,300	666,200	519,686	112,615	91,82084
SO ₄ ⁻	5,000	67,250	23,242	21,341	40,51752
HCO ₃ ⁻	4,880	976,000	481,836	195,228	24,67344
CO ₃ ⁻	46,000	108,000	74,947	18,492	66,67755
NO ₃ ⁻	0,188	18,756	6,128	4,086	102,7586
NO ₂ ⁻	0,010	0,587	0,145	0,149	102,7586

Campagne 02 :

Les teneurs en magnésium présentent une moyenne de 13.63 mg/l et une fréquence des valeurs comprises entre 1 et 34 mg/l. Le sodium avec une moyenne de 278.26 mg/l présente une forte fréquence des valeurs comprises entre 140 et 410 mg/l. Les chlorures suivent une évolution avec une forte fréquence des valeurs comprises entre 260 et 666 mg/l et des valeurs comprises entre 12 et 55 mg/l pour Ca²⁺. Les bicarbonates ont la même évolution, elles sont comprises entre 20.30 et 986.00 mg/l. par contre les sulfates présentent une répartition spatiale assez hétéroclite pour l'ensemble des résultats de cette deuxième campagne.

Tableau 31 Statistique descriptive pour la chimie des eaux(campagne 13 janvier 2013).

Variabiles	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coefficients de V %
CE	352,000	1270,000	705,421	261,723	37,10167
pH	6,530	7,280	6,771	0,175	2,584552
Eh	0,000	72,000	46,789	15,939	34,0657
T°C	14,700	19,800	16,753	1,804	10,76822
NH ₄ ⁺	0,001	0,080	0,029	0,024	82,75862
Ca ⁺⁺	12,000	55,000	25,684	11,884	46,27005
Mg ⁺⁺	1,000	34,000	13,632	10,023	73,52553
Na ⁺	140,000	410,000	278,263	86,082	30,93548
K ⁺	3,000	10,000	6,158	2,387	38,76259
Cl ⁻	260,800	666,000	521,005	112,907	21,671
SO ₄ ⁻	4,250	66,750	24,479	21,458	87,65881
HCO ₃ ⁻	20,300	986,000	477,837	185,977	38,92059
CO ₃ ⁻	42,000	101,000	75,263	18,269	24,27355
NO ₃ ⁻	0,201	17,854	7,149	4,972	69,54819
NO ₂ ⁻	0,060	0,496	0,148	0,133	89,86486

Campagne 03 :

Les coefficients de variation des deux ions :sodium et chlorures montrent des valeurs importantes (26.65% pour le sodium et 23.13 % pour les chlorures). Avec le sodium qui présente une concentration moyenne de 290.31 mg/l et l'ion chlorures est le plus abondant avec une moyenne de 518.05mg/l. Les sulfates présentent une grande dispersion des valeurs (coefficient de variation 88.37%). Les ions bicarbonates et calcium sont présents avec une concentration moyenne est respectives de 466.58 mg/l et de 28.26 mg/l. Les coefficients de variation sont importants (39.87% pour le calcium et 39.02% pour les bicarbonates).

Les concentrations en magnésium sont comprises entre 2 et 36 mg/l, la moyenne est de l'ordre de 14.34 mg/l. les teneurs en potassium présentent une variation de 2 à 11 mg/l, avec une moyenne de 6.316 mg/l. Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux c'est en fait l'ion le moins abondant.

Tableau 32 Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne 28 mai 2014).

Variabes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coefficients de V %
CE	165,000	1360,000	779,053	343,669	44,11369
pH	7,180	8,470	7,635	0,324	4,243615
Eh	13,000	93,000	50,263	25,335	50,40487
T°C	15,800	24,200	19,100	2,148	11,24607
NH ₄ ⁺	0,001	0,099	0,030	0,034	113,3333
Ca ⁺⁺	9,000	56,000	28,263	11,269	39,87192
Mg ⁺⁺	2,000	36,000	14,346	10,438	72,75896
Na ⁺	154,000	410,000	290,316	77,378	26,65303
K ⁺	2,000	11,000	6,316	2,496	39,51868
Cl ⁻	260,000	680,200	518,051	119,826	23,13016
SO ₄ ⁻⁻	2,750	68,030	26,197	23,152	88,37653
HCO ₃ ⁻	52,980	899,900	466,589	182,064	39,02021
CO ₃ ⁻⁻	32,000	110,000	79,737	18,496	23,19626
NO ₃ ⁻	0,201	6650,000	356,439	1524,062	427,58
NO ₂ ⁻	0,042	0,512	0,158	0,130	82,27848

Explication :

- Le sodium est généralement associé à l'ion chlorure, très soluble dans l'eau, il est affecté par le processus d'échange de base. Les argiles peuvent retenir des quantités importantes en sels (Schoeller, 1962), les eaux en contact avec les dépôts argileux peuvent se charger en ces éléments et grâce à leur solubilité élevée, ces ions peuvent atteindre des concentrations considérables.
- Les concentrations en chlorures et en sodium présentent une forte similitude avec la conductivité électrique des eaux. Ceci indique que la CE des eaux, est déterminée principalement par le NaCl et que le faciès des eaux étudiées est en partie de type chloruré sodique.
- Les sulfates pourraient provenir de la dissolution d'anhydrite ou de gypse ou encore de l'oxydation de la pyrite présente dans les formations argileuses.
- Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux car il est adsorbé par la matrice argileuse du sol est absorbé par les plantes.

- Les bicarbonates sont des composés anioniques contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles selon leurs sources et le pH de l'eau. L'origine de cet élément est essentiellement la mise en solution du gaz carbonique qui par formation d'un acide faible attaque les roches carbonatées.

3. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Tableaux **33, 34 et 35**) présente les différentes corrélations entre les variables prises deux à deux, la signification du coefficient (**r**) est fonction du nombre des individus traités (**n**), les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux ; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations.

La matrice de corrélation entre les éléments chimiques (Tableau.33) montre que la conductivité est très corrélée avec les ions Na⁺ et Cl⁻ avec une relation importante entre ces derniers éléments entre eux (Na⁺ - Cl⁻)($r > 0.7$) indiquant que la salinité des eaux est due probablement à la dissolution des formations évaporitiques, L'ion Cl⁻ présente les meilleures corrélations avec CE et Na⁺. Mais il y a aussi d'autres corrélations entre : (pH - T°C), (Mg⁺⁺ - NO₃⁻).

Tableau 33 Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 29 février 2012).

Variables	CE	pH	Eh	T°C	NH ₄ ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
CE	1														
pH	-0,129	1													
Eh	-0,204	-0,108	1												
T°C	-0,329	0,615	0,238	1											
NH ₄ ⁺	0,449	-0,339	-0,119	-0,518	1										
Ca ⁺⁺	0,574	0,257	-0,350	0,130	0,212	1									
Mg ⁺⁺	0,553	0,193	-0,112	0,130	0,103	0,092	1								
Na ⁺	0,928	0,475	0,170	-0,367	0,051	-0,226	-0,216	1							
K ⁺	0,459	0,227	0,042	0,532	-0,311	0,270	-0,123	0,236	1						
Cl ⁻	0,716	-0,375	0,202	-0,255	0,077	-0,178	0,195	0,753	0,036	1					
SO ₄ ⁻	-0,102	0,243	-0,148	0,278	-0,193	-0,126	0,397	0,238	0,482	0,189	1				
HCO ₃ ⁻	0,152	0,083	0,003	-0,053	0,002	-0,039	0,098	0,206	0,016	0,014	0,277	1			
CO ₃ ⁻	0,360	-0,065	-0,359	-0,223	0,160	0,364	-0,081	-0,217	-0,408	-0,363	-0,301	0,174	1		
NO ₃ ⁻	-0,167	0,014	-0,139	-0,420	0,360	0,452	0,047	-0,218	-0,274	-0,269	-0,450	-0,012	0,110	1	
NO ₂ ⁻	-0,505	0,353	0,235	0,457	-0,218	0,170	0,582	-0,297	-0,079	0,095	-0,038	-0,159	-0,104	0,144	1

L'examen du (**Tableau .34**) relatif à la matrice des corrélations permet de voir de très forte corrélation entre la conductivité électrique et les éléments majeurs, sauf avec les Carbonates(CO₃⁻), Bicarbonates (HCO₃⁻), Nitrites(NO₂⁻), Nitrates (NO₃⁻) elle est moins significative. De plus des corrélations positives et significatives entre (T°C - NO₂⁻), (Mg⁺⁺-NO₂⁻), (Na⁺-Cl⁻).

Une corrélation négative du potentiel d'oxydo-réduction avec les éléments responsables de la minéralisation des eaux (sodium, calcium, magnésium et chlorures). Mais aussi on remarque une autre corrélation négative entre (pH-Cl⁻).

Tableau 34 Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 13 janvier 2013).

Variables	CE	pH	Eh	T°C	NH ₄ ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
CE	1														
pH	0,081	1													
Eh	-0,299	-0,210	1												
T°C	0,713	0,169	-0,167	1											
NH ₄ ⁺	0,011	-0,016	-0,060	-0,106	1										
Ca ⁺⁺	0,690	0,003	-0,687	0,523	0,050	1									
Mg ⁺⁺	0,824	0,032	-0,651	0,519	0,141	0,066	1								
Na ⁺	0,632	-0,357	-0,763	-0,480	0,169	-0,226	-0,207	1							
K ⁺	0,760	-0,074	-0,545	-0,098	-0,313	0,072	-0,327	0,101	1						
Cl ⁻	0,911	-0,620	0,475	-0,284	0,097	-0,093	0,197	0,729	-0,104	1					
SO ₄ ⁻	0,872	0,054	-0,302	0,084	0,078	-0,158	0,370	0,252	0,374	0,150	1				
HCO ₃ ⁻	-0,218	0,217	-0,373	0,029	0,456	-0,057	0,077	0,179	-0,024	0,070	0,336	1			
CO ₃ ⁻	-0,079	0,337	0,310	0,086	0,084	0,246	-0,012	-0,153	-0,415	-0,198	-0,256	0,249	1		
NO ₃ ⁻	0,291	0,322	-0,191	0,297	0,234	0,560	-0,089	-0,171	-0,159	-0,348	-0,489	-0,100	0,155	1	
NO ₂ ⁻	0,213	-0,144	0,127	0,600	-0,233	0,226	0,646	-0,261	-0,315	0,105	-0,093	-0,160	-0,076	0,148	1

La matrice de corrélation (**Tableau.34**) présente les différentes corrélations entre les variables prises deux à deux, la signification du coefficient(r) est fonction du nombre d'individus traités (n).

La matrice de corrélation permet de voir que pratiquement la conductivité électrique et tous les éléments majeurs sont corrélés entre eux.

Tableau 35 Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne 28 mai 2014).

Variables	CE	pH	Eh	T°C	NH ₄ ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
CE	1														
pH	-0,129	1													
Eh	-0,204	-0,108	1												
T°C	-0,329	0,615	0,238	1											
NH ₄ ⁺	0,582	-0,001	-0,188	-0,362	1										
Ca ⁺⁺	0,793	0,308	-0,172	0,047	-0,160	1									
Mg ⁺⁺	0,653	0,235	-0,538	0,204	-0,150	0,238	1								
Na ⁺	0,824	-0,490	0,555	-0,487	-0,213	0,049	-0,194	1							
K ⁺	0,732	0,254	-0,413	0,477	-0,271	0,226	-0,160	0,214	1						
Cl ⁻	0,922	-0,520	0,401	-0,386	-0,415	-0,152	-0,029	0,788	0,169	1					
SO ₄ ⁻	0,540	-0,016	-0,410	0,113	-0,408	0,057	0,232	0,227	0,322	0,197	1				
HCO ₃ ⁻	0,188	0,143	-0,545	-0,099	-0,354	0,435	0,106	0,132	-0,069	0,066	0,245	1			
CO ₃ ⁻	0,262	0,013	-0,341	-0,004	-0,012	0,291	-0,159	-0,164	-0,070	-0,236	-0,152	-0,124	1		
NO ₃ ⁻	-0,382	0,625	0,064	0,574	-0,206	-0,047	0,502	-0,276	0,066	-0,239	-0,006	-0,036	-0,258	1	
NO ₂ ⁻	-0,629	0,278	0,190	0,353	-0,024	-0,147	0,537	-0,320	-0,330	-0,253	-0,258	-0,075	-0,069	0,658	1

Explication :

La corrélation positive des chlorures et la conductivité électrique de l'eau est excellente, d'où une grande influence des chlorures sur la salinité des eaux, le coefficient de corrélation entre la conductivité électrique et les ions chlorures est égale à 0,716 pour la première campagne, 0,911 pour la deuxième campagne et 0,922 pour la troisième campagne. Le coefficient de corrélation, dans le cas du sodium est fortement significatif pour les trois campagnes.

Les corrélations entre la conductivité électrique qui reflète la salinité totale de l'eau et les variables chimiques, autres que les chlorures et sodium, sont présentées dans les tableaux 33, 34 et 35.

Les chlorures montrent une excellente corrélation avec le sodium. On remarque que les teneurs en chlorures et sodium varient de façon similaire avec augmentation de la conductivité électrique. Ces fortes corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations des teneurs de ces ions. Les relations entre

ces cations indiquent l'existence des réactions d'échange ioniques entre solution et le complexe adsorbant.

4. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le grand intérêt de l'ACP réside dans le fait qu'elle prend en compte toutes les variables entrées simultanément et que l'interprétation des résultats se limite le plus souvent à l'interprétation des premières composantes. Des cercles de corrélations permettent de schématiser les liens existant entre les différentes variables étudiées. De même, des projections des individus sur les plans formés par les premières composantes principales permettent de visualiser la répartition des différents individus (points d'eau échantillonnés), ce qui donne une idée sur leur ressemblance vis-à-vis des variables mesurées.

➤ **Plans factoriels de la première campagne :**

Projection sur le plan factoriel F1F2 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F2 nous donne une variance de 41.23 %. L'axe F1 (22.06 % de la variance) présente le pôle de la salinité avec une relation proportionnelle entre les éléments, Na^+ , Cl^- , et la conductivité électrique, elle est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique .de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique. Cette salinité est corrélée négativement avec le potentiel d'oxydo-réduction qui occupe la partie négative.

Projection sur le plan factoriel F1F3 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F3 nous donne une variance de 35.31 %. L'axe F1 (22.06 % de la variance) et pratiquement les mêmes relations proportionnelles entre les éléments que pour le plan factoriel F1F2. La projection des individus par rapport à cet axe montre deux groupes chloruré-sodiquebicarbonaté-sodique. (Figure 47,48)

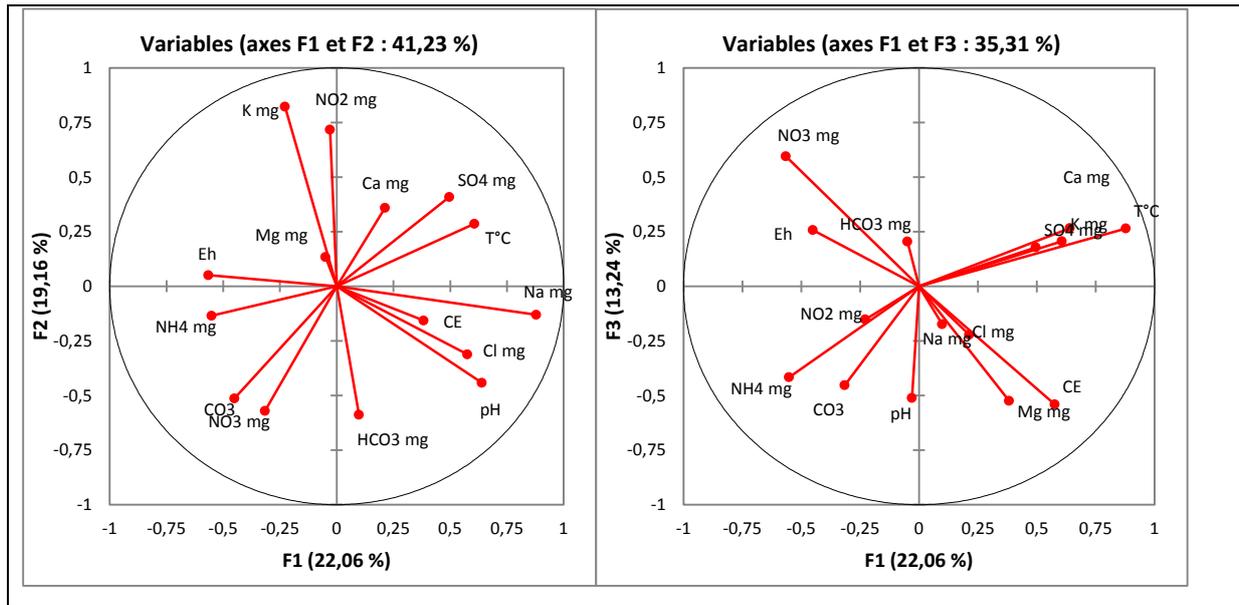


Figure 48 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne 29 Février 2012).

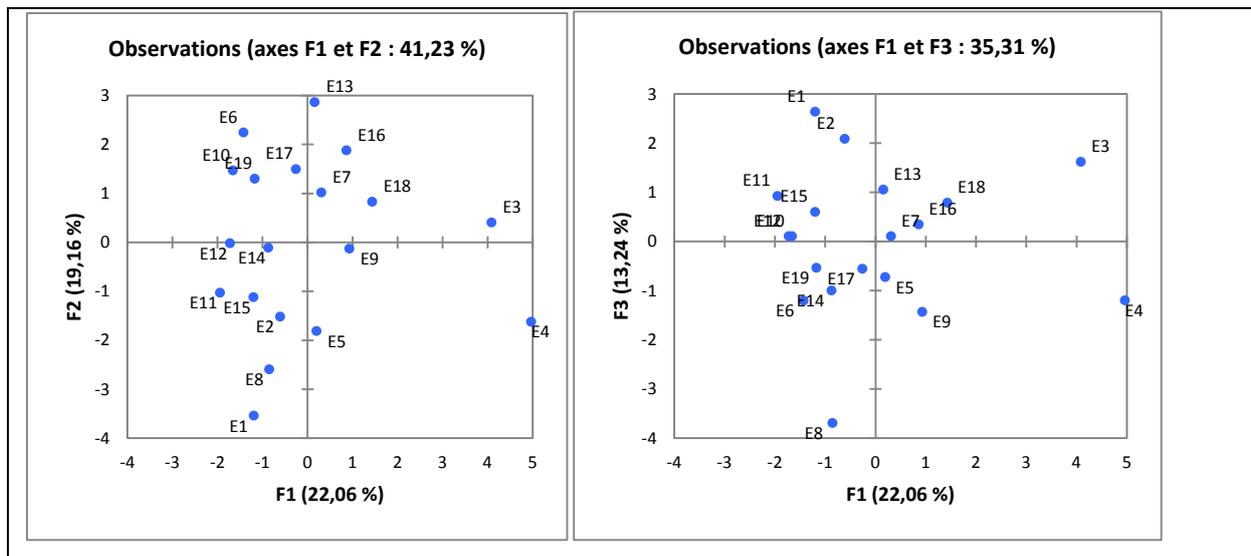


Figure 49 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne 29 Février 2012).

(E : Echantillon)

➤ Plans factoriels de la deuxième campagne :

Projection sur le plan factoriel F1F2 : la projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1F2 nous donne une variance de 39.73 %. L'axe F1 (24.04 % de la variance) présente une relation proportionnelle entre les éléments majeurs (Na^+ , Cl^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+

,K, Cl⁻, SO₄²⁻) et la conductivité électrique, c'est les eaux fortement minéralisées, Cette première interprétation montre une double origine de la salinité, une première engendrée par la géologie, notamment par la dissolution de l'encaissant, la seconde(d'après Hadj-Said 2007 contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière :

Cas de la nappe de Guerbès) serait d'origine marine caractérisée par des valeurs importantes du rapport Br/Cl .Tandis que il y a un deuxième groupe, avec une corrélation négative du potentiel d'oxydo-réduction avec les éléments responsables de la minéralisation des eaux (sodium, calcium, magnésium et chlorures) et il représente les eaux faiblement minéralisées à pH neutre qui caractérisent le reste des cours d'eau de la région d'étude.

Une relation est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique .de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique. Cette salinité est corrélée négativement avec le potentiel d'oxydo-réduction qui occupe la partie négative.

Projection sur le plan factoriel F1F3 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F3 nous donne une variance de 38.62 %. L'axe F1 (24.04 % de la variance) et pratiquement les même relations proportionnelle entre les éléments que pour le plan factoriel F1F2. (Figure 49,50)

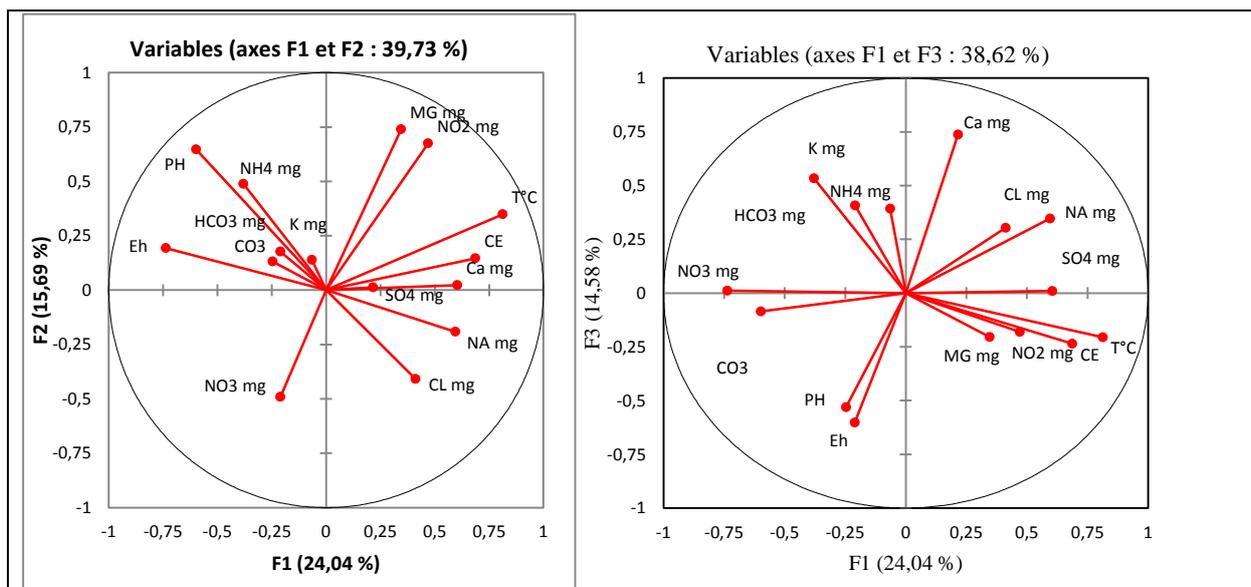


Figure 50 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (13 Janvier 2013).

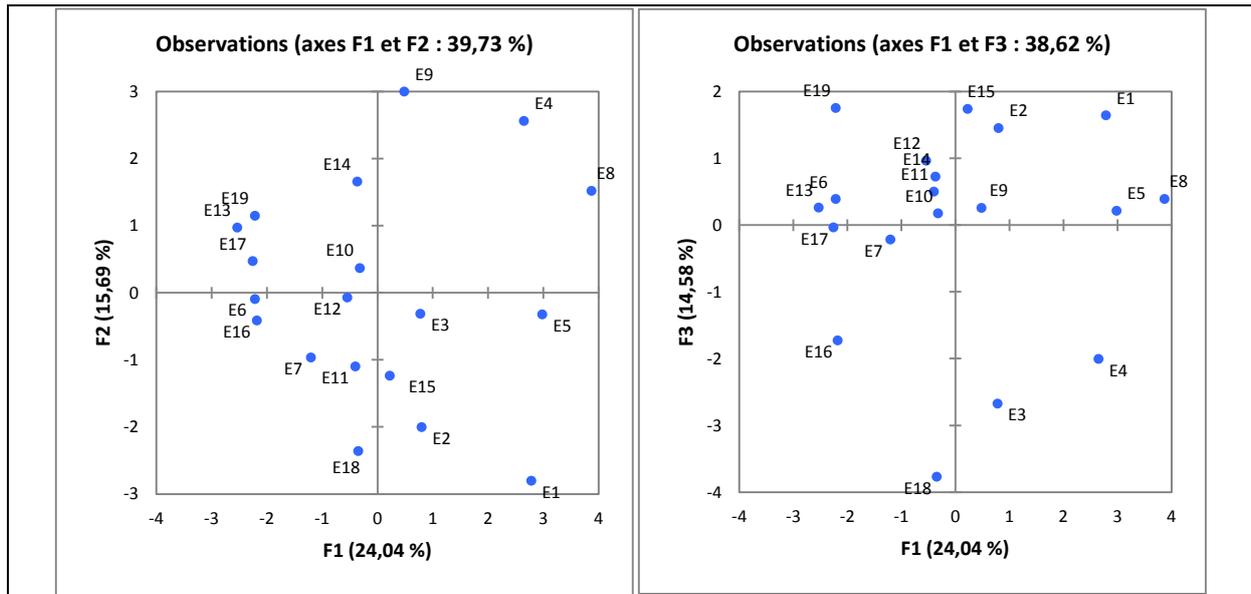


Figure 51 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (13 Janvier 2013).

➤ **Plans factoriels de la troisième campagne :**

Projection sur le plan factoriel F1F2 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F2 nous donne une variance de 41.79 %. L'axe F1 (17.17 % de la variance permet de voir que pratiquement la conductivité électrique et tous les éléments majeurs sont corrélés entre eux c'est les eaux fortement minéralisées,

- Projection sur le plan factoriel F1F3 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F3 nous donne une variance de 38.99 %. L'axe F1 (17.17% de la variance) et pratiquement les même relations proportionnelle entre les éléments que pour le plan factoriel F1F2.

Dans le plan des individus, le facteur F3 exprime donc un phénomène d'oxydoréduction. (Figure 51,52)

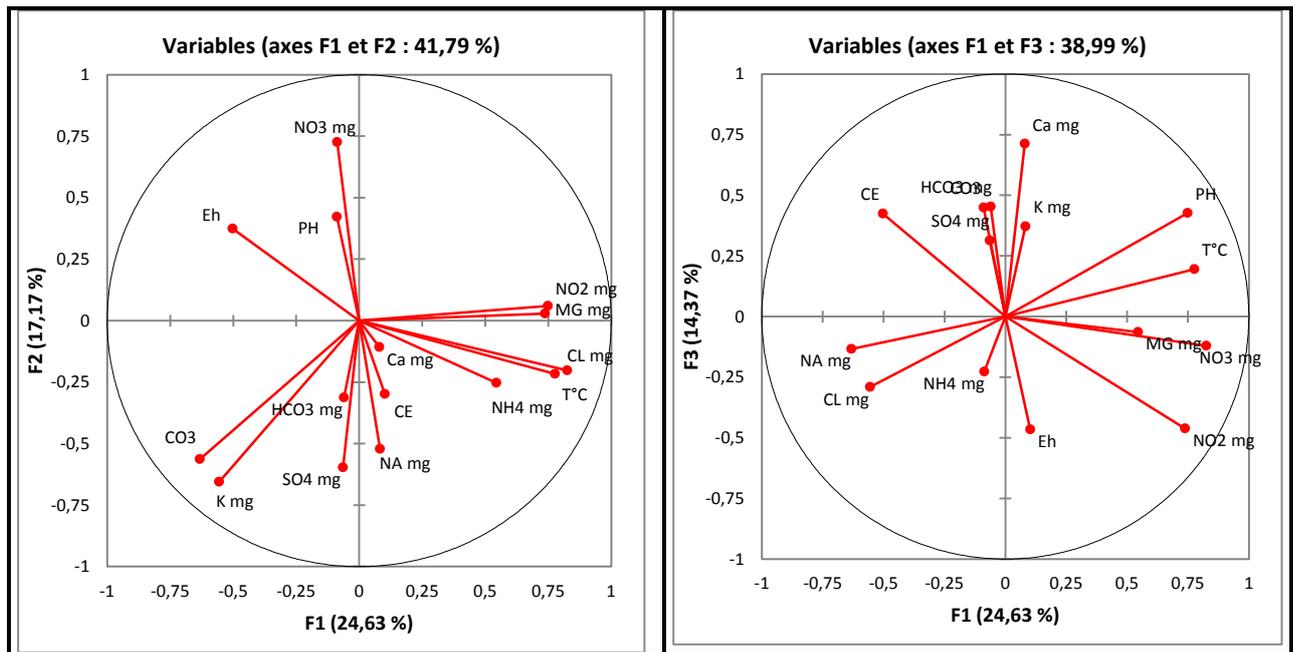


Figure 52 Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (28 Mai 2014).

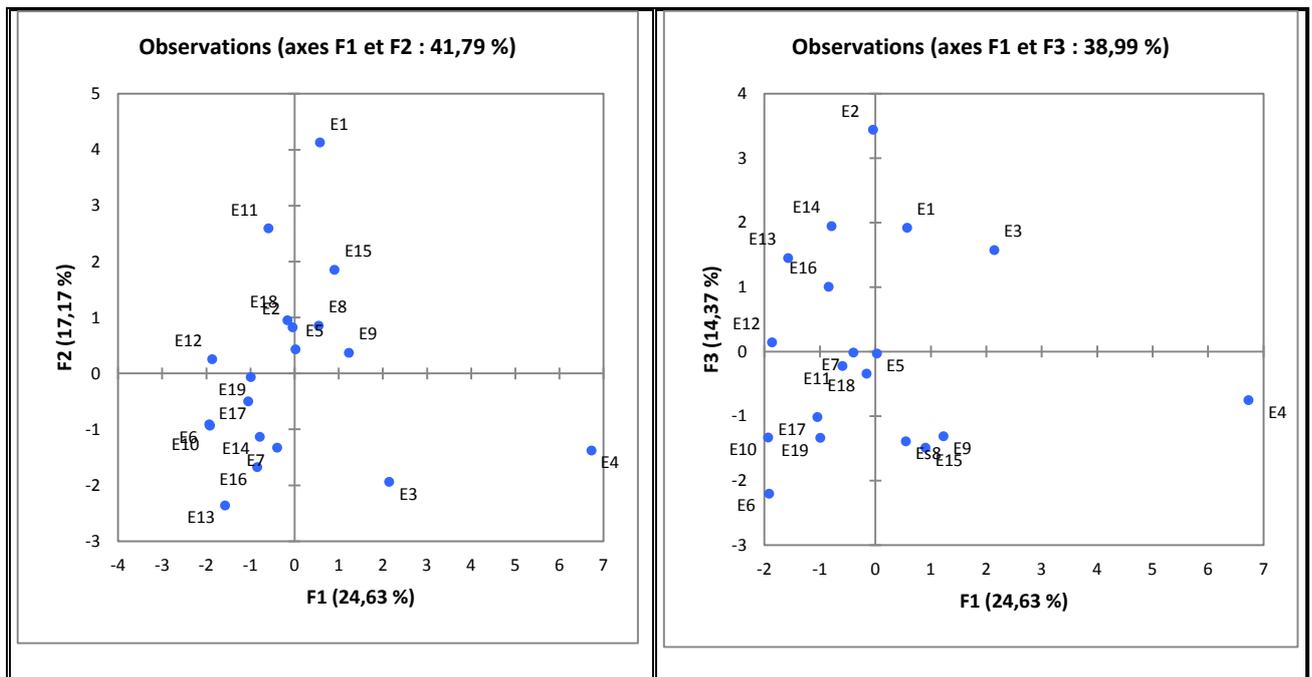


Figure 53 Répartition des échantillons sur le plan factoriel (28 Mai 2014).

5. Relations entre facteurs et individus

Tableau 36Corrélation entre individus et facteurs (campagne 29 Février 2012)

	F1	F2	F3
E1	0,065	0,573	0,317
E2	0,025	0,156	0,296
E3	0,739	0,007	0,115
E4	0,781	0,083	0,046
E5	0,002	0,194	0,031
E6	0,138	0,341	0,099
E7	0,012	0,126	0,001
E8	0,027	0,251	0,508
E9	0,058	0,001	0,137
E10	0,264	0,206	0,001
E11	0,376	0,105	0,085
E12	0,321	0,000	0,001
E13	0,001	0,409	0,055
E14	0,042	0,001	0,056
E15	0,194	0,170	0,048
E16	0,082	0,392	0,013
E17	0,011	0,342	0,047
E18	0,156	0,052	0,047
E19	0,163	0,199	0,034

Tableau 37Corrélation entre individus et facteurs(campagne13 Janvier 2013)

	F1	F2	F3
E1	0,402	0,408	0,140
E2	0,039	0,243	0,127
E3	0,038	0,006	0,455
E4	0,364	0,340	0,209
E5	0,472	0,006	0,002
E6	0,419	0,001	0,013
E7	0,166	0,107	0,005
E8	0,544	0,084	0,006
E9	0,013	0,509	0,004
E10	0,009	0,012	0,003
E11	0,028	0,207	0,042
E12	0,034	0,001	0,108
E13	0,271	0,040	0,003
E14	0,010	0,205	0,039
E15	0,007	0,200	0,395
E16	0,420	0,015	0,264
E17	0,450	0,020	0,000
E18	0,005	0,222	0,568
E19	0,420	0,113	0,262

Tableau 38Corrélation entre individus et facteurs(campagne 28 Mai 2014)

	F1	F2	F3
E1	0,014	0,717	0,155
E2	0,000	0,035	0,616
E3	0,240	0,197	0,129
E4	0,897	0,038	0,011
E5	0,000	0,019	0,000
E6	0,208	0,049	0,274
E7	0,015	0,174	0,000
E8	0,018	0,043	0,116
E9	0,140	0,012	0,160
E10	0,283	0,063	0,135
E11	0,034	0,656	0,005
E12	0,424	0,008	0,002
E13	0,159	0,357	0,134
E14	0,046	0,096	0,281
E15	0,062	0,260	0,170
E16	0,074	0,290	0,104
E17	0,178	0,041	0,169
E18	0,002	0,084	0,011
E19	0,142	0,001	0,258

6. Relations facteurs et paramètres

Tableau 39 Corrélation entre variables et facteurs (campagne 29 Février 2012)

	F1	F2	F3
CE	-0,565	0,050	0,594
pH	0,640	-0,442	0,266
Eh	0,213	0,359	-0,223
T°C	0,879	-0,130	0,264
NH ₄ ⁺	-0,552	-0,135	-0,416
Ca ⁺⁺	0,099	-0,588	-0,174
Mg ⁺⁺	0,383	-0,156	-0,524
Na ⁺	-0,228	0,822	-0,152
K ⁺	0,606	0,286	0,207
Cl ⁻	-0,030	0,718	-0,512
SO ₄ ⁻	0,496	0,408	0,178
HCO ₃ ⁻	-0,049	0,134	0,205
CO ₃ ⁻	-0,450	-0,513	0,257
NO ₃ ⁻	-0,316	-0,570	-0,453
NO ₂ ⁻	0,576	-0,311	-0,541

Tableau 40 Corrélation entre variables et facteurs (campagne 13 Janvier 2013)

	F1	F2	F3
CE	0,687	0,146	-0,235
pH	0,412	-0,409	0,304
Eh	-0,380	0,488	0,534
T°C	0,813	0,348	-0,206
NH ₄ ⁺	-0,064	0,139	0,393
Ca ⁺⁺	0,604	0,023	0,010
Mg ⁺⁺	0,345	0,740	-0,205
Na ⁺	-0,736	0,193	0,011
K ⁺	-0,210	-0,491	-0,603
Cl ⁻	-0,599	0,647	-0,085
SO ₄ ⁻	-0,246	0,131	-0,530
HCO ₃ ⁻	-0,210	0,178	0,407
CO ₃ ⁻	0,216	0,012	0,738
NO ₃ ⁻	0,595	-0,192	0,347
NO ₂ ⁻	0,470	0,675	-0,180

Tableau 41Corrélation entre variables et facteurs(campagne 28 Mai 2014)

	F1	F2	F3
CE	-0,503	0,374	0,425
pH	0,748	0,060	0,426
Eh	0,102	-0,298	-0,466
T°C	0,776	-0,217	0,195
NH ₄ ⁺	-0,087	0,726	-0,227
Ca ⁺⁺	0,080	-0,108	0,712
Mg ⁺⁺	0,545	-0,253	-0,064
Na ⁺	-0,632	-0,563	-0,134
K ⁺	0,082	-0,521	0,371
Cl ⁻	-0,556	-0,656	-0,291
SO ₄ ⁻	-0,064	-0,597	0,314
HCO ₃ ⁻	-0,060	-0,313	0,453
CO ₃ ⁻	-0,089	0,422	0,449
NO ₃ ⁻	0,825	-0,202	-0,121
NO ₂ ⁻	0,738	0,028	-0,462

Conclusion

L'analyse statistique multi variée des données hydro chimiques ont montrées :

- une relation proportionnelle entre les éléments, Na⁺, Cl⁻, et la conductivité électrique, elle est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique .de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique.

-présente une relation proportionnelle entre les éléments majeurs (Na⁺, Cl⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K, Cl⁻, SO₄⁻) et la conductivité électrique, c'est les eaux fortement minéralisées, Cette première interprétation montre une double origine de la salinité, une première engendrée par la géologie, notamment par la dissolution de l'encaissant, la seconde serait d'origine marine (d'après Hadj-Said2007)

- ✓ il y a un deuxième groupe, avec une corrélation négative du potentiel d'oxydo-réduction avec les éléments responsables de la minéralisation des eaux (sodium, calcium, magnésium et chlorures) et il représente les eaux faiblement minéralisées à pH neutre qui caractérisent le reste des cours d'eau de la région d'étude. Une relation est très importante entre les

Chapitre IV. Résultats et discussion

chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique .de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique.

- ✓ la conductivité électrique et tous les éléments majeurs sont corrélés entre eux c'est les eaux fortement minéralisées,

Chapitre V. Discussion générale

Chapitre V. Discussion générale

Cette partie du travail permet des explications avancées et synthétiser les diverses approches géochimiques pour nous permettre de comprendre l'état actuel des eaux du complexe humide Guerbès-Sanhadja dont la qualité est affectée par les risques de la contamination par l'eau de mer d'une part et d'autre part l'impact de l'utilisation en excès des engrais sur les cultures mais aussi l'irrigation excessive.

La description des formations géologiques a montré que la région d'étude fait partie de l'ensemble géologique de l'Atlas Tellien, zone plissée alpine de l'Afrique du Nord caractérisée par sa complexité lithologique et structurale. La région présente une succession d'ensembles structuraux tectoniquement empilés. Ce sont de bas en haut :

- ✓ l'autochtone de la bordure occidentale de l'Edough (Khammar, 1980]
- ✓ la zone para-autochtone des terrains Mésozoïques du mont de Safia
- ✓ un ensemble allochtone des schistes métamorphiques du Paléozoïque inférieur que surmonte
- ✓ une couverture sédimentaire oligocène.
- ✓ un flysch albo-aptien et paléogène recouvert par du flysch à microbrèches présentant une
- ✓ extension limitée
- ✓ la nappe numidienne dont l'âge a été attribuée au sommet de l'Oligocène et à l'Aquitaniens
- ✓ et enfin, les sédiments plio-quadernaires déposés en discordance sur l'ensemble de ces
- ✓ formations.
- ✓ Les descriptions pédologiques ont montré que dans notre région d'étude, il y a les types de sols suivants :
- ✓ Classe des sols peu évolués :
- ✓ Groupe d'apport alluvial
- ✓ Sols d'apport colluvial

Classe des vertisols :

- ✓ Sous-classe des vertisols à drainage externe possible
- ✓ Sous-classe des vertisols à drainage externe nul ou réduit
- ✓ Classe des sols calcimagnésiques

- ✓ Classe des sols fersialitiques
- ✓ Classe des sols hydromorphes
- ✓ Sous-groupe à pseudogley de surface
- ✓ Sous-groupe à pseudogley

Du fait de l'aridité, les eaux de surface ont beaucoup diminué et la recharge des aquifères est actuellement faible. Cependant durant les périodes humides, la couverture végétale est abondante et joue un rôle important dans la reprise évapotranspiratoire et donc une décharge de la nappe dans la zone racinaire (Walvoord et *al.*, 2002). Par contre, si la couverture végétale est réduite (périodes arides), les fortes pluies, même très occasionnelles, peuvent créer des ruissellements en surface qui alimentent les mares temporaires et par conséquent une augmentation de la recharge des nappes souterraines (Favreau et *al.*, 2002).

Le climat de la région d'étude a été déterminé par les différentes méthodes, il s'agit d'un climat méditerranéen caractérisé par un hiver humide et clément et un été chaud et sec. La saison humide s'étale depuis le mois d'Octobre jusqu'à Mai et la saison sèche s'étend sur le restant de l'année.

La lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant a été estimée 64,86mm et la température moyenne annuelle est de 19,01°C pour la période (2005/2016),

Pour l'évapotranspiration la moyenne maximale a lieu au mois Juillet 88.52 mm et la moyenne minimale en Janvier 47.98 mm

Les valeurs les plus basses de températures varient de 12.95 à 14.01 °C, sont observées durant la période hivernale (décembre – avril), avec un minimum pendant le mois de février (12.95°C). L'influence de la température sur la qualité chimique se fait sentir pendant la période d'été, où on a une concentration des éléments par évaporation. L'humidité moyenne mensuelle est de 71.50 % au mois d'Avril et à 65.95 % au mois de mai.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm), c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en mars, avec un maximum au mois de février (82.1 mm) et un minimum au mois de décembre (44.2 mm). L'excédent est égal à (209.03 mm), l'ETR est de l'ordre de (515.1mm) ; le déficit agricole (DA) débute au mois de juillet et se poursuit jusqu'au mois d'octobre donc plus de 50% sera attribué à l'infiltration vu que les conditions

qui règnent dans le secteur d'étude (conditions géologiques, couvert végétal...) favorisent plutôt l'infiltration au ruissellement. Ce dernier étant négligeable se manifestant particulièrement au niveau des oueds.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.7 mm) et son minimum au mois de janvier (28.20 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (48.3 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois de mars, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

Pour la première campagne, les teneurs moyennes en sodium est de 285.36 mg/l, on observe une très grande variabilité pour les chlorures la valeur moyenne de 519, 686 mg/l Son coefficient de variation corrobore très bien cette observation. On remarque que les concentrations en sulfates et en carbonates sont relativement faibles vis-à-vis des bicarbonates et des chlorures, Les chlorures et les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux. On observe aussi une très grande variabilité pour le calcium, la valeur moyenne de 26,78 mg/l. Les concentrations en magnésium sont très variables avec une valeur moyenne de 13.79 mg/l. La teneur moyenne en potassium est de 6.13 mg/l, c'est en fait l'ion le moins abondant. Il montre une variabilité avec une valeur minimale de 3 mg/l et un maximum de 11 mg/l.

Dans la deuxième campagne, les teneurs en magnésium présentent une moyenne de 13.63 mg/l. Le sodium avec une moyenne de 278.26 mg/l présente une forte fréquence des valeurs. Les chlorures suivent une évolution avec une forte fréquence des valeurs comprises entre 260 et 666 mg/l et des valeurs comprises entre 12 et 55 mg/l pour Ca^{2+} . Les bicarbonates ont la même évolution, elles sont comprises entre 20.30 et 986.00 mg/l. par contre les sulfates présentent une répartition spatiale assez hétéroclite pour l'ensemble des résultats de cette deuxième campagne.

La troisième campagne, les coefficients de variation des deux ions : sodium et chlorures montrent des valeurs importantes (26.65% pour le sodium et 23.13 % pour les chlorures). Avec le sodium qui présente une concentration moyenne de 290.31 mg/l et l'ion chlorures est le plus abondant avec une moyenne de 518.05mg/l, les sulfates présentent une grande

dispersion des valeurs (coefficient de variation 88.37%). Les ions bicarbonates et calcium sont présents avec une concentration moyenne est respectives de 466.58 mg/l et de 28.26 mg/l. Les coefficients de variation sont importants (39.87% pour le calcium et 39.02% pour les bicarbonates).

La moyenne des concentrations en magnésium est de l'ordre de 14.34 mg/l, les teneurs en potassium présentent une moyenne de 6.316 mg/l. Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux, c'est en fait l'ion le moins abondant.

L'interprétation géochimique de l'eau de la région d'étude a permis de mettre en évidence :

- Le sodium est généralement associé à l'ion chlorure, très soluble dans l'eau, il est affecté par le processus d'échange de base. Les argiles peuvent retenir des quantités importantes en sels (Schoeller, 1962), les eaux en contact avec les dépôts argileux peuvent se charger en ces éléments et grâce à leur solubilité élevée, ces ions peuvent atteindre des concentrations considérables.
- ✓ Les concentrations en chlorures et en sodium présentent une forte similitude avec la conductivité électrique des eaux. Ceci indique que la CE des eaux, est déterminée principalement par le NaCl et que le faciès des eaux étudiées est en partie de type chloruré sodique.
- ✓ Les sulfates pourraient provenir de la dissolution d'anhydrite ou de gypse ou encore de l'oxydation de la pyrite présente dans les formations argileuses.
- ✓ Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux car il est adsorbé par la matrice argileuse du sol est absorbé par les plantes.
- ✓ Les bicarbonates sont des composés anioniques contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles selon leurs sources et le pH de l'eau. L'origine de cet élément est essentiellement la mise en solution du gaz carbonique qui par formation d'un acide faible attaque les roches carbonatées.

- ✓ La corrélation positive des chlorures et la conductivité électrique de l'eau est excellente, d'où une grande influence des chlorures sur la salinité des eaux, le coefficient de corrélation entre la conductivité électrique et les ions chlorures est égale à 0,716 pour la première campagne, 0,911 pour la deuxième campagne et 0,922 pour la troisième campagne. Le coefficient de corrélation, dans le cas du sodium est fortement significatif pour les trois campagnes.
- ✓ Les corrélations entre la conductivité électrique qui reflète la salinité totale de l'eau et les variables chimiques, autres que les chlorures et sodium, sont présentées dans les tableaux 29, 30 et 31.
- ✓ Les chlorures montrent une excellente corrélation avec le sodium. On remarque que les teneurs en chlorures et sodium varient de façon similaire avec augmentation de la conductivité électrique. Ces fortes corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations des teneurs de ces ions. Les relations entre ces cations indiquent l'existence des réactions d'échange ioniques entre solution et le complexe adsorbant.
- ✓ Une relation proportionnelle entre les éléments Na^+ , Cl^- et la conductivité électrique, elle est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique, de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique.
- ✓ Présente une relation proportionnelle entre les éléments majeurs (Na^+ , Cl^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--}) et la conductivité électrique, c'est les eaux fortement minéralisées. Cette première interprétation montre une double origine de la salinité, une première engendrée par la géologie, notamment par la dissolution de l'encaissant, la seconde serait d'origine marine (Hadj-Said, 2007). La richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , Ca^{++} et SO_4^{--} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées de sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^- sont liés à la dissolution des carbonates car les sels dissous dans les eaux est généralement liée aux minéraux contenus dans les roches et des formations traversées par ces eaux. Il y a un deuxième

groupe, avec une corrélation négative du potentiel d'oxydo-réduction avec les éléments responsables de la minéralisation des eaux (sodium, calcium, magnésium et chlorures) et il représente les eaux faiblement minéralisées à pH neutre qui caractérisent le reste des cours d'eau de la région d'étude. Une relation est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, d'où le faciès chloruré-sodique, de plus une relation entre les bicarbonates et le sodium d'où le faciès bicarbonaté-sodique.

- ✓ La conductivité électrique et tous les éléments majeurs sont corrélés entre eux c'est les eaux fortement minéralisées.

- ✓ Le faciès chloruré-sodique qui caractérise les mares est à l'origine de la situation de la plaine au voisinage de la mer qui influe sur la chimie des eaux de surface.

D'après Hadj-Said(2007), dans les zones à dominance sableuses, les échanges mer-nappe sont présents et mettent en évidence une intrusion marine confirmée par les valeurs des rapports, rMg/rCa et rSO_4/rCl . Cette intrusion se fait probablement par le biais de l'oued car l'évolution de ces rapports sur le profil ne reflète pas cette pollution marine, laissant penser à la présence d'une barrière aux échanges mer-nappe (Figure 53), il s'agit des grès quartzeux littoraux (D.E.M.R.H., 1975). Par ailleurs, la diminution de rMg/rCa aux premiers kilomètres de la côte montre l'influence des calcarénites.

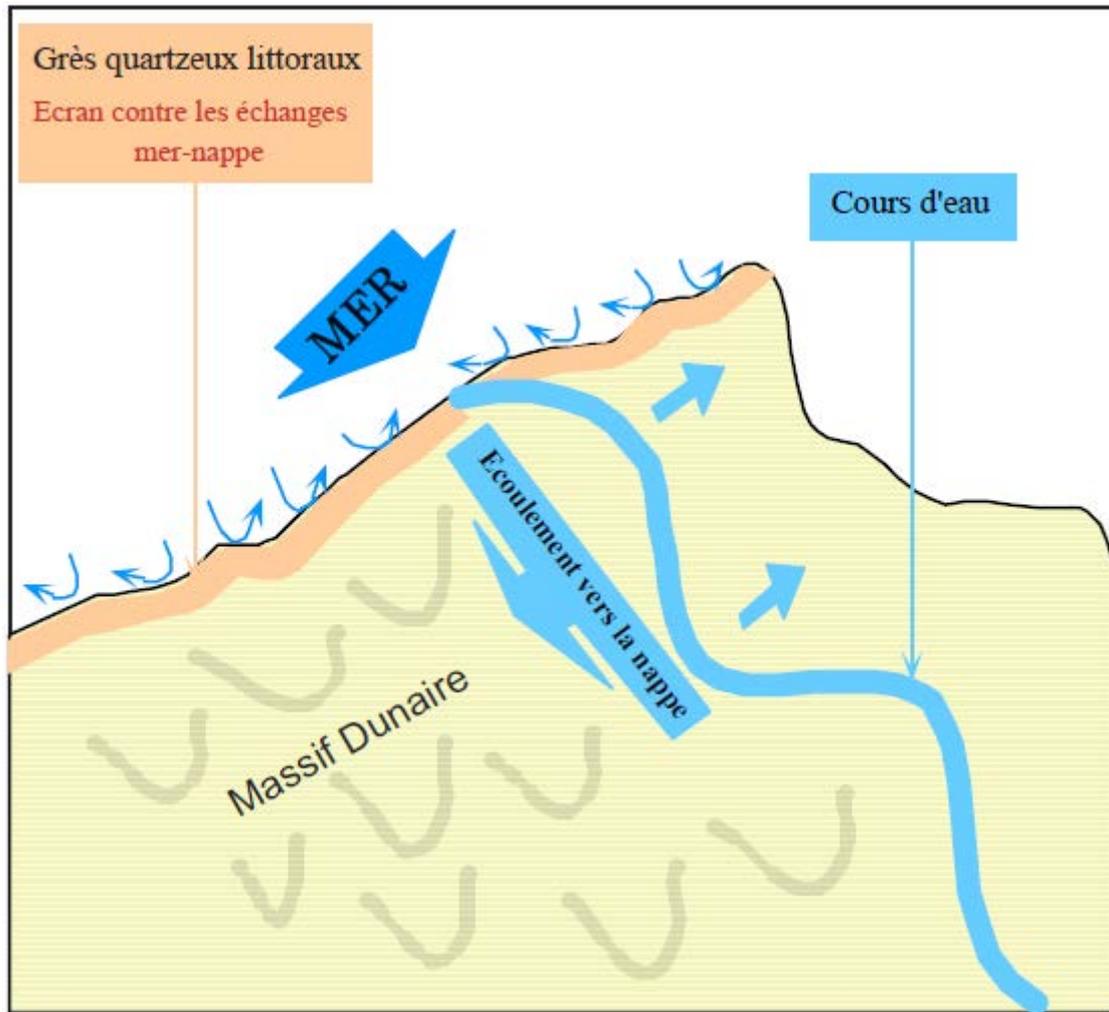


Figure 54 Schéma explicatif synthétique de la pollution marine

(Cas de la nappe de Guerbès) (d'après Hadj-Said, 2007)

Ainsi, on obtient des valeurs différentes du rapport qui pourront être attribuées à différentes origines. Les deux montrent des rapports proches de celui de l'eau de mer ce qui indique l'influence marine. Cette situation serait liée aux pompages intensifs qui associés à la géologie et au sens de l'écoulement favoriserait la pollution marine.

Conclusion

En conclusion l'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, a montré que les eaux superficielles du complexe humide Guerbès-Sanhadja subissent des variations chimiques et sont influencées par plusieurs processus géochimiques combinés qui sont les réactions d'échanges de bases ; mais également la concentration par évaporation et le phénomène de dilution par mélange avec les eaux de pluie ainsi que la dissolution/précipitation des minéraux carbonatés et évaporitiques. Les eaux présentent dans l'ensemble un faciès chloruré-sodique qui varie par endroit et par période.

En effet, les mares dont les points d'eau situés à proximité de la mer, celle-ci influe sur la chimie des eaux ce qui se traduit par cette tendance chlorurée sodique. Quant aux mares situées au Sud-Ouest indiquent plutôt l'influence des massifs carbonatés de la bordure Ouest de la plaine.

Conclusion générale

Conclusion générale

Guebès-Sanhadja est un complexe de zones humides d'importance majeure (classé Site Ramsar 2001) qui constitue un réservoir de biodiversité faunistique et floristique avec des espèces d'origines biogéographiques diverses (Toubal *et al* ; 2014)

La plaine de Guebès est une région côtière du Nord-est algérien. L'étude géologique a permis de mettre en évidence les formations aquifères. Ainsi, il s'agit des formations carbonatées liasiques, les dépôts sableux du massif dunaire et les alluvions de l'oued El Kébir. Quant aux formations imperméables, elles sont d'une part celles situées en profondeur et qui constituent le substratum des nappes de recouvrement et notamment les formations aquifères, c'est le socle métamorphique et les flyschs et d'autre part celles qui affleurent et favorisent le ruissellement.

L'étude climatologique a permis de déterminer les caractéristiques du climat du secteur. C'est un climat méditerranéen à hiver humide et clément et été chaud et sec. La lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant a été estimée à 654,2mm et la température moyenne annuelle est de 18,5 °C pour la période 1980/2003. L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 503,9mm soit 77% des précipitations, une quantité appréciable favorisée par la présence d'importantes surfaces de plans d'eau, il s'agit des marécages qui se répartissent le long de l'oued El Kébir. L'écoulement a été estimé à 150,3mm dont plus de 50% sera attribué à l'infiltration vu que les conditions qui règnent dans le secteur d'étude (géologie, couvert végétal...) favorisent plutôt l'infiltration au ruissellement. Ce dernier étant négligeable se manifestant particulièrement au niveau des oueds. L'infiltration efficace a été estimée à 143,1mm.

Pour cette étude dans l'éco-complexe de Guebès-Sanhadja, l'échantillonnage des eaux a été fait de manière à couvrir toute la zone afin d'avoir une idée sur la qualité physico-chimique des eaux et dans le but de contrôler la qualité des eaux de la région. Les campagnes de prélèvements ont porté sur trois cycles hydrologiques et ont fait l'objet d'analyses détaillées (2012,2013et 2014). Au cours de ces années un prélèvement par an a été effectué.

Les résultats obtenus montrent des températures moyennes de 21,2°C des eaux de la nappe superficielle et de 22,8°C. Des teneurs en oxygène dissous de 2,9 et 2,5 mg/l. Un pH de 7,2 des eaux de la nappe libre. Des valeurs d'Eh de l'ordre de 169mV pour la nappe superficielle et profonde.

La chimie des eaux est basée principalement sur les informations tirées de la base de données analytiques, sur laquelle une description a été effectuée en utilisant les méthodes suivantes :

- ✓ Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi lesquels le diagramme de Piper qui permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leur évolution et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès chimiques et la minéralisation des eaux (TDS) ainsi que le diagramme de Stiff qui a été utilisé parce qu'il démontre mieux les ions dominants qui caractérisent l'empreinte de l'encaissant. le logiciel Rockworks15 a été utilisé pour traiter l'ensemble des données.
- ✓ Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques qui permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.
- ✓ Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel «Diagramme» pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques et qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux auquel nous avons rajouté le diagramme de Richards pour la classification des eaux d'irrigation
- ✓ Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales), qui permettent d'observer les relations entre les différentes variables et échantillons mais aussi la corrélation entre les individus et les facteurs d'une part et d'autre part entre les variables et les facteurs.

L'étude hydrochimique des nappes de la plaine de Guerbès montrent que les eaux présentent un faciès chloruré-sodique. Quant à la forte minéralisation observée dans la partie Sud, elle serait due à la fois à la géologie et à une origine anthropique (activités agricoles, eaux usées...). Dans le temps, les teneurs en nitrates ont augmenté atteignant des valeurs qui dépassent les normes de potabilité (44mg/l) atteignant un maximum de l'ordre de 96,96mg/l.

Quant à la variation saisonnière, les teneurs élevées se manifestent en période de basses eaux et se répartissent sur l'ensemble du secteur (mai 2014).

La plaine de Guerbès-Sanhadja est une région à vocation agricole, le développement de ces activités au cours de ces dernières années laisse supposer une éventuelle influence sur la qualité des eaux souterraines. Ceci nous a conduits à étudier la qualité physico-chimique dans les eaux et suivre son évolution dans l'espace et dans le temps afin de détecter une éventuelle contamination ou la prévoir et préserver la nappe contre ce danger qui menace à la fois la santé humaine et l'environnement. Ainsi, on remarque que ces teneurs en nitrates sont trop élevées en période de basse eau, ces fortes concentrations sont dues au lessivage du sol au moyen de l'irrigation qui entraîne les nitrates présents dans le sol de la zone superficielle vers les profondeurs pour engendrer un tel taux de ce sel.

Notre région d'étude est à vocation agricole, une activité qui demande beaucoup d'eau afin de satisfaire aux besoins des diverses cultures. L'eau destinée à l'irrigation doit présenter des caractéristiques physico-chimiques tolérables par les plantes. Les eaux trop minéralisées créent divers problèmes pédologiques et agronomiques, ces sels peuvent nuire aux cultures et perturber leur croissance entraînant ainsi une baisse des rendements.

Parmi les éléments responsables de ces problèmes nous pouvons citer le sodium ; les fortes teneurs de cet élément provoquent un changement de la structure physique du sol à cause du gonflement des particules d'argiles. Celles-ci seront par la suite dispersées rendant ainsi la circulation de l'eau plus lente au sein du sol. Cette dégradation des caractéristiques physiques du sol se traduit par une baisse de sa perméabilité et de son aération.

Dans l'étude de la qualité des eaux de l'aquifère à l'irrigation, nous avons fait recours à la méthode de Richards (logiciel Diagramme). Il met en évidence les différentes classes d'eau qui ont été définies sur la base du taux d'absorption de sodium (S.A.R) et sur la concentration des eaux en sels traduite par la conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C). Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux de la zone d'étude conviennent à l'irrigation des diverses cultures. Cependant, on note que les points d'eau situés dans le secteur Sud donnent une eau ne convenant qu'à l'irrigation de certaines plantes tolérantes aux sels.

Perspectives

Le complexe de zones humides de Sanhadja présente la particularité de combiner, dans un étage bioclimatique humide, l'interface d'un écosystème forestier, lacustre et marin. Il comprend une richesse faunistique et floristique exceptionnelle : grandes roselières entrecoupées d'aulnaies, macrophytes, espèces boréales et tropicales, poule sultane, fuligule morillon, foulque macroule...etc.

Ces nombreux sites de zones humides comme celui de Sanhadja, à caractère exceptionnel sont parfois affectés par la proximité urbaine et l'activité humaine nocive. Les perspectives qui s'annoncent en matière de développement touristique menacent ces écosystèmes. Dans les zones humides du complexe de Sanhadja, les modes d'irrigation et les pompages incontrôlés assèchent les plans d'eau en période d'étiage à cela s'ajoute les défrichements illicites les décharges sauvages...(Annexe 13)

Les eaux des zones humides constituent une ressource économique et écologique de première importance. Toutefois, ces réserves s'épuisent et leur qualité se dégrade sous l'effet des différentes activités humaines.

Par ailleurs, la demande en eau est à satisfaire non seulement du point de vue quantité mais devant répondre surtout aux exigences de qualité. Cependant plusieurs points restent à approfondir et à développer, afin de protéger les eaux des zones humides et de minimiser la dégradation des eaux de surface de la région d'étude, nous proposons les recommandations suivantes :

- ✓ Dans la région de Guerbès le manque de données a rendu difficile notre étude. Pour une bonne estimation de la part d'eau qui s'infiltré pour alimenter les eaux souterraines, il est nécessaire de mettre une station de mesures météorologiques dans le site.
- ✓ Pour déterminer le risque de la contamination par l'eau de mer, il est nécessaire de mettre en place des piézomètres profonds au niveau du secteur côtier.(Annexe 13)

Conclusion générale

- ✓ Pour mieux comprendre les facteurs responsables de l'hétérogénéité géochimiques à grande et à petite échelle Il faudra poursuivre l'échantillonnage chimique en multipliant les points de mesure.
- ✓ Eviter le pompage intensif au niveau des ouvrages situés dans les différentes mares du complexe, car cela produirait un abaissement du niveau piézométrique dans les ouvrage et un écoulement des eaux vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité de la nappe.
- ✓ La sensibilisation des agriculteurs sur l'impact de l'utilisation en excès des engrais sur la qualité des eaux souterraines est très importante.
- ✓ Un suivi de la qualité des eaux et de mesures piézométriques régulier est recommandé en vue de préserver ces ressources.
- ✓ Approfondir les études hydro-géophysiques afin d'expliquer le phénomène de la salinisation ponctuelle des eaux dans plusieurs point de la région d'étude.

Enfin, nous espérons que cette contribution à l'état géochimique des eaux du complexe humide, qui sont affectés par le risque de la contamination par l'eau de mer, et l'impact de l'utilisation en excès des engrais ,l'irrigation et les pompages incontrôlés sur la qualité des eaux a apporté un certain nombre d'informations et de précision pour orienter de futurs travaux dans le domaine de la géochimie.(Annexe 13)

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Ait Brahim Y.; 2012 - Dénoyages miniers et hydrochimie élémentaire et isotopique des eaux souterraines de la région d'Oumjrane. Mémoire de fin d'étude, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc; 79 p.

Azzaoui S.; 1999 - Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse Doct. Univ. Ibn Tofail, Kénitra, Maroc; 130 p.

Banton O. & Bangoy L. M.; 1999 - Hydrogéologie: multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec; 460 p.

Benzellat Benmahammed.; 2012- Contribution à l'amélioration des rendements des plantes cultivées en sols salés. Mémoire de Magister, Univ. Aboubeker Belkadi, Tlemcen 64 p.

Berrouch H.;2011-Etude de la qualité des eaux d'irrigation et du sol dans le périmètre de Saâda (Région du Haouz). Mémoire de fin d'étude, Univ. Cadi Ayyad Marrakech, Maroc; 34 p.

Bouchaib A. ; 2007-Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mohammed V. Rabat, Maroc, 134 p.

Boumezbeur A. ; 2001-Fiche Descriptive sur les zones humides Ramsar, DGF.

Boumezbeur A. ; 2008-Fiche Descriptive sur les zones humides Ramsar, DGF.

Bouchaib A. ; 2007 -Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet. Thèse de Doctorat d'Etat ; Université Mohammed V. Rabat, Maroc, 134p.

Bouhlassa S., Alecheikh C. & Kabiri L.; 2008 - Origine de la minéralisation et détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse*; 19; 67-75.

- Bourhane A. ; 2010-** Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eaux souterraines: contexte hydrogéologique et méthode d'étude, Géosciences Réunion, BRGM ,Univ. Avignon ; 108p.
- Brindha K. &Kavitha R. ; 2014** - Évaluation hydrochimique de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines le long du chenal Uyyakondan, en Inde du Sud. *Environnement Earth Sciences*.
- Bustillo V. ; 2005** -Biogéochimie et hydroclimatologie appliquées à l'aménagement des bassins fluviaux. Modèles de mélange. Diagnostic et prévision. Cas du Niger, de l'Amazonie et de la Garonne. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, France, 235p.
- Chabour N.; 2006** - Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas Saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse Doct., Univ. Constantine; 125 p.
- Chapelle F. H.; 1993** - Ground-water microbiology and geochemistry, John Wiley & Sons, Inc. N.Y.; 93 p.
- Clement R. & Galand A. ; 1979** -Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. Ed. Eyrolles
- Cudennec C., Leduc C. &Koutsoyannis D.; 2007** -Dryland hydrology in Mediterranean regions. *Hydrology Science Journal*; 52: 1077-87.
- Custodio E. &Bruggeman G.A.; 1987** - Groundwater problems in coastal areas; Studies and Reports in Hydrology, Paris; 596 p.
- Durand J.H.; 1982** -Les sols irrigables : Etude pédologique. 399 p.
- Durov S.A.; 1948** – Klassifikatsia prirodnykh vodigrafiches koe izobrazhenie ikh sostava. *Doklady Akademii Nauk*; 59(1): 87-90.

Droubi A.; 1976 - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doc., Univ. Strasbourg; 177 p.

Droubi A., Fritz B., Gac J. &Tardy Y.; 1978 - Generalized residual alkalinity concept, application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science*; 280: 560-572.

El Blidi S., Fekhaoui M., El Blidi A., Idrissi L. &Benazzou T.; 2003- Contamination des rizières de la plaine du Gharb (Maroc) par des métaux traces. *Vecteur Environnement*; 46–53.

Gapon E.N.; 1933 - Théorie de l'adsorption d'échange dans les sols. *J. Gec Chem.* (URSS), 19 : 114-158

Gasscoyne M. &Kaminen D. C.; 1994 - The hydrogeochemistry of fractured plutonic rocks in the Canadian Shield. *Applied Hydrogeology*; 2(94): 43 - 49.

Gueddari M. ; 1984 - Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. Etude du lac Natron en Tanzanie et du Chott El Djerid en Tunisie. Mém. Sciences Géol, Strasbourg, 143 p.

Hani A. ; 2003-Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'Etat.Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 214 p.

Hani A. ; 2003-Identification des apports latéraux et de drainance à partir des réponses chimiques et isotopiques : cas du système aquifère de Annaba – Bouteldja, Algérie.*Africa GéoscienceReview*, vol.10, N° 3, pp 267-280.

Houhamdi M. ; 1998. Ecologies du Lac des Oiseaux, Cartographie, Palynothèque et utilisation de l'espace par l'avifaune aquatique. Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar Annaba 198 p.

Joleaud L. ; 1936. Etude géographique de la région de Bône et la Calle. Bull. Serv. Carte Géol de l'Algérie. 2ème série stratigraphique. Description générale. 185 p.

Metallaoui S. ; 2010. Écologie de l'avifaune aquatique de Garaet Hadj- Tahar (Numidie occidentale). Thèse de Doctorat. Univ. Badji Mokhtar, Annaba (Algérie).120 p.

Metallaoui S. & Houhamdi M. 2008. Données préliminaires sur l'avifaune aquatique de Garaet Hadj Tahar (Skikda, Nord-Est algérien). *Afri. Birdclub. Bull.15(1): 71-76.*

Lange J. & Leibundgut C.; 1999 - A non-calibrated rainfall-runoff model for large, arid catchment. *Water Resources*; 35: 2161-72.

Leybourne M. I. & Goodfellow W. D.; 2007 - Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ; 71(9): 2209-2223.

Maouni A.; 2007 - Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse Doct., Univ. Annaba, 257 p.

Marjoui A., Olive P. & Jusserand C.; 1997 - Origines des sels dans l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc). Hydrochemistry (Proceeding of the Rabat Symposium). IASH Publ. N°244; 245-252.

Marlet S. & Job J. O. ; 2006 -Processus et gestion de la salinité des sols, In Tiercelin, J,R, Traité d'irrigation ; Seconde Edition, Tec & Doc Lavoisier, p, 797-822.

Miller R. W. & Donahue R. L.; 1995 - Soils in our environment, Prentice Hall; 7th edition, U.S.A.; 784 p.

Morell I., Médina J., Pulido A. & Fernandez-Rudio R.; 1986 – The use of bromide and strontium ions as indicators of marine intrusion in the aquifer of Torreblanca Castellon, Spain. 9 th Salt water intrusion meeting, Deft: 12(16): 629-640.

Mudry J. &Blavoux A.; 1986 - Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*; 1:53-59.

NdemboLongoj J.; 2009 - Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba. Thèse Doct., Univ. Avignon; 203 p.

Nordstrom D. K., Plummer L.N., Langmuir D., Busenberg E., May H. M., Jones B. F. & Parkhurst D.L.; 1990 - Revised chemical equilibrium data for major water-mineral reactions and their limitations. *American Chemical Society*, Washington; 398-413.

Olive P.; 1996 - Introduction à la géochimie des eaux continentales. Tempus S-JEP 09781/95. Gestion et protection des ressources en eau; 127 p.

OuardiJ.; 2006 - Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla Marocain par salinisation et sodisation. Thèse Doct.,Univ. Cadi Ayyad, Marrakech; 154 p.

Oulaaross Z.; 2009 - Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel Côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa. Thèse Doct.Univ. Chouaib Doukkali & Univ. Bordeaux 1; 279 p.

Ouyse S.; 2005 - Contribution à l'étude des ressources en eau dans la Vallée de Drâa Moyen (Province de Zagora). Mémoire de DESA à la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech.

Peter-Borie M., Lucassou F. &Aubie S.; 2009 - Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basique français, observation de la côte Aquitaine, BRGM, France; 31 p.

Piper A. M.; 1944 - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union*, Tranc; 914-923.

Poutoukis D.; 1991 - Hydrochimie, teneurs isotopiques et origine des saumures associées aux gisements de potasse d'Alsace. Thèse Doct., Univ. Paris-11, Orsay; 124 p.

Raoult J. F. & Foucault A.; 2005 - Dictionnaire de géologie, 6^{ème} Edition; 388 p.

Richard L.A.; 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook 60, USDA, Washington D.C.; 160 p.

Richter B.C. & Kreitler C.W.; 1993 - Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization, Boca Katon, FL, C.K. Smoley; 258 p.

Richard S.K., Chesnaux R., Rouleau A., Morin R., Walter J. & Rafin S.I. ; 1984 - Field evidence of hydraulic connections between bedrock aquifers and overlying granular aquifers: examples from the Grenville Province of the Canadian Shield. *Hydrogeol. J.*, 22, 1889-1904.

Richard L.A.; 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook 60, USDA, Washington D.C.; 160 p

Rouabhia A.E.K. & Djabri L.; 2010 - l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocène de la plaine d'El Ma El Abiod. *Larhyss Journal*; 55-67.

Rouabhia A.E.K., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fehdi C. & Hani A.; 2010 - Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*; 5(1): 1-13

Rodier J., Legube B. & Merlet N. ; 2009 - L'Analyse de l'eau, 9^e édition, Dunod, Paris; 1526 p.

Saidi D. ; 2005 - Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat, INA, Alger, Algérie, 200 p.

Samraoui B. & de Belair G. ; 1997 - The Guerbes-Sanhadja wetlands: part I. Overview. *Ecologie*. 28: 233-250.

- Sekiou F. & Kellil A. ; 2014-** Caractérisation et classification empirique, graphique et Statistique multivariée d'eaux de source embouteillées de l'Algérie. *Larhyss journal*, 20 : 225-246
- Servant J.; 1978.** - La salinité dans les sols et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage. Bull. du BRGM, section IV, n°2 .142 p.
- Schoeller H.; 1962** - Les eaux souterraines. Masson et Cie, Editeurs, Paris, 642 p.
- Subba Rao N. ; 2002-** Géochimie des eaux souterraines dans certaines parties du district de Guntur, Andhra Pradesh, Inde. *Environ Geo*; (1)41:552–562.
- Toubal O.S., Boussehaba A., Toubal A. & Samraoui B. ; 2014.** Biodiversité méditerranéenne et changements globaux : cas du complexe de zones humides de Guerbès-Senhadja (Algérie). *Physio-Géo*; 8: 273-295.
- Thornthwaite C. W. & Mather J.; 1957-** Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Philadelphia Publications in Climatology*; 10(3): 185-311.
- Tôth J.; 1999** - Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*; 7: 1-14.
- Vengosh A. & Rosenthal A.; 1994** - Saline groundwater in Israel: it's bearing on the water crisis in the country. *Journal of Hydrology*; 156: 389–430.
- Vengosh A., Spivack A. J., Artzi Y. & Ayalon A.; 1999** - Boron, strontium and oxygen isotopic and geochemical constraints for the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean Coast. *Water Resources Research*; 35: 1877–1894.
- Vengosh A.; 2003** - Salinization and saline environments, in treatise on geochemistry, *Environmental Geochemistry*; 9: 333-365.

Walvoord M. A., Plummer M. A., Phillips F. M. & Wolfsberg A. V.; 2002- Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose zones. *Water Resources Research*; 38 (12)

Younsi A.; 2001 - Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse Doct., Univ. Chouaïb Doukali. El Jadida; 175 p.

Violette A. ; 2010 - Processus et bilans d'altération en milieu tropical (bassin versant de Mule Hole, Inde du Sud) : Sensibilité à la composition Minéralogique et au Climat. Thèse Doctorat, Université de Toulouse, France, 374p.

Vila J.M. ; 1980 -La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro- Tunisiens. Thèse de Doctorat Es Science. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 665 p.

Zahi F. ; 2008 - La qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est d'Algérie). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba; 156 p.

Zahi F.; 2014 -Contribution à l'étude hydro chimique dusous bassin versant du lac Fetzara (Nord-Est algérien).Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux.Thèse de Doctorat d'Etat. Université Badji Mokhtar Annaba

Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Douiche A. & Medjani F. ; 2013 - Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue Synthèse*; 26 : 86-95.

Webographie

<http://www.xlstat.com>

<https://www.rockware.com/product/overview.php?id=165>

<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

<http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr/hydrochimie.html>.

Cartographie :

Logiciel d'information géographique :**Arc GIS 10.2**

Annexes

**Annexe 1. Composition chimique des eaux du complexe Guerbès-Sanhadja en meq/l
(Campagne 29 Février 2012)**

NH ₄ ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺
0,00138889	1,7	0,16460905	6,30434783	0,12820513	3,00423131	0,11979167	0,13114754	3,46666667	0,12903226	0,00136957	3,38557234	8,29716201
5,5556E-05	1,45	0,82304527	10,6956522	0,12820513	3,3145275	0,515625	0,18634426	3	0,18333871	0,00130435	4,20113982	13,0969026
5,5556E-05	1,45	1,39917695	8,73913043	0,28205128	20,0282087	1,08854167	0,00308197	1,76666667	0,00303226	0,0016087	21,1244733	11,8703587
5,5556E-05	1,6	2,4691358	8,91304348	0,17948718	25,0352609	0,72395833	0,09259016	2	0,09109677	0,01276087	25,9556671	13,1616665
0,00077778	2,65	0,74074074	13,3043478	0,23076923	1,6022567	0,109375	0,16447541	3,6	0,16182258	0,00563043	2,04356012	16,9258578
0,00233333	0,85	0,08230453	17,8695652	0,15384615	3,00423131	0,41145833	0,15481967	1,53333333	0,15232258	0,00165217	3,72448407	18,9557159
0,00194444	1,45	0,74074074	13,4782609	0,23076923	3,00423131	0,15104167	0,07704918	1,93333333	0,07580645	0,00184783	3,30997644	15,8997708
0,00277778	1,95	2,4691358	8,7826087	0,12820513	6,00846262	0,13020833	0,30747541	2	0,30251613	0,00536957	6,75403206	13,3299496
0,00066667	0,8	2,22222222	9	0,07692308	4,00564175	0,359375	0,06331148	2,46666667	0,06229032	0,01004348	4,50066203	12,0991453
0,00016667	0,7	0,82304527	13,4347826	0,1025641	5,00705219	0,17708333	0,06440984	2,33333333	0,06337097	0,00021739	5,31213371	15,060392
0,00194444	0,75	1,2345679	9,43478261	0,1025641	8,0112835	0,125	0,07668852	2,96666667	0,07545161	0,0016087	8,29003233	11,5219146
0	2,1	0,32921811	13,5217391	0,15384615	8,0112835	0,140625	0,09701639	2,66666667	0,09545161	0,00156522	8,34594172	16,1048034
0,00055556	0,65	1,56378601	17,5652174	0,20512821	8,0112835	1,40104167	0,03618033	2,33333333	0,03559677	0,00165217	9,48575444	19,9841316
0,00305556	1,9	2,96296296	13,8695652	0,12820513	4,00564175	1,24479167	0,07370492	3,2	0,07251613	0,00206522	5,39871968	18,8607333
0,00177778	1,2	0,24691358	9,08695652	0,1025641	3,00423131	0,10416667	0,10036066	3	0,09874194	0,00130435	3,30880492	10,6364342
0,00094444	1,45	0,57613169	17,5217391	0,23076923	6,00846262	0,996875	0,05852459	2,1	0,05758065	0,00154348	7,12298634	19,77864
0,00027778	0,95	0,99588477	17,3478261	0,15384615	3,00423131	0,109375	0,08960656	2,3	0,08816129	0,00371739	3,29509155	19,447557
0,00055556	0,95	0,82304527	11,3913043	0,23076923	5,00705219	0,99479167	0,07145902	1,73333333	0,07030645	0,00215217	6,14576149	13,3951188
0,00183333	0,9	0,90534979	15,4782609	0,12820513	4,00564175	0,296875	0,06034426	3,06666667	0,05937097	0,00252174	4,42475372	17,4118158

Annexe 2. Composition chimique des eaux du complexe Guerbès-Sanhadja en meq/l
(campagne 13 Janvier 2013)

NH₄⁺	Ca⁺⁺	Mg⁺⁺	Na⁺	K⁺	Cl⁻	SO₄⁻	HCO₃⁻	CO₃⁻	NO₃⁻	NO₂⁻	Σ⁻	Σ⁺
0,0020	1,5	0,494	6,087	0,154	7,357	0,127	0,246	3,300	0,324	0,125	8,179	8,235
0,0003	1,1	0,823	10,435	0,179	10,155	0,641	0,185	2,967	0,182	0,002	11,165	12,537
5,2504	1,5	1,317	8,522	0,256	12,920	1,182	0,003	2,067	0,025	0,002	14,132	11,595
0,0001	1,65	2,634	8,652	0,128	15,035	0,786	0,109	2,100	0,107	0,011	16,049	13,064
0,0010	2,75	0,658	13,043	0,205	12,745	0,193	0,264	3,267	0,260	0,006	13,467	16,657
0,0023	0,85	0,082	17,826	0,128	16,897	0,422	0,190	1,700	0,187	0,002	17,698	18,887
0,0018	1,4	0,658	8,652	0,256	14,973	0,214	0,108	2,067	0,106	0,002	15,403	10,967
0,0044	2	2,387	8,739	0,077	14,189	0,089	0,293	2,000	0,288	0,006	14,864	13,203
0,0006	0,85	2,305	8,870	0,077	16,079	0,349	0,049	2,667	0,048	0,010	16,535	12,101
0,0002	0,6	0,905	13,435	0,128	16,928	0,193	0,066	2,633	0,064	0,001	17,252	15,068
0,0020	0,6	0,823	9,435	0,154	11,320	0,172	0,074	2,700	0,073	0,002	11,641	11,012
0,0007	2,25	0,412	13,435	0,128	18,787	0,132	0,107	3,000	0,105	0,002	19,132	16,225
0,0044	0,6	1,481	17,435	0,179	16,976	1,391	0,021	2,333	0,021	0,002	18,411	19,696
0,0030	1,5	2,798	13,826	0,103	17,207	1,250	0,092	3,367	0,090	0,002	18,641	18,227
0,0020	1,25	0,165	9,130	0,077	11,233	0,141	0,086	2,833	0,084	0,001	11,545	10,622
0,0015	1,5	0,576	17,478	0,256	17,743	1,019	0,094	1,867	0,093	0,002	18,951	19,811
0,0004	0,85	1,070	17,391	0,179	18,643	0,099	0,123	2,033	0,121	0,004	18,990	19,491
0,0006	0,8	0,905	11,739	0,231	12,553	0,979	0,057	1,400	0,056	0,002	13,646	13,675
0,0019	0,85	0,823	15,739	0,103	17,501	0,313	0,061	3,367	0,060	0,002	17,936	17,515

Annexe 3. Composition chimique des eaux du complexe Guerbes-Sanhadja meq/l
(Campagne 28 Mai 2014)

NH_4^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	CO_3^{--}	NO_3^-	NO_2^-	Σ^-	Σ^+
0,0055	1,5	0,165	6,696	0,154	7,334	0,057	0,164	3,200	0,324	0,125	8,005	8,515
0,0003	2,8	0,825	11,478	0,128	10,307	0,495	0,188	3,367	0,185	0,001	11,176	15,231
5,2504	1,45	1,235	8,609	0,282	12,852	1,297	0,003	2,133	0,025	0,002	14,180	11,575
0,0001	1,3	2,963	8,783	0,179	11,286	0,536	109,016	2,000	107,258	0,011	228,108	13,225
0,0009	1,7	0,412	13,261	0,205	13,049	0,130	0,246	3,667	0,242	0,004	13,672	15,578
0,0031	1,1	0,165	17,826	0,128	16,931	0,394	0,168	1,067	0,165	0,002	17,660	19,219
0,0001	1,75	0,824	12,870	0,256	16,942	0,130	0,084	2,167	0,082	0,001	17,240	15,700
0,0050	1,95	2,469	12,870	0,128	14,305	0,089	0,305	2,100	0,300	0,007	15,005	17,417
0,0011	1,3	2,635	8,957	0,077	14,082	0,474	0,067	2,733	0,066	0,007	14,696	12,969
0,0001	0,45	0,905	13,478	0,128	16,925	1,354	0,067	2,167	0,066	0,001	18,414	14,962
0,0042	0,9	1,481	9,870	0,103	11,317	0,167	0,078	2,700	0,077	0,002	11,641	12,354
0,0006	1,1	0,412	13,087	0,154	19,188	0,148	0,100	2,667	0,098	0,001	19,535	14,752
0,0006	1,6	1,482	17,348	0,205	17,082	1,417	0,053	2,333	0,052	0,002	18,606	20,635
0,0001	2,4	2,477	14,304	0,128	17,151	1,252	0,106	3,200	0,105	0,002	18,616	19,310
0,0018	0,7	0,494	8,783	0,051	11,317	0,190	0,068	3,000	0,067	0,008	11,650	10,028
0,0006	1,6	0,742	17,304	0,282	17,794	0,791	0,045	3,033	0,044	0,002	18,676	19,928
0,0006	1,05	0,996	17,478	0,128	18,674	0,224	0,107	3,000	0,105	0,004	19,114	19,652
0,0044	1,15	0,823	13,087	0,205	12,609	0,991	0,087	3,000	0,086	0,002	13,775	15,265
0,0028	1,05	0,930	13,739	0,154	18,511	0,234	0,069	2,967	0,068	0,003	18,885	15,873

Annexe 4. Paramètres physico-chimiques des eaux

Echantillons	Première campagne				Deuxième campagne				Troisième campagne			
	CE (mS/cm)	T°C	pH	Eh (mv)	CE (mS/cm)	T°C	pH	Eh (mv)	CE (mS/cm)	T°C	pH	Eh (mv)
E1	1290	19,1	8,13	13	700	17,4	7,08	31	502	24,86	8,00	-42,5
E2	1360	18,9	8	56	500	16,6	7,28	51	585	24,80	7,88	-35,6
E3	326	23,3	8,14	61	1000	19,6	6,71	39	9669	22,49	9,34	-118,2
E4	238	24,2	8,47	57	1000	19,8	6,72	40	360	21,38	8,14	-49,7
E5	308	19,7	7,35	47	998	19,7	6,74	39	322	21,28	7,97	-40,3
E6	760	16,9	7,42	91	615	14,8	6,58	55	13410	22,33	8,66	-79,5
E7	903	21,3	7,42	86	481	14,9	6,61	57	2237	22,10	9,01	-99,5
E8	165	15,8	7,6	29	1270	19,8	6,81	35	454	20,98	8,79	-86,3
E9	832	20,3	7,44	87	495	18,1	6,69	72	525	20,24	7,31	-3,3
E10	893	16,8	7,18	49	710	15,2	6,7	46	548	19,88	7,46	-11,5
E11	1153	18,1	7,44	20	710	15,2	6,69	46	858	19,21	8,22	-53,7
E12	1171	17,6	7,57	24	597	16,2	6,85	48	526	19,86	7,85	-33,5
E13	924	18	7,41	27	597	16,2	6,84	46	976	20,49	7,98	-40,8
E14	935	17,7	7,57	23	597	16,1	6,86	46	213	21,21	7,85	-33,3
E15	610	19,6	7,45	55	454	16,1	6,63	44	358	20,06	7,73	-26,6
E16	607	19,8	7,66	29	352	14,7	6,72	60	492	25,07	10,10	-162,7
E17	777	18,3	7,62	53	712	15,3	6,76	0	504	26,55	9,65	-137,9
E18	806	20,1	7,61	55	443	15,7	6,53	67	529	27,13	9,59	-134,6
E19	1290	19,1	8,13	13	442	15,6	6,53	66	518	26,99	9,52	-130,2

Annexe 5. Indices de saturation des minéraux du complexe humide plaine Guerbès-Sanhadja
(Campagne 29 Février 2012)

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	-1,03	-1,18	-2,95	-3,04	-3,26	-6,00
E2	AN2	-1,10	-1,24	-2,31	-2,51	-2,73	-5,65
E3	BM1	-1,47	-1,62	-2,86	-2,21	-2,44	-5,61
E4	BM2	-1,17	-1,32	-2,06	-2,34	-2,57	-5,56
E5	BM3	-0,88	-1,03	-2,23	-2,95	-3,19	-5,46
E6	CH1	-0,69	-0,84	-2,30	-2,87	-3,10	-5,21
E7	CH2	-0,41	-0,55	-1,01	-3,06	-3,29	-5,39
E8	K1	0,08	-0,06	0,36	-3,00	-3,23	-5,59
E9	M1	-2,48	-2,63	-4,44	-2,94	-3,18	-5,52
E10	HT1	-2,39	-2,54	-4,65	-3,32	-3,55	-5,32
E11	HT2	-1,51	-1,66	-2,75	-3,41	-3,65	-5,64
E12	HT3	-1,36	-1,51	-3,46	-2,95	-3,19	-5,28
E13	HT4	-2,17	-2,31	-3,87	-2,48	-2,71	-5,22
E14	HT5	-1,52	-1,66	-2,76	-2,07	-2,30	-5,32
E15	SM1	-1,66	-1,81	-3,95	-3,28	-3,51	-5,65
E16	SM2	1,59	0,44	0,91	-2,26	-2,48	-5,20
E17	Z1	0,16	0,02	0,50	-0,02	0,50	-5,20
E18	Z2	0,05	-0,10	0,19	-0,10	0,19	-5,28
E19	Z3	-0,15	-0,29	-0,14	-0,29	-0,14	-5,54

Annexe 6.Indices de saturation des minéraux du complexe humide plaine Guerbès-Sanhadja
(Campagne 13 Janvier 2013)

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	-0,57	-0,72	-1,59	-3,31	-3,55	-6,03
E2	AN2	-0,22	-0,37	-0,54	-2,70	-2,94	-5,65
E3	BM1	-0,68	-0,83	-1,36	-2,32	-2,56	-5,65
E4	BM2	-0,76	-0,90	-1,24	-2,47	-2,70	-5,58
E5	BM3	-0,52	-0,66	-1,59	-2,84	-3,08	-5,47
E6	CH1	-1,20	-1,35	-3,42	-3,00	-3,25	-5,21
E7	CH2	-0,90	1,05	-2,13	-3,05	-3,30	-5,56
E8	K1	-0,57	-0,72	-1,00	-3,32	-3,56	-5,60
E9	M1	-1,13	-1,28	-1,79	-3,07	-3,32	-5,53
E10	HT1	-1,43	-1,58	-2,68	-3,46	-3,71	-5,32
E11	HT2	-1,29	-1,44	-2,44	-3,47	-3,72	-5,64
E12	HT3	-0,56	-0,71	-1,85	-3,09	-3,34	-5,28
E13	HT4	-0,84	-0,99	-1,27	-2,72	-2,96	-5,23
E14	HT5	-0,64	-0,79	-1,00	-2,35	-2,59	-5,32
E15	SM1	-0,90	-1,05	-2,66	-3,25	-3,50	-5,66
E16	SM2	-0,92	-1,07	-2,26	-2,40	-2,65	-5,20
E17	Z1	-1,11	-1,27	-2,13	-3,64	-3,89	-5,18
E18	Z2	-2,61	-2,76	-5,15	-2,59	-2,83	-5,50
E19	Z3	-1,21	-1,36	-2,43	-3,14	-3,39	-5,25

**Annexe 7. Indices de saturation des minéraux du complexe humide plaine Guerbès-Sanhadja
(Campagne 28 Mai 2014)**

N°	Échantillons	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
E1	AN1	0,38	0,23	-0,15	-3,63	-3,87	-5,99
E2	AN2	0,96	0,81	1,45	-2,46	-2,70	-5,62
E3	BM1	0,75	0,60	1,55	-2,31	-2,54	-5,65
E4	BM2	0,75	0,60	2,00	-3,00	-3,23	-5,78
E5	BM3	-0,25	-0,40	-1,05	-3,18	-3,42	-5,45
E6	CH1	-0,19	-0,34	-1,19	-2,94	-3,18	5,21
E7	CH2	-0,05	-0,19	-0,33	-3,21	-3,44	-5,36
E8	K1	0,12	-0,03	0,36	-3,34	-3,59	-5,42
E9	M1	-0,17	-0,31	0,05	-2,78	-3,01	-5,59
E10	HT1	-1,04	-1,19	-1,76	-2,76	-3,01	-5,33
E11	HT2	-0,35	-0,49	-0,43	-3,34	-3,58	-5,63
E12	HT3	-0,11	-0,26	-0,62	-3,34	-3,58	-5,29
E13	HT4	0,14	-0,01	0,29	-2,30	-2,54	-5,23
E14	HT5	0,32	0,17	0,68	-2,16	-2,41	-5,31
E15	SM1	-0,28	-0,42	-0,64	-3,38	-3,62	-5,68
E16	SM2	0,11	-0,04	-0,05	-17,01	-2,73	-5,21
E17	Z1	-0,13	-0,28	-0,23	-3,21	-3,45	-5,18
E18	Z2	-0,90	-1,05	-1,88	-2,45	-2,69	-5,46
E19	Z3	-0,08	-0,23	-0,18	-3,18	-3,42	-5,28

Annexe 12. Méthodes de dosage

- **Dosage des chlorures (Cl⁻)**

Réactifs nécessaires

- Nitrate d'argent (AgNO₃) : 0.1N (16.99g d'AgNO₃/1litre d'eau distillée).
- Chromate de potassium (K₂CrO₄) à 5%.

Mode opératoire

- Prélever un aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau et placer dans une capsule en porcelaine.
- Ajouter 5 gouttes de la solution de K₂CrO₄.
- Titrer avec AgNO₃ 0.1 N jusqu'à l'apparition d'une couleur rouge brique.
- Effectuer un essai à blanc avec de l'eau distillée.

Calculs

V₂: Le volume en ml de l'aliquote prélevé.

n: La lecture faite à la burette en ml pour l'échantillon.

n': La lecture faite à la burette en ml pour l'essai à blanc.

$$\text{Cl}^- \text{ (meq/l)} = (n - n') (0.1 / V_2) \times 100$$

Dosage des sulfates (SO₄²⁻)

Réactifs nécessaires

- Chlorure de baryum (BaCl₂) : (100 g de BaCl₂ / 1litre d'eau distillée).
- Nitrate d'argent (AgNO₃): 0.1N.

Mode opératoire

- Prélever une aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau dans un bécher et le porter à une douce ébullition à 60°C.
- Précipiter l'ion SO₄²⁻ avec une solution chaude de BaCl₂ à 10%. La précipitation doit être faite très lentement, en ajoutant le réactif (BaCl₂) goutte à goutte.
- Placer le bécher sur une plaque chauffante et attendre que les sulfates soient complètement déposés.
- Décanté la liqueur sur un filtre sans cendre placé sur un entonnoir.
- Reprendre le précipité resté dans un bécher et rincer le avec l'eau distillée bouillante et filtrer à nouveau par décantation.
- Répéter cette opération trois fois, puis faire passer le précipité sur le filtre et laver à l'eau bouillante jusqu'à la disparition complète de BaCl₂ dans les eaux de lavage (vérifier la réaction avec AgNO₃).

-Prendre le filtre et le faire sécher dans une étuve à une faible température (50°), puis placer –le dans une capsule en porcelaine préalablement peser.

-Placer le tout dans un four à moufle à 500°C et laisser le filtre se carboniser pendant 30 minutes

.Après refroidissement, peser à nouveau la capsule.

Calculs

A : Le poids du précipité de BaCl₂ en mg.

V₂: Le volume de l'aliquote en ml.

1g de BaCl₂ —————> 0.411g de SO₄⁻

SO₄⁻/BaSO₄ = 0.411 et qui va correspondre à 8.56 meq de SO₄⁻

$$\text{SO}_4^- (\text{meq/l}) = A \times 8.56 \times \frac{100}{V_2}$$

Dosage des carbonates (CO₃⁻) et bicarbonates (HCO₃⁻)

Réactifs nécessaires

-Acide sulfurique (H₂SO₄): 0.02N (0.56 ml de H₂SO₄/1 litre d'eau distillée).

-Orange de méthyl à 0.01%.

-Phénophtaléine à 1% (10 g de phénophtaléine/1litre d'alcool éthylique "éthanol").

Mode opératoire

-Prélèver une aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau et la placer dans une capsule en porcelaine.

-Ajouter 2 gouttes de phénophtaléine. En présence des carbonates la couleur devient rouge claire.

-Titrer avec l'acide sulfurique à 0.02N jusqu'à ce que la couleur rouge disparaisse.

-Noter la quantité d'acide utilisé (X).

-Ajouter 2 gouttes de méthyle orange à la même solution, puis titrer avec toujours de l'acide sulfurique à 0.02N jusqu'à l'apparition de la couleur rose.

-Noter la nouvelle lecture sur la burette (Y).

Calculs

$$\text{CO}_3^- (\text{meq/l}) = \frac{2X \cdot \text{normalité de H}_2\text{SO}_4}{\text{volume d'aliquote}} \times 1000$$
$$\text{HCO}_3^- (\text{meq/l}) = \frac{(Y - 2X) \cdot \text{normalité de H}_2\text{SO}_4}{\text{volume d'aliquote}} \times 1000$$

- **Dosage des cations**

Dosage du calcium (Ca⁺⁺)

Réactifs nécessaires

-NaOH (2N).

-EDTA (0,02):7.448g d'EDTA/1litre d'eau distillée.

Mode opératoire

-Prélever 50 ml de l'échantillon d'eau et placer la dans un erlen.

-Ajouter 1ml de NaOH (2N).

-Puis ajouter 10 ml de Muréxide.

-Titrer avec l'EDTA (0.02) jusqu'à l'apparition d'une couleur violette.

Calculs

$$N_1.V_1=N_2.V_2$$

V₁: Prise d'essai

N₂:Normalité EDTA (0,02N).

V₂: Volume d'EDTA.

$$N/1000=1\text{meq/l.}$$

$$N_1=(0,02N.V_2)/50 =N.V_2/2500=N.V_2/1000.2.5=V_2/2.5$$

$\text{Ca}^{++}(\text{meq/l}) = \frac{V_2}{2.5}$
--

Dosage du magnésium (Mg⁺⁺) par complexométrie**Réactifs nécessaires :**

-NH₄OH (6N): 238.69 ml de NH₄OH /1litre d'eau distillée.

-Noir d'ériochrome T: 0.02 g de NET + 2g de NaCl/1 litre d'eau distillée.

-EDTA (0.02N).

Mode opératoire

-Prélever 50 ml de l'échantillon d'eau et placer –la dans un erlen.

-Ajouter 1ml de NH₄OH (6N).

-Puis ajouter 10 ml de NET.

-Titrer avec l'EDTA 0.02N jusqu'à l'apparition d'une couleur bleue cobalt.

Calculs

$$N_1 V_1=N_2.V_2$$

$$TH = V_2/2.5$$

$$\text{Mg}^{++} \text{ (meq/l)} = \text{TH-Ca}^{++} \text{ (meq/l)}$$

Dosage du sodium par (Na⁺) et du potassium (K⁺) par spectrophotomètre à flamme

Gamme étalon du sodium (Na⁺)

Solution mère

254 mg de NaCl /1000 ml d'eau distillée.

Solution filles

A partir de la solution mère, préparée une série de solution (2 ppm, 4 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm).

Introduire successivement 2 ml de solution mère dans une fiole de 100 ml, 4 ml dans une deuxième, 10ml dans une troisième, 15 ml dans une quatrième, 20 ml dans une cinquième, 30 ml dans une sixième et compléter le volume avec l'eau distillée.

Gamme étalon du potassium (K⁺)

Solution mère

190,8 mg de KCl/1000 ml d'eau distillée.

Solution filles

Pour la préparation des solutions filles, mêmes principe de la préparation des solutions filles du sodium avec des concentrations, 2 ppm, 4 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm.

Dosage par spectrophotomètre à flamme

Le réglage du zéro de l'appareil se fait avec l'eau distillée.

L'étalonnage de l'appareil se fait par les gammes étalons selon l'élément à doser (Na⁺ ou K⁺).

La lecture de la concentration des échantillons doit être inférieure à la concentration maximale de la gamme étalon. Dans le cas contraire, faire des dilutions.

Calculs

Noter les lectures obtenues (Y₂, Y₄, Y₁₀, Y₁₅, Y₂₀, Y₃₀) de chaque concentration des solution de la gamme étalon (X₂, X₄, X₁₀, X₁₅, X₂₀, X₃₀).

Calculer le coefficient C (densité optique en ppm).

$$C = \frac{Y_2 + Y_4 \dots \dots \dots + Y_{30}}{X_2 + X_4 \dots \dots \dots + X_{30}}$$

L : la lecture obtenue de l'échantillon.

C : la densité optique en ppm.

D : l'inverse du rapport de dilution.

$$\text{La teneur de l'élément (meq/l)} = \frac{L}{D} \times D \times A$$

Pour le sodium $A=1/22.99$

Pour le potassium $A=1/39$

Dosage des Bromures (Br^-) par la méthode colorimétrique

Réactifs

- Réactif fushiné

Verser 10 ml d'une solution récente de fuchsine à 1‰ dans 100 ml d'acide sulfurique au 1/20, préparé en mélangeant 5 ml de H_2SO_4 concentré avec de l'eau en quantité suffisante pour obtenir 100 ml et en laissant refroidir. Le mélange se décolore peu à peu. En une heure environ, il est prêt pour l'emploi.

- Chloroforme privé d'alcool.

Purifier le chloroforme de l'alcool par 3 lavages à l'eau distillée pour éviter ainsi la réduction par l'alcool du mélange sulfo-chromique, dont l'action serait dans ce cas atténuée.

- Solution de chromate à 10%.
- Acide chlorhydrique pur.
- Acide sulfurique pur.
- Solution mère étalon de brome à 1g/l.
Bromure de potassium.....1.487 g
Eau distillée.....100 ml.
- Solution fille étalon de brome à 0.001 g/l.

Amener 1 ml de la solution mère à 100 ml avec de l'eau distillée.

Etablissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de tubes à essais numérotés, introduire successivement les réactifs suivants en agitant après chaque addition :

Numéro des tubes	T	I	II	III	IV	V	VI
Solution de brome à 0,001 (ml).....	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Eau distillée (ml).....	5	4.95	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5
Acide chlorhydrique (gouttes).....	4	4	4	4	4	4	4
Acide sulfurique (ml).....	1	1	1	1	1	1	1
Correspondance en mg/l de Brome.....	0	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1

Refroidir sous courant d'eau froide jusqu'à 15°C environ. Verser le contenu des tubes à essais dans une série d'ampoules à décanter de 50 ml numérotées et ajouter dans l'ordre indiqué.

Numéro des ampoules	T	I	II	III	IV	V	VI
Chloroforme (ml).....	3	3	3	3	3	3	3
Solution de chromate (gouttes)	8	8	8	8	8	8	8
Solution de fuchsine décolorée (ml).....	2	2	2	2	2	2	2

Agiter fortement. Le chloroforme se sépare coloré en rouge. Décanter la solution chloroformique dans une série de tubes à essais numérotés.

Effectuer la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 470 nm.

Tracer la courbe d'étalonnage.

Annexe 13.Exemples de menaces des activités agricoles portant sur les ressources en eau du complexe de Sanhadja

Pompage anarchique et intensifs pour l'irrigation



Trace d'eutrophisation





Photos aériennes du complexe humide Guerbès-Sanhadja



1. Vue aérienne de la Mare de Bnihamed (BM)



2. Vue aérienne d'Oued El Kebir (K)



3. Vue aérienne de la Mare de Msawsa(M)



4. Vue aérienne de la Mare Chichaya (CH)



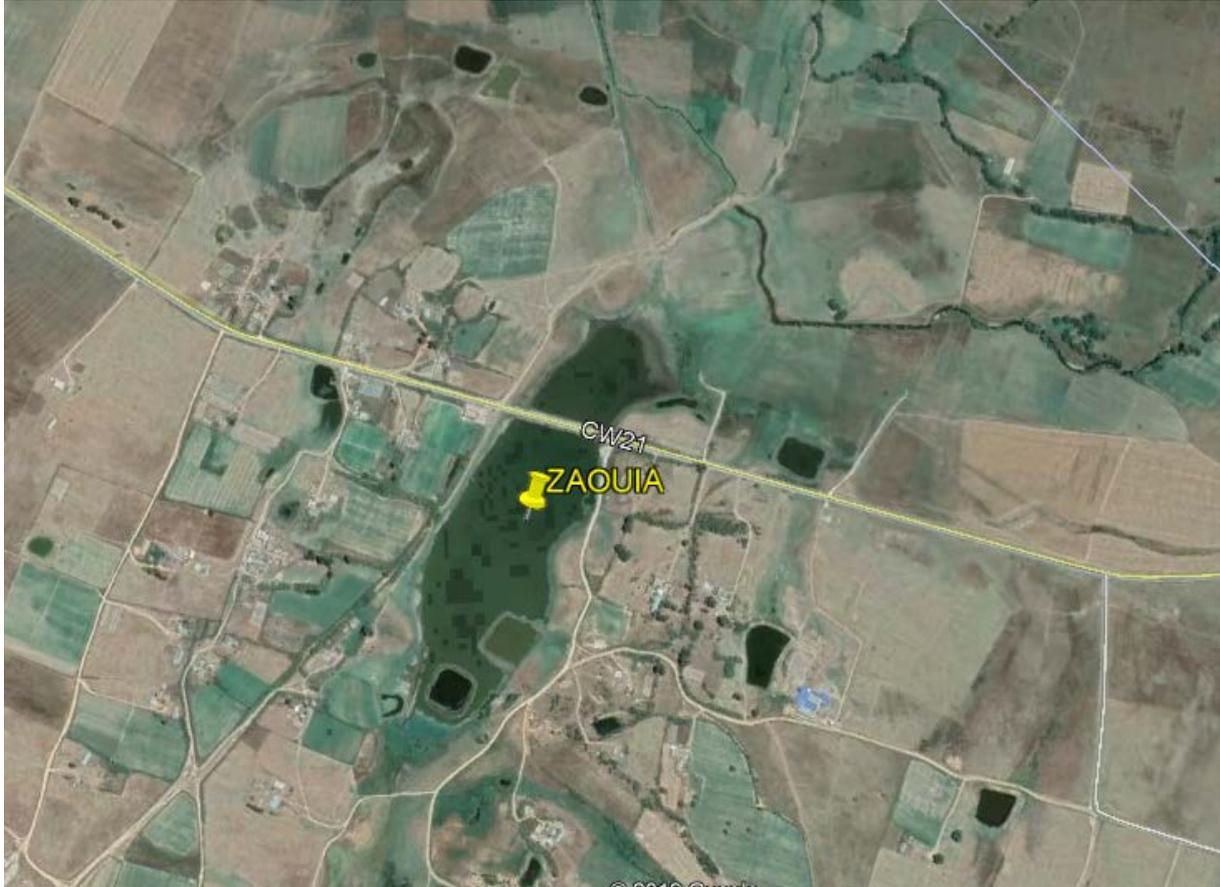
4. Vue aérienne de la Mare de Hadj Taher (HT)



6. Vue aérienne de la Mare de Sidi Makhlouf (SM)



7. Vue aérienne de la Mare de Zaouia (Z)



8. Vue aérienne de la Mare d'Ain Nechma (AN)

