

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة Hassiba Benbouali Chlef – الشلف
UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI CHLEF – UHBC
معهد العلوم الزراعية
INSTITUT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



*Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister
Spécialité : Hydraulique Agricole
Option : Irrigation et Gestion de l'eau*

Thème :

Caractérisation géochimiques des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation dans les plaines du Chélif

Présenté par : BOUZADA NACERA

Devant les Membres du Jury :

<i>M. BOUTHIBA Abdelkader</i>	Professeur, U. Hassiba Ben Bouali Chlef	Président
<i>M. DOUAOUI Abdelkader</i>	Professeur, U. Khemis Miliana.	Directeur de mémoire.
<i>M. RÉGUIEG ISSAD H. A.</i>	Professeur, U. Mostaganem	Examinateur.
<i>M. ABABOU Adda</i>	MCA, Hassiba Ben Bouali Chlef	Examinateur.
<i>M. NADJAI Sassi</i>	MCB, Hassiba Ben Bouali Chlef	Examinateur.
<i>M^{me}. BOUTHIBA Abla</i>	MAA, Hassiba Ben Bouali Chlef	Examinatrice.

Année Universitaire : 2012/2013.

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné tout de patience et de courage pour accomplir ce travail.

*Je tiens à remercier mon directeur de thèse **Mr DOUAOUI Abdelkader**, professeur à Université de Khemis Miliana qui m'a initiée à la recherche scientifique. Sa disponibilité constante, ses précieux conseils, son enthousiasme pour la recherche, sa compétence scientifique resteront pour moi un exemple. Qu'il trouve dans ces quelques mots l'expression de ma vive reconnaissance.*

Mes remerciements vont aux membres de mon jury de thèse:

*Mr **BOUTHIBA Abdelkader**, professeur à l'UHBC pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail et son acceptation de présider le jury de soutenance. Qu'il sache que, au-delà de cette thèse, je lui dois aussi une construction personnelle rendue possible par sa gentillesse et sa modestie. Mr **RÉGUIEG ISSAD H.A** professeur à l'université de Mostaganem et Mr **ABABOU Adda** maître de conférences A à l'UHBC qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail comme examinateurs.*

*Toute ma reconnaissance va également à madame **BOUTHIBA Abba** maître assistant A à l'UHBC pour ses encouragements, son appui ainsi que d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également à Mr **BARADAI A**, pour ces conseils et ses orientations précieuses le long de mon travail.*

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille et mes proches qu'ils sont des piliers sur lesquels je me suis toujours appuyée et qu'ils ont été des compagnons à toute épreuve.

*Mes plus vifs remerciements à mon mari **Chenaoui Ali** qui m'a appuyée et encouragée tout au long de ce mémoire et qui a toujours été présent à mes côtés.*

*En fin je dédie ce travail à la mémoire de mes parents et à mes deux petites filles **Besma** et **Ines**.*

Hassina

RÉSUMÉ

Les plaines du Chélif sont à vocation agricole se basent essentiellement sur l'utilisation des eaux souterraines pour irriguer les différentes cultures. En plus du problème quantitatif, la qualité de ces eaux n'est pas toujours conformes aux normes d'irrigation telles que définies par les différentes écoles. Il s'agit par ce travail d'étudier la minéralisation des eaux souterraines des plaines du Chélif par l'approche géochimique pour mieux caractériser leurs qualités hydrochimiques, étudier les interactions ioniques de ces eaux et prédire leurs impact sur la qualité des sols.

Les résultats auxquels on a abouti ont montré que les eaux souterraines de la plaine du Chélif (Haut, Moyen et Bas) sont désignées comme salées donc elles sont déconseillées pour être utilisées en irrigation mais à des degrés différents. D'un autre côté, les valeurs moyennes du SAR montrent qu'il n'y a pas de risque d'utilisation de ces eaux sur la dégradation physique des sols de la plaine.

La classification hiérarchique nous a permis de classer les eaux de la plaine de Chélif en cinq classes distinctes de point de vue qualité des eaux d'irrigation. Il ressort que les eaux de la plaine de Chélif sont très diversifiées dans l'espace dont on trouve des eaux de très bonne qualité pour l'irrigation (30%) réparties en gros dans le Haut et le Bas-Chélif, et des eaux qui présentent un risque de salinité : C3 (24%) répartie dans Haut et le Moyen-Chélif et C5 (17%) répartie dans le Moyen et le Bas-Chélif et en fin des eaux qui présentent les deux risques en même temps (salinité et sodicité) (21%) répartie dans le Moyen et le Bas-Chélif.

L'action de ces eaux souterraines utilisée dans l'irrigation sur la qualité des sols devient plus apparente quand le raisonnement se fait en explorant d'autres indicateurs de la qualité des eaux d'irrigation comme l'alcalinité résiduelle plutôt que le SAR qui ne montre aucun risque de sodicité.

Mots-clés : eaux souterraines, géochimie, irrigation, Haut-Chélif, Moyen-Chélif, Bas-Chélif.

SUMMARY

The plains of Chélif for agricultural purposes are based primarily on the use of groundwater to irrigate different cultures. In addition to the quantitative problem, the quality of these waters is not always consistent with irrigation standards as defined by the various schools. It is for this work to study the mineralization of groundwater Plains Chélif by geochemical approach to better characterize their hydrochemical properties, study ionic interactions of these waters and predict their impact on soil quality.

The outcomes that resulted showed that groundwater in the plain Chélif (High, Medium and Low) are designated as salty so they are not recommended to be used for irrigation, but to different degrees. On the other hand, the average SAR values show that there is no risk of use of these waters on the physical degradation of the plain.

The hierarchical classification allows us to classify the waters of plain Chélif five distinct classes of point seen quality of irrigation water. It appears that the waters of the plain Chélif are very diverse in space which we find very good quality water for irrigation (30%) distributed in the wholesale in Upper and Lower-Chélif, and waters have a salinity risk: C3 (24%) distributed in Upper and Middle-Chélif and C5 (17%) distributed in the Middle and Lower-Chélif and end of waters of the two risk at the same time (salinity and sodicity) (21%) distributed in the Middle and Lower-Chélif.

The action of the groundwater used in irrigation on soil quality becomes more apparent when the reasoning is done on exploring other indicators of the quality of irrigation water as residual alkalinity rather than the SAR that shows no risk of sodicity.

Keywords: groundwater, geochemistry, irrigation, Upper-Chélif, Middle-Chélif, Lower-Chélif.

ملخص

تستند سهول الشلف للأغراض الزراعية في المقام الأول على استخدام المياه الجوفية في ري مختلف الزراعات. بالإضافة لمشكل الكمية، نوعية هذه المياه ليست دائماً مطابقة لمعايير الري كما هو محدد من قبل المدارس المختلفة. يتمثل هذا العمل في دراسة تمعدن المياه الجوفية لسهول الشلف بواسطة نهج الجيوكيميائية لتحديد صفاتهم الكيميائية بأفضل طريقة، دراسة التفاعلات الأيونية لهذه المياه والتنبؤ بتأثيرها على نوعية التربة.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن سهل المياه الجوفية في سهل الشلف (الأعلى ، الأوسط و الأدنى) يتم تصنيفها كمياه مالحة وغير مناسبة لأغراض الري، ولكن بدرجات مختلفة. من ناحية أخرى، يظهر متوسط قيم SAR أنه لا يوجد أي خطر من استخدام هذه المياه على تدهور النوعية الفيزيائية للتربة.

التصنيف الهرمي يسمح لنا بتصنيف المياه في سهل الشلف إلى خمس فئات مختلفة من منظور نوعية مياه الري. حيث يظهر أن مياه سهل الشلف متنوعة جداً فنجد مياه ذات نوعية جيدة جداً للري (30%)، موزعة إجمالاً بين سهلي الشلف الأعلى والأدنى، ونجد مياه تظهر مخاطر ملوحة: 3C (24%) موزعة بين سهلي الشلف الأعلى والأوسط و 5C (17%) موزعة بين سهلي الشلف الأوسط والأدنى وفي الأخير نجد مياه تظهر مخاطر الملوحة والتصدن في نفس الوقت (21%) موزعة بين سهلي الشلف الأعلى والأدنى.

تأثير المياه الجوفية المستخدمة في الري على نوعية التربة تصبح أكثر وضوحاً عندما يتم الاستدلال بمؤشرات أخرى لجودة مياه الري كالقلوية المتبقية بدلاً من SAR الذي لا يظهر أي خطر تصدن.

الكلمات الرئيسية: المياه الجوفية، الجيوكيمياء، الري، الشلف الأعلى ، الشلف الأوسط، الشلف الأدنى.

LISTE DES FIGURES

Figure 01: Localisation de la zone d'étude	3
Figure 02: Histogramme de répartition des pluies interannuelles dans la plaine du Chélif.....	5
Figure 03: Diagrammes ombrothermiques des plaines de Chélif d'après les données de l'ONM de 1975 à 2006.....	7
Figure 04: Coupes géologiques à travers le bassin du Chélif.....	8
Figure 05: Carte Hydrogéologique du Haut-Chélif (El Khmis)	17
Figure 06: Carte Hydrogéologique du Moyen-Chélif.....	21
Figure 07: Réactions et processus géochimiques contrôlant la composition de l'eau souterraine dans un système aquifère. (Adaptée par Hounslow, 1995 in Cloutier, 2004)	26
Figure 08: Diagramme de Riverside (1954)	33
Figure 09: Risques de sodicité des eaux d'irrigation	34
Figure 10 : Plan d'échantillonnage des points d'eau	39
Figure 11 : La méthode "plus proche voisin".....	41
Figure 12 : La méthode " voisin le plus éloigné ".....	41
Figure 13: Evolutions de la concentration des ions selon la loi du T (Vallès et al., 1989)	43
Figure 14: Différentes voies d'évolutions d'une eau d'irrigation suite à la précipitation des minéraux (Appelo et Prostma, 1993 ; Marlet et Job, 2006).....	46
Figure 15 : composition cationique des eaux des plaines du Chélif.....	50
Figure 16 : composition anionique des eaux des plaines du Chélif.....	51
Figure 17: diagramme de Piper des eaux du Haut-Chélif.....	52
Figure 18: diagramme de Piper des eaux du Moyen-Chélif.....	53
Figure 19: diagramme de Piper des eaux du Bas-Chélif.....	54
Figure 20: diagramme de Riverside des eaux du Haut-Chélif.....	55
Figure 21: diagramme de Riverside des eaux du Moyen-Chélif.....	56

Figure 22: diagramme de Riverside des eaux du Bas-Chélif.....	56
Figure 23: cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Haut-Chélif)	60
Figure 24: répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Haut-Chélif)	61
Figure 25: cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Moyen-Chélif)	64
Figure 26: répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Moyen-Chélif)	65
Figure 27: cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Bas-Chélif)	68
Figure 28: répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Bas-Chélif)	69
Figure 29: cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 pour la plaine de Chélif.....	72
Figure 30: répartition des individus des différentes classes obtenus par l'HCA dans le plan formé par l'axe 1 et 2 pour la plaine de Chélif.....	73
Figure 31: Dendrogramme pour les échantillons de la plaine de Chélif, montrant la division en 6 classes et les variables qui influencent chaque classe.....	74
Figure 32: la proportion des classes obtenues par (HCA) dans les eaux des plaines de Chélif..	77
Figure 33: Simulation de l'évolution géochimique des ions en fonction des facteurs de concentration au cours de l'évaporation des différentes classes obtenues par classification.....	79
Figure 34: l'évolution du SAR et de l'AR _{CG} en fonction du facteur de concentration.....	81
Figure 35: Indices de saturation des classes obtenues par HCA.....	83
Figure 36: Concentrations des éléments en fonction des concentrations des ions Chlorures.....	85
Figure 37: L'évolution des différentes alcalinités résiduelles en fonction de la CE.....	87
Figure 38: Diagramme de l'évolution du SAR en fonction du facteur de concentration.....	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01: Données pluviométriques année 2001/2002 et moyennes interannuelles (1968-2001), d'après l'ABH-CZ, 2004.....	5
Tableau 02: Températures moyennes mensuelles et pluies mensuelles (période 1975 à 2006) d'après l'ONM.....	6
Tableau 03: Les ressources en eau des nappes du Moyen-Chélif.....	20
Tableau 04: Evaluation du danger de salinité selon plusieurs sources.....	31
Tableau 05: Les classes de SAR et leurs interprétations.....	32
Tableau 06: Interprétation des classes issues de la projection sur le diagramme de RIVERSID	33
Tableau 07: Les normes des eaux d'irrigation fixée par la FAO, 1996.	35
Tableau 08: Les directives pour l'interprétation d'une eau d'irrigation	36
Tableau 09: paramètres statistiques des variables physico-chimiques de la plaine du Haut-Chélif.....	48
Tableau 10: paramètres statistiques des variables physico chimiques de la plaine du Moyen-Chélif.....	48
Tableau 11: paramètres statistiques des variables physico chimiques de la plaine du Bas-Chélif.....	49
Tableau 12: coefficients de corrélations entre les variables initiales (Haut-Chélif)	58
Tableau 13: valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux (Haut-Chélif)	59
Tableau 14: statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Haut-Chélif.....	61
Tableau 15: coefficients de corrélations entre les variables initiales (Moyen -Chélif).....	63
Tableau 16: valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux (Moyen -Chélif)	63
Tableau 17: statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Moyen-Chélif.....	66

Tableau 18: coefficients de corrélations entre les variables initiales (Bas -Chélif).....	67
Tableau 19: valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux (Bas -Chélif)	67
Tableau 20: statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Bas-Chélif.	70
Tableau 21: valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux.	72
Tableau 22: Caractéristiques physicochimiques de chaque Classe (concentrations médianes en meq/l)	75
Tableau 23: répartition des classes de l'HCA dans les différentes plaines de Chélif.	76

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ABH -CZ : Agence du Bassin Hydrographique Cheliff - Zahrez.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

ANRH : Agence Nationale des Ressources.

AR : alcalinité résiduelle.

BC : Bas Chélif.

CE : Conductivité Electrique.

CV : Coefficient de Variation.

dS/m : Déci Siemens par mètre.

FAO: Food and Agronomical Organization.

FC : Facteur de Concentration.

HC : Haut Chélif.

MC : Moyen Chélif.

NAE: National Academy of Engineering.

NAS: National Academy of Sciences.

ONM : Office National de la Météorologie.

RQEC : Recommandations pour la qualité des eaux au Canada.

RSC : Résiduel Sodium Carbonates ou Carbonates de Sodium Résiduelle.

SAR : Sodium Adsorption Ratio.

USSL: United States Salinity Laboratory.

TABLE DES MATIERES

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction 1

CHAPITRE I : MILIEU PHYSIQUE

I.1. Situation géographique de la zone d'étude 3

I.2. Climatologie 4

I.2.1. Pluviométrie 4

I.2.2. Température 6

I.3. Géologie 8

1.3.1. Haut Chéiff 9

1.3.1.1. Stratigraphie 9

Le Paléozoïque 9

Le Miocène 9

Le Pliocène 10

Le Plaisancien 10

Le Quaternaire 10

1.3.1.2. Tectonique 11

1.3.2. Moyen Chéiff 11

1.3.2.1. Stratigraphie 11

Le Jurassique 11

<i>Tertiaire moyen (Pliocène Supérieur Continental)</i>	12
<i>Le Plaisancien</i>	13
<i>L'Astien marin et Continental</i>	13
<i>Le Pliocène Continental</i>	13
<i>Le Villafranchien</i>	13
1.3.2.2. Tectonique	13
1.3.3. Bas Chéiff	13
1.3.3.1. Lithostratigraphie	14
1.3.3.2. Tectonique	14
1.4. Hydrogéologie	15
1.4.1. Haut Chéiff	15
1.4.1.1. Les calcaires Jurassiques	15
1.4.1.2. La nappe du Mio-plio-Quaternaire	15
<i>Description de l'aquifère</i>	16
<i>Alimentation</i>	16
<i>Ressources exploitables</i>	16
1.4.2. Moyen Chéiff	17
1.4.1.1. La nappe alluviale	17
<i>Description de l'aquifère</i>	17
<i>Alimentation</i>	17
<i>L'exutoire</i>	18
1.4.1.2. La nappe des calcaires à Lithothamniées	18
<i>Description de l'aquifère</i>	18
<i>Le réservoir</i>	18
<i>L'alimentation</i>	19

<i>L'exutoire</i>	19
<i>Potentialité de la nappe</i>	19
1.4.1.3. Les grès astiens	19
<i>Description de l'aquifère</i>	19
<i>Le réservoir</i>	19
<i>Alimentation</i>	20
<i>L'Exutoire</i>	20
<i>Potentialités de la nappe</i>	20
1.4.3. Bas Chéiff	21
1.4.3.1. Le Miocène calcaire	21
1.4.3.2. Le Pliocène marin	21
1.4.3.3. Le Quaternaire-Pliocène continental	21
1.5. Hydrographie et hydrologie	22
1.6. Les sols de la vallée	23

CHAPITRE II : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Introduction	25
II.2. Évolution chimique de l'eau souterraine	25
II.3. La minéralisation des eaux souterraine	26
II.4. Qualité de l'eau d'irrigation	27
II.4.1. Propriétés Physiques	28
II.4.1.1. La température	28
II.4.1.2. La salinité	28
II.4.1.3. pH	28
II.4.2. Propriétés Chimiques	29

II.4.2.1. Sodium	29
II.4.2.2. l'alcalinité	29
II.4.2.3. concentration en élément toxique	29
II.4.3. Classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation	30
II.4.3.1. La classification des eaux par l'USSL - Riverside (1954)	31
II.4.3. 2. Classification de la FAO	34
II.4.4. Les normes d'une eau d'irrigation	34
II.5. Vulnérabilité des nappes a la pollution	36
II.5.1. Pollution des eaux souterraines	37
II.5.2. Les origines des pollutions	37

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. Echantillonnage.....	39
III.2. Les méthodes d'analyse de données.....	40
III.2.1. Analyse en composantes principales.....	40
III.2.2. Analyse hiérarchique ascendante.....	40
III.2.2.1. La méthode "single linkage" ou "plus proche voisin"	41
III.2.2.2. La méthode "complete linkage" ou "voisin le plus éloigné"	41
III.2.2.3. Les méthodes intermédiaires	42
III.2.2.4. Le dendrogramme	42
III.2.3. L'alcalinité résiduelle en tant que méthode d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation	42
III.2.3.1. Précipitation et dissolution de minéraux	42
III.2.3.2.L'alcalinité résiduelle	44
III.2.3.3. Signe d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des eaux	44

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction	47
IV.2. Caractérisation générale des eaux souterraines des plaines Chélif	47
IV.2.1 Analyse statistique	47
IV.2.1.1. Statistique descriptive	47
<i>a. Haut Cheliff</i>	47
<i>b. Moyen Chélif</i>	48
<i>c. Bas Chélif</i>	49
IV.2.1.2. Etude de la composition ionique des eaux des plaines du Chélif	50
<i>a. Les cations</i>	50
<i>b. Les anions</i>	51
IV.2.2. Les faciès hydro-chimiques	52
IV.2.2.1. Diagramme de Piper	52
<i>a. Haut Chélif</i>	52
<i>b. Moyen Chélif</i>	53
<i>c. Bas Chélif</i>	53
IV.2.2.2. Diagramme de Riverside	54
<i>a. Haut Chélif</i>	54
<i>b. Moyen Chélif</i>	55
<i>c. Bas Chélif</i>	56
IV.3. Analyse multidimensionnelle	57
IV.3.1. L'analyse en composantes principales (ACP) des plaines du Chélif	57
IV.3.1.1. Haut Chélif	58
<i>a. Analyse des variables</i>	58

<i>b. Analyse des individus</i>	60
IV.3.1.2. Moyen Chélif	62
<i>a. Analyse des variables</i>	62
<i>b. Analyse des individus</i>	65
IV.3.1.3. Bas Chélif	66
<i>a. Analyse des variables</i>	66
<i>b. Analyse des individus</i>	69
IV.3.1.4. Discussion	70
IV.3.2. Classification hydrochimique de la plaine du Chélif	71
IV.3.2.1. Analyse en composante principale (ACP)	71
<i>a. Analyse des variables</i>	72
<i>b. Analyse des individus</i>	73
IV.3.2. 2. analyse par classification hiérarchique (HCA)	73
IV.4. Etude géochimique des eaux d'irrigation des plaines du Chélif	77
IV.4.1. Indices de saturations	82
IV.4.2. Evaluation des risques d'utilisation des eaux souterraines des plaines de Chélif en irrigation	84
CONCLUSION GENERALE	89

Références Bibliographiques

Annexe

Introduction

INTRODUCTION

L'irrigation a permis de contribuer substantiellement à satisfaire les besoins alimentaires croissants de la population, d'une part, et de promouvoir un développement économique et social autour des périmètres irrigués, d'autre part. En zone aride et semi-aride, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants de l'expansion de la production agricole, tant dans le sens de l'intensification des cultures, que de l'extension des surfaces irriguées (**Achit et al, 2003**). Cependant, ces pratiques d'irrigation à grande échelle ont modifié le fonctionnement des sols conduisant parfois à la baisse de leur qualité en matière de fertilité, de productivité et de qualité environnementale mettant en jeu ainsi la durabilité de la ressource.

L'agriculture irriguée est tributaire d'un bon approvisionnement en eau. Dans un temps passé, elle était abondante et d'une qualité appréciable qui ne posait pas de problème. Mais vu le changement climatique qui touche la planète, surtout dans les zones arides et semi-arides d'une part, et l'exploitation irrationnelle et intensive des ressources en eau d'autre part, la qualité des eaux d'irrigation est devenue l'un des problèmes qui s'impose au développement de l'agriculture irriguée (**Ayers et Westcot, 1984**).

Les plaines du Chélif, comprenant le Haut-Chélif, le Moyen-Chélif et le Bas-Chélif, dont les terres sont à vocation agricole se basent essentiellement sur l'utilisation des eaux souterraines pour irriguer les différentes cultures qui vont des cultures maraichères en passant par l'arboriculture et même les céréales sous forme d'irrigation d'appoint.

En plus du problème quantitatif, la qualité de ces eaux n'est pas toujours conformes aux normes d'irrigation telles que définies par les différentes écoles. La minéralisation de ces eaux, parfois excessive, abouti souvent à une salinisation des sols et limite fortement les rendements des cultures.

Pour évaluer la qualité des eaux destinées à l'irrigation et prédire leurs impacts sur les sols, les chercheurs utilisent plusieurs paramètres entre autres la Conductivité Electrique (CE) et le Sodium Adsorption Ratio (SAR). Ces deux variables, bien qu'elles soient les plus utilisées, restent insuffisantes pour une bonne prédiction du danger de dégradation des sols car la qualité géochimique des eaux naturelles n'est pas stable et change en fonction du temps de leur exposition aux conditions atmosphériques (**Tabet, 1999**). C'est le cas des eaux souterraines qui sont sujettes à des profonds changements géochimiques lorsqu'elles arrivent à la surface sous les conditions climatiques particulièrement sévères des plaines du Chélif où l'évaporation atteint

des valeurs très élevées durant la période estivale qui coïncide justement avec la campagne d'irrigation (**Douaoui et al., 2006**).

Il s'agit par ce travail d'étudier la minéralisation des eaux souterraines des plaines du Chélif par l'approche géochimique pour mieux caractériser leurs qualités hydro-chimiques, étudier les interactions ioniques de ces eaux et prédire leurs impact sur la qualité des sols.

Dans cette optique, le travail sera scindé en quatre chapitres, dont:

- Le premier concerne la présentation générale de la région d'étude du point de vue géographique, climatique, géologique et hydrogéologique;
- Un aperçu bibliographique sur quelques notions théoriques est détaillé dans le deuxième chapitre ;
- Dans le troisième chapitre est exposé la démarche méthodologique adoptée dans ce
- travail ;
- Enfin, dans le quatrième chapitre sont exposés les différents résultats obtenus avec la discussion relative.

CHAPITRE I

Milieu Physique

I.1. Situation géographique de la zone d'étude

Située au centre ouest de l'Algérie du nord, la région hydrographique Chlef-Zahrez (Figure 1.a.) regroupe trois bassins hydrographiques, le Chélif, le Zahrez et le côtier Dahra. Le bassin de Chélif qui s'étend sur 43750 Km², est le plus vaste bassin hydrographique du nord du pays. Il est compartimenté lui-même en trois bassins versants : Le bassin Chélif-amont de barrage de boughzoul, le bassin du haut et du Moyen-Chélif et le bassin du Bas-Chélif et de la Mina.

La vallée du Chélif, traversée par oued Chlef, se situe dans la partie nord du bassin versant du Chélif qui occupe 22 % de la superficie de l'Algérie du Nord (Figure 1.b.). Elle est composée de trois plaines : la plaine du Haut-Chélif, la plaine du Moyen-Chélif et la plaine du Bas-Chélif (Figure 1.c.).

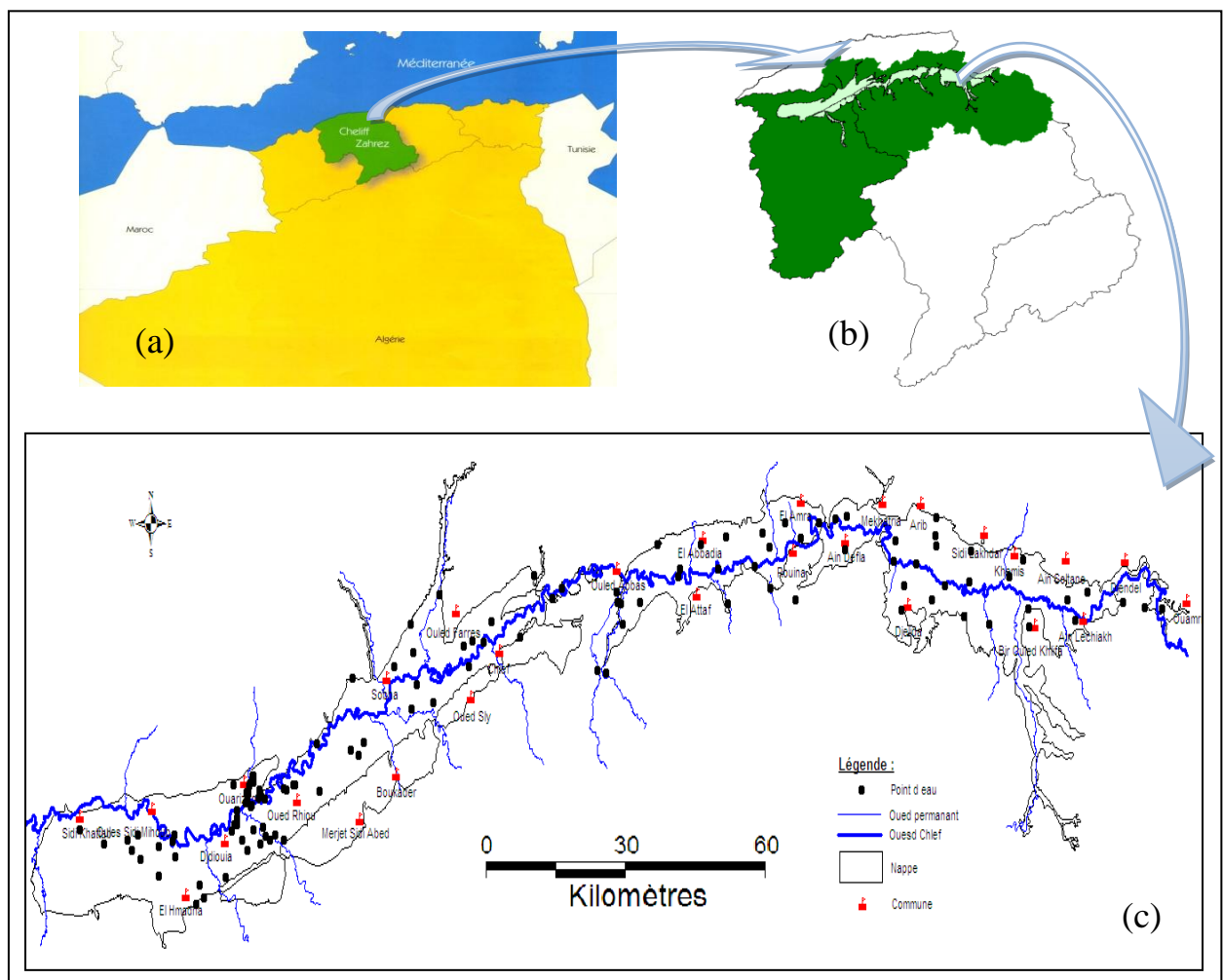


Figure 01 : Localisation de la zone d'étude

La plaine alluviale du Haut-Chélif appelée aussi plaine d'El-Khemis est située à 120 Km au Sud-Ouest d'Alger. Elle a une superficie de 21035 Km². Elle est limitée au Nord par les

monts du Zaccar, au Sud par les contreforts de l'Ouarsenis, à l'Ouest par le massif de Doui et à l'Est par Djebel Gountas. Elle a une pente relativement faible (15%). La plaine est comprise entre les coordonnées suivantes :

- 36°12' et 36°17' de latitude Nord, c'est-à-dire entre les communes de Bir-Ouled-Khelifa et de Miliana ;
- 2°12' et 2°17' de longitude Est, soit entre djebels Doui et Gontas.

La plaine du Moyen-Chéliff se situe au centre du bassin du Chéliff à 200 km à l'Ouest d'Alger et 35 km à vol d'oiseau de la méditerranée. Elle est limitée au Nord par les monts de Medjadja, à l'Est par le seuil d'Oum Drou (Pontéba), au Sud par les monts de l'Ouarsenis et à l'Ouest par le seuil de Boukadir.

La plaine du Bas-Chéliff se situe à l'extrémité nord du bassin du Chéliff (nord-ouest de l'Algérie), à environ 250 km à l'ouest d'Alger et à 35 km à vol d'oiseau de la méditerranée, avec en son centre la ville de Oued Rhiou (wilaya de Relizane). Elle est limitée par le périmètre du Moyen-Chéliff à l'Est, le périmètre de la Mina à l'Ouest, le massif du Dahra au Nord et le massif de l'Ouarsenis au Sud. Elle se trouve entre :

- 0° 40' et 1° 6' 8'' de longitude est et
- 34° 3' 12'' et 36° 5' 57'' de latitude nord

I.2. Climatologie

Les plaines du Chéliff, en général, ont un climat spécial, de type continental semi - aride, célèbre par sa dureté, malgré la proximité de la mer (50 km en moyenne) (**Scet-Agri, 1985**), et qui a été cité comme une curiosité météorologique (**Seltzer, 1946 in Rata, 2010**).

On parle du "four du tell" ou de "portion de Sahara égarée dans le tell" ; en effet la chaleur qui règne dans le Chéliff en été et qui est notablement plus élevée que dans les régions voisines, est une des caractéristiques les plus notables de ce climat. Il en est d'autre. Comme les basses températures de l'hiver ou la sécheresse de l'air, Qui constituent un ensemble de conditions climatiques particulières et justifient la notion de climat Chélifien (**Yacono, 1954**).

I.2.1. Pluviométrie

Le réseau de plusieurs stations pluviométriques implantées et gérées par l'ANRH assure les relevés de ce facteur.

Tout dépend la disponibilité et la continuité des données, nous avons choisie six stations réparties dans toute la plaine de Chéliff mentionnées dans le tableau 01. Ce tableau expose des

données pluviométriques pour l'année 2001/2002 et une moyenne interannuelle de 34 ans (1968/2001) (ABH-CZ, 2004). Chaque plaine du Chélif (Haut, Moyen et Bas) est représentée par deux stations.

Tableau 01 : Données pluviométriques année 2001/2002 et moyennes interannuelles (1968-2001), d'après l'ABH-CZ, 2004.

Stations Mois	Haut-Chélif		Moyen-Chélif		Bas-Chélif	
	Ain Defla	El khmis	Larebt Ouled Fares	Chlef DDA	El hmadna INRA	Djidiouia
Septembre	25,7	44,4	31,1	16,3	13,4	16,1
Octobre	4,3	45,2	3,2	3,4	9,5	4,8
Novembre	105,2	77	134,4	97,6	128,7	123,5
Décembre	31,6	32,7	33,2	32,7	36,3	25,3
Janvier	15,3	25,9	17,3	15,2	5,3	6,6
Février	14	12,8	13,3	5,2	0,0	0,0
Mars	50,4	28	49,7	33,7	53,5	51,6
Avril	37,7	26,4	51,6	39,9	33,5	34,7
Mai	27,9	38,3	34,8	27,2	42,9	42,1
Juin	0,0	0,4	3,0	0,0	0,0	0,0
Juillet	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Août	14,6	14,9	7,9	8,2	6,6	4,6
Total (mm) (2001-2002)	326,7	347,1	379,5	279,4	329,7	309,3
Moyenne interannuelle (1968-2001) (mm)	436	424	375	355	279	325

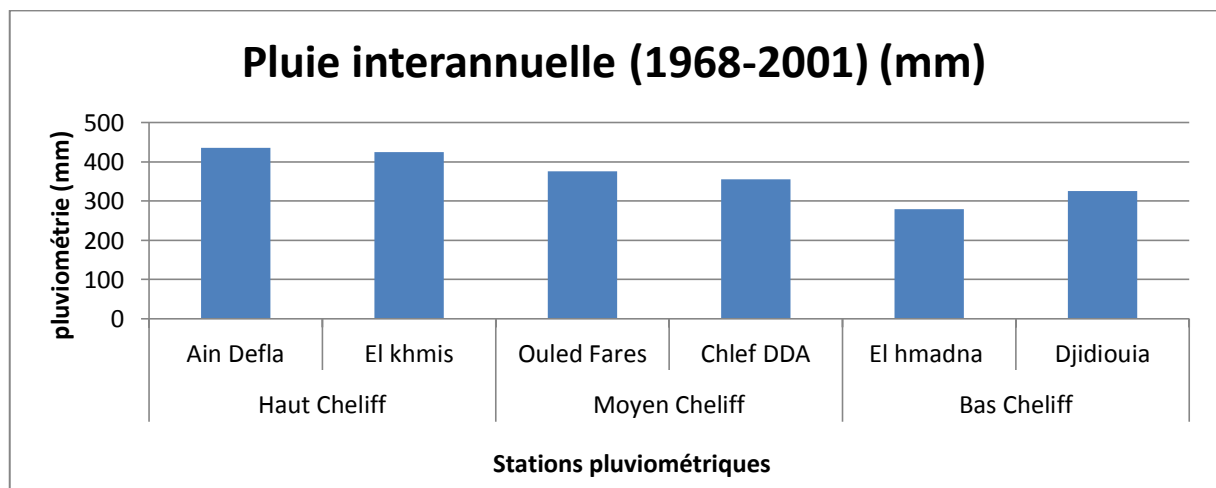


Figure 02 : Histogramme de répartition des pluies interannuelles dans la plaine du Chélif.

Les données du tableau 01 et les résultats du graphique (Figure 02) montrent que les hauteurs pluviométriques annuelles dans la plaine de Chélif varient entre 279 mm (station d'El hmadna dans le Bas-Chélif) et 436 mm (station d'Ain Defla dans le Haut-Chélif). Ceci dénote d'un régime interannuel très irrégulier.

Cette constatations de pluviométrie montre que le mois de Novembre est le mois le plus pluvieux pour l'ensemble des stations. La période estivale s'étalant entre juin et août est la moins

pluvieuse dans l'année, la faible pluviosité est enregistrée durant le mois de juillet dans toutes les stations du Chélif.

On distingue une diminution de précipitation d'est en ouest. En effet la pluviométrie passe de 436 mm enregistrée à la station d'Ain Defla (plaine du Haut-Chélif) à environ 375 mm pour la station Larebt Ouled Fares (plaine du Moyen-Chélif) et à 325 mm à la station Djidiouia (plaine du Bas-Chélif). Cette diminution de précipitation est observée aussi du nord en sud dont on enregistre 355 mm à la station de Chlef DDA située au sud par rapport à celle de Larebt Ouled Fares du nord de la wilaya de Chlef.

I.2.2. Température

Les relevés des températures pour une période allant de 1975 à 2007 relatives aux stations de Khemis Miliana, ONM Chlef et H'madna appartenant à l'ONM.

Le régime thermique de la plaine de Chélif varie entre 21.26°C (station de ONM Chlef dans le Moyen-Chélif) et 17.99°C (station de Khemis dans le Haut-Chélif) indiquant ainsi un écart thermique plus au moins important.

Les températures de la plaine sont relativement élevées en été et basses en hiver. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août. Où elles atteignent un maximum de 39,2°C en moyenne dans la plaine de Moyen-Chélif. Ce qui conduit à une forte évaporation (concentration des eaux de la nappe en été). Les basses températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne minimale de 9,47 °C enregistrée dans le Haut-Chélif (Tableau 02).

Tableau 02 : Températures moyennes mensuelles et pluies mensuelles (période 1975 à 2006) d'après l'ONM.

Stations Mois	Haut-Chélif Khemis Miliana		Moyen-Chélif ONM Chlef		Bas-Chélif H'madna	
	T Moy (°C)	P (mm)	T Moy (°C)	P (mm)	T Moy (°C)	P (mm)
Janvier	9,47	55,15	10,5	42,78	12	33,25
Février	10,4	55,56	11,8	44,09	14	32,1
Mars	13,02	46,05	14,3	38,62	17	26,36
Avril	14,88	35,96	17	35,52	21	23,62
Mai	19,48	25,92	21,5	26,66	25	16,35
Juin	24,56	9,23	27,2	6,28	29	2,74
Juillet	27,87	3,96	39,2	2,44	30	0,86
Août	28,34	3,37	38,4	4,14	25	1,8
Septembre	24,11	23,03	26,4	17,59	20	15,51
Octobre	19,4	32,02	21,2	35,89	15	20,3
Novembre	13,87	50,07	15,7	54,82	12	35,52
Décembre	10,49	55,17	11,9	47,03	12	30,12
T Moyenne et P total	17,99	395,49	21,26	355,86	19,33	238,53

Les diagrammes ombrothermiques des stations citée plus haut et sur une période de 32 ans (1975-2006) (Figure 03) montrent que la période de sécheresse la plus longue est observée dans le Bas-Chéliff, elle s'étale sur plus de huit mois, allant du fin février jusqu'au fin octobre. Survenant ensuite le Moyen-Chéliff avec une saison sèche plus au moins longue s'étalant entre la dernière décade du mois d'avril à la dernière décade du mois d'octobre. La période sèche dans le Haut-Chéliff commence avec le mois de mai et achève avec la fin d'octobre.

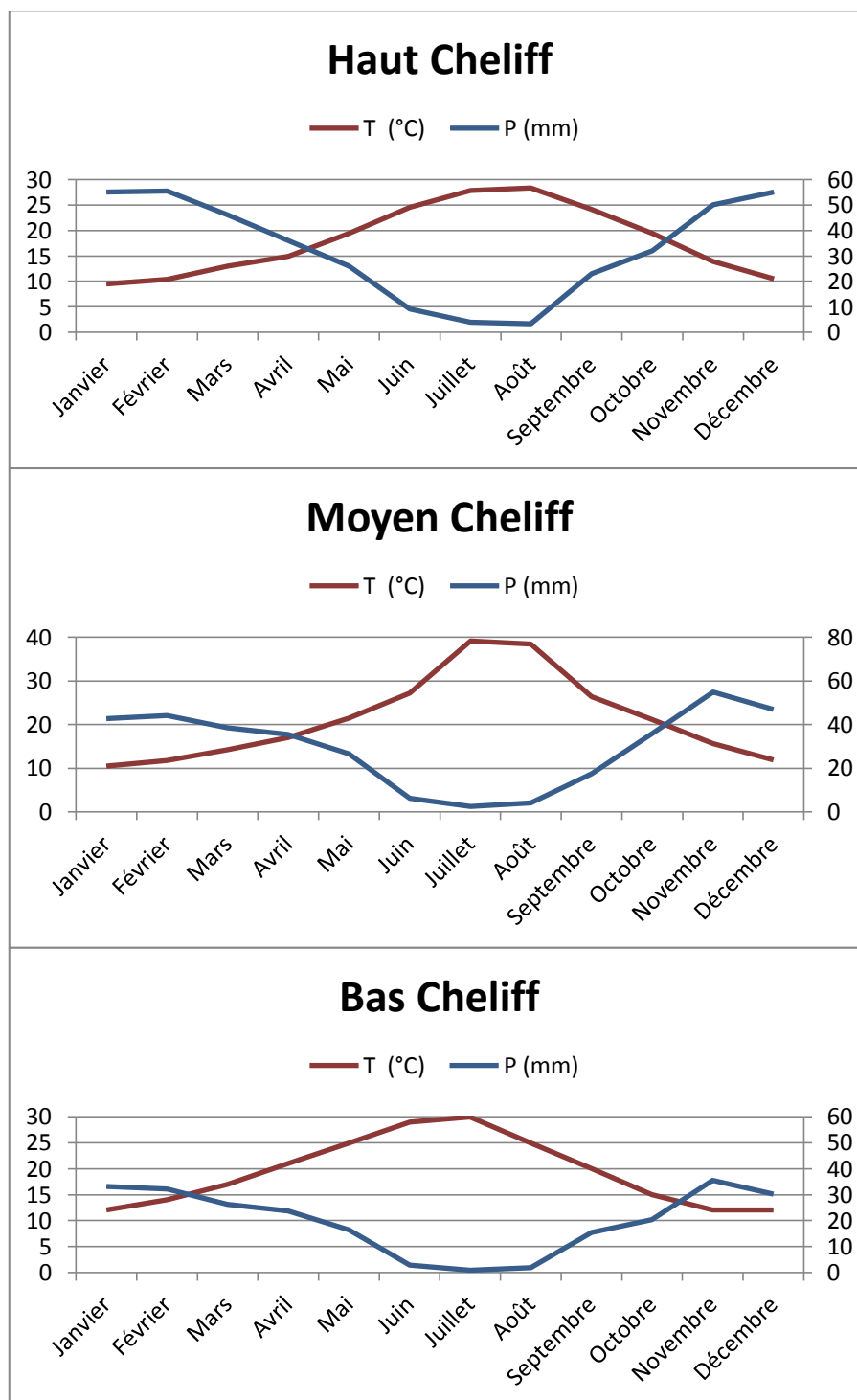


Figure 03 : Diagrammes ombrothermiques des plaines de Chéliff d'après les données de l'ONM de 1975 à 2006.

I.3. Géologie

Le bassin du Chélif appartient aux bassins sédimentaires sublittoraux allongés Est -Ouest et mis en place après la dernière phase alpine de tectonique tangentielle.

Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le Tell septentrional représenté par une suite de reliefs parallèles formés essentiellement de terrains jurassico-crétacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et massifs épi-métamorphiques à schistosités du Doui, Rouina et Témoulga).

Au sud, le bassin du Chélif est limité par le Tell méridional représenté par un ensemble de massif montagneux où le substratum y est principalement marno-calcaire et correspond à l'allochtone tellien avec ses différentes nappes.

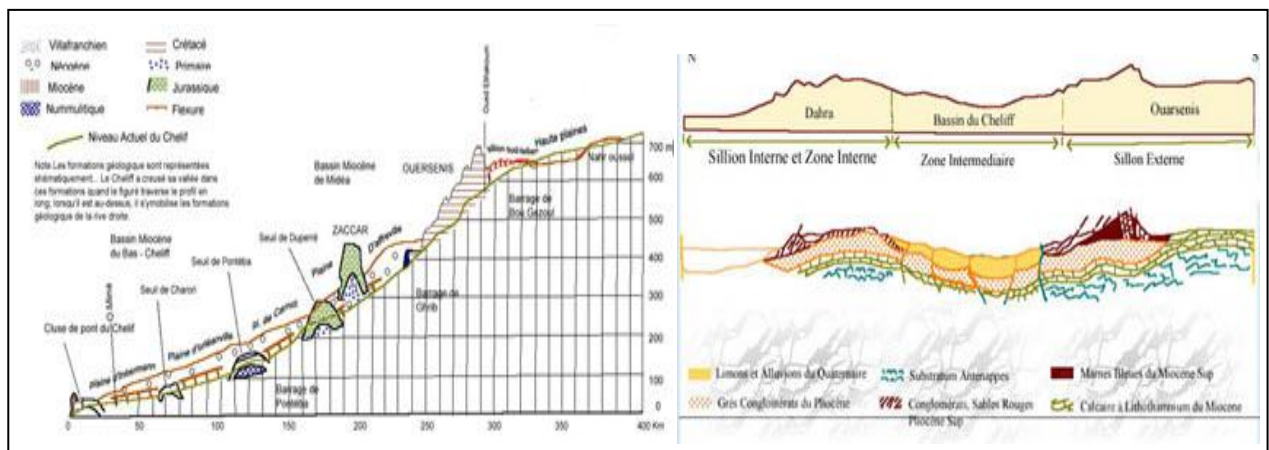


Figure 04 : Coupes géologiques à travers le bassin du Chélif.

Une phase infra-crétacé, compressive donne des plis NE-SW ; Une phase à composante tangentielle intervient après le Sénonien et le Paléocène et serait en partie responsable de l'épimétamorphisme.

Une phase datée Aquitano-Burdigalienne, compressive et profonde génératrice d'un nouvel épimétamorphisme.

Pendant que les nappes telliennes achèvent de se mettre en place, un nouveau cycle sédimentaire s'amorce marqué par une transgression qui envahit le bassin et finit par déposer une épaisse sédimentation mio-plio-quadernaire. Parallèlement, le bassin du Chélif est soumis pendant tout le Néogène à une importante tectonique principalement distensive pour certains auteurs (Y. Gourinard, A.Perrodon, B.Fenet in et polyphasée pour G.Thomas in ABH-CZ, 2004). Cette tectonique continue jusqu'à l'actuel comme en témoigne l'intense activité sismique de la région.

1.3.1. Haut-Chélif

1.3.1.1. Stratigraphie

La carte géologique (1/50 000) de la région de Ain Defla, montre l'existence d'un sillon subsidant d'allure synclinale, comblé par des dépôts essentiellement quaternaires, présentant des ondulations vers le nord avec quelques affleurements. La partie sud est marquée par l'émergence du massif de Doui très accidenté.

La succession lithologique observée dans la région d'Ain Defla se présente comme suit avec de bas en haut :

Le Paléozoïque : En l'absence de fossiles, la datation avec précision des formations primaires n'a pas été possible, mais les géologues s'accordent à distinguer :

- Le siluro – Dévonien : constitué de schistes à patines de couleur gris verdâtre, avec parfois des intercalations de niveaux gréseux. Ces schistes affleurent au sud et au nord d'Ain Defla.
- Les formations volcaniques : sont constituées par des Tufs pyroclastiques à grains grossiers ainsi que de laves andésitiques datées du Carbonifère.
- Le Permo-trias : représenté par une série de schistes, de quartzites et de conglomérats, marquant en quelque sorte le passage du primaire au secondaire.
- Les lentilles de quartz : Au sud d'Ain Defla, on note la présence de lentilles de quartz parfois assez importantes, 'enrobées' dans l'ensemble schisteux.
- Le jurassique : est la seule formation du Secondaire visible dans les environs d'Ain Defla. Il est représenté par les calcaires du Lias visible à Kef Deliouz – Kef N'Sours et Koudiet Zelia. Les faciès observés dans cette masse carbonatée sont constitués par :
 - Des calcaires gris bleus massif (Kef N'Sour), 100 m d'épaisseur environ,
 - Des calcaires gris de faible épaisseur.

Le Miocène : La série Miocène est plus ou moins complète, elle s'observe généralement au nord de la région où elle est représentée de la base au sommet par :

- Burdigalien : Le Burdigalien ne représente que des petits affleurements localisés au nord-ouest du bassin et sur la rive droite de l'Oued Abda. Constitué respectivement par des marnes dites Carténniennes, des grès et des poudingues, il se trouve en contact anormal avec les schistes de Littré. L'épaisseur de ces formations est comprise entre 100 et 300 m.

- Helvétien : Reposant sur le Burdigalien, il peut être observé au nord - est de Ain Defla. Il est représenté par des argiles bleues ou gris bleues claires, compactes et homogènes s'intercalant à la partie supérieure de petits bancs gréseux. L'ensemble peut avoir une puissance supérieure à 200 m.
- Tritonien : affleure largement au nord, au niveau de Beni Roumariane où il est constitué par des grès sableux avec des alternances argilo-gréseuses et des poudingues, l'ensemble peut atteindre 100 m d'épaisseur.
- Pontien : Visible uniquement au nord – ouest. Il est représenté par des marnes argileuses avec intercalation de petits lits sableux dans les couches supérieures. Sa puissance est supérieure à 80 m.

Le Pliocène : il est représenté par un affleurement localisé au nord de la ville de Kherba. Il est constitué par des grès sableux renfermant quelques bancs durs et passants à la partie supérieure à des sables gris à concrétion gréseuse, ces formations constituent l'étage Astien d'une épaisseur de 120 m.

Le Plaisancien : est constitué par des grès et des conglomérats à sable argileux rouge.

Le Quaternaire : Les dépôts quaternaires d'une puissance pouvant atteindre 80 m, sont localisés dans la partie méridionale de la plaine, et sont représentés par :

- Alluvions anciennes des plateaux : visible au sud – ouest. Généralement ce sont de puissants dépôts caillouteux et limoneux rougeâtres, souvent avec des conglomérats.
- Alluvions anciennes : Ce sont, des dépôts caillouteux qui représentent les anciennes terrasses de la vallée de Chélif.
- La distinction avec les terrains caillouteux plus anciens, qui présentent sensiblement le même aspect n'est pas toujours facile, aussi le niveau alluvionnaire peut renfermer des dépôts de différents âges, notamment sur la rive droite de l'oued Chlef.
- Alluvions récentes : bien visible le long de l'Oued Chlef, généralement c'est des cailloutis alternant avec des bancs limoneux et argileux.
- Eboulis des pentes : Constituent des amas de débris de calcaires plus ou moins cimentés sur les pentes inférieures et au pied des escarpements rocheux liasiques au nord de Doui.
- Alluvions actuelles : C'est des limons sableux des crues de la vallée de Chélif et de ces affluents. (**Sofreco, 2010**).

1.3.1.2. Tectonique

Sur son versant nord le massif du Doui est constitué par une série de plis déversés, qui comprennent dans leurs axes des schistes et des quartzites primaires, surmontés de poudingues du Permien. Cette série de plis est renversée sur les calcaires du Lias.

Le reste du bassin subsidient a été comblé par les dépôts du tertiaire et du Quaternaire.

1.3.2. Moyen Chélif

1.3.2.1. Stratigraphie

Les terrains les plus anciens de la vallée du Chélif sont constitués par :

Le Jurassique : Les terrains jurassiques sont peu étendus. Il représente quelques affleurements disséminés au milieu de masse énorme de terrains crétacés. Ils sont représentés par l'Infra-lias, le Lias et l'oxfordien, on les rencontre dans les environs d'El Asnam, Oued Fodda et sur les crêtes de l'Ouarsenis.

- **L'infra Lias et le Lias :** Ils sont représentés par des îlots de calcaire bleuâtres compacts et des schistes argileux luisants et apparaissent aux environs des villages de oued Fodda et Ex Lamartine et au Djebel Tamoulga et dans l'Ouarsenis. En certains endroits, comme au Kef Sid Amar on rencontre des dolomies jaunâtres et des calcaires dolomitiques, ou même des calcaires massifs blancs ou grisâtres.
- **L'oxfordien :** Il peut être observé sur les rives de l'oued Lella Ouada, où il apparaît sous forme de calcaire dur, blanchâtre, avec quelques bancs marneux. Dans l'Ouarsenis, la couche de base est constituée de calcaire rigoureux, reconnue comme appartenant à l'Oxfordien.
- **Le Crétacé :** Les terrains du crétacé occupent une grande partie du massif de l'Ouarsenis. Le crétacé inférieur forme une large bande dans la partie méridionale du bassin du Chélif. Cette bande qui est recouverte à l'ouest par les terrains Tertiaires et se poursuit à l'est pour rejoindre les terrains de même âge dans la région de Teniet El Had. Les terrains crétacés rencontrés sont :
 - Le Néocomien – barrémien : Les dépôts de ces étages sont d'origine marine. Ils sont représentés entièrement par des marnes à ammonites, qui s'étendent depuis Mendes jusqu'à Teniet El Had.
 - En certain endroit, on peut rencontrer des intercalations de calcaire. Dans la région de Lalla Aouda, on rencontre des schistes feuilletés avec de très rares bancs de grès peu épais qui s'étendent jusqu'aux rives de Oued Sly.

- L'Albo – Aptien : affleure à environ 4 km au sud de Chlef, dans la région de Lalla Aouda. Il est constitué par des Flysch.
- Le Cénomaniens : Le cénomaniens dans toute la zone montagneuse située au sud d'El Asnam, à l'état de marnes et de calcaires marneux renfermant des Bélemnites et des Ammonites.
- **L'Eocène Inférieur** : Il est constitué de marnes blanchâtres à bleuâtres et de calcaires marneux blancs contenant des lits de silex noirs. On les rencontre dans la région d'Ammi Moussa et sur la rive droite de l'oued Rhiau et repose en discordance sur le Néocomien. La partie supérieure de l'Eocène inférieur est constituée d'argiles blanches ou grises et de grès.
- **L'Eocène Supérieur** : il est représenté par une puissante assise de grès sableux rougeâtres à petits grains de quartz. Très démantelée en lambeaux, cette assise se trouve comprise dans la zone septentrionale du massif de l'Ouarsenis.

Le Lambeau le plus occidental se trouve dans la région d'Ammi Moussa, alors que vers l'Est, c'est dans la région d'Oued Fodda que l'on rencontre un affleurement de marnes bariolées avec intercalation de grès brunâtre quartzeux.

Ce sont les formations pliocènes rouges, marnes, poudingues sable, grès. On distingue :

- La région moyenne : est formée par des argiles sableuses grises ou jaunes contenant des cristaux de gypses. Ce sont des terrains largement ondulés. La stratification est indiquée seulement par les couches intercalées de sable, gris jaunâtre ou de poudingues, sur les bords de l'oued Tilefet qui se jette dans l'oued Tsighaout ou Bordj l'Agha, les poudingues sont assez développés et les couches argilo – sableuses plongent à l'est sous une argile.
- la région méridionale : plus accidentée se trouve sur la ligne de contact des terrains secondaires et Tertiaires. Elle est formée de poudingues qui constituent la base du terrain tertiaire moyen avec un ciment argilo – calcaire rouge.

Tertiaire moyen (Pliocène Supérieur Continental) : Il s'étend des montagnes de Medjadja (vallée du Chélif) jusqu'à Ténès (sur la côte), et forme le vaste massif du Dahra. A deux kilomètres au nord d'El Asnam, on trouve de petites collines connues sous le nom de « Montagnes Rouges » Il est constitué par une succession de couches de sable de couleur jaune ou rouge.

Au nord des montagnes rouges se trouve la plaine des Adjerafs qui sépare le Dahra d'une chaîne assez élevée, parallèle au Chélif appelée chaîne de Medjadja (Pliocène supérieur

Continental). La partie supérieure est constituée de calcaires jaunes reposants sur des argiles, reposants à leur tour sur des poudingues à débris secondaires composés de quartzites.

Les terrains du **Tertiaire Supérieur** : sont peu étendus dans le bassin d'El Asnam, on les rencontre dans la région d'Oued Fodda. Les plaines d'Oued Fodda et Sidi Rached sont séparés dans leur partie orientale par des formations rouges du Pliocène, (marnes, poudingues, sables et grès) que l'on rencontre tout au long de la vallée du Chélif (sur son flanc nord surtout).

Le Plaisancien : est constitué de marnes bleues, caractéristiques de cet étage.

L'Astien marin et Continental : il est représenté par une série détritique sableuse ou gréseuse. Les grès à ciment calcaire, sont argileux dans la partie inférieure et peuvent passer à des calcaires gréseux. Cet ensemble a une épaisseur moyenne de 100 mètres.

Le Pliocène Continental : est représenté par des sables grès et roux d'une cinquantaine de mètres. Cette série est difficile à distinguer du Villafranchien Continental.

Le Villafranchien : il est représenté à la base par des dépôts de couleur grise ou brune à la base, surmonté par des couches rouges. (Sofreco, 2010).

1.3.2.2. Tectonique

Le bassin du Chélif résulte du plissement des terrains moyen sous forme de cuvette dont le Chélif occupe le Talweg. Mais ce plissement n'a pas été uniforme.

Les couches de la rive gauche et de la rive droite ont subi une rupture. Les premières se rapprochant beaucoup plus de l'horizontale que les secondes.

1.3.3. Bas Chélif

Le bassin du Bas-Chélif s'insère dans le vaste bassin « synorogénique intramontagneux » du Chélif. Il est le siège d'une importante sédimentation néogène affleurant largement, sur ses marges nord (Dahra) et sud (Tessala et Beni Chougrane), en discordance sur les terrains allochtones (Delteil 1974). Les dépôts miocènes en constituent la plus grande partie avec une épaisseur avoisinant les 4 000 m en zones axiales. Les nombreux travaux effectués, dans ce bassin, ont dans un premier temps subdivisé la série **miocène** en deux cycles sédimentaires attribués respectivement au : « **Miocène inférieur** » et « **Miocène supérieur** ». Au sens de certains travaux antérieurs (S.N. Repal 1952 ; Perrodon 1957 in Belkebir L *et al.*, 2008), le Miocène dit « inférieur » correspond à un intervalle de temps allant du Burdigalien supérieur jusqu'au Serravallien terminal alors que le Miocène dit « supérieur » englobe le Tortonien et le Messinien. En fonction de la prise en compte de la mise en place des nappes (Mattauer 1958 ;

Polvêche 1960), la même série est différenciée en « Miocène anténappes », « Miocène synchronappes » et « Miocène postnappes ». Ce dernier, largement répandu dans la région étudiée, est divisé à son tour en premier et deuxième cycle postnappes ; l'âge de leur limite ne fait pas encore l'unanimité parmi les auteurs.

1.3.3.1. Lithostratigraphie

La plaine est relativement jeune parce qu'elle date seulement du quaternaire. C'est un synclinal comblé du Rharbien (quaternaire récent) encadré au Nord et au Sud par des collines de l'âge Miocène-Pliocène (tertiaire). En conséquence, les alluvions de la plaine du Bas-Chéiff proviennent directement de l'érosion de ces collines (**McDonald et BNEDER, 1990**).

Au Sud, les collines coupées par l'Oued Rhiou et l'Oued Djidiouia, consistent en de schistes et de marnes salés, ce qui explique la haute salinité des sols alluviaux de la plaine ainsi que le niveau de la salinité des eaux de la retenue de Merdjet sidi Abed et du barrage Gargar. (**McDonald et BNEDER, 1990**).

Au nord, Les collines de Dahra sont composées de marnes et de limons argileux qui deviennent vers l'ouest des sables et des conglomérats plus grossiers. Encore une fois, certains de ces lits sont salés.

Les collines de l'est du Bas-Chéiff sont plus récentes que le Dahra et le massif de l'Ouarsenis, d'âge Villafranchien et sont composées de limons calcaires intercalés de sables, extrêmement tendres, une érosion sévère à ravines profondes. On retrouve toutefois deux principales unités géomorphologiques particulières :

- La sebkha de Benziane qui est une dépression naturelle (cuvette elliptique de 5 km de long sur près de 3 km de large, bordée au nord de falaise d'environ 15m) cavée dans la région de Benziane au Nord de la ville de Oued El Djemaa.
- La Gaa : C'est une dépression fermée, couverte par des formations récentes très argileuses, elle se trouve dans la rive droite de l'oued Mina. On y retrouve des petits cours d'eau qui constituent des artères permettant une circulation d'eau vers le centre de la dépression où les eaux stagnent sur pratiquement toute l'année provoquant dans ceci une hydromorphie et une salinisation importantes des sols (**Douaoui, 2005**).

1.3.3.2. Tectonique

Durant le pliocène inférieur et le miocène d'épaisses séries de marnes se sont déposés. Au-dessus de ce substratum, des grès-calcaires astiens, des grès du Pliocène continental et du Calabrien se sont déposés. La phase tectonique poste pliocène et la transgression calabrienne ont

fait éroder en quelques endroits les grès-calcaires astien et les grès du Pliocène continental (Sofreco, 2010).

1.4. Hydrogéologie

1.4.1. Haut Chélif

Les caractéristiques lithologiques des formations rencontrées dans le Haut-Chélif, permettent d'identifier deux ensembles aquifères constitués par :

1.4.1.1. Les calcaires Jurassiques

Les calcaires Jurassiques affleurent au sud d'Ain Defla. D'une épaisseur d'environ 100 m, ils constituent un horizon à perméabilité de fractures.

Les sondages électriques montrent que les calcaires ont une bonne résistivité (100 Ohm.m), et présentent un pendage vers le nord en direction de l'oued Chlef, et sont recouverts par les dépôts du Tertiaire et du Quaternaire. Leur extension est cependant limitée, ce qui réduit leur possibilité d'emmagasiner de grandes quantités d'eau.

Un forage réalisé dans les calcaires de Koudiet Zelia a donné un débit de 54 l/s. L'eau est douce (400 mg/l). Plusieurs forages, ont par la suite été réalisés dans le massif de Doui, mais ceux-ci ont capté les séries primaires et se sont soldés par des échecs.

La ressource totale exploitable, semble donc très faible en raison de la faible extension des calcaires.

1.4.1.2. La nappe du Mio-plio-Quaternaire

Compte tenu des intercommunications entre les formations du Mio-pliocène et du Quaternaire, celles-ci ont été regroupées sous le terme de nappe du Mio-plio-quaternaire. On rappellera que le Mio-pliocène gréseux-sableux affleure au niveau de Bir Roumaria et dans la région de Kherba. Son épaisseur ne dépasse pas 60 m.

Les sables ont une porosité d'interstices, tandis que les grès ont une porosité de fracture. En dehors de la fenêtre constituée par les schistes et située à la sortie nord de Ain Defla, le Quaternaire occupe toute la plaine. On le rencontre sur les deux rives de l'oued Chlef. Il est constitué par les alluvions grossières et argilo – limoneuses dont l'épaisseur varie entre 15 m et 50 m.

Description de l'aquifère

Les formations du Mio-pliocène et du Quaternaire sont en contact direct et fonctionnent comme un seul aquifère. La surface piézométrique se présente comme une gouttière avec des courbes piézométriques parallèles à la rivière. (Voir Figure 5)

Au sud d'El kherba, les courbes sont en forme circulaires, montrant une concentration de l'eau à cet endroit. Le niveau de celle-ci est en effet peu profond. Dans la partie amont, les courbes semblent en continuité avec celles de la nappe d'El Khemis qui constitue son prolongement naturel.

Alimentation

L'alimentation se fait :

- Directement par les pluies à travers les surfaces offertes par l'impluvium. Les affleurements du Mio-pliocène dans la région de Bled Roumariane jouent un rôle particulier.
- Par infiltration des eaux de ruissellement des oueds Chlef – Abda et El Arch.

Ressources exploitables

Si en excepte les formations primaires et secondaires situées au sud de la ville, l'essentiel des dépôts de la région de Ain Defla est constitué par le remplissage Mio-pliocène et Quaternaire.

C'est dans ce remplissage que se trouve concentré l'essentiel des ressources en eau du Haut-Chélif.

D. Pradines (in Sofreco, 2010) a procédé à une évaluation des potentialités de la nappe du Haut-Chélif dont fait partie la plaine d'El Khemis. En considérant la pluviométrie, l'évaporation potentielle et le ruissellement, il a estimé la recharge moyenne annuelle à 500 l/s (15.8 Hm³/an).

Les ressources en eau du Massif de Doui sont selon le même auteur de l'ordre de 2.3 Hm³/an.

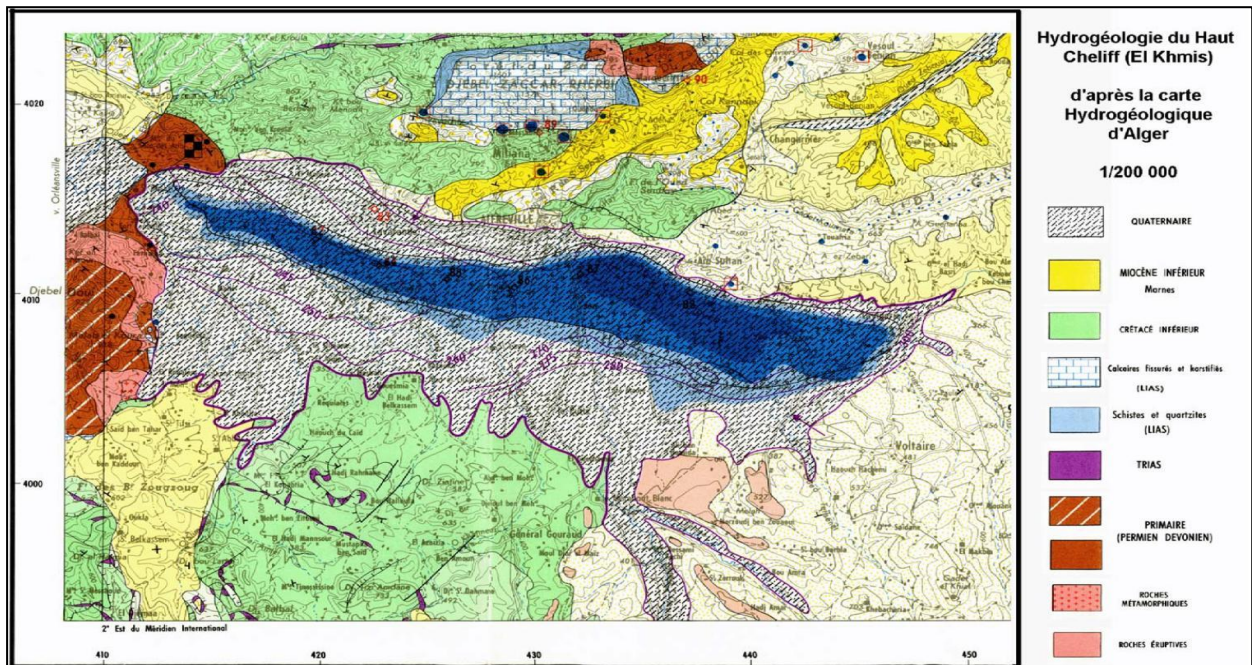


Figure 05 : Carte Hydrogéologique du Haut-Chélif (El Khmis) (Sofreco, 2010).

1.4.2. Moyen Chélif

Les aquifères importants du Moyen-Chélif, sont au nombre de trois, et sont plus ou moins indépendants (figure 6).

1.4.1.1. La nappe alluviale

Description de l'aquifère

La nappe alluviale est constituée par alluvions grossières du Quaternaire, beaucoup plus développées dans la partie amont du Moyen-Chélif, et se prolongent dans le Haut-Chélif. La partie supérieure est constituée par des limons argileux grisâtres sur la majeure partie de la plaine.

L'épaisseur des alluvions varie entre 80 et 90 m en moyenne aussi bien dans le moyen que dans le Haut-Chélif, mais le forage d'El Abadia les a traversées sur 130 m, « soit la plus grande épaisseur reconnue dans le Haut et Moyen-Chélif ».

Alimentation

L'alimentation s'effectue par les eaux de pluie, par les eaux superficielles au moment des crues de l'oued Chlef, cette alimentation s'effectue uniquement en certains endroits, et par des remontées à partir des formations profondes.

L'exutoire

Les cartes piézométriques montrent que l'écoulement se fait dans la direction de l'Oued Chlef, c'est dire d'amont en aval.

1.4.1.2. La nappe des calcaires à Lithothamniées*Description de l'aquifère*

Les calcaires à lithothamniées affleurent sur toute la rive gauche de l'oued Chélif, depuis Oued Fodda jusqu'à Djidiouia, ils forment une bande d'environ 65 km de long. La largeur varie entre 2.5 km au NE et 4 km au NW.

Ces calcaires appartiennent au Miocène supérieur (Tortonien). Latéralement, ils passent à des grès calcaires fossilifères (rive gauche l'oued Djidiouia, et rive droite Oued Fodda).

Le calcaire à lithothamniées plonge vers le nord, (rive droite de l'oued Chélif), sous les dépôts sus-jacents (Pliocène et Quaternaire) et passe à des marnes à Tripoli.

Les forages réalisés par les pétroliers (Kh5 et 6) montrent que le maximum d'épaisseur a été atteint dans la région de Boukadir (entre 160 et 200 m). Le forage Hydraulique réalisé dans les années 1980, près de Chleff montre que l'épaisseur des calcaires à lithothamnium est de 68 m. Elle atteint 80m à Oued Sly.

Le réservoir

Il est constitué par les calcaires fissurés mais ceux-ci sont très hétérogènes. Les changements latéraux et verticaux de faciès sont extrêmement fréquents. Vers le nord, les calcaires passent à des couches de marnes à tripoli de même âge.

Le réservoir est presque partout entouré de séries marneuses imperméables du Pliocène et du Miocène. Le mur étant constitué par des marnes du Miocène supérieur.

Les terrains de couverture sont constitués vers le nord, soit par des formations de piémont, soit des formations continentales, ou des grès Astien. Au sud, les calcaires à lithothamniées affleurent sur environ 2 km.

La karstification semble peu importante en profondeur, et les fissures ne sont pas très ouvertes. Cependant dans les forages d'El Arroussi, des pertes totales attribuées à la présence d'une faille à 45° ont été enregistrées.

L'alimentation

L'alimentation s'effectue évidemment par l'impluvium grâce à l'infiltration des pluies, et localement par les oueds. Elle se fait généralement en amont des oueds. Comme c'est le cas de l'oued Sly.

L'exutoire

Il est admis que la nappe des calcaires à lithothamniées, se déverse dans le remplissage constitué par les formations plus récentes du Pliocène et du Quaternaire, qui reposent au nord en biseau incliné sur les calcaires. Les oueds agissent localement dans le drainage de la nappe, à l'image de l'oued Sly.

Les calcaires ne sont aquifères que dans la mesure où ils sont fissurés ou karstifiés. L'alimentation étant irrégulière, l'écoulement n'est donc pas uniforme. Dans les calcaires du Chélif, la circulation de l'eau se fait à travers les fissures suivant un régime rapide "turbulent" ou lent à travers de fines canalicules.

D'une manière générale, l'écoulement se fait du sud vers le nord, par diffusion à travers les alluvions d'origine continentale ou de l'Astien.

Potentialité de la nappe

Plusieurs auteurs ont tenté de calculer les potentialités de la nappe des calcaires à lithothamniées. Pour un coefficient d'infiltration de 10 %, **Schrambach in Sofreco, 2010** avait estimé la recharge à 12 Hm³/an.

1.4.1.3. Les grès astiens***Description de l'aquifère***

Les grès astiens ont une lithologie plus ou moins constante, constituée de sables très fins renfermant des grès fins à ciment calcaire. Ils sont bien développés au nord - est de Chleff, mais leur superficie est cependant assez faible. La nappe de l'Astien comprend deux parties :

- Une nappe libre occupant le flanc sud du Djebel Hamri ;
- Une nappe captive.

Le réservoir

Le réservoir des grès astiens peut être rencontré essentiellement sur la rive droite de l'Oued Chélif, et rarement sur la rive gauche. La lithologie assez constante, montre que l'Astien est constitué de sables fins renfermant localement des grès.

Le réservoir est compris entre deux horizons de marne imperméable. Dans la partie nord, l'Astien affleure sur de larges superficies, par contre dans la partie sud, il est recouvert par des dépôts plus récents.

Certains géologues associent aux sables Astien, des calcaires gréseux et des poudingues.

Alimentation

L'alimentation de la nappe s'effectue soit directement par infiltration à travers l'impluvium, soit par les Oueds notamment dans la partie amont sur le flanc sud du Djebel Hamri, là où la nappe est libre.

Le débit infiltré par percolation à travers les sédiments a été estimé à 100 l/s. L'apport des oueds serait de l'ordre de 10 l/s.

L'Exutoire

La nappe libre comprend une zone « suspendue » par rapport à la rive droite de l'oued Chlef. C'est une zone de déversement qui donne lieu à une multitude de sources, particulièrement dans la partie aval.

La partie captive se caractérise par la présence d'un artésianisme notamment dans la région de Medjadja. D'autre part, la Sebkhia de Sidi Abed semble constituer un exutoire naturel pour la nappe.

Potentialités de la nappe

Les ressources en eau du Moyen-Chélif de la nappe alluviale, de grès Pliocène et des calcaires à Lithothamniées ont été évaluées respectivement par D.Pradines, et G.Schrambach. Les ressources exploitables de ces aquifères sont consignées dans le tableau ci-dessous (**Sofreco, 2010**).

Tableau 03 : Les ressources en eau des nappes du Moyen-Chélif.

Aquifère	Ressources exploitables (Hm³/an)
Nappe alluviale, sable et grés Pliocène	16.0
Calcaire à lithothamniées	12.0
Total	28.0

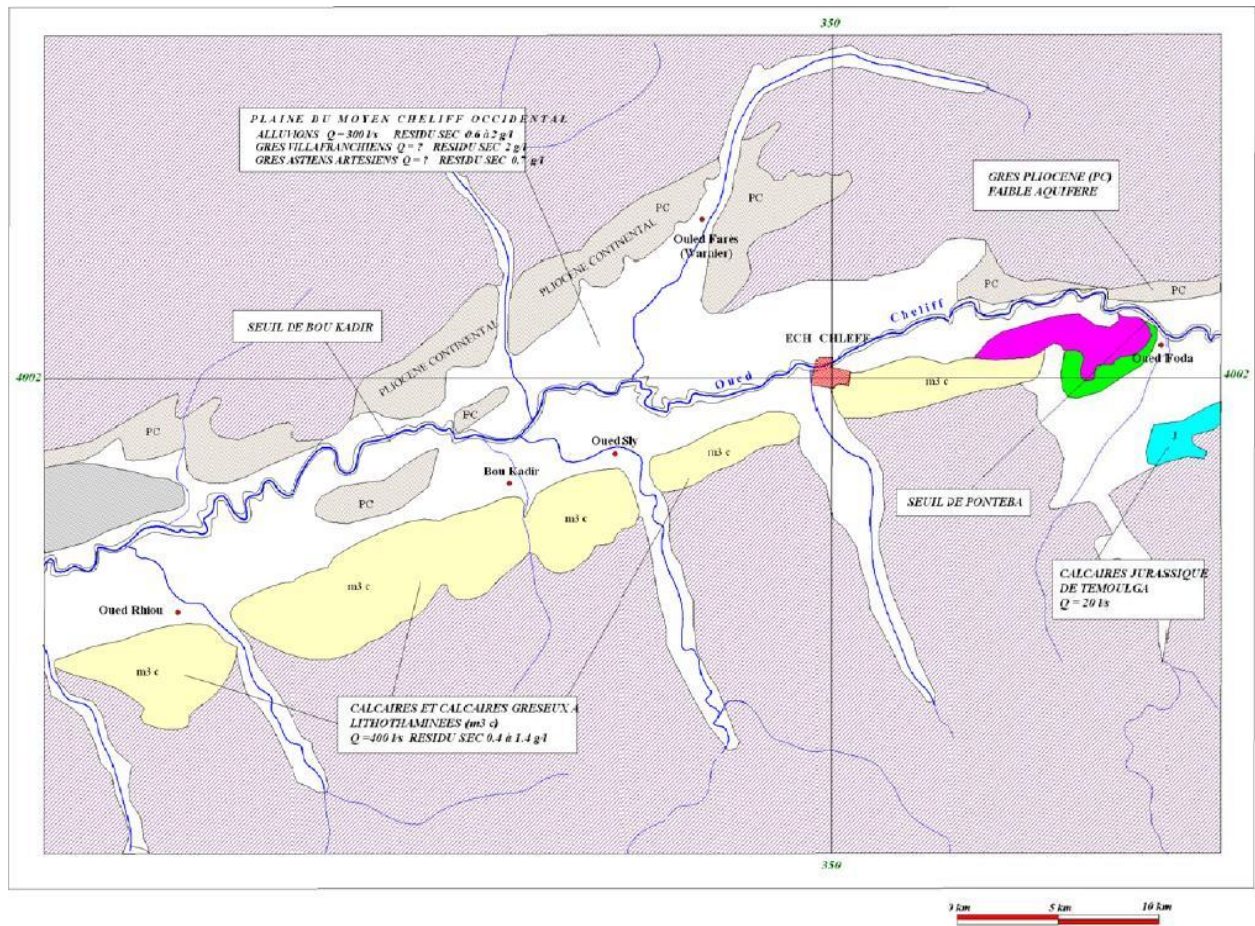


Figure 06 : Carte Hydrogéologique du Moyen-Chélif (Sofreco, 2010).

1.4.3. Bas Chélif

Les principaux aquifères du Bas-Chélif sont :

1.4.3.1. Le Miocène calcaire

Affleure le long de la limite sud de la plaine. Les descriptions lithologiques ont montré l'existence de zones de fracture productives entre 37 et 60 m de profondeur ;

1.4.3.2. Le Pliocène marin

C'est une suite d'argiles et de marnes avec des couches minces de grès qui affleurent au nord de la plaine. On le retrouve dans la région de Ouarizane à plus de 55 m de profondeur et dans la région de Sebket Benziane à plus de 400 m de profondeur ;

1.4.3.3. Le Quaternaire-Pliocène continental :

Il est constitué de sédiments à base d'argile, de marnes et des lits de sable, de graviers et de conglomérats. La profondeur de ces forages est très variable selon les régions où elle peut aller jusqu'à 300 m alors que la moyenne est de 70 m. (Douaoui, 2005).

1.5. Hydrographie et hydrologie

La plaine du Chélif située entre les montagnes du Dahra au nord et l'Ouarsenis au sud est une région principalement à vocation agricole, traversée par l'Oued le plus important d'Algérie. L'Oued Chélif coule sur 700 kilomètres avec un débit de $5 \text{ m}^3 \text{ S}^{-1}$ à la station du Ghrib dans le Haut-Chélif jusqu'à atteindre $15 \text{ m}^3 \text{ S}^{-1}$ à l'embouchure de Mostaganem.

Dans la plaine du Haut Chélif, oued Chlef partage ce périmètre en deux rives : la rive droite couvre 11303 ha tandis que la gauche ne fait que 9730 ha. Les principaux oueds qui convergent vers la plaine d'El Khemis sont :

- **Oued Souffay** qui draine le secteur Nord-est des monts du Zaccar et reçoit les eaux usées de la ville d'El Khemis.
- **Oued Boutane** qui collecte des eaux provenant du secteur Nord des amonts du Zaccar ainsi que les eaux usées de l'Ouest de la ville, puis traverse la plaine où il présente, par endroits, des intercommunications avec la nappe alluviale, avant de rejoindre l'oued Chlef à l'Ouest de la plaine.
- **Oued Deurdeur** qui prend sa source dans les amonts d'Ouarsenis au sud du secteur d'étude. Il traverse la plaine sur plusieurs Km avant de confluer avec l'oued Chlef.
- **Oued Harreza** est également un oued du sud (Ouarsenis). Il est caractérisé par un débit élevé du fait de l'importance de sa surface d'impluvium. Dans sa partie avale, il s'écoule dans la plaine où il présente un inféroflux en relation avec la nappe alluviale et rejoint, plus en aval, l'oued Chlef.

La plaine du Moyen-Chélif occidental est drainée par un réseau hydrographique bien marqué dont les ramifications principales sont :

- **Oued Ouahrane et oued Ras** : Deux affluents situés sur la rive droite, issus des monts de Dahra, présentent des bassins versants de taille modeste et de débits nuls à l'étiage.
- **Oued Sly, oued Tsighaout et oued Fodda** : Affluents sur la rive gauche. Ils ont des bassins versants plus étendus, dont la partie supérieure est formée par les reliefs montagneux de l'Ouarsenis. Les deux oueds principaux (oued Sly et oued Fodda), qui bénéficient d'un régime hydrologique favorable, ont fait l'objet d'aménagement de leurs ressources en eau (barrages de Oued Fodda et Sidi Yakoub).

Le réseau hydrographique de la vallée du Bas-Chélif comprend l'oued principal Chlef et des oueds voisins Razzaz, Tarhia, Ouarizane et Asfar.

- **L'oued Razzaz** : prend sa source dans les montagnes Hassi Belouenaouz. Dans cette région se trouve des argiles gypseuses. C'est pourquoi pendant les grandes crues les eaux de l'oued contiennent beaucoup de particules argileuses et une grande quantité de sel. Dans la vallée la profondeur du lit de l'oued est de 5 à 10m et il draine le territoire contigu. En été le débit de l'oued est très faible et parfois l'oued est desséché. En hiver, pendant les grandes crues l'oued ne sort pas de son lit. Dans la partie inférieure du lit de l'oued l'érosion latérale est bien développée.
- **Oued Tarhia** : cet oued n'a pas de débit permanent seulement pendant les périodes hivernales son débit est peu important, le lit de l'oued a une profondeur de 4 à 5m. Il comporte des blocs et des galets.
- **L'Oued Ouarizane** : prend sa source dans les montagnes El Abiod. Il a un débit très faible, son lit dans les limites de la vallée est mal exprimé. Pendant de grandes crues les matériaux de texture grossière se déposent sur le cône de déjection de cet oued.
- **L'oued Asfar** : à un faible débit pendant les crues hivernales. Durant les autres saisons le lit de l'oued est sec.

1.6. Les sols de la vallée du Chélif

La vallée du Chélif est caractérisée par des sols d'apport colluvial et surtout alluvial. La pédogénèse est très marquée par des phénomènes d'hydromorphie, halomorphie, tirsification et la rubéfaction qui sont liés aux propriétés morphologiques.

Au périmètre du Haut-Chélif, on distingue :

- Les sols alluviaux sableux de la terrasse moderne du Chélif, qui sont peu évolués, profonds et perméables,
- Les sols alluviaux de texture limoneuse de la terrasse récente du Chélif, qui sont faiblement argileux,
- Les sols des terrasses anciennes, qui sont rouges sur tuf ou sur croute décalcifiée en surface.

Alors que les sols du périmètre du Moyen-Chélif sont caractérisés par :

- Les sols d'apport colluvial se trouvant à la lisière de la plaine et sont profonds,
- Les sols hydromorphes se trouvent pour la plupart dans les vallées de la Merdja et de l'Oued Fodda.
- Les sols salés se localisent dans la partie Ouest du périmètre, surtout dans la région de Bled Souala.

Quant au périmètre du Bas-Chélif, ses sols peuvent être classés en deux principaux types généraux :

- Les sols légers et non salés qui se trouvent sur le plateau de Benziane et les périphéries de la plaine,
- Les sols lourds et salés qui occupent la partie centrale de la plaine.

CHAPITRE II

Aperçu Bibliographique

II.1 Introduction

Lorsque l'eau de pluie tombe sur le sol, elle peut ou non y pénétrer. On conçoit aisément que suivant la nature du sol, l'eau s'infiltré ou ne s'infiltré pas dans les nappes d'eau souterraines (**Valiron, 1989**). Les eaux superficielles et souterraines sont les deux principales sources utilisées par l'homme pour satisfaire ses différents besoins (domestiques, industriels et agricoles).

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble du bassin versant. Elles sont généralement polluées bactériologiquement, de plus, elles peuvent présenter plusieurs pollutions d'origine : urbaine, industrielle et agricole.

Les formations géologiques poreuses et perméables qui ont la propriété de permettre l'infiltration, le stockage et l'écoulement des eaux constituent les aquifères et les réservoirs des eaux souterraines. Leurs ressources en eaux proviennent de la partie des eaux de pluie non reprise par l'évaporation, la végétation ou le ruissellement (**Roux, 2000**).

II.2. Évolution chimique de l'eau souterraine

L'écoulement de l'eau souterraine, des zones de recharge aux zones d'émergence, entraîne des modifications dans la composition chimique de l'eau. **Chebotarev, 1955 in Cloutier, 2004** a observé que l'eau souterraine évolue avec la distance dans un système d'écoulement. Il a décrit cette évolution par une séquence où les espèces anioniques dominantes changent avec l'écoulement. Cette évolution chimique est causée par les processus géochimiques et les réactions se produisant dans le système aquifère régional, tel l'interaction avec les minéraux des roches ou avec des gaz. La composition finale dépend de la lithologie de l'aquifère et du temps de résidence de l'eau souterraine. D'autres paramètres ont aussi une incidence importante sur l'évolution de l'eau souterraine : les caractéristiques structurales du milieu, la température et la pression, la vitesse d'écoulement, la surface de roc en contact avec l'eau et la composition chimique de l'eau. La Figure 07 présente une synthèse des réactions et des processus géochimiques susceptibles d'être importants dans un système d'écoulement régional de l'eau souterraine. (**Cloutier, 2004**).

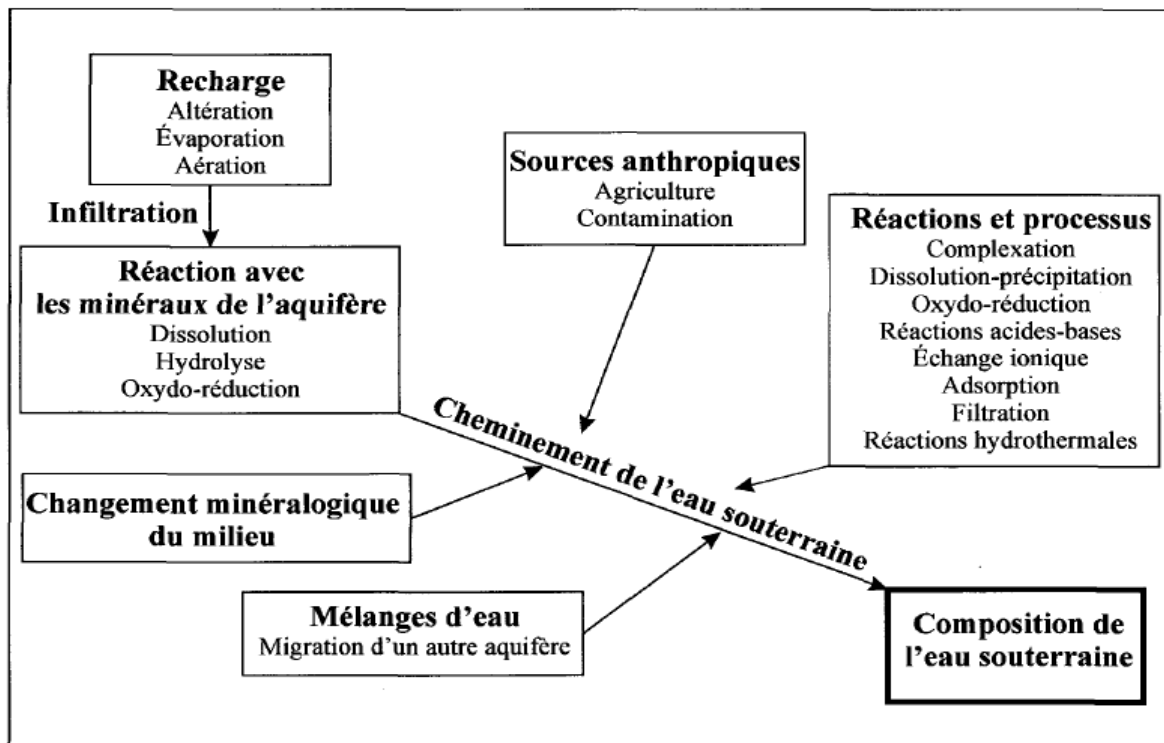


Figure 07 : Réactions et processus géochimiques contrôlant la composition de l'eau souterraine dans un système aquifère. (Adaptée par Hounslow, 1995 in Cloutier, 2004).

II.3. La minéralisation des eaux souterraine

Chaque source a une composition chimique déterminée provenant de la constitution des zones souterraines qu'elle a traversées et qui lui cèdent, ou avec qui elle échange différentes substances (Trombe, 1977). Les propriétés physiques et chimiques ainsi acquises caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme et sont conditionnées par les facteurs suivants :

Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches : l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydro-chimique.

Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées en sels de calcium et magnésium ; elles entartrent les conduites.

Au contact du gypse, l'eau se charge en sulfate de calcium et devient dure et impropre à la consommation.

En bordure de mer, les aquifères peuvent être en contact avec l'eau de mer : échange au niveau du biseau salée, contamination de l'eau d'infiltration par les embruns salés. L'eau de la nappe devient plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe.

II.4. Qualité de l'eau d'irrigation

Le choix d'une source d'eau pour irriguer doit dépendre du type et de la concentration des substances qui y sont dissoutes ou en suspension (**Ollier et Poirée, 1986**). Il dépend aussi des caractéristiques physiques et chimiques du sol (**Durand, 1982**). Bien que certaines sources d'eau soient pures, d'autres par contre contiennent des taux élevés de sels, de microorganismes et d'autres résidus. De ce fait, la connaissance des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau utilisée pour l'irrigation est indispensable pour éviter des effets négatifs sur les plantes, le système d'irrigation utilisé, le sol, et l'environnement.

Les problèmes les plus fréquents qui résultent de l'utilisation d'une eau de mauvaise qualité sont les suivants : accumulation de sels dans la zone des racines, perte de perméabilité du sol à cause d'un excès de sodium ou de la lessivage du calcium, et toxicité des ions, des éléments traces ou des pesticides. Ces problèmes seront exposés en même temps que les limites recommandées.

Dans l'application des recommandations pour la qualité de l'eau d'irrigation (**RQEC, 2008**), il faut tenir compte de trois facteurs importants :

1. La quantité d'eau. L'évapotranspiration détermine le débit d'irrigation requis. En général, plus la quantité d'eau d'irrigation utilisée annuellement est importante, plus les substances qu'elle contient risquent de s'accumuler dans le sol jusqu'à atteindre des concentrations toxiques. Les précipitations et l'utilisation d'une quantité d'eau supérieure aux besoins de la culture offrent une certaine protection contre cette accumulation en lessivant la zone des racines, à condition que le drainage puisse se faire sans contrainte.
2. Le type de culture. La sensibilité des cultures à l'égard des substances toxiques est très variable.
3. Le type de sol. Le taux de percolation est généralement plus élevé dans les sols sableux que dans les sols argileux. Les concentrations élevées de sodium peuvent agir de manière défavorable sur la structure et la perméabilité des sols argileux.

Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont : **La salinité, le sodium, l'alcalinité, le pH de l'eau et en fin la concentration en élément** qui peuvent être toxique pour le végétal (**Couture, 2006**).

II.4.1. Propriétés Physiques

II.4.1.1. La température

Elle est la qualité physique à considérer en premier lieu. Une eau trop chaude ou froide peut donner lieu à des accidents, surtout sur les jeunes plantes (**Rieul & Ruelle, 2003**).

En général, les eaux souterraines jouissent d'une constance de température que ne peuvent avoir les eaux de ruissellement soumises aux évaporations, aux échanges thermiques avec l'extérieur et le sol superficiel au rayonnement solaire (**Trombe, 1977**).

II.4.1.2. La salinité

La salinité, ou teneur en sels dissous, de l'eau d'irrigation constitue un paramètre très important de la qualité de l'eau. La pression osmotique de la solution du sol augmente proportionnellement à la salinité, ce qui entraîne une réduction de la qualité d'eau utilisable par les plantes (**Allison, L.E. 1964**). Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-) (**Harivandi, 1999**).

Les conductivités des eaux associées aux roches silicatées sont les moins élevées, jusqu'à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux des roches carbonatées ont des conductivités de 100 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Derron, 2000**). Les roches contenant des sulfates (gypses, anhydrite, epsomite) augmentent considérablement la conductivité lorsqu'elles sont dissoutes : 1000 – 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

II.4.1.3. Le pH

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H^+ dans l'eau. Cette mesure est très importante car la valeur du pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Les eaux peu profondes (sub-surface) sont généralement neutres à basiques ($\text{pH} = 7 - 9$), et en équilibre avec la pression d' O_2 atmosphérique (oxydantes).

Le pH influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation. Il devrait se situer entre **6,5** et **8,4**. À ces valeurs, la solubilité de la plupart des microéléments est optimale (**Rieul & Ruelle, 2003**).

II.4.2. Propriétés Chimiques

II.4.2.1. Sodium

La présence d'un excès de sodium dans l'eau d'irrigation, que ce soit par rapport à la quantité de calcium et de magnésium ou par rapport à la teneur totale en sels solubles, peut altérer la structure du sol, ralentir les déplacements de l'eau dans le sol et à travers le sol (infiltration, perméabilité) et réduire l'aération du sol (NAS/NAE. 1973) constance

Un excès de sodium peut également être à l'origine de la toxicité chez certaines plantes, or le sodium est absorbé par les cultures en même temps que l'eau et celui-ci se concentre dans les feuilles tandis que l'eau s'échappe par transpiration (Ayers & Westcot, 1984). Une fois que la concentration de cet élément atteint le seuil de la tolérance de la culture on peut constater des toxicités qui se manifestent par des brûlures et des dessèchements des feuilles qui aboutissent toujours à une mort certaine du végétal.

II.4.2.2. l'alcalinité

L'alcalinité, quant à elle, est une mesure du pouvoir de l'eau à neutraliser les acides. L'abondance des ions carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) dans l'eau d'irrigation mérite d'être évaluée, les bicarbonates peuvent nuire à la fertilité du sol si l'on utilise de l'eau d'irrigation à forte teneur en bicarbonates pendant plusieurs décennies (Eaton 1950). Au fur et à mesure que les bicarbonates se concentrent dans le sol en raison de l'évapotranspiration, le calcium et le magnésium ont de plus en plus tendance à précipiter sous forme de carbonates insolubles. Avec le temps, le coefficient d'adsorption du sodium (SAR) augmente et des problèmes dus à la présence d'un excès de sodium commencent à apparaître. Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver des façons d'évaluer quantitativement le danger potentiel lié à la présence de bicarbonates en calculant des valeurs de carbonate de sodium résiduel (CSR) (Eaton 1950 ; Wilcox 1958) ou celles des SAR corrigés (Rhoades 1968,1971).

II.4.2.3. concentration en élément toxique

Certains sels peuvent être gênants quand ils se trouvent naturellement en quantités supérieures aux exportations classiques des végétaux.

Les substances toxiques qui doivent être considérées attentivement sont le sodium, le chlorure et le bore, elles peuvent causer la baisse du rendement et provoquer l'échec de la récolte (Ayers & Westcot, 1984).

- *Bore*

Bien que le bore soit un élément essentiel à la croissance des plantes, la quantité nécessaire est relativement faible et sa présence en excès peut être toxique. Les concentrations toxiques de bore dans l'eau d'irrigation proviennent plus souvent des eaux souterraines ou des eaux usées ayant subi un traitement secondaire que des eaux superficielles (**Ayers et Westcot 1976**).

La concentration de bore total dans l'eau d'irrigation ne devrait pas dépasser 0,5 mgAL-1 dans le cas des plantes sensibles, mais elle peut s'élever jusqu'à 6 mgAL-1 dans le cas des plantes tolérantes. (**RQEC, 2008**).

- *chlorure*

Bien que les chlorures soient essentiels à la croissance des plantes, la plupart des plantes ligneuses (fruits à noyaux, agrumes, avocats) sont sensibles même à de faibles concentrations de chlorures, contrairement à la plupart des cultures légumières, céréalières, fourragères et des cultures de fibres (**Chapman 1966, Oster et Rhoades 1984**). Les chlorures peuvent endommager les plantes de deux façons. D'une part, l'ion chlorure peut être absorbé par les racines et remonter pour s'accumuler dans les feuilles, comme le sodium. Son accumulation en excès provoque alors la brûlure des feuilles, la chlorose et le dépérissement des rameaux. D'autre part, si l'on pratique une irrigation par aspersion, l'absorption directe des chlorures par les feuilles peut causer des dommages, en particulier lors des journées chaudes et venteuses (**Bernstein 1965**).

II.4.3. Classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation

La plupart de ces classifications se basent sur le calcul de deux facteurs essentiels, à savoir la salinité représentée par la conductivité électrique « CE » et le taux d'absorption du sodium nommé « SAR » (Sodium Absorption ratio).

La classification des eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent a été proposée par différents auteurs et qui sont présentés dans le tableau 04.

Tableau 04 : Evaluation du danger de salinité selon plusieurs sources.

Classe de salinité	US Salinity Laboratory de Riverside (1954)	Thorn and Peterson (1954)	Carter (1969)	Ayers and Westcot (1984)
	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)
C1	0.1-0.25	<0.25	<0.4	<0.75
C2	0.25-0.75	0.25-0.75	0.4-1.2	0.75-1
C3	0.75-2.25	0.75-2.25	1.2-2.25	1.5-3.0
C4	>2.25	2.5-4.0	2.25-4.0	>3.0
C5		4.0-6.0		

C1 : satisfaisante pour toutes les cultures excepté les cultures très sensibles.

C2 : Généralement satisfaisante bien que quelques cultures sensibles seront affectées.

C3 : Satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats.

C4 : Normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées. Le lessivage et le drainage sont impératifs.

Les eaux d'irrigation peuvent être classées selon le taux d'absorption du sodium, en anglais (Sodium Absorption ratio(SAR)) qui est calculé par la formule élaborée par (**Gapon, 1933**) & (**Richards, 1954**) et elle est formulée comme suit :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Mg + Ca)/2}} \quad \left(\text{en } \frac{\text{még}}{\text{l}} \right)$$

II.4.3.1. La classification des eaux par l'USSL - Riverside (1954)

Cette classification se base sur les effets directs des eaux d'irrigation par apport aux sels et au sodium. L'impact de ce dernier est exprimé par le SAR. La classification de l'USSL préconise des domaines de qualité des eaux pour prédire les effets de ces eaux d'irrigation.

Le tableau 05 montre les différentes classes représentant les risques croissants de l'alcalinité des eaux d'irrigation en fonction du SAR.

Tableau 05 : Les classes de SAR et leurs interprétations.

Nomination	Classe	Interprétation
Classe 1 (S1)	$0 < SAR \leq 10$ 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 2 (S2)	$10 < SAR \leq 18$ 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 3 (S3)	$18 < SAR \leq 26$ 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 4 (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.

Dans la plupart des cas et pour la prédiction de l'effet des eaux d'irrigation en considérant les deux critères en même temps (salinisation et sodium), la classification de Riverside de l'USSS (1954) est la plus utilisée. Comme il est expliqué dans la figure 08, le diagramme de Riverside repose sur le croisement des deux critères.

Les classes des eaux (C1S1,...C5S4) correspondent, dans le diagramme de Riverside 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.

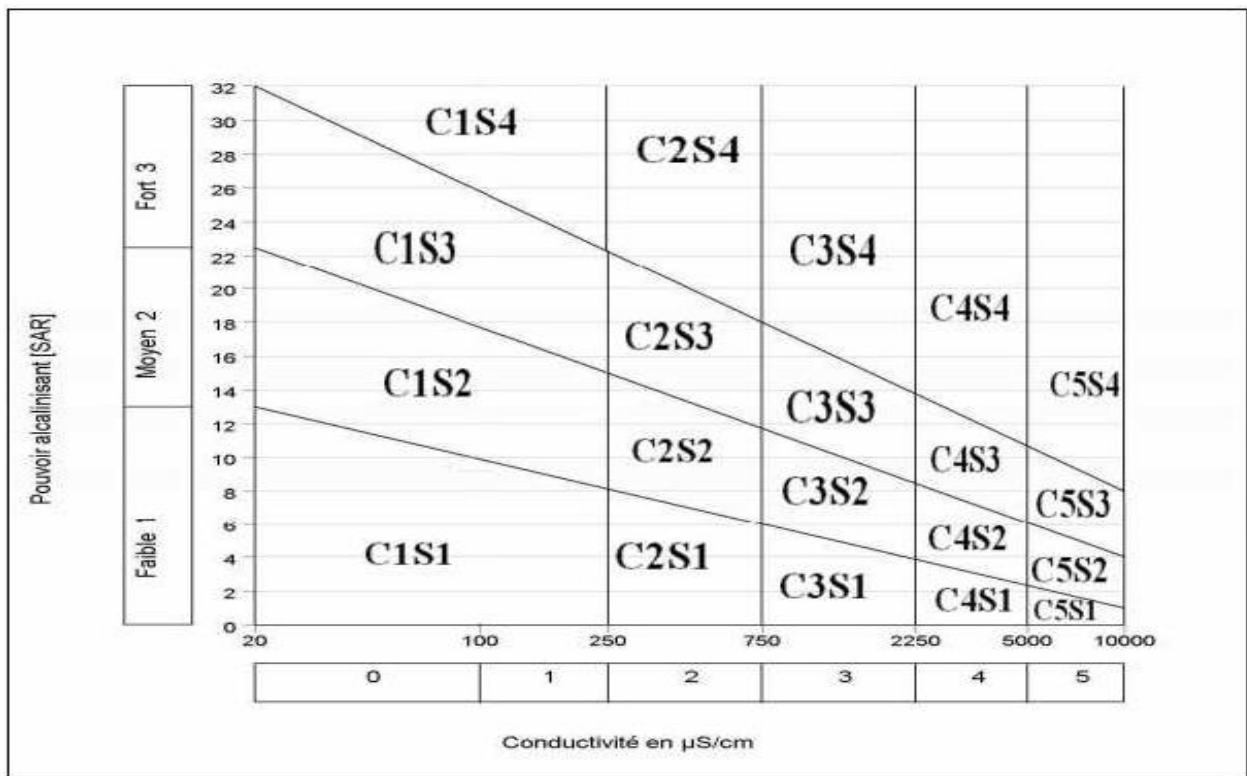


Figure 08 : Diagramme de Riverside (1954).

Le tableau 06 qui complète le diagramme de Riverside est consacré à l'interprétation des classes d'eau issues du diagramme de Richards (1954) vis-à-vis de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

Tableau 06 : Interprétation des classes issues de la projection sur le diagramme de RIVERSID.

Classe	Interprétation
C1S1	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
C1S2, C2S1	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
C1S3, C2S2 et C3S1	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
C1S4, C2S3, C3S2 et C4S1	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.
C2S4, C4S2 et C3S3	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.
C3S4, C4S3	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
C4S4, C5S3 et C5S4	Eau déconseillée pour l'irrigation.

(Source : Durant 1982)

II.4.3.2. Classification selon la FAO

La FAO a établi également une classification des risques de salinisation et d'alcalinisation des sols par les eaux d'irrigation. Cette classification utilise également la conductivité électrique comme indicateur de salinité et le SAR comme indicateur de la sodicité. D'après cette classification (Figure 09), une eau d'irrigation ne représente aucun risque si sa CE est inférieure à 0,7 dS/m alors qu'une eau dont la CE est, supérieure à 3 dS/m empêche le bon développement des plantes (Ayers et Westcot, 1985). Pour évaluer les risques de sodicité, le SAR de l'eau a été ajusté afin de prendre en compte le phénomène de précipitation des carbonates au contact du sol.

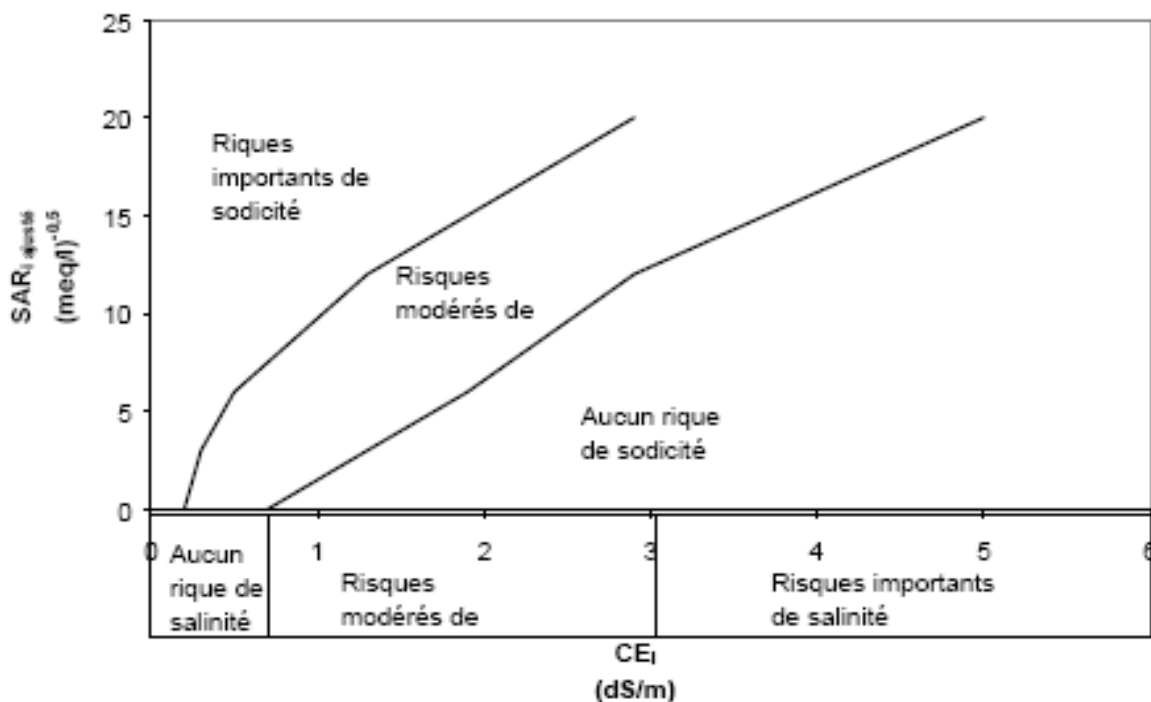


Figure 09 : Risques de sodicité des eaux d'irrigation.

II.4.4. Les normes d'une eau d'irrigation

Le tableau 07 montre les normes fixées par la FAO (1996) pour l'utilisation des eaux d'irrigation.

Tableau 07 : Les normes des eaux d'irrigation fixée par la **FAO, 1996**.

Paramètre de l'eau	Symbole	Unité	Valeur maximale admissible
Conductivité électrique	CE	dS/m	3
Total des sels dissous	TDS	mg/l	2000
Calcium	Ca ⁺⁺	mg/l	400
Magnésium	Mg ⁺⁺	mg/l	60,75
Sodium	Na ⁺	mg/l	920
Carbonates	CO ₃ ⁻⁻	mg/l	3
Bicarbonates	HCO ₃ ⁻	mg/l	610
Chlore	Cl	mg/l	1065
Sulfates	SO ₄ ⁻	mg/l	960
Nitrates	NO ₃ ⁻	mg/l	10
Ammonium	NH ₄ ⁺	mg/l	5
Phosphate	PO ₄ ⁻	mg/l	2
Potassium	K	mg/l	2
Acidité	pH	-	6 – 8,5
Coefficient d'absorption du sodium	SAR	-	15
Bor	B	mg/l	2

Le tableau 08 est un complément avec plus de détail que le tableau 07 pour les paramètres les plus utilisés dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraine. C'est également une source de la FAO qui a été synthétisée par **Ayers et Westcot (1985)**.

Tableau 08 : Les directives pour l'interprétation d'une eau d'irrigation.

Nature du problème	Unité	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modérée	Forte
Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)				
CEi	dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
Infiltration (influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol : utiliser à la fois CEi et SAR)				
SAR = 0-3 et CEi =		>0.7	0.7-0.2	<0.2
SAR = 3-6 et CEi =		>1.2	1.3-0.3	<0.3
SAR = 6-12 et CEi =		>1.9	1.9-0.5	<0.5
SAR = 12-20 et CEi =		>2.9	2.9-1.3	<1.3
SAR = 20-40 et CEi =		>5.0	5.0-2.9	<2.9
Toxicité de certains ions (affectent les cultures sensibles)				
Sodium :				
Irrigation de surface	SAR	<3	3-9	>9
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	□
Chlore :				
Irrigation de surface	méq/l	<4	4-10	>10
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	
Bore	mg/l	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Eléments traces:	Concentration maximale d'éléments à l'état de traces recommandées pour les eaux d'irrigation			
Effets divers (affecte les cultures sensibles)				
Azote (NO ₃ -N)	mg/l	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO ₃) (pour aspersion sur frondaison)	méq/l	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH		Zone normale : 6.5 - 8.4		

II.5. Vulnérabilité des nappes à la pollution

La pollution des eaux superficielles est très perceptible, attire de suite l'attention sur les dangers et les mesures à prendre pour la combattre. Par contre la pollution des eaux souterraines est moins apparente, de telle sorte que la tendance générale est de la négliger. Mais elle n'en est pas moins dangereuse, car elle atteint les ressources les plus précieuses par leur qualité et la nature de leurs réserves. (Schoeller 1971).

En faisant disparaître les polluants dans le sol, on pense que l'on s'en débarrasse définitivement, ce qui est bien pratique, en conscience légère. En réalité on les cache tout simplement, et l'on pollue les nappes d'eau souterraine. Or les eaux souterraines constituent une

réserve immense dont on ne pourra pas se passer. C'est de l'eau pure, normalement protégée par les terrains qui la recouvrent, et par filtration au sein de l'aquifère. Lorsque la pollution y pénètre, en particulier par infiltration massive en un lieu, elle est plus ou moins retardée, et non pas directe et rapide comme dans le cas des eaux superficielles. Par contre la contamination est beaucoup plus longue à disparaître en raison de la lenteur de la circulation de l'eau souterraine. Dans le cas de terrains karstiques les caractères de la pollution peuvent être semblables à ceux des eaux superficielles (**Schoeller 1971**).

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. Les aquifères superficiels sont très proches des activités humaines et leurs eaux peuvent aisément être contaminées (**Olivier, 2005**).

Les nappes alluviales sont en connexion hydraulique avec le cours d'eau ; la qualité de leur eau dépend de celle de la rivière. Un trait essentiel de ce type de nappe est la liaison privilégiée qui existe entre celle-ci et le cours d'eau qui la traverse. En situation naturelle (c'est-à-dire sans captage), le cours d'eau draine, le plus souvent, la nappe. Cette situation s'inverse temporairement lors des crues. Quand les captages sont implantés dans l'aquifère à proximité de la berge, les échanges ne s'effectuent alors que dans le seul sens rivière-nappe du fait de la mise en dépression de la nappe par les pompes (**Doussan et al, 1995 in Detay, 1997**).

II.5.1. Pollution des eaux souterraines

On appelle pollution tout facteur physique, chimique, ou biologique rejeté dans un émissaire, ou une réserve d'eau naturelle superficielle ou profonde, et qui risque de perturber à plus ou moins longue échéance l'équilibre biologique de cette eau, et de le rendre susceptible de causer tort à autrui.

Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où elle présente un danger pour l'environnement (**Castany, 1982**). Les pollutions d'origine anthropique sont liées à l'activité agricole, industrielle ou bien aux diverses utilisations domestiques de l'eau.

II.5.2. Les origines des pollutions

Un large classement des causes des pollutions est proposé par **Schoeller 1971**. Tout d'abord il y a lieu de considérer séparément les pollutions biologiques, les pollutions chimiques et les pollutions radioactives, car chacun de ces groupes requiert un traitement particulier.

Les origines peuvent être ainsi classées :

- **Habitats humains** : pollution essentiellement biologique ; excréments, fosses d'aisance, puits perdus, décharge des villes, puits, etc. ; conduites d'eau d'égout, eaux résiduaires, bassins de purification.
- **Fermes** : pollution essentiellement biologique ; habitats, animaux, fumier, fosse à purin etc., puits etc.
- **Cultures** : pollution biologique, par épandage de fumier, de gadoues, par irrigation d'eau d'égouts ; pollution chimique, par épandage d'engrais minéraux ; chlorures et sulfate et nitrate de potassium, sels ammoniacaux, nitrate, phosphates etc. ; par irrigation amenant une augmentation de la salure par évapotranspiration, salure qui se transmet aux nappes par infiltration; par traitements antiparasitaires, pesticides etc.
- Eaux de rivières, canaux de navigation, canaux d'adduction, lacs, barrages, recharges artificielles.
- Eau de mer.
- **Industrie** : Les pollutions chimiques et biologiques vont souvent de pair mais on peut mettre à part les usines atomiques. Industries des produits pétroliers; forages, raffineries, réservoirs, oléoducs, réservoirs souterrains, postes de pompes à essence etc.; déchets des Mines, par exemple de sels de sodium ou de potassium arrivant à saler dangereusement les nappes superficielles, terrils, exhaurage etc. industries métalliques; industries chimiques; papeterie; sucrerie; distillerie; laiterie; teinturerie; lavage de laine etc.; usines atomiques à déchets liquides et déchets solides etc.

CHAPITRE III

Matériels et Méthodes

III.2. Les méthodes d'analyse de données

III.2.1. Analyse en composantes principales

L'ACP, est un procédé statistique essentiellement descriptif, son objectif est de présenter, d'une manière graphique, le maximum d'informations contenu dans un tableau de données. De ce fait, cette méthode est conçue pour convertir les variables d'origines en de nouvelles variables, non corrélées entre elles, appelées composantes principales. Ces dernières sont des combinaisons linéaires entre les variables de départ ; Une fois les axes principaux sont définis, l'ACP procède à une projection de ces variables dans le nouveau espace à faibles dimensions formé par les facteurs orthogonaux (composantes principales) (**Bishop, 1995**).

Les droites et les plans issus d'une ACP ne seront pas réalisés avec les variables initiales mais avec des indices synthétiques obtenus par combinaison linéaire de variables initiales. La méthode cherche d'abord l'indice pour lequel la variation des individus est maximale : cet indice est appelé première composante principale ou premier axe principal.

Ensuite, une seconde composante est recherchée et ceci sous deux conditions :

- Avoir une corrélation nulle avec la première.
- Avoir, à son tour, la plus grande variance.

Ainsi, cette deuxième composante fournit la plus grande information non expliquée par la première (**Dervin, 1992 ; Philipeau, 1992**).

Le processus se déroule ainsi jusqu'à l'obtention de la dernière composante principale, la part d'information expliquée par chacune d'elle devenant de plus en plus faible (**Diday et al. 1982 ; Philipeau, 1992**).

III.2.2. Classification hiérarchique ascendante

L'analyse hiérarchique ascendante (Hierarchical Cluster Analysis, HCA) est une méthode de classification non supervisée des données. Les objets sont regroupés de façon séquentielle en classes ou clusters selon un critère de ressemblance. Ce critère est défini par la distance inter-élément. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'un arbre hiérarchique appelé dendrogramme. De manière générale, on utilise l'algorithme de Ward pour effectuer le regroupement. L'algorithme est le suivant (**Lasch et al. 2004**) :

- la matrice de distance entre objet est calculée. C'est une matrice symétrique qui contient les distances entre les individus deux à deux.

- les deux individus les plus proches sont regroupés en un cluster. Ce cluster sera représenté par son centroïde. Une nouvelle matrice de distance est calculée entre tous les individus restants et le cluster nouvellement formé. Les deux objets les plus proches (individu/cluster ou individu/individu) sont regroupés en un même cluster.
- le processus s'arrête lorsqu'une seule classe regroupant tous les individus est formée.

Les méthodes hiérarchiques diffèrent entre elles par le choix du critère de ressemblance et par la façon de mesurer les ressemblances entre un nouveau groupe fusionné et les autres inchangés.

III.2.2.1. La méthode "single linkage" ou "plus proche voisin"

Ou encore saut minimum (la distance entre parties est la plus petite distance entre éléments des deux parties) (Figure 11).

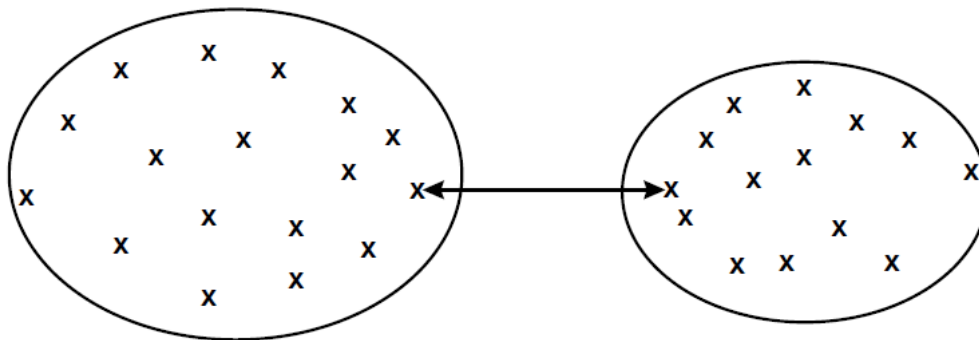


Figure 11 : La méthode "plus proche voisin".

III.2.2.2. La méthode "complete linkage" ou "voisin le plus éloigné"

Ou encore saut maximum (la distance entre parties est la plus grande distance entre éléments des deux parties) (Figure 12).

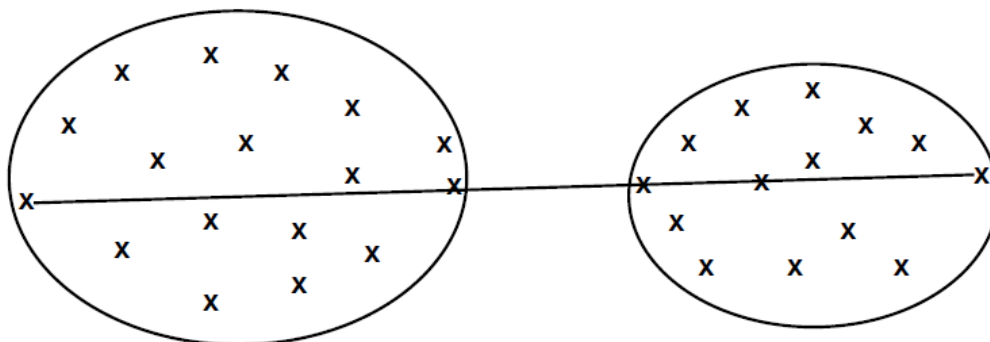


Figure 12 : La méthode "voisin le plus éloigné".

III.2.2.3. Les méthodes intermédiaires

Ces méthodes définissent une ressemblance 'moyenne' entre groupes. Il en existe plusieurs variantes par ex. "average linkage"

D'autres méthodes compromises existent, certaines ne peuvent être utilisées qu'avec certains types de mesures de ressemblance.

III.2.2.4. Le dendrogramme

Puisque les méthodes hiérarchiques fusionnent les groupes à des degrés décroissants de ressemblance, il est naturel de représenter les résultats de la classification au moyen d'une structure arborescente que l'on appelle dendrogramme.

Il peut être intéressant de fournir l'algorithme pour la construction d'un dendrogramme qui consiste à ordonner les observations de telle sorte qu'il n'y ait aucun croisement entre les diverses branches du dendrogramme.

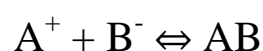
- i. placer les observations selon un ordre quelconque de gauche à droite
- ii. s'il ne reste qu'un seul groupe, on termine.
- iii. prendre les groupes compris entre les groupes qui fusionnent et les déplacer rigidement à la droite de la dernière observation du groupe fusionné situé le plus à droite.
- iv. retourner à ii.

III.2.3. L'alcalinité résiduelle en tant que méthode d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation

III.2.3.1. Précipitation et dissolution de minéraux

C'est le processus de concentration de la solution du sol qui est à l'origine de la salinisation (Vallès et al. 1989). Ce processus graduel s'accompagne de la précipitation successive des minéraux, du moins soluble au plus soluble. Dans une solution où deux ions A^+ et B^- sont susceptibles de se combiner pour former un minéral AB, il faut envisager deux phases distinctes au cours du processus de concentration :

- En deçà de la saturation de la solution vis à vis du minéral, la paire d'ions se concentre à la même vitesse que l'ensemble de la solution ;
- à l'équilibre, les ions précipitent comme suit :



Les conditions de l'équilibre sont régies par :

$$K_s = \frac{(A^+)(B^-)}{(AB)}$$

Avec : (A^+) activité ionique de A ; (B^-) activité ionique de B

K_s , désigne une donnée thermodynamique du minéral AB, constante à une pression et à une température données.

Pour un minéral AB, $(AB) = 1$ par convention (**condom, 2000**), de sorte que lorsque le minéral et la solution sont en équilibre, on obtient :

$$K_s = (A^+) (B^-)$$

$$-pK_s = \log (A^+) + \log (B^-)$$

Où, pK_s : produit de solubilité du minéral AB.

Les activités des ions A et B ne peuvent croître simultanément : le produit de solubilité étant constant, la concentration simultanée des deux espèces chimiques présentes ne peut se faire. En fonction de leur rapport de concentration dans la solution, la concentration de l'espèce majoritaire va s'accroître tandis que celle de l'espèce associée va diminuer jusqu'à s'annuler (**Vallès et al. 1989**). Cette propriété connue sous le nom de « Loi du T » (Figure 13) (**Vallès et al. 1989 ; Tabet, 1999 ; Condom, 2000 ; Barbério et al. 2004 ; Marlet et Job, 2006**) constitue aujourd'hui ce qu'on appelle la loi de l'alcalinité résiduelle. Elle permet de prévoir quel est l'ion dont l'activité croît lors de la concentration (**Samba, 1998 ; Barbério et al. 2004**).

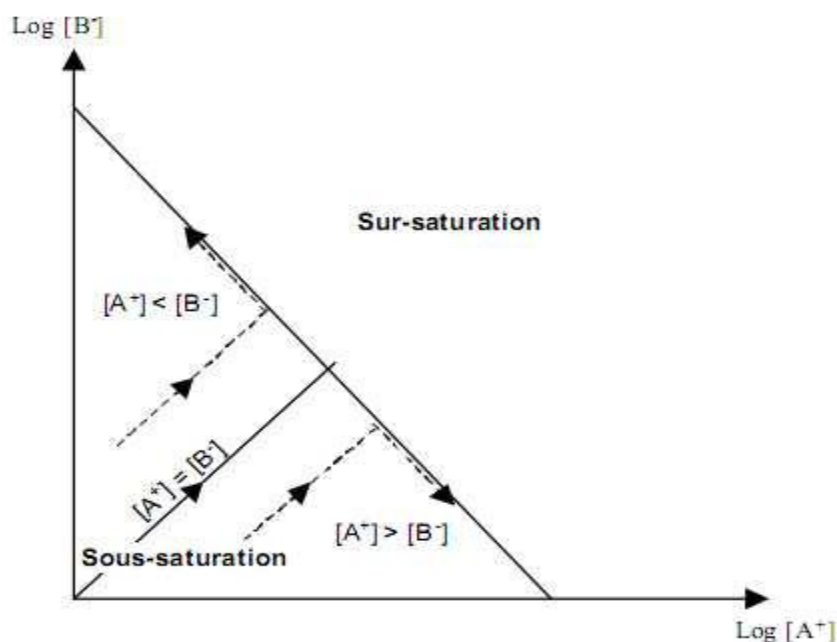


Figure 13 : Evolutions de la concentration des ions selon la loi du T (**Vallès et al. 1989**).

III.2.3.2.L'alcalinité résiduelle

L'alcalinité résiduelle n'est qu'autre que le concept proposé par **Eaton, (1950)**, et **Richards, (1954)**, nommée « Residuel Sodium Carbonates (RSC) », elle est définie comme étant la part de l'alcalinité qui n'est pas neutralisée par les cations divalents (**Al Droubi, 1976**). Elle est souvent considérée à la précipitation de la calcite et de la sépiolite (**Condom, 2000 ; Marlet et Job, 2006**).

$$RSC = (HCO_3 + CO_3) - (Ca + Mg) \dots\dots\dots (mmol_c.L^{-1})$$

Cependant, dans les milieux où on assiste qu'à la précipitation de la calcite, **Hardie et Eugster, (1970)**, puis **Van Beek et Van Breemen, (1973)**, définissent la notion d'alcalinité résiduelle calcite (AR calcite), elle est calculée :

$$AR_{calcite} = (HCO_3 + CO_3) - Ca \dots\dots\dots (mmol_c.L^{-1})$$

Enfin, la généralisation de l'alcalinité résiduelle (ARG) intervient avec **Al Droubi et al. (1980)**. Elle est relative à la précipitation de plusieurs minéraux successive. Aussi, l'ARG est particulièrement efficace pour prévoir le sens d'évolution des concentrations de différents éléments dissous et en conséquence la voie du faciès chimique. Historiquement, ce fut sa première application.

III.2.3.3. Signe d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des eaux

Le concept de l'alcalinité résiduelle (RA) est souvent employé pour analyser les changements et les prévisions de la composition des eaux en fonction des taux de concentration initiale d'une eau d'irrigation. Comparé à la méthode classique du SAR, l'alcalinité résiduelle tient compte des processus géochimiques qui modifient la composition de l'eau d'irrigation qui, potentiellement, va augmenter le risque d'adsorption du sodium du sol irrigué (**Al Droubi, 1976 ; Marlet et Job, 2006**).

Donc, pour prédire l'évolution de la composition chimique d'une eau d'irrigation, le concept d'alcalinité résiduelle est utilisé. Ce concept a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (**Van Beek, et al. 1973 ; Barbiero et Valles, 1992**). Selon **Vallès et al. (1989)** puis **Barrios-Gonzales, (1992)**, arrivé à **Barbiéro et al., 2004** et **Marlet et Job, (2006)**, préconisent tous qu'il est indispensable d'introduire l'alcalinité résiduelle comme critère d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation (Figure 14).

Le principe de l'alcalinité résiduelle est généralisé à la précipitation de tous les minéraux et permet d'évaluer la composition chimique de l'eau d'irrigation lorsqu'elle atteint une

concentration supérieure au seuil de précipitation du minéral pris en considération. Ainsi, la différence entre la concentration équivalente en bicarbonates et carbonates et celles des cations divalents Ca et Mg si elle est positive (>0), a été introduite pour évaluer la précipitation de la calcite et de la sépiolite qui à leurs tours vont influencer la valeur du SAR qui voit sa valeur augmentée dans la solution (Tabet, 1999 ; Condom, 2000).

$$RSC = \text{Alcalinité carbonatée} - Ca - Mg > 0 \dots\dots\dots (\text{mmol}_c.L^{-1})$$

De même, l'alcalinité résiduelle calcite/sépiolite/gypse se réfère à la précipitation de la calcite, de la sépiolite et du gypse et elle se définit par :

$$AR-CSG = \text{Alcalinité carbonatée} - (Ca - Mg) + SO_4 > 0 \dots\dots (\text{mmol}_c.L^{-1})$$

Si le RSC est positif, c'est la voie alcaline relative à la précipitation de calcite/sépiolite. Pour ces eaux de type 01 (alcalinité résiduelle positive), il existe un risque majeur d'alcalinisation et de dégradation des propriétés physiques des sols par sodisation dont ne rend pas compte le SAR des eaux d'irrigation initiale. Le risque de salinisation est secondaire, voire négligeable dans la mesure où ces eaux sont généralement peu salées.

Si le signe du RSC est négatif ($RSC < 0$), deux cas peuvent se présenter en fonction du signe de l'alcalinité résiduelle appliquée à la précipitation de calcite de sépiolite et de gypse (AR-CSG) (Marlet et Job, 2006).

- AR-CSG > 0 : L'alcalinité résiduelle devient positive suite à l'addition des sulfates relatifs à la précipitation du gypse, c'est la voie saline neutre à dominances sulfatées ; le risque principal est celui de la dégradation des propriétés physiques des sols suite à une sodisation rapide que le SAR ne caractérise qu'imparfaitement. On pourra secondairement relever un risque de salinisation en fonction de la conductivité électrique des eaux d'irrigation ;
- AR-CSG < 0 : L'alcalinité résiduelle devient négative même par addition des sulfates, on parle alors de la voie saline neutre à dominance chlorurée. Le risque principal est celui d'une salinisation des sols et le critère déterminant est leur conductivité électrique. La sodisation accompagne généralement cette salinisation en fonction du déséquilibre entre Na et (Ca + Mg), bien représentée par le SAR ; mais le risque de dégradation des sols est faible dans la mesure où la sodisation est progressive et la salinité alors suffisamment élevée pour assurer la stabilité structurale des sols (Samner, 1993 ; Douaoui et al. 2004 ; Marlet et Job, 2006).

Les différentes voies de salinisation et d'évolution géochimique des eaux ont été schématisées par Appelo et Prohma, (1993) puis Marlet et Job, (2006).

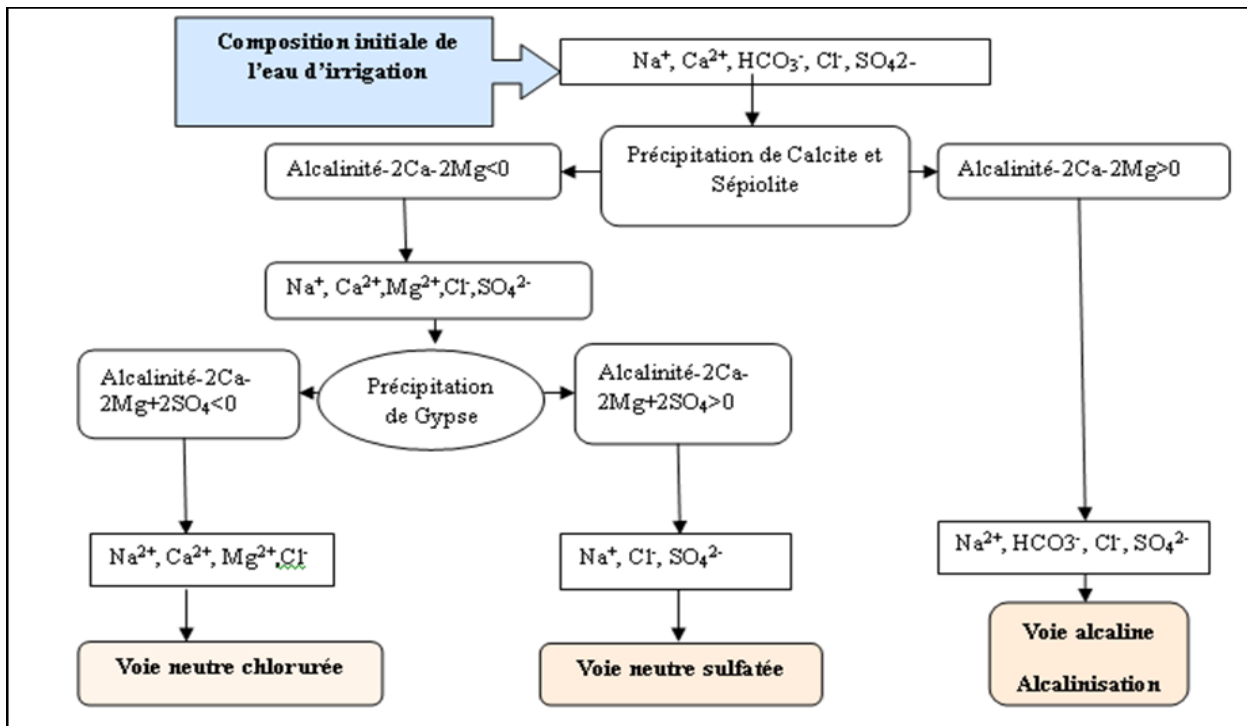


Figure 14 : Différentes voies d'évolutions d'une eau d'irrigation suite à la précipitation des minéraux (Appelo et Prohma, 1993 ; Marlet et Job, 2006)

CHAPITRE IV

Résultats et Discussion

IV.1. Introduction

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ...). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (Gouaidia L, 2008).

Le présent chapitre traite du chimisme des eaux souterraines des trois plaines de Chélif tout (haut, moyen et bas) dans le but de décrire l'aspect qualité des eaux utilisées pour l'irrigation.

IV.2. Caractérisation générale des eaux souterraines des plaines du Chélif

IV.2.1 Analyse statistique

Les analyses physico-chimiques des eaux de la plaine de Chélif (haut, moyen et bas) pendant l'année 2011 ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques. Afin de bien montrer et comprendre ces variations on a eu recours à :

- une représentation statistique descriptive des données qui présente les valeurs maximales et minimales, les moyennes, les écarts types et les coefficients de variations on comparant les résultats avec les différentes normes établies pour contrôler la qualité d'eau d'irrigation ;
- une représentation graphique de la composition ionique des eaux des plaines de Chélif dans un objectif de comparaison entre les teneurs des divers éléments majeurs constituant ces eaux (Haut, moyen et Bas-Chélif).

IV.2.1.1. Statistique descriptive

a. Haut-Chélif

Le tableau n° 09 montre une qualité chimique des eaux dominée par les anions dont les chlorures enregistrent la moyenne la plus élevée avec 466,14 mg/l pouvant ainsi causer un risque de toxicité pour certaines cultures (Ayers et Westcot, 1988) surtout que plus de 57% des puits dépassent le seuil de 10 meq/l. Ils sont suivis par les bicarbonates et les sulfates avec 291,25 mg/l et 289,84 mg/l respectivement. La CE enregistre une valeur moyenne de 2,60 dS/m qui dépasse légèrement la valeur maximale admissible (2,25dS/m) fixée par plusieurs auteurs (Riverside,

1954 ; Durand, 1982 ; Marlet et Job, 2006). Concernant le pH il varie entre 6,40 à 9,30 dont la valeur maximale dépasse la norme de la FAO 1996. Selon le SAR ces eaux sont utilisables pour l'irrigation avec un faible danger de sodisation (Riverside, 1954 ; Durand, 1982).

Les coefficients de variation sont élevés pour l'ensemble des variables et même très élevés pour le potassium (119,54%), et le SAR (105,41%), ce qui indique une variabilité spatiale importante de ces paramètres ; ce coefficient est plus faible pour le pH et les bicarbonates.

Tableau 09 : paramètres statistiques des variables physico-chimiques de la plaine du Haut-Chélif.

Variables	Unité	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	CV %
Calcium	mg/l	195,10	89,33	4,26	340,43	45,79
Magnésium		85,94	59,05	5,11	434,04	68,72
Sodium		197,44	158,43	12,00	1020,00	80,24
Potassium		3,84	4,58	0,07	23,20	119,54
Chlorures		466,14	324,06	60,00	2200,00	69,52
Sulfates		289,84	241,68	0,00	1630,00	83,38
Bicarbonates		291,25	93,68	15,25	701,50	32,17
Nitrates		58,24	48,98	0,00	270,00	84,09
pH		7,72	0,46	6,40	9,30	5,89
CE	dS/m	2,60	1,46	0,74	9,20	56,25
SAR		3,22	3,40	0,25	25,99	105,41

b. Moyen-Chélif

Tableau 10 : paramètres statistiques des variables physico chimiques de la plaine du Moyen-Chélif.

Variables	Unités	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	CV %
Calcium	mg/l	227,08	116,11	53,19	522,11	51,13
Magnésium		132,95	63,83	29,09	303,83	48,01
Sodium		354,36	224,30	61,00	1000,00	63,30
Potassium		7,32	10,06	0,00	47,00	137,44
Chlorures		696,59	386,06	102,00	1790,00	55,42
Sulfates		574,03	422,70	43,00	1860,00	73,64
Bicarbonates		319,84	112,38	146,40	579,50	35,14
Nitrates		34,64	26,57	2,00	95,00	76,71
pH		7,63	0,34	6,68	8,50	4,41
CE	dS/m	4,03	1,81	0,81	8,80	44,97
SAR		4,75	2,97	0,81	16,39	62,63

Les teneurs en chlorures sont les plus dominantes avec une moyenne de 696,59 mg/l (la toxicité par les chlorures est possible car plus de 86% des puits dépassent la valeur de 10 meq/l (Ayers et Westcot, 1988) suivies par les sulfates (574,03 mg/l) et le sodium (354,36 mg/l)

(tableau 10). La valeur moyenne de la CE (4,03 dS/m) indique un risque de salinisation très élevé du fait qu'elle est largement supérieure à la valeur de 2,25 dS/m retenue par plusieurs auteurs (**Riverside, 1954; Durand, 1982; Marlet et Job, 2006**). Par rapport au pH (7,63) l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation ne présente pas de danger d'alcalinisation des sols. Le SAR avec une moyenne de 5,23 indique un faible danger de sodisation des sols (**Riverside, 1954 ; Durand, 1982**).

Le coefficient de variation est très élevé pour le potassium avec 137,44 % montrant ainsi une hétérogénéité spatiale de cet élément ; il l'est moins pour les autres voire faible pour les bicarbonates (35,14 %) et le pH (4,41 %).

c. Bas-Chélif

Les teneurs en chlorures sont les plus élevées avec une moyenne de 643.98 mg/l ce qui pose un problème de toxicité des plantes du fait que plus de 80% des puits dépasse le seuil de 10 meq/l (**Ayers et Westcot, 1988**) (tableau 11). Survenant ensuite les sulfates et le sodium avec une valeur moyenne de 605,22 mg/l et 419.65 mg/l respectivement. La valeur moyenne de la CE (3.42 dS/m) indique que ces eaux sont normalement inutilisables pour l'irrigation selon **Riverside (1954) ; Durand (1982) ; Marlet et Job (2006)**. Par rapport au pH (7,61), ces eaux ne présentent aucun risque de salinisation. Le SAR enregistre une valeur moyenne de 6,22 ce qui montre un faible risque de sodisation (**Riverside, 1954 ; Durand, 1982**).

Le coefficient de variation est très élevé pour le potassium ce qui indique une variabilité spatiale très élevée de ce paramètre remettant ainsi en cause la moyenne non significative. Le CV est moyen pour la majorité des autres variables voire faible pour les bicarbonates (22,09 %) et le pH (5.13 %).

Tableau 11 : paramètres statistiques des variables physico chimiques de la plaine du Bas-Chélif.

Variables	Unités	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	CV%
Calcium	mg/l	174,61	90,29	48,10	448,90	51,71
Magnésium		126,43	69,01	24,61	290,35	54,59
Sodium		419,65	209,77	127,58	1152,19	49,99
Potassium		6,03	22,20	0,40	161,23	367,84
Chlorures		643,98	319,06	178,63	1616,90	49,54
Sulfates		605,22	331,53	102,82	1396,08	54,78
Bicarbonates		332,60	73,48	193,49	506,06	22,09
CE	dS/m	3,42	1,40	1,32	6,15	40,92
pH		7,61	0,39	6,80	8,10	5,13
SAR		6,22	3, 31	2,67	17,88	53,12

IV.2.1.2. Etude de la composition ionique des eaux des plaines du Chélif

a. Les cations

La figure ci-dessous résume la composition cationique des eaux souterraines des plaines de Chélif. Il apparaît que :

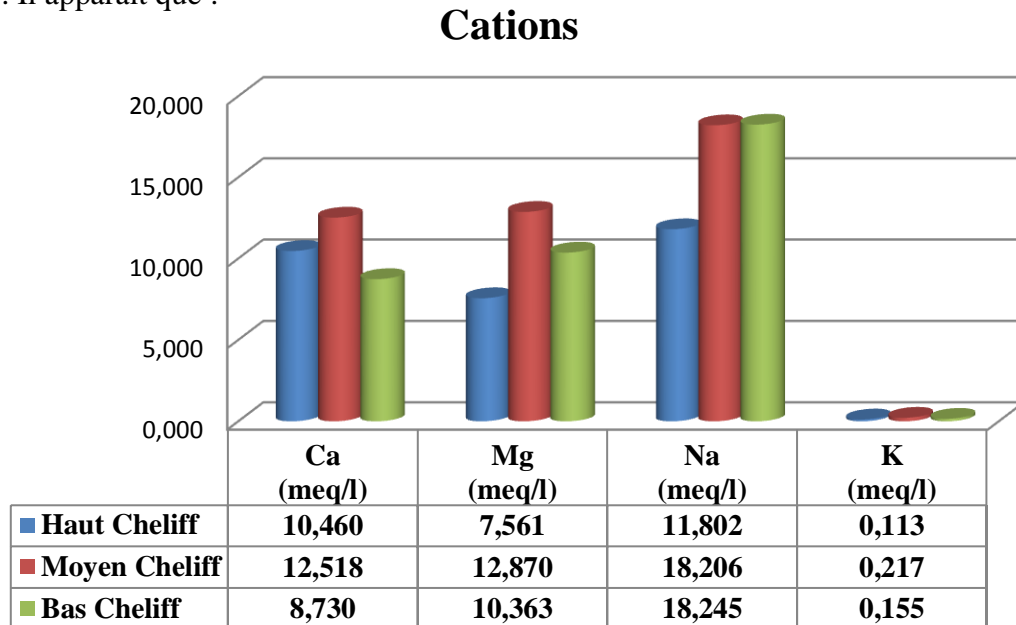


Figure 15 : composition cationique des eaux des plaines du Chélif.

Le sodium est le cation dominant la composition chimique de ces eaux, il enregistre la valeur moyenne la plus élevée dans les eaux du bas et du Moyen-Chélif. Cet élément peut provenir du matériel géologique (altération de minéraux primaires riches en sodium).

Quant au calcium et magnésium, ils enregistrent les moyennes les plus élevées dans les eaux du Moyen-Chélif. La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit à la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4). Les origines du magnésium sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) (**Debieche, 2002**).

Le potassium est l'ion le moins abondant dans les eaux de la plaine ; il marque des valeurs moyennes presque identiques dans les trois plaines avec des valeurs légèrement plus élevées dans le Moyen-Chélif. Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (Gneiss, Schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (**Debieche, 2002**).

On conclut que les eaux du Moyen-Chélif sont les plus chargées de point de vu cationique car elles enregistrent les moyennes les plus élevées pour les cations Ca^{+2} , Mg^{+2} et K^{+} , suivies ensuite par le Bas et le Haut-Chélif.

b. Les anions

La figure ci-dessous résume la composition anionique des eaux souterraines de la plaine de Chélif. Il apparaît que :

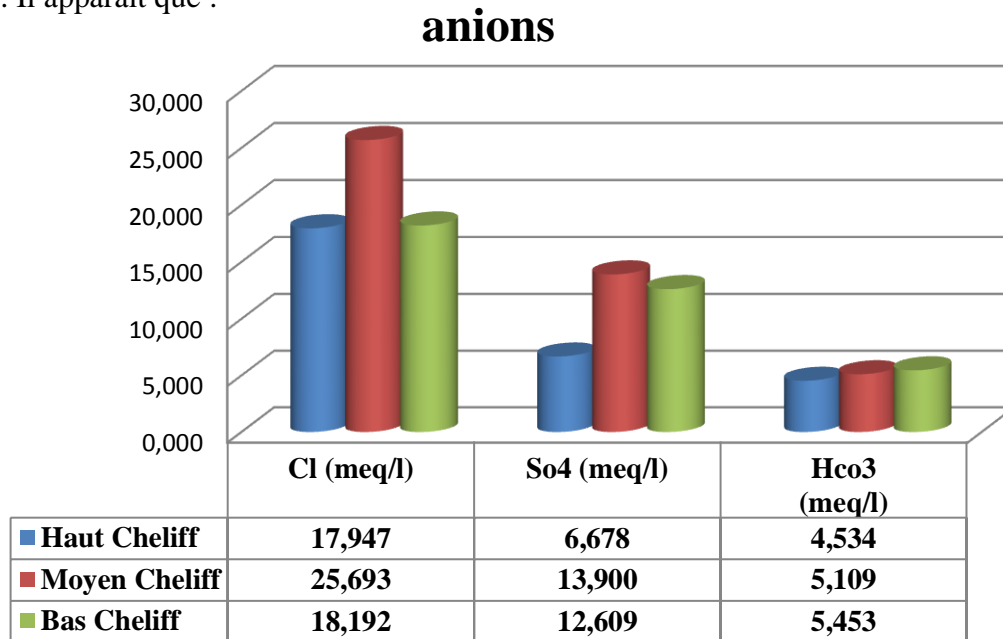


Figure 16 : composition anionique des eaux des plaines du Chélif.

La composition anionique est dominée par les chlorures dont la moyenne enregistrée dans les eaux du Moyen-Chélif est nettement supérieure par rapport à celle du bas et du Haut-Chélif. Les chlorures existent dans toutes les eaux naturelles à des concentrations très variables. L'origine peut en être naturelle (**Bremond et Vuichard, 1973**) ou autre telle que : percolation à travers des terres salées, infiltrations d'eaux marines dans les nappes phréatiques ou profondes, rejets humains (en particulier l'urine), industries extractives et dérivées (soudières, salines, mines de potasse, industries pétrolières...).

Les sulfates comme les chlorures marquent la moyenne la plus élevée dans les eaux du Moyen-Chélif. Les sulfates sont des composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et aussi du lessivage des terrils pyrifères où les sulfures entraînés s'oxydent au contact de l'air en sulfates (**Bremond et Vuichard, 1973**).

Les bicarbonates sont les moins abondants dans les eaux de la plaine, ces valeurs sont proches dans toutes les eaux des plaines. Le maximum est observé dans le Bas-Chélif. La présence des Bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (Cipolin, Calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique (**Hennia, 2006**).

Comme pour les cations, les eaux du Moyen-Chélif sont les plus chargées de point de vu anionique (les chlorures et les sulfates), suivies par celle du Bas et du Haut-Chélif.

IV.2.2. Les faciès hydro-chimiques

Dans le but de mieux identifier les faciès hydro chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil précieux. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et à celui de **Riverside, 1954**. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes, conçu par Roland Simler (**Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004**).

IV.2.2.1. Diagramme de Piper

Ce diagramme a la particularité de représenter plusieurs échantillons sur le même plan. Il est composé de deux triangles, permettant de déterminer les faciès cationique et anionique. Le faciès global est obtenu par intersection sur un losange synthétisant le faciès chimique de l'échantillon considéré.

a. Haut-Chélif

Le diagramme de Piper établi pour les eaux souterraines de cette plaine (figure 17) montre un équilibre anionique des eaux avec une certaine dominance des chlorures pour quelques échantillons. Du point de vue cationique, les eaux sont équilibrées aussi avec toutefois des échantillons calciques et autres sodiques ou potassiques. La projection des échantillons sur le losange donne le faciès global ; on obtient donc les faciès : chloruré calcique (faciès dominant), chloruré sodique ou potassique et bicarbonaté calcique.

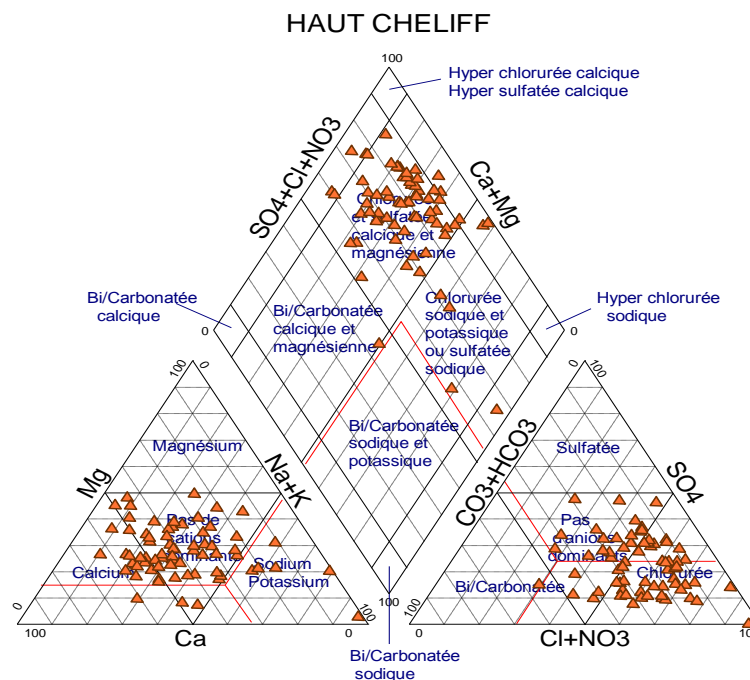


Figure 17 : diagramme de Piper des eaux du Haut-Chélif.

b. Moyen-Chélif

Le diagramme de piper établi pour les eaux souterraines de la plaine du Moyen-Chélif (figure 18) montre une dominance anionique chlorurée avec quelque fois des échantillons sulfatés ; concernant les cations ces eaux sont équilibrées avec quelques échantillons sodiques ou potassiques. Ceci révèle la présence de plusieurs faciès hydro chimiques dominés principalement par des groupes chlorurés et sulfatés qui peuvent être calciques ou magnésiques. Le groupe qui représente les faciès chlorurés et sulfatés soit potassique ou sodique est faiblement présenté.

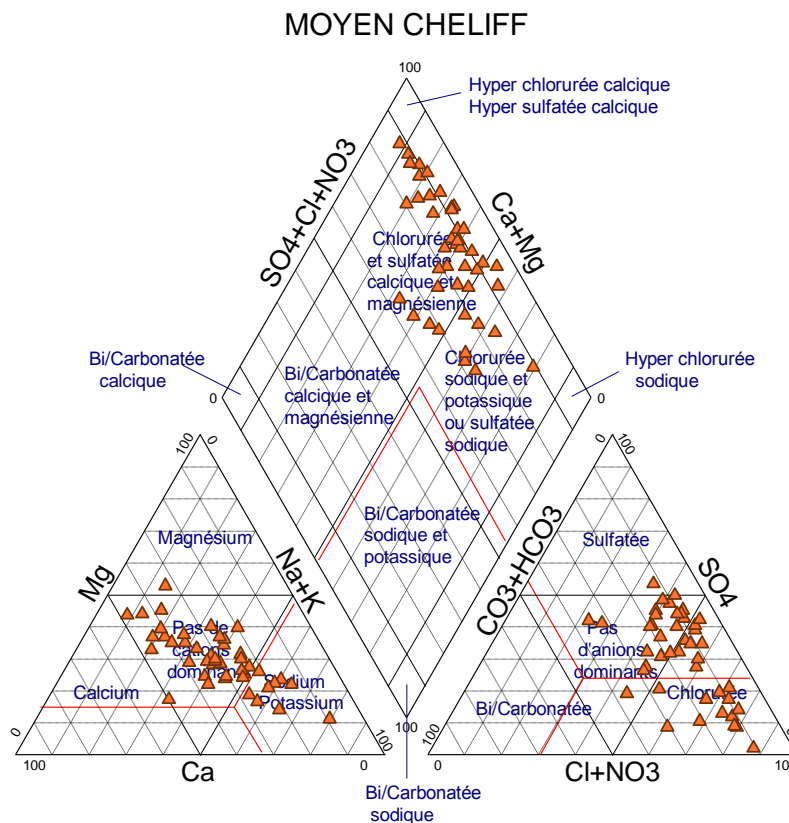


Figure 18 : diagramme de Piper des eaux du Moyen-Chélif

c. Bas-Chélif

Le diagramme de Piper a été utilisé pour déterminer les faciès chimiques des eaux destinées à l'irrigation de la plaine du Bas-Chélif (figure 19). Il apparaît que le triangle anionique est équilibré avec quelques échantillons chlorurés et autres sulfatés. Les cations sont représentés principalement par le calcium et le potassium et/ou le sodium. Ainsi plusieurs faciès généraux sont obtenus : chloruré sodique et sulfato-sodique ainsi que les faciès chlorurés et sulfatés qui peuvent être calciques et/ou magnésiques.

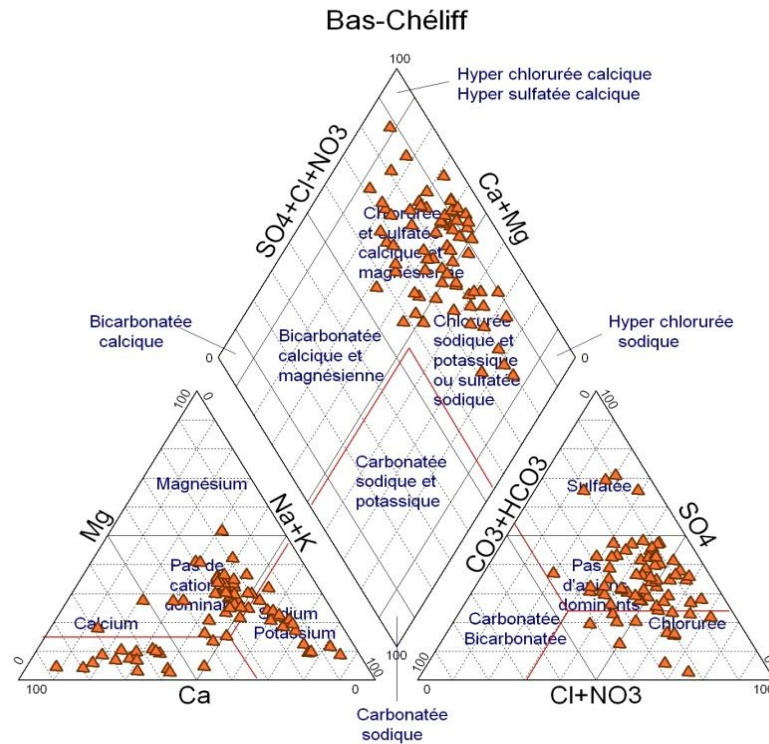


Figure 19 : diagramme de Piper des eaux du Bas-Chélif.

IV.2.2.2. Diagramme de Riverside

Le diagramme de Riverside qui est établi en fonction de la CE et du SAR tient compte de l'équilibre entre ces deux variables dont l'une influe sur l'autre. Le risque de la sodicité due au SAR est atténué en présence d'une salinité élevée (**Richards et al. 1954**).

a. Haut-Chélif

D'après le diagramme de Riverside établi pour les eaux souterraines du Haut-Chélif (figure 20), il apparaît l'existence de plusieurs classes de salinité et de sodicité qui sont réparties en huit classes dont les plus dominantes sont : C3S1, C4S1 et C4S2. Ces classes indiquent des eaux de mauvaises qualité pour l'irrigation du fait qu'elles présentent un fort danger de salinisation avec un risque de sodicité faible à moyen.

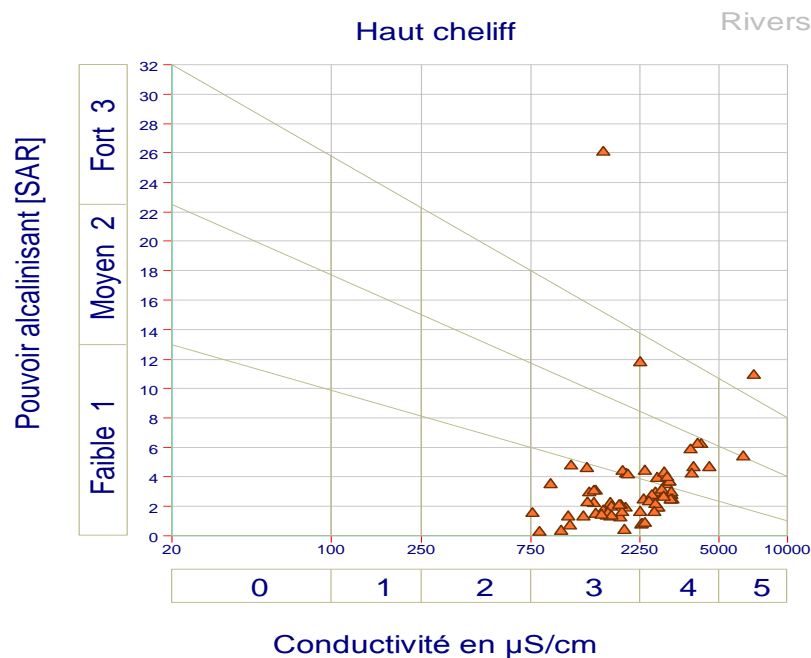


Figure 20 : diagramme de Riverside des eaux du Haut-Chélif

Plusieurs auteurs ont interprété les classes issues du diagramme de Riverside (figure 20). Selon **Durant (1982)**, ces classes sont qualifiées de la façon suivante :

- **C3S1** : Qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
- **C3S2 et C4S1** : Eau de qualité médiocre à mauvaise, à utiliser 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.
- **C4S2 et C3S3** : 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.
- **C3S4, C4S3** : Qualité très mauvaise à n'utiliser que pour les circonstances exceptionnelles.
- **C5S2 et C5S4** : Eau déconseillée pour l'irrigation.

b. Moyen-Chélif

Le diagramme de Riverside établie pour les eaux souterraines de la plaine du Moyen-Chélif (figure 21) montre que sur neuf classes : la C4S2 suivie par C4S1 et C3S1 qui sont les plus dominantes. Ces classes présentent un fort danger de salinité et un danger d'alcalinité faible à moyen. Les autres classes sont présentées à des proportions différentes.

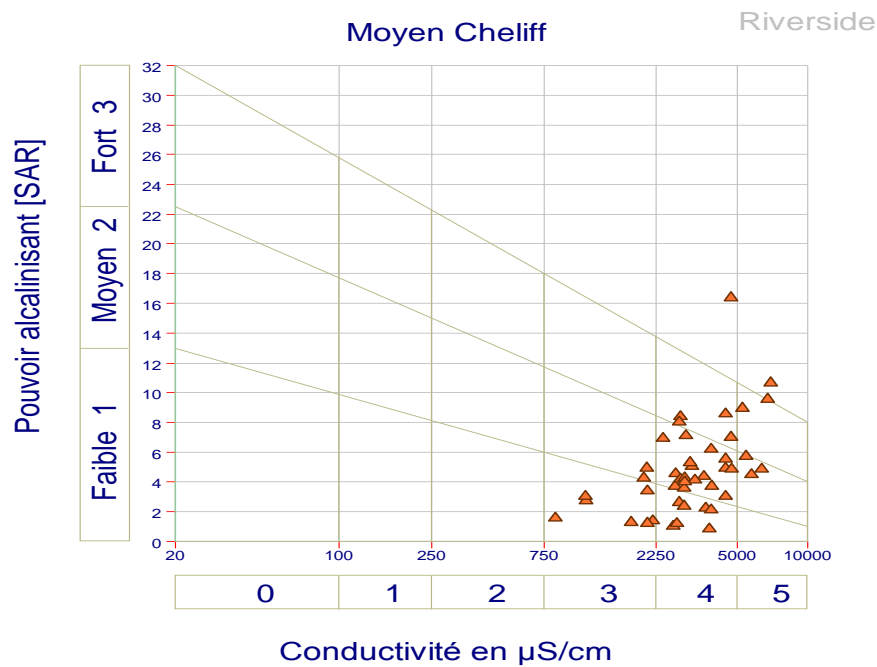


Figure 21 : diagramme de Riverside des eaux du Moyen-Chélif

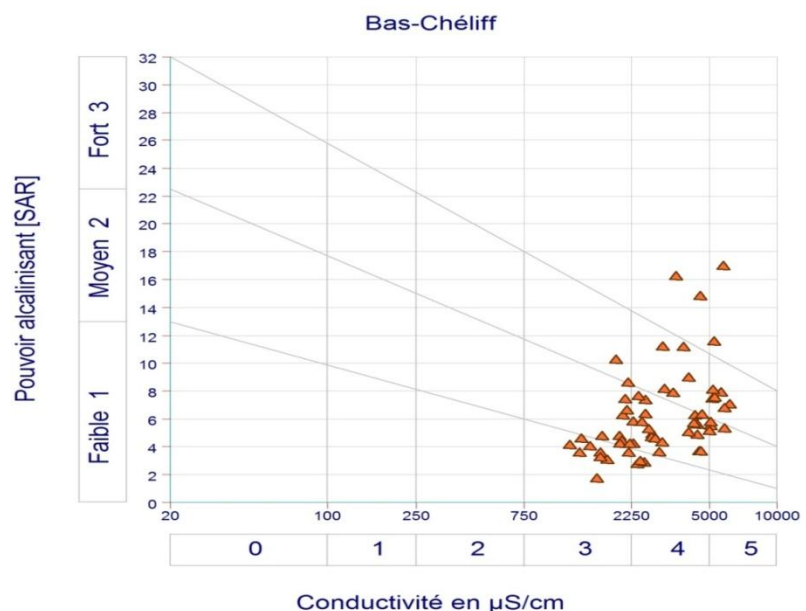
L'interprétation selon **Durant (1982)** de ces différentes classes est résumée comme suit :

- Les classes : **C3S1, C3S2, C4S1, C4S2, C4S3, C5S2, C5S4** sont interprétées précédemment ;
- **C4S4 et C5S3** : Eau déconseillée pour l'irrigation.

c. Bas-Chélif

D'après le diagramme de Riverside établi pour les eaux souterraines de cette plaine (figure 22), il apparaît l'existence de plusieurs classes de salinité et de sodicité dont C3S1, C3S2, C4S2, C4S3 et C5S3 sont les plus rependues indiquant une qualité mauvaise des eaux, car elles présentent des risque de salinité et de sodicité moyens à élevés.

Figure 22 : diagramme de Riverside des eaux du Bas-Chélif



- Les classes obtenues sont : C3S1, C3S2, C3S3, C4S2, C4S3, C4S4, C5S2, C5S3 et C5S4, elles sont interprétées précédemment.

IV.3. Analyse multidimensionnelle

Comme la qualité d'une eau ne dépend pas d'une seule ou de deux variables, les analyses statistiques simples monodimensionnelles et bidimensionnelles restent insuffisantes pour une bonne connaissance de la qualité de cette eau et dépend plutôt de l'interaction entre plusieurs variables. C'est pour cette raison que nous avons opté pour une analyse statistique multidimensionnelle (ACP) ou Analyse en Composantes Principales et une Classification Hiérarchique Ascendante (HCA).

L'analyse statistique multivariée est une approche quantitative et indépendante qui classe les eaux souterraines permettant ainsi la définition des groupes distincts d'échantillons d'eau ainsi que les corrélations entre les paramètres chimiques de ces échantillons (Vincent C, 2004). Notre étude a été structurée de la manière suivante :

En première étape une analyse en composante principale (ACP) est appliquée pour chaque plaine de Chélif séparément (Haut, Moyen et Bas-Chélif) dont l'objectif est de caractériser d'une manière générale les eaux de chaque plaine et puis de faire comparer la composition de ces eaux on faisant ressortir les ressemblances et les dissemblances entre les eaux des trois plaines.

En deuxième étape on fait une classification hiérarchique ascendante (HCA) pour les échantillons de toute la plaine du Chélif afin de classer statistiquement ces eaux en plusieurs classes distinctes selon les variables physicochimiques initiales. Puis, de voir si cette répartition des classes correspondrait ou pas à la répartition géographique dans les plaines de Chélif (Haut, Moyen et Bas-Chélif).

IV.3.1. L'analyse en composantes principales (ACP) des plaines du Chélif

Dans cette partie, trois analyses en composantes principales ont été effectuées sur des données physico-chimiques (11 variables) de l'année 2011 : analyse des eaux de la plaine de Haut-Chélif, analyse des eaux de la plaine de Moyen-Chélif et en fin l'analyse des eaux de la plaine de Bas-Chélif.

Dans notre étude, le but de l'ACP est de déterminer les origines et les principaux mécanismes de minéralisation à travers les corrélations entre les éléments et les individus. Cette analyse a été réalisée par le logiciel Spad Version 5.5.

IV.3.1.1. Haut-Chéiff

a. Analyse des variables

Le tableau des matrices de corrélations (tableau 12) renseigne sur les liaisons existantes entre les variables. Ce tableau montre :

- La plus grande corrélation (0,84) entre Na^+ et Cl^- ;
- Des corrélations deux à deux fortes à moyenne entre (Mg^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^- , Na^+) et (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl , SO_4^{-2}) prise deux à deux ;
- le potassium, les bicarbonates et les nitrates ne présentent aucune corrélation avec les autres variables.

Tableau 12 : coefficients de corrélations entre les variables initiales.

	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	HCO_3^-	NO_3^-
Ca^{+2}	1,00							
Mg^{+2}	0,52	1,00						
Na^+	0,35	0,55	1,00					
K^+	0,05	0,23	0,28	1,00				
Cl^-	0,67	0,66	0,84	0,12	1,00			
SO_4^{-2}	0,61	0,79	0,61	0,32	0,58	1,00		
HCO_3^-	0,00	0,12	-0,04	0,17	-0,19	0,08	1,00	
NO_3^-	0,21	-0,05	-0,21	-0,22	-0,05	-0,16	0,00	1,00

La valeur propre ou variance exprime le degré de dispersion des variables sur l'axe d'une composante principale. La variance expliquée par chaque axe est exprimée en pourcentage par rapport à la variance totale pour faciliter leurs interprétations.

Le premier axe principal à une valeur propre égale à 3,5772, il exprime 44,71 % de la variation totale. La deuxième composante explique 17,20 % de la variance totale. La part de l'information expliquée par deux axes du même plan est égale à la simple addition des parts des variances expliquées par Chacun d'eux. Ainsi, le plan formé par les deux premiers axes explique 64,92 % de la variance totale. Le troisième axe avec une valeur propre égale à 1,1290 exprime 14,11 % de la variance totale donc il sera pris en considération lors des interprétations.

Le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré renseigne sur la contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale ; autant que ce coefficient est important, autant la variable contribue à la formation de cet axe.

Tableau 13 : valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Valeur propre	3,5772	1,3762	1,1290	0,7071	0,5542
Variance expliquée	44,71 %	17,20 %	14,11 %	8,84 %	6,93 %
Ca⁺²	0,71	0,43	0,25	-0,03	0,21
Mg⁺²	0,85	-0,02	0,18	0,12	0,18
Na⁺	0,82	-0,11	-0,27	0,03	-0,46
K⁺	0,34	-0,65	0,11	-0,66	0,01
Cl⁻	0,89	0,24	-0,23	0,02	-0,25
SO₄⁻²	0,87	-0,11	0,13	0,06	0,30
HCO₃⁻	0,01	-0,43	0,80	0,32	-0,26
NO₃⁻	-0,13	0,71	0,49	-0,39	-0,21
pH	-0,21	-0,51	0,19	0,10	-0,22
CE dS/m	0,97	0,14	-0,04	0,05	-0,14
SAR	0,24	-0,32	-0,30	0,02	-0,53

Le tableau n° 13 montre que la majorité des variables présentent une bonne corrélation avec l'axe 1 ; il s'agit en l'occurrence et par ordre décroissant : CE, Cl⁻, SO₄⁻², Mg⁺², Na⁺, Ca⁺² donc c'est l'axe de la minéralisation d'origine géologique il traduit le processus prédominant du réservoir étudié et oppose ainsi les eaux minéralisées aux eaux faiblement chargées.

Les variables les plus corrélées à l'axe 2 sont par ordre décroissant : NO₃⁻, K⁺, pH, HCO₃⁻, Ca⁺² et SAR. Cet axe représente deux pôles : le premier est celui des bicarbonates lié à élément HCO₃⁻ et le deuxième représente la pollution nitratée.

Le troisième axe présenté également par les bicarbonates et les nitrates indiquerait une autre origine de pollution ces deux éléments dont l'une pourrait être agricole et l'autre urbaine.

Le cercle de corrélation (figure 23) établi entre les deux premières composantes principales exprime les mêmes résultats déduit des axes pris individuellement. Ces résultats sont quelques fois complémentaires. Il s'avère qu'il existe des forages représentés par l'axe 1 (l'axe de la minéralisation des eaux exprimée par la CE) : ces forages sont du point de vu anionique chlorurés et de point de vu cationique magnésiques. Le sodium et les sulfates ont également une grande influence sur la CE. Il peut être déduit de ce comportement l'existence de plusieurs types de sels avec une dominance des sels chlorurés magnésiques en premier lieu et chlorurés calciques et sodiques, sulfato-magnésique et sodiques en second lieu.

Les forages expliqués par l'axe 2 sont influencés par les bicarbonates qui font augmenter le SAR et par conséquent le pH. Ces eaux sont peu minéralisées par rapport aux eaux représentées par l'axe 1. Ces forages sont présentés par les facies bicarbonatés potassiques et bicarbonatés calciques.

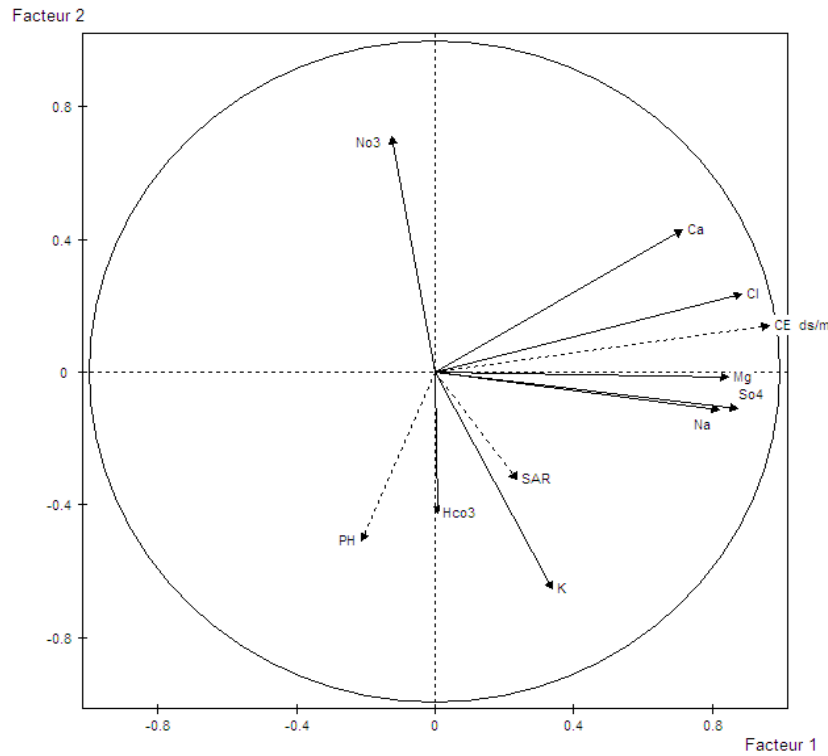


Figure 23 : cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Haut-Chéiff).

Les nitrates sont mal présentés sur ce plan et ils ne peuvent donc faire l'objet d'une interprétation qu'au plan formé par les deux axes 1 et 3.

b. Analyse des individus

La projection des individus (70 forages) sur le plan formé par les deux premiers axes (figure 24) permet de ressortir les forages qui forment des unités homogènes et cohérentes indiquant ainsi la même qualité chimique des eaux. Il apparaît clairement que la disposition des individus se fait essentiellement selon l'axe 1 excepté pour le groupe 3 dont la discrimination est due à l'axe 2. Quatre groupes ont donc été identifiés ;

Groupe I : 32, 38, 6, 11, 8, 16, 44, 27, 50, 37, 53, 23, 17, 60, 65, 31, 35, 34, 9, 18, 26, 5, 70, 25, 2, 21, 58, 66, 55, 54, 43, 61, 47.

Groupe II : 48, 40, 49, 3, 39, 67, 45, 41, 24, 13, 29, 12, 51, 64, 52, 57, 36, 10, 33, 7, 63, 20, 59, 68.

Groupe III : 28, 14, 1, 56, 62.

Groupe IV : 69, 22, 46, 19, 30, 4, 42, 15.

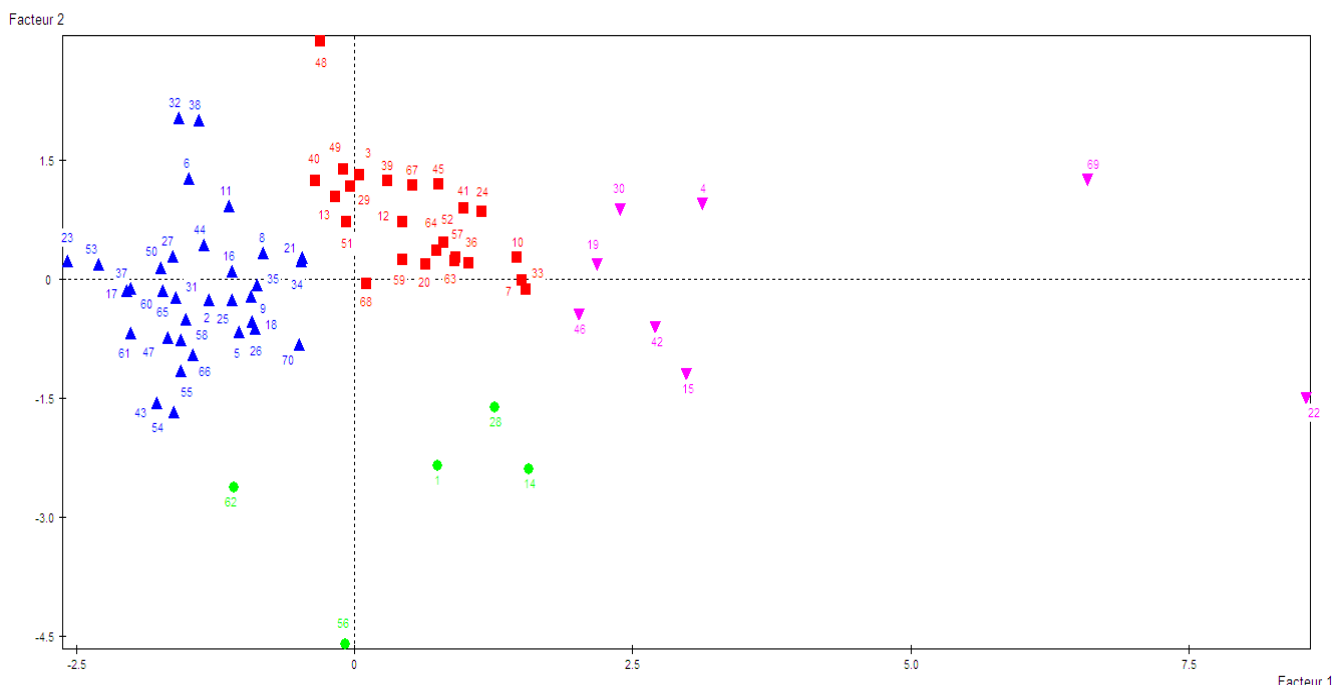


Figure 24 : répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Haut-Chélif).

Une analyse statistique (Min, Max, Moyenne, Ecart type et Coefficient de variation) a été réalisée sur les différents groupes obtenus par ACP.

Tableau 14 : statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Haut-Chélif.

Groupe	N	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	CE	SAR
Groupe I N=33	Min	0,21	0,42	0,52	0,00	1,74	0,00	0,24	0,00	6,40	0,74	0,25
	Max	11,49	10,17	14,66	0,30	12,83	7,27	6,73	3,28	9,30	2,25	25,99
	Moyenne	6,30	4,49	4,95	0,06	7,16	3,11	4,40	0,87	7,81	1,53	2,83
	Ecart type	2,91	2,46	3,00	0,06	2,69	1,80	1,34	0,79	0,53	0,42	4,33
	CV%	46,17	54,90	60,63	97,82	37,55	57,92	30,54	90,39	6,73	27,45	153,05
Groupe II N=24	Min	8,33	4,24	2,58	0,02	10,73	2,23	3,17	0,08	7,30	2,50	0,74
	Max	16,55	13,56	13,12	0,15	21,97	14,70	6,34	4,32	7,90	4,10	4,24
	Moyenne	13,19	8,34	8,06	0,07	16,44	7,27	4,56	1,25	7,57	3,09	2,49
	Ecart type	2,06	2,75	3,00	0,03	2,81	3,64	0,78	0,84	0,15	0,43	0,98
	CV%	15,63	32,99	37,25	44,84	17,07	50,07	17,07	67,31	1,94	13,95	39,26
Groupe III N=5	Min	0,21	5,09	7,31	0,07	6,24	3,15	4,88	0,00	7,60	2,11	2,43
	Max	12,70	11,87	19,09	0,60	14,65	11,03	11,22	0,94	9,00	3,50	11,73
	Moyenne	7,69	7,46	11,28	0,40	11,08	6,90	7,57	0,50	8,20	2,2	4,94
	Ecart type	5,07	2,73	4,62	0,20	3,76	3,41	2,52	0,46	0,65	0,59	3,87
	CV%	65,95	36,56	40,95	50,66	33,91	49,43	33,24	92,46	7,90	22,21	78,18
Groupe IV N=8	Min	13,70	7,14	15,35	0,03	23,42	8,51	0,98	0,14	6,60	4,00	4,15
	Max	17,02	36,03	43,86	0,39	63,80	34,23	5,37	1,07	8,00	9,20	10,90
	Moyenne	14,99	14,20	22,64	0,16	32,52	14,30	4,22	0,50	7,56	5,51	5,98
	Ecart type	1,10	9,38	9,33	0,14	13,39	8,27	1,40	0,39	0,44	1,98	2,13
	CV%	7,34	66,07	41,21	84,64	41,18	57,85	33,25	77,69	5,78	35,94	35,68

L'analyse descriptive des groupes obtenus par l'ACP est résumée dans le tableau ci-dessus, on obtient ainsi :

Le groupe I avec 33 individus renferme le meilleur type d'eau pour l'irrigation. Ces eaux sont dominées par les chlorures du point de vue anionique et par le calcium du point de vue cationique. Elles sont faiblement minéralisées avec une CE convenable pour l'irrigation ($CE < 2,25$ dS/m). Le SAR reste dans la norme mais il présente un coefficient de variation très élevés (153.05%) ce qui reflète une variation spatiale de cet élément au sein de ce groupe.

Le groupe II, présenté par 24 individus, regroupe les eaux dominées par les chlorures comme anion dominant et le calcium comme cation dominant. Ces eaux sont plus ou moins minéralisées avec une CE moyenne supérieure à la norme présentant ainsi un risque de salinité. Le SAR et le pH restent dans les normes d'irrigation.

Les eaux du groupe III sont dominées par les chlorures du point de vue anionique et le sodium du point de vue cationique. Ces eaux sont moyennement minéralisées avec une CE moyenne légèrement supérieure à la norme (2.66 dS/m). Les eaux de ce groupe présentent le pH le plus élevé parmi les autres groupes suivies par la valeur des bicarbonates qui est la plus élevée parmi tous les autres groupes, ce qui fait augmenter le risque de sodicité.

Les eaux du dernier groupe (8 individus) sont dominées par les chlorures (anion dominant) et par le sodium (cation dominant). Ces eaux sont très fortement minéralisées, ce qui donne une valeur moyenne de la CE largement supérieure à la norme d'irrigation augmentant ainsi le risque de salinité. Le SAR et le pH sont dans les normes.

IV.3.1.2. Moyen-Chélif

a. Analyse des variables

Les liaisons existantes entre les variables sont résumées dans le tableau ci-dessous, il en ressort :

- La plus grande corrélation ($r = 0,78$) entre Ca^{+2} et Mg^{+2} ;
- Des fortes corrélations positives entre les variables Ca^{+2} , Mg^{+2} , So_4^{-2} et Na^+ , Cl^- prises deux à deux ;
- Le potassium présente une seule corrélation avec le sodium (0,51) ;
- Les bicarbonates et les nitrates ne sont corrélés à aucune autre variable.

Tableau 15 : coefficients de corrélations entre les variables initiales.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Ca ⁺²	1,00							
Mg ⁺²	0,78	1,00						
Na ⁺	0,35	0,28	1,00					
K ⁺	0,07	-0,07	0,51	1,00				
Cl ⁻	0,64	0,63	0,70	0,15	1,00			
SO ₄ ⁻²	0,74	0,66	0,48	0,28	0,33	1,00		
HCO ₃ ⁻	0,13	0,22	0,43	0,30	0,20	0,18	1,00	
NO ₃ ⁻	-0,24	-0,20	-0,18	-0,29	-0,13	-0,31	-0,32	1,00

Le premier axe principal à une valeur propre égale à 3,5804, il exprime 44,76 % de la variation totale. La variance de la deuxième composante 19,34 % de la variance totale. Ainsi, le plan formé par les deux premiers axes explique 64,34 % de la variance totale. L'information apportée par le troisième axe est de 12,47 %.

Tableau 16 : valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Valeur propre	3,5804	1,5472	0,9973	0,7895	0,5752
Variance expliquée	44,76 %	19,34 %	12,47 %	9,87 %	7,19 %
Ca ⁺²	0,83	0,42	0,11	0,10	-0,02
Mg ⁺²	0,78	0,48	0,11	-0,16	-0,09
Na ⁺	0,73	-0,39	-0,45	0,04	0,06
K ⁺	0,37	-0,74	-0,07	0,45	-0,06
Cl ⁻	0,77	0,15	-0,46	-0,16	0,36
SO ₄ ⁻²	0,80	0,14	0,26	0,35	-0,31
HCO ₃ ⁻	0,44	-0,52	0,10	-0,63	-0,35
NO ₃ ⁻	-0,42	0,36	-0,69	0,07	-0,46
pH	0,23	-0,28	0,04	-0,07	-0,05
CE dS/m	0,95	0,14	-0,22	-0,01	0,04
SAR	0,39	-0,59	-0,52	-0,04	0,12

Les variables qui contribuent fortement à la formation de l'axe 1 sont toutes corrélées positivement à cet axe sauf les nitrates et qui sont classées par ordre décroissant comme suit : CE, Ca⁺², SO₄⁻², Mg⁺², Cl⁻, Na⁺, HCO₃⁻ et NO₃⁻, cet axe représente celui de la minéralisation il présente plus l'origine géologique de la salinité.

Le potassium, le SAR et les bicarbonates sont assez bien corrélés négativement à l'axe 2 qui représente le pôle des bicarbonates. Les variables Mg^{+2} , Ca^{+2} et Na^{+} avec des corrélations très élevées avec l'axe 1, présentent aussi des corrélations non négligeables avec l'axe 2.

Les nitrates sont bien corrélés négativement avec l'axe 3, donc c'est l'axe qui représente la pollution d'origine agricole. Le SAR, Cl^{-} et Na^{+} présentent des corrélations importantes avec cet axe, ce qui atteste un faciès chlorure sodique des eaux présentées par cet axe (tableau 16).

Le cercle de corrélation établi entre les deux premières composantes principales (figure 25) montre :

Les éléments SO_4^{-2} , Cl^{-} , Ca^{+2} et Mg^{+2} sont bien corrélés entre eux et à la CE donc bien représentés sur le graphe et forment un groupe dont le sodium a une tendance à s'éloigner légèrement de ce groupe. La conductivité électrique n'évolue pas avec les bicarbonates, alors que les chlorures et les sulfates croissent avec la salinité. Cette dernière est donc due aux éléments salifères ce qui rend les forages présentés par cet axe (l'axe 1) plus ou moins salés présentant des faciès variés comme chlorurés et sulfatés calcique et magnésienne en premier lieu et des faciès chlorurés et sulfatés sodique en seconde lieu.

Le SAR, les bicarbonates, le potassium et le pH forment un autre groupe dont le sodium s'éloigne légèrement de ce groupe aussi. Cet axe est présenté par des forages bicarbonatés caractérisés par un SAR et un pH élevés. Les faciès dominants ce groupe sont en premier lieu bicarbonaté potassique et bicarbonaté sodique, calcique et magnésique en seconde lieu.

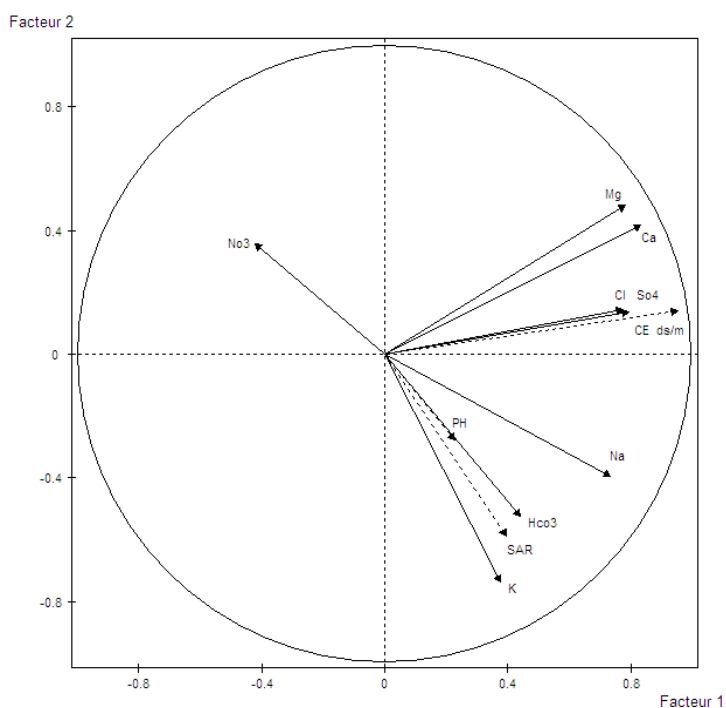


Figure 25 : cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Moyen-Chélif).

b. Analyse des individus

La projection des 45 individus (points d'eau) sur le plan formé par les deux premiers axes (figure 26) montre l'existence de trois groupes d'eau dont la distribution se fait essentiellement selon l'axe 1. Le point 8 s'écarte relativement par rapport à l'ensemble des autres points ; il ne sera donc pas pris dans la typologie des groupes.

Groupe I : 28, 14, 13, 35, 20, 43, 39, 32, 41, 17, 22, 33, 16, 44, 36, 23, 31.

Groupe II : 45, 25, 30, 10, 1, 18, 34, 5, 24, 7, 4, 15.

Groupe III : 19, 3, 2, 21, 29, 6, 9, 40, 37, 42, 38, 27, 11, 26, 12.

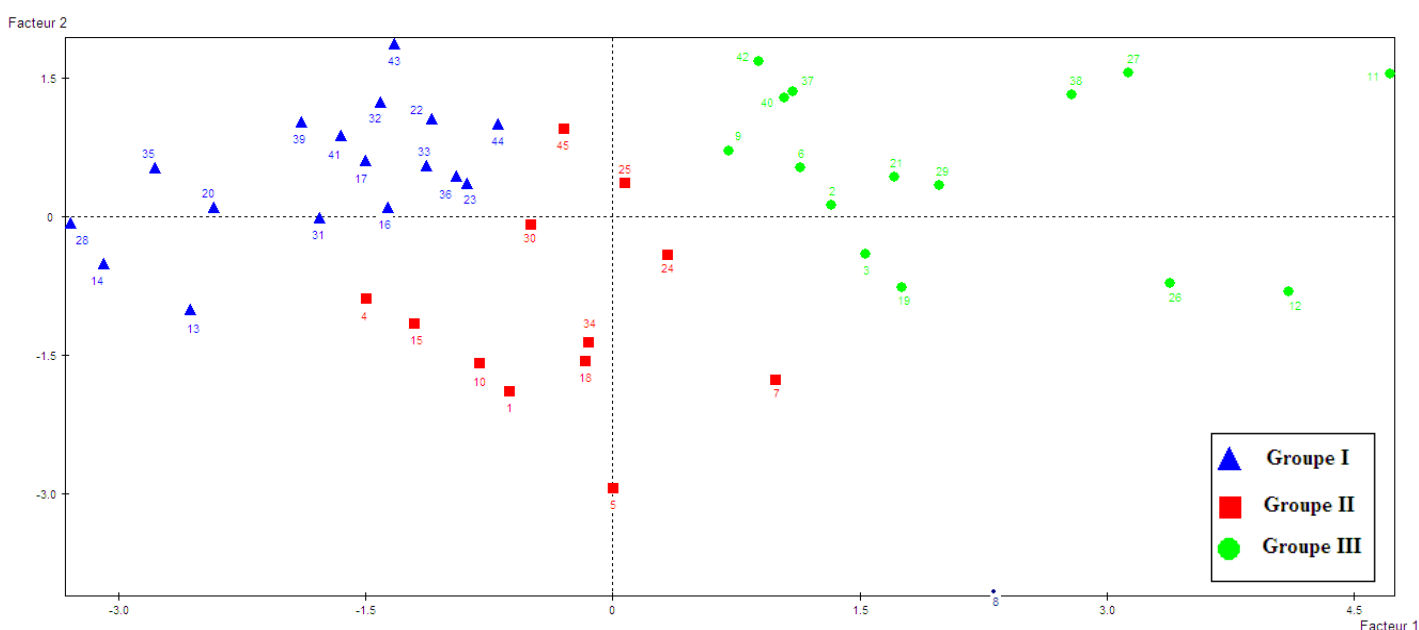


Figure 26 : répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Moyen-Chélif).

Une analyse statistique (Min, Max, Moyenne, Ecart type et Coefficient de variation) a été réalisée sur les différents groupes obtenus par ACP (tableau 17).

Le groupe I avec 17 individus : renferme les eaux dominées par les chlorures et le magnésium comme anion et cation dominants. Ces eaux sont moyennement minéralisées avec une CE moyenne légèrement supérieure à la norme. Le SAR et le pH restent dans les normes.

Les eaux du deuxième groupe sont dominées par les chlorures du point de vue cationique et le sodium du point de vue anionique ; elles sont plus ou moins minéralisées, ce qui donne une CE moyenne supérieure à la norme posant ainsi un risque de salinité. La valeur maximale du SAR indique la présence de certains forages qui peuvent poser un problème de sodicité.

Tableau 17 : statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Moyen-Chélif.

Groupe	N	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	CE	SAR
Groupe I N=17	Min	2,66	2,41	2,62	0,03	2,96	0,97	2,34	0,10	6,68	0,81	1,00
	Max	12,63	15,52	15,48	0,21	23,27	14,49	5,86	1,52	7,90	4,00	5,01
	Moyenne	7,53	8,20	7,96	0,08	13,51	6,36	3,59	0,85	7,50	2,59	2,95
	Ecart type	3,02	3,81	4,24	0,06	6,53	3,74	0,78	0,52	0,32	0,92	1,44
	CV%	40,07	46,40	53,23	76,75	48,37	58,73	21,68	61,12	4,28	35,38	48,88
Groupe II N=12	Min	4,17	4,28	8,60	0,01	4,52	0,90	4,00	0,03	7,10	2,50	2,37
	Max	14,04	14,41	35,05	0,94	39,44	19,43	8,30	0,75	8,50	4,76	16,39
	Moyenne	8,27	8,70	16,95	0,27	16,27	9,58	6,34	0,42	7,70	3,46	6,37
	Ecart type	3,30	3,58	6,82	0,30	8,86	5,26	1,61	0,24	0,42	0,78	3,67
	CV%	39,88	41,11	40,24	111,05	54,45	54,93	25,38	57,31	5,52	22,63	57,56
Groupe III N=15	Min	11,91	7,55	3,57	0,00	16,68	3,30	3,17	0,06	7,23	4,23	0,81
	Max	26,11	25,22	43,00	0,72	51,91	39,06	8,78	1,06	8,00	8,80	10,63
	Moyenne	18,21	16,15	21,28	0,19	30,98	19,98	5,59	0,37	7,72	6,05	5,22
	Ecart type	3,62	4,60	11,17	0,22	10,01	9,98	1,44	0,23	0,26	1,37	2,83
	CV%	19,89	28,49	52,48	117,37	32,32	49,92	25,85	63,26	3,42	22,64	54,13

Le groupe 3, avec 15 individus, englobe les eaux caractérisées par la dominance des chlorures et du sodium comme anion et cation dominant. Ces eaux sont très fortement minéralisées ce qui donne une valeur de CE moyenne largement supérieure à la norme d'irrigation posant ainsi un fort risque de salinité. Le pH et le SAR restent dans les normes.

IV.3.1.3. Bas-Chélif

a. Analyse des variables

Pour étudier la liaison entre les variables on a établi le tableau des corrélations ci-dessous. Il en ressort ce qui suit :

- la plus grande corrélation ($r= 0,85$) est entre Mg^{+2} , SO_4^{-2} .
- Des fortes corrélations positives entre $(Ca^{+2}, Mg^{+2}, Cl^{-}, SO_4^{-2})$ et (Na^{+}, Cl, SO_4^{-2}) prises deux à deux.
- Le potassium et les bicarbonates ne présentent aucune corrélation avec l'ensemble des variables.

Tableau 18 : coefficients de corrélations entre les variables initiales.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻
Ca ⁺²	1,00						
Mg ⁺²	0,81	1,00					
Na ⁺	0,28	0,39	1,00				
K ⁺	-0,10	-0,09	0,01	1,00			
Cl ⁻	0,61	0,70	0,80	-0,01	1,00		
SO ₄ ⁻²	0,81	0,85	0,50	-0,08	0,72	1,00	
HCO ₃ ⁻	-0,17	-0,02	0,25	-0,01	0,00	0,02	1,00

Le premier axe principal à une valeur propre égale à 3,6324, il explique 51,89% de la variation totale, la seconde composante a une variance de 17,87 % cumulant ainsi 69,76 % d'information. La troisième composante principale représente 14,35% de la variance totale (tableau 19).

Tableau 19 : valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Valeur propre	3,6324	1,2509	1,0044	0,6988	0,1801
Variance expliquée	51,89 %	17,87 %	14,35 %	9,98 %	2,57 %
Ca ⁺²	-0,84	0,37	-0,01	0,22	-0,30
Mg ⁺²	-0,90	0,18	0,02	0,24	0,27
Na ⁺	-0,67	-0,57	-0,03	-0,43	-0,08
K ⁺	0,09	-0,23	-0,95	0,22	0,00
Cl ⁻	-0,89	-0,19	-0,11	-0,30	0,06
SO ₄ ⁻²	-0,92	0,09	0,01	0,18	0,01
HC03	-0,01	-0,81	0,31	0,49	-0,03
pH	0,18	-0,24	-0,09	-0,17	-0,06
CE	-0,95	-0,19	-0,02	-0,10	-0,01
SAR	-0,21	-0,75	-0,04	-0,53	-0,08

Les variables CE, SO₄⁻², Mg⁺², Cl⁻, Ca⁺² et Na⁺ présentent des fortes corrélations négatives avec l'axe 1. Ces dernières, classées par ordre décroissant contribuent à la formation de cet l'axe qui représente celui de la minéralisation des eaux en rassemblant les eaux fortement minéralisées.

L'axe 2 est représenté par les variables : HCO_3^- , SAR, Na^+ , Ca^{+2} et pH classées par ordre décroissant. Cet axe représente le pôle de l'alcalinité dont les corrélations les plus significatives reviennent aux bicarbonates, SAR et Na^+ .

L'axe trois est représenté par les variables : potassium ($r = -0,95$) et les bicarbonates ($r = 0,31$), il apporte la même information que l'axe 2 et représente les eaux à faciès bicarbonaté potassique.

Le cercle de corrélation établi entre les deux premières composantes principales (figure 27) montre :

Les variables Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^- et CE forment un groupe opposé à celui qui inclut le pH et les bicarbonates. Il apparaît, que ce sont les chlorures qui interviennent le plus sur la salinité des eaux, ce qui veut autrement dire que les eaux dont la salinité est élevée sont celles qui sont riches en chlorures. Les sels sulfatés, magnésiques et calciques peuvent également engendrer une salinité plus ou moins élevée mais pas autant que les chlorures. Ces mêmes types d'eau ont toujours un faible pH et une teneur très faible en bicarbonates.

Le sodium avec sa forte corrélation à l'axe de la minéralisation ($r = -0,67$) semble intégrer les deux groupes : celui qui inclus le SAR, HCO_3^- et pH ; et le groupe de la CE ce qui donne des eaux salées avec un SAR plus au moins élevé. Ces types d'eau ont des faciès chlorurés sodiques et bicarbonatés sodiques.

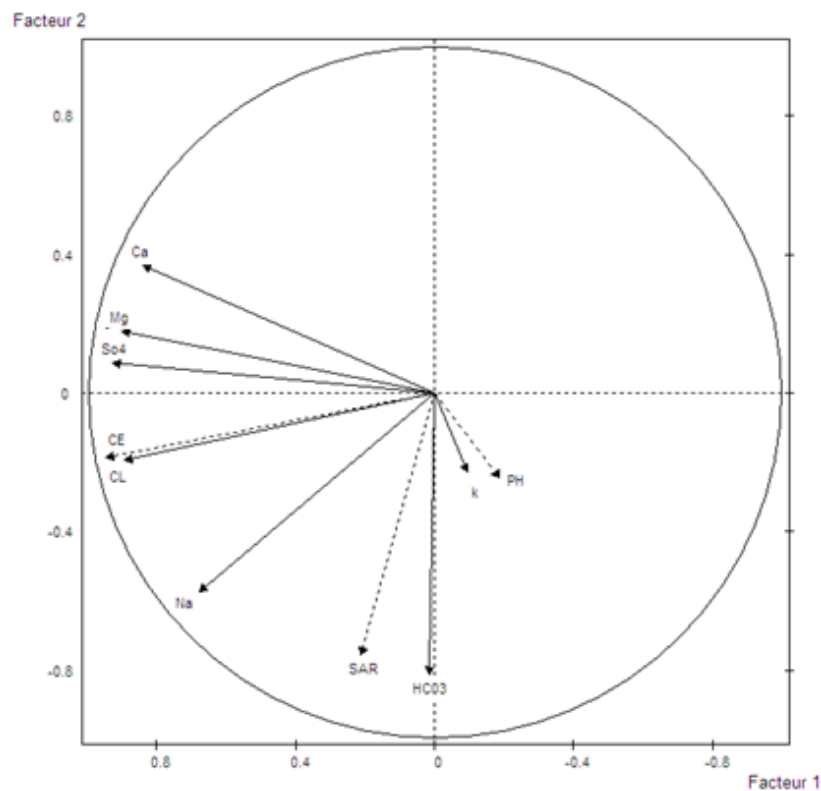


Figure 27 : cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Bas-Chélif).

b. Analyse des individus

La projection des individus (51 points d'eau) sur le plan formé par les deux premiers axes (figure 28) a donné les groupements de forages homogènes de point de vue qualité d'eau. On remarque qu'il y a une discrimination des individus qui est influencée essentiellement par l'axe 1. On obtient ainsi 3 groupes distincts qui regroupent les forages suivants :

Groupe I : 49, 29, 4, 23, 27, 18, 47, 46, 50, 30, 20, 17, 22, 39, 33, 3, 19.

Groupe II : 21, 27, 38, 2, 7, 28, 31, 32, 51, 40, 5, 14.

Groupe III : 34, 42, 1, 45, 26, 6, 36, 41, 44, 43, 37, 35, 9, 16, 48, 12, 10, 24, 13, 11, 8, 15.

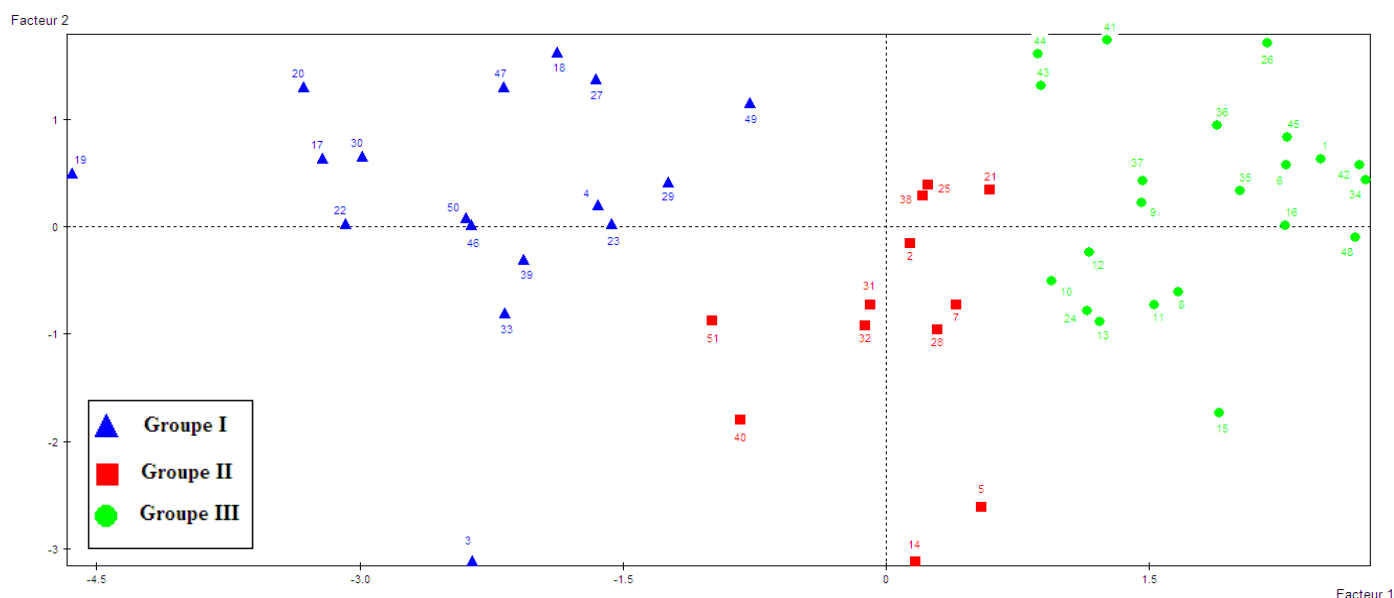


Figure 28 : répartition des individus dans le plan formé par l'axe 1 et 2 (Bas-Chéiff).

Une analyse statistique (Min, Max, Moyenne, Ecart type et Coefficient de variation) a été réalisée sur les différents groupes obtenus par l'ACP. Les statistiques sommaires des groupes issus de l'ACP appliquée dans la plaine de Bas-Chéiff sont résumées dans le tableau 20.

Les eaux du premier groupe (17 individus) sont caractérisées par la dominance des chlorures par rapport aux anions et le sodium par rapport aux cations. Ces eaux sont très fortement chargées remettant ainsi la valeur moyenne de la CE (4,79 dS/m) largement supérieure à la norme d'irrigation. La valeur moyenne du SAR reste dans la norme mais sa valeur maximale (16,66) renseigne sur la présence de certains forages qui peuvent présenter un risque de sodicité.

Le deuxième groupe avec 12 individus réunit les eaux dominées par les chlorures et le sodium comme anion et cation dominants. Ces eaux sont fortement minéralisées remettant ainsi la CE moyenne (3,81 dS/m) supérieure à la norme d'irrigation et posent un problème de salinité.

Malgré la valeur moyenne du SAR qui reste dans les normes, la valeur maximale de ce paramètre indique un problème de sodicité pour certains forages.

Le troisième groupe est le meilleur du point de vue qualité pour l'irrigation dans cette plaine car il regroupe les eaux moyennement chargées avec une CE moyenne convenable (2.14dS/m) dominées par les chlorures et le sodium. Le SAR et le pH de ce groupe sont dans la norme.

Tableau 20: statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des différents groupes de la plaine du Bas-Chélif.

Groupe	N	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	PH	CE	SAR
Groupe I N=17	Min	7,01	4,03	8,21	0,03	5,39	6,68	3,42	6,80	1,63	3,49
	Max	22,44	23,80	50,10	0,63	45,68	29,09	7,56	8,02	6,15	16,66
	Moyenne	13,72	16,34	23,44	0,11	25,70	20,01	5,24	7,54	4,79	6,21
	Ecart type	3,54	5,17	9,25	0,14	8,66	5,71	1,18	0,40	1,06	3,02
	CV%	25,81	31,67	39,47	119,26	33,69	28,54	22,44	5,31	22,06	48,73
Groupe II N=12	Min	2,40	5,85	12,90	0,03	11,17	5,30	3,17	6,90	2,76	4,20
	Max	14,43	13,11	36,77	0,18	33,35	16,43	8,30	8,06	5,23	17,88
	Moyenne	7,48	9,50	23,21	0,07	21,06	11,95	6,11	7,61	3,81	8,60
	Ecart type	3,08	2,37	8,82	0,04	6,38	3,21	1,50	0,40	0,88	4,61
	CV%	41,16	24,97	38,01	63,84	30,31	26,88	24,54	5,29	23,18	53,62
Groupe III N=22	Min	3,01	2,02	5,55	0,01	5,05	2,14	3,66	6,90	1,32	2,67
	Max	9,62	12,30	16,77	4,13	18,05	15,86	7,32	8,10	2,99	10,07
	Moyenne	5,56	6,22	11,52	0,23	10,82	7,25	5,26	7,67	2,14	4,94
	Ecart type	1,83	2,65	3,57	0,87	3,40	3,32	0,98	0,39	0,42	1,87
	CV%	32,97	42,65	30,96	374,16	31,45	45,75	18,71	5,15	19,50	37,84

IV.3.1.4. Discussion

On peut conclure, selon les résultats obtenus par l'application des différentes ACP, que les eaux des plaines de Chélif présentent des ressemblances et des dissemblances entre elles et qui peuvent être résumées comme suit :

Il est clairement ressorti que les variables qui influencent le plus la qualité des eaux de toutes les nappes du Chélif sont toutes de nature géologique, à savoir : Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, Cl⁻ et SO₄⁻². Ces variables sont tous corrélées à l'axe 1 qui présente celui de la minéralisation géologique dans les différentes ACP. L'analyse statistique a donné de fortes corrélations entre ces variables prises deux à deux (tableaux.12. 15 et 18) ;

Les bicarbonates qui sont les principaux constituants de l'axe 2 dans toutes les nappes du Chélif montrent que le risque de sodisation des sols qui sont irrigués par ces eaux n'est pas à écarter malgré les faibles valeurs du SAR.

La projection des individus sur le plan principal formé par l'axe 1 et l'axe 2 des différentes ACP a données trois groupes dans le Moyen et le Bas-Chélif et quatre groupes dans le Haut-Chélif

On se référant à la composition chimique des eaux, celle du Haut-Chélif sont divisées en deux grandes catégories : une dominé par le couple chlorure-calcium et l'autre par le couple chlorure-sodium alors que les eaux du Moyen-Chélif sont représentées par les couples chlorure-sodium et chlorure-magnésium. Les eaux du Bas-Chélif sont présentées que par le couple chlorures-sodium ce dernier est le groupe commun entre toutes les plaines.

Concernant la salinité, $\frac{3}{4}$ des groupes d'eaux sont qualifiés comme inutilisables pour l'irrigation car ils présentent un risque de salinité dans la plaine de Haut-Chélif tandis que tous les groupes de la plaine du Moyen-Chélif sont désignés comme salés. $\frac{2}{3}$ des groupes d'eaux du Bas-Chélif présentent un risque de salinité.

Malgré l'absence du risque de sodicité n'a pas apparait clairement dans les groupes des différentes plaines, il existe, cependant, quelques forages qui présentent des valeurs élevées du SAR dans toutes les eaux de la plaine de Chélif.

IV.3.2. Classification hydrochimique de la plaine du Chélif

Dans cette étape, deux méthodes multivariées sont appliquées en utilisant le logiciel SPAD, l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse par classification hiérarchique ascendante (HCA).

IV.3.2.1. Analyse en composante principale (ACP)

La classification sur SPAD ne peut s'effectuer qu'après avoir réalisé une analyse factorielle (ACP). Les algorithmes de construction des classes travailleront sur les coordonnées factorielle d'une analyse préalable, ce qui présente plusieurs avantages. On assure de cette façon la compatibilité des calculs et donc des résultats car on travaille dans les deux cas sur les mêmes configurations initiales des objets. On peut perfectionner ces configuration et en général obtenir des catégories moins typées en abandonnant les derniers axes factoriels, souvent porteurs des composantes aléatoire (non systématique) des données. Enfin on réduit le volume des opérations en travaillant sur les seuls premiers axes et en profitant de leur orthogonalité.

Par ailleurs, la classification de tous les points d'eau pour les trois plaines à la fois nous permettrait de déterminer une typologie générale et unique à toutes les plaines.

a. Analyse des variables

Ayant été largement étudiées dans ce qui a précédé, l'analyse des variable n'est faite ici que par rapport au cercle de corrélation formé entre les deux premières composantes qui sont les plus significatives (tableau 21).

Tableau 21 : valeurs propres, Variance expliquée et corrélations des variables aux axes principaux.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Valeur propre	3,4860	1,1973	0,9089	0,7079	0,3999
Variance expliquée	49,80 %	17,10 %	12,98 %	10,11 %	5,71 %

Le cercle de corrélation fait apparaître deux principaux groupes de variables qui sont corrélées entre eux ainsi on obtient (figure 29) :

- Le groupe représentant la minéralisation qui contient la CE et les ions qui lui sont corrélés comme SO_4^{-2} , Cl^- , Mg^{+2} , et Ca^{+2} . Les facies prédominants sont : chlorurés et sulfatés qui peuvent être calcique ou magnésique.
- Les bicarbonates forment avec le SAR et le pH un autre groupe influencé par l'axe 2 et exprimant le pôle de l'alcalinité. On y trouve également le potassium.

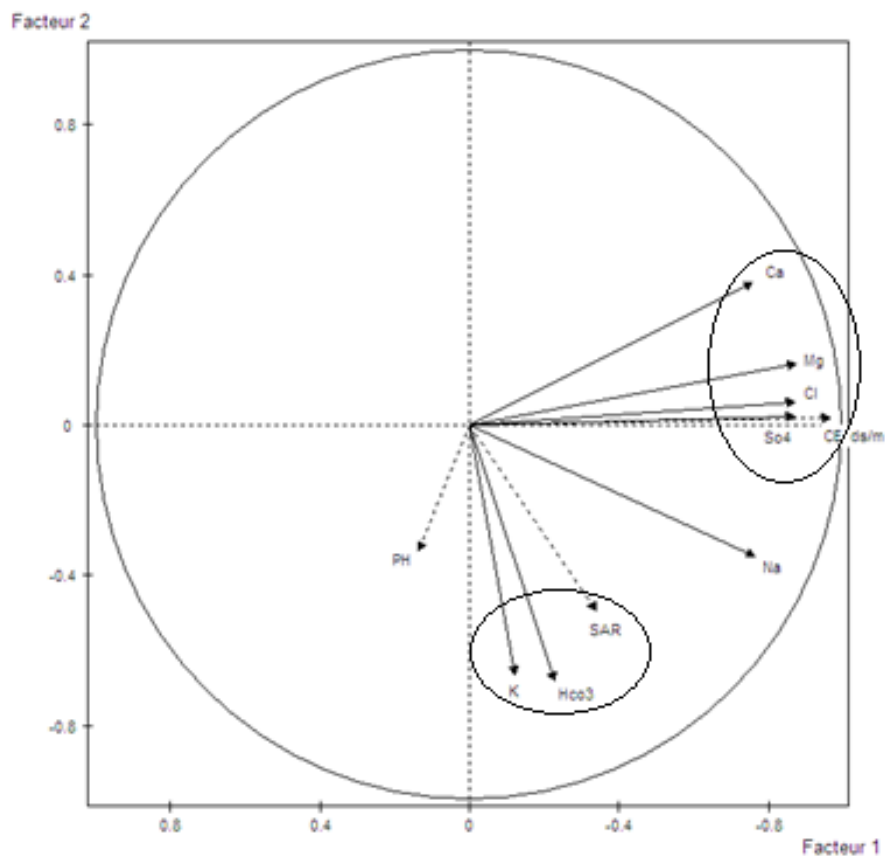


Figure 29 : cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et 2 pour la plaine du Chélif.

b. Etude des individus

La projection des 166 individus (forages) sur le plan formé par les deux premiers axes (figure 30) ainsi que leurs classifications a permis de ressortir des unités homogènes et cohérentes indiquant une même qualité chimique des différentes classes obtenues par (HCA).

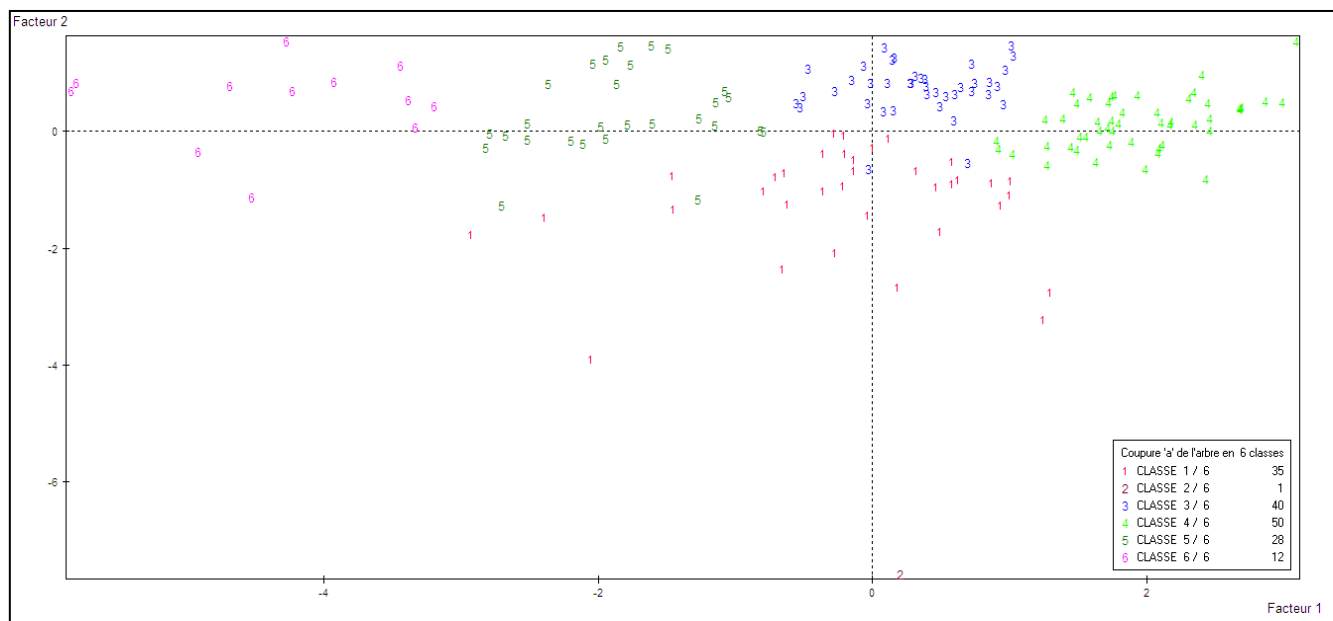


Figure 30 : répartition des individus des différentes classes obtenus par l'HCA dans le plan formé par l'axe 1 et 2 pour la plaine du Chélif.

IV.3.2.2. Analyse par classification hiérarchique (HCA)

Le HCA est une technique de classification de données. Il existe différentes techniques de clustering, mais le regroupement hiérarchique est la plus largement appliquée en sciences de la Terre (Davis, 1986), et souvent utilisée dans la classification des données hydrogéochimiques (Steinhorst et Williams, 1985 ; Schot et van der Wal, 1992 ; Ribeiro et Macedo, 1995 ; Guler et al. 2002 in Vincent C, 2004).

Le principe de la classification hiérarchique consiste à l'agglomération progressive, de façon ascendante deux à deux des éléments les plus proches (L. Lebart et al. 2006).

Une classification hiérarchique (HCA), a été réalisée sur un tableau de données de dix variables et de 166 individus en faisant introduire tous les points d'eau des trois plaines du Chélif.

Les variables CE, SAR et pH sont introduites comme étant des variables illustratives (supplémentaires) dans le but d'éviter les redondances dans les résultats.

Le principal résultat de l'HCA effectué sur ces échantillons est le dendrogramme de la figure 31. La classification des échantillons en grappes est basée sur une observation visuelle du

dendrogramme. La ligne phénon a été attirée sur le dendrogramme permettant ainsi une division du dendrogramme en six classes d'échantillons, de C1 à C6. Le numéro de classe attribué aux échantillons est présenté en annexe. L'observation du dendrogramme révèle quelques indications sur le degré de similitude entre les 6 classes (figure 31). Les échantillons provenant de C5 et C6 sont reliés aux autres classes à une distance élevée, ce qui indique que ces échantillons sont distincts de des autres classes et similaire entre eux. Parmi ces quatre classes, C3 et C4 ont la distance de liaison entre les pôles inférieur et donc avoir la plus grande similitude entre les grappes. On peut s'attendre à ce que les variables des échantillons de C3 présente des similitudes avec celles de C4. La classe C2 est représentée par un seul individu, donc elle ne sera pas prise en considération lors des interprétations.

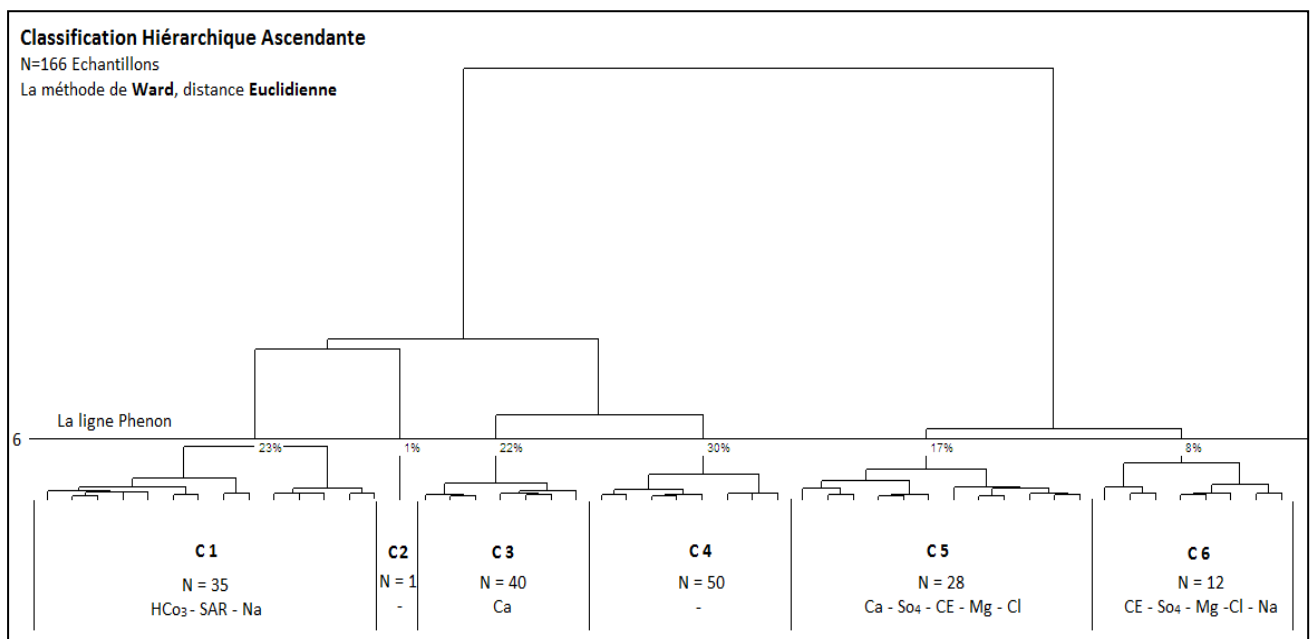


Figure 31 : Dendrogramme pour les échantillons de la plaine de Chélif, montrant la division en 6 classes et les variables qui influencent chaque classe.

Les statistiques descriptives et les schémas du dendrogramme indiquent que les cinq classes sont distinctes de point de vue qualité (Figure 31, tableau 22). Les échantillons provenant de la classe C1 sont influencés par les variables HCO_3^- , SAR et Na^+ et caractérisées par des pH élevés et des basses teneurs en potassium. Les échantillons provenant de la C3, conditionnés par la variables Ca^{+2} seulement, sont caractérisés par des faibles concentrations en HCO_3^- , SAR et pH parmi tous les groupes. Les échantillons provenant de C4 présentent les plus faibles valeurs pour la majorité des variables (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et CE) chose qui rend cette classe non définie par une ou plusieurs variables. La classe C6 est du point de vue qualité, la classe opposée de la C4 car elle présente des valeurs élevées des mêmes variables présentant des faibles valeurs dans la classe C4.

Tableau 22 : Caractéristiques physicochimiques de chaque Classe (concentrations médianes en meq/l)

Paramètres	Classe 1	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
N	35	40	50	28	12
Ca ⁺²	6,81	12,57	<u>5,36</u>	14,55	17,02
Mg ⁺²	8,47	8,49	<u>4,09</u>	14,26	19,43
Na ⁺	16,30	8,41	<u>5,27</u>	18,62	28,81
K ⁺	0,06	0,07	<u>0,05</u>	0,10	0,10
Cl ⁻	15,73	15,19	<u>7,41</u>	23,49	34,37
SO ₄ ⁻²	9,35	7,52	<u>3,54</u>	17,22	27,41
HCO ₃ ⁻	6,34	<u>4,00</u>	4,44	5,37	4,95
pH	7,80	<u>7,60</u>	7,70	7,70	7,70
CE dS/m	3,03	3,00	<u>1,60</u>	4,50	7,00
SAR	6,23	<u>2,52</u>	2,74	4,89	6,30

N : nombre d'échantillons.

Les valeurs en gras : les valeurs les plus élevées.

Les valeurs soulignées : les valeurs les plus faibles.

La classe C1 caractérisée principalement par les valeurs de pH et des bicarbonates les plus élevées de toutes les classes, ce qui augmente le SAR et par conséquent le risque de sodicité. Les eaux de ces classes sont moyennement minéralisées avec des valeurs de CE supérieures à la norme d'irrigation présentant ainsi un risque de salinité.

La C3 renferme les eaux moyennement minéralisées avec une valeur moyenne de salinité (3 dS/m) supérieure à la norme d'irrigation présentant ainsi un risque élevé de salinité. Cette même classe présente la valeur de SAR, HCO₃⁻ et pH les plus faibles parmi toutes les classes, ce qui positionne ces eaux comme étant utilisables pour l'irrigation sans aucun risque de sodicité.

La C4 regroupe les eaux faiblement minéralisées avec la plus faible valeur moyenne de la CE parmi toutes les autres classes. Le SAR est également faible donc on peut qualifier ces eaux comme de très bonne qualité pour l'irrigation parmi les eaux des autres classes. Elle ne présente ni un risque de salinité ni un risque de sodicité.

Les eaux de la classe C5 sont fortement minéralisées avec des valeurs de CE qui dépassent de loin la norme d'irrigation (risque de salinité très élevé).

La classe C6 est celle qui renferme les plus mauvaises eaux de point de vue qualité pour l'irrigation. Ces eaux sont très fortement minéralisées avec une valeur de CE largement supérieure à la norme d'irrigation (risque très élevé de salinité) ainsi qu'un risque de sodicité.

Elle est représentée par 3%, 10% et 11% respectivement dans le Haut, le Bas et le Moyen-Chélif.

Dans le but d'une visualisation spatiale des différentes classes obtenues par HCA, on a calculé le nombre d'échantillons appartenant à chaque classe dans les différentes plaines du Chélif. Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 23 : répartition des classes de l'HCA dans les différentes plaines de Chélif.

	Haut-Chélif	Moyen-Chélif	Bas-Chélif	Somme
Classe 1	4	12	19	35
Classe 2	0	0	1	1
Classe 3	26	11	3	40
Classe 4	32	6	12	50
Classe 5	6	11	11	28
Classe 6	2	5	5	12
Somme	70	45	51	166

La figure 32 représente le pourcentage de chaque classe obtenu par HCA dans l'ensemble des points d'eaux des plaines de Chélif. Il en ressort que :

Les eaux du Haut-Chélif sont dominées principalement par les classes C4 et C3 avec 46% et 37% respectivement. Le pourcentage de la classe C4 le plus élevé est observé au niveau de cette plaine ce qui qualifie ces eaux comme étant les meilleures types d'eaux pour l'irrigation parmi les autres plaines. Toutefois, ceci n'empêche pas de négliger le risque de salinité causé par l'utilisation des eaux de cette plaine qui est représenté par la classe C3. Les classes C5, C1 et C6 (8%, 6% et 3% respectivement) sont très faiblement représentées dans les eaux de cette plaine ;

Dans le Moyen-Chélif il n'existe pas de dominance dans la répartition des classes : C1, C3 et C5 participent par près d'un quart du secteur global (27%, 25% et 24% respectivement). Cette répartition désigne les eaux de cette plaine comme étant mauvaise pour être utilisées en irrigation car elles présentent un risque de salinité (C3 et C5) et les deux risques à la fois (salinité et sodicité) pour la classe C1. Les classes C4 et C6 sont faiblement représentées (13% et 11% respectivement) ;

Les eaux du Bas-Chélif sont représentées principalement par les classes C1, C4 et C5 avec 37%, 23% et 22% respectivement cela montre que les eaux de cette plaine sont variées en terme de qualité. Les autres classes (C1, C3 et C6) sont mal représentées dans les eaux du Bas-Chélif (2%, 6% et 10%).

De ce comportement, il ressort que les eaux de la plaine de Chélif sont très diversifiées dans l'espace dont on trouve des eaux de bonne qualité pour l'irrigation (principalement présentées par la classe C4 (30%) partagées en générale entre le Haut et le Bas-Chélif. Les eaux qui présentent un risques de salinité : C3 (24%) sont réparties dans Haut et le Moyen-Chélif ; C5 (17%) est répartie dans le Moyen et le Bas-Chélif et en fin des eaux qui présentent les deux risques en même temps (salinité et sodicité) présentées principalement par la classe C1 (21%) se répartissent essentiellement entre le Moyen et le Bas-Chélif.

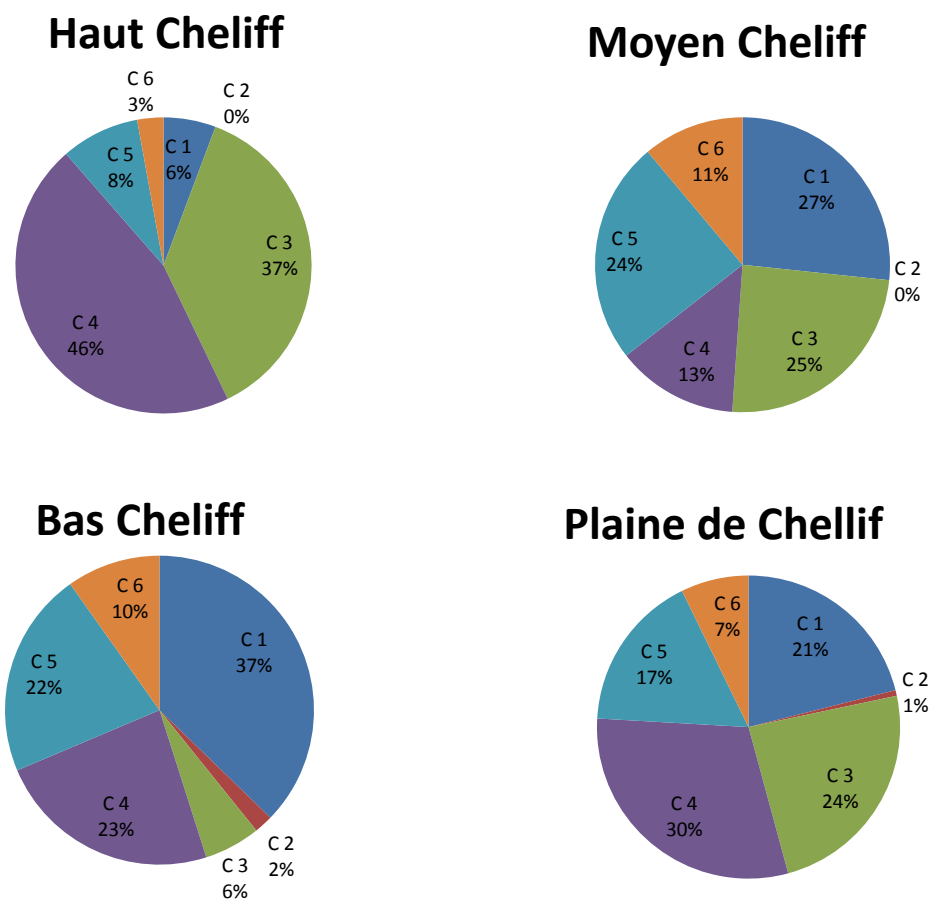


Figure 32 : la proportion des classes obtenues par (HCA) dans les eaux des plaines de Chélif.

IV.4. Etude géochimique des eaux d'irrigation des plaines du Chélif

On se référant aux classifications les plus connues, il s'avère qu'une eau qui dépasse une salinité de 2.25 dS/m et un SAR qui dépasse 15 meq/l est déconseillée pour être utilisées dans l'irrigation au vu de son impact sur la détérioration de la qualité physique et chimique des sols.

Dans notre cas et par rapport à la salinité, les résultats montrent que le nombre des forages qui dépassent une CE de 2.25 dS/m et qui ne sont pas donc recommandés pour l'irrigation dépasse 50% dans les trois plaines du Chélif (50% dans le Haut-Chélif, 86% dans le

Moyen-Chélif et 72.54% dans le Bas-Chélif). D'un autre côté et selon le SAR, il n'y a que 5 forages seulement (03 dans le Bas-Chélif, 01 dans le Moyen-Chélif et 01 dans le Haut-Chélif) dont ces valeurs dépassent la limite de 15 meq/l et qui pourraient causer un danger de sodisation et/ou d'alcalinisation. Chose qui rend la discrimination des groupes obtenus par l'ACP et HCA faite presque uniquement selon la salinité et le risque de sodicité n'apparaît pas, donc les eaux sont semblables de point de vue sodicité.

Par ailleurs, la présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les périmètres irrigués conduisent souvent à la salinisation (salinisation secondaire) qui est la forme de dégradation la plus rapide dans ces périmètres et particulièrement en zones arides et semi-arides (**Umali, 1993 ; Robert, 1996 ; Badraoui et al, 1998 ; Lahlou et al, 2002**). Le recours à la détermination de l'évolution géochimique des eaux devient indispensable pour mieux caractériser les risques d'utilisation de ces eaux pour l'irrigation.

L'identification des processus géochimiques passe d'abord par la détermination d'un indicateur de facteur de concentration (traceur). Par définition, un traceur est un élément qui se concentre proportionnellement à la réduction de volume de la solution sans pour autant interagir avec le milieu. C'est donc un élément présent dans le milieu en quantité suffisante pour être facilement quantifiable. Un tel traceur aide à prévoir les changements affectant la composition chimique des solutions naturelles (**Al Droubi, 1976 ; Ribolzi, 1993**). L'ion chlorure est généralement considéré comme traceur car il ne précipite qu'à de fortes valeurs de salinité (**Ribolzi, 1993**). Comme il est présent en forte proportion, l'ion chlorure sera donc l'indicateur de facteur de concentration à partir duquel on évaluera le comportement des autres ions dans le milieu. On peut ordonner donc nos analyses selon leur teneur en ion chlorure, et suivre l'évolution de la molalité (méq.l⁻¹) de chaque élément majeur depuis les échantillons d'eau les plus dilués aux échantillons les plus concentrés, en fonction de la molalité croissante de Cl⁻. Le facteur de concentration (FC) des eaux a été estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorures d'une eau et la plus petite teneur en chlorures observée dans l'ensemble des échantillons (**Vallès, 1992**).

Les analyses ont été replacées dans des diagrammes présentant en ordonnée le logarithme de la molalité et en abscisse le logarithme du facteur de concentration. Les résultats ont été classés selon les classes ressorties par classification (figure 33).

Dans ces diagrammes, les molalités des ions chlorures apparaissent alignées suivant une droite de pente égale à 1 puisqu'elles ont servi à l'élaboration du facteur de concentration. Des courbes polynomiales d'ordre 4 ont été tracées pour mieux voir l'évolution des éléments. Lors que la concentration d'un élément chimique des eaux passe en dessous de la courbe de l'ion chlorure, cela traduit la précipitation de ce dernier au fur et à mesure de la concentration. L'éloignement au-dessus de la courbe d'équilibre indique que l'élément reste en solution et ne se précipite pas.

Les résultats obtenus pour chaque classe sont résumés comme suit :

La classe 1 et pour des faibles concentrations montre la précipitation précoce du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), car l'alcalinité augmente dès les premiers FC alors que la molalité en calcium et celles du sulfates diminuent progressivement, ce qu'est confirmé par le graphique de AR_{CG} en fonction du FC (figure 34). En parallèle les molalités de l'ion sodium augmentent ce qui provoquera une augmentation du SAR qui est proportionnelle au facteur de concentration (figure 34) et par conséquent le risque de sodicité du sol irrigué.

La classe 3 : et pour des faibles valeurs du FC, les molalité de l'alcalinité diminuent alors que celles du calcium et des sulfates augmentent, ce qui provoque une précipitation précoce du gypse ; chose qui est confirmée par le graphe de l' AR_{CG} en fonction du FC, cette consommation du calcium provoque une augmentation du SAR (figure 34).

Comparativement par rapport à la tendance générale des courbes des ions, la molalité de l'alcalinité (représentée par HCO_3^-) tend à décroître vers des fortes valeurs de FC, ce qui n'est pas le cas pour le magnésium par exemple. A priori, il y aurait précipitation de la sépiolite pour de fortes valeurs de FC. Cette consommation du Mg^{2+} provoquera de nouveau une augmentation du SAR mais sans qu'il y aurait un risque de sodicité car dans cette classe le sodium est en dessous de la courbe d'équilibre alors que le calcium et le magnésium le dépasse.

La classe 4 : les eaux qui appartiennent à cette classe ont tendance à se précipiter sous forme de gypse car à des faibles valeurs du FC, les molalités de sulfates et celles du calcium diminuent tandis que celle de l'alcalinité augmente. Ce type de comportement conduit à une élévation du SAR (Figure 34).

La classe 5 : malgré l'augmentation des molalités du sulfate et du calcium et la diminution des molalités de l'alcalinité, à des faibles valeurs de FC on n'a pas une précipitation du gypse chose qui est confirmée par le graphe de l' AR_{CG} en fonction du FC (Figure 34) car les fortes valeurs de la CE des eaux qui appartiennent à cette classe protègent la structure du sol.

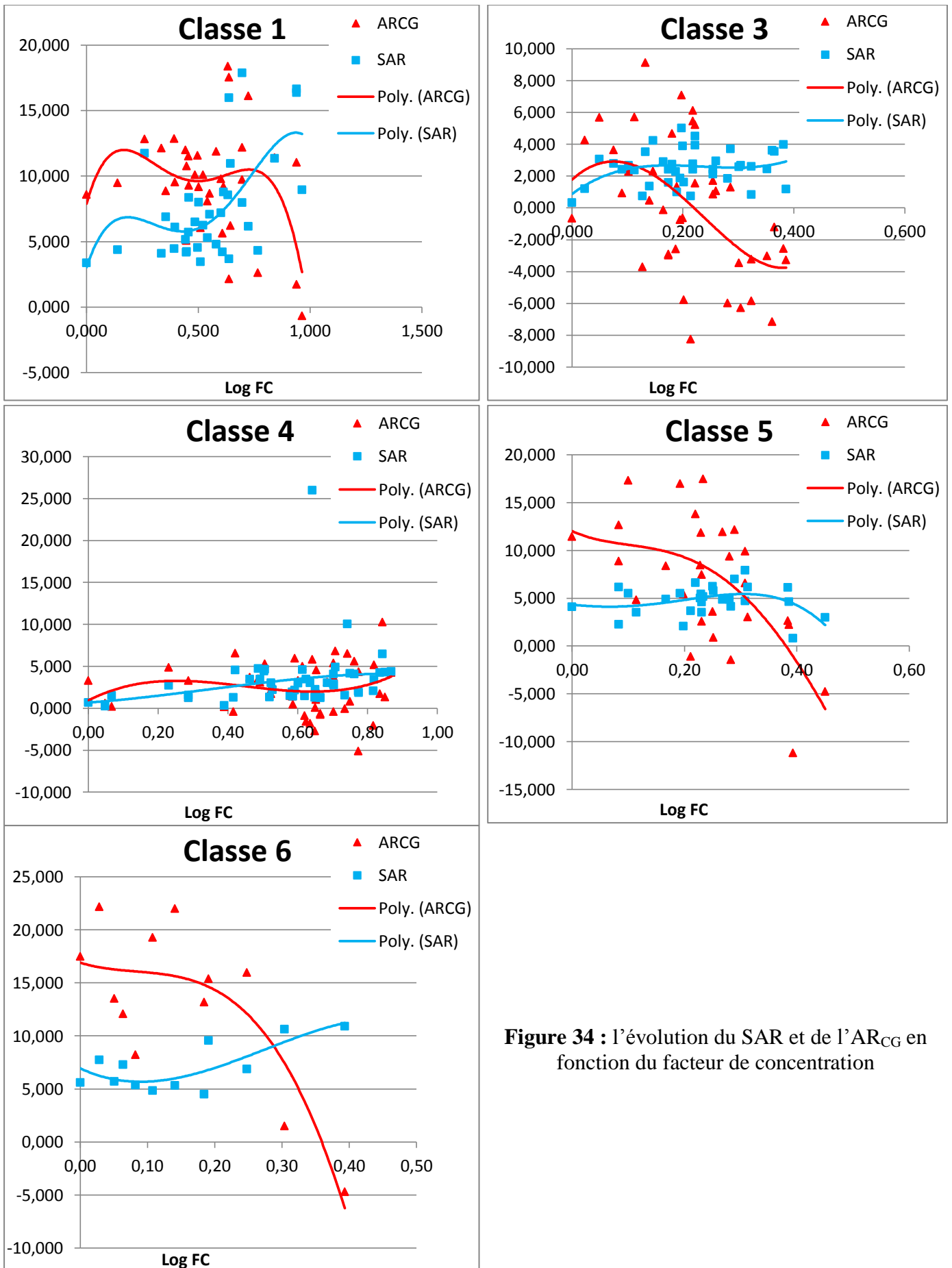


Figure 34 : l'évolution du SAR et de l'AR_{CG} en fonction du facteur de concentration

La classe 6 a des fortes valeurs du FC ; on assiste à une diminution des molalités de l'alcalinité avec une augmentation de celles du magnésium renseignant sur la précipitation de la sépiolite. Ce type de comportement conduit à une consommation du magnésium qui fait augmenter le SAR et par conséquent le risque de sodicité. Une augmentation dans la molalité du sodium rend ce risque plus appréciable.

IV.4.1. Indices de saturations

Les indices de saturation calculés par DIAGRAMMES en utilisant la base de données Wateq4f.dat explique mieux cette situation (figure 35). On constate, en effet, que les eaux sont sursaturées en calcite (CaCO_3) pour toutes les classes à l'exception de la première classe dont on constate un léger abaissement au niveau des fortes concentrations, ce qui n'est pas le cas pour le gypse qui est sous saturé dans toute les classes avec un faible rapprochement à l'équilibre dans les faibles concentrations. Pour la halite (NaCl), l'indice augmente certes au cours de l'évaporation mais elle reste toujours sous saturée dans toutes les eaux.

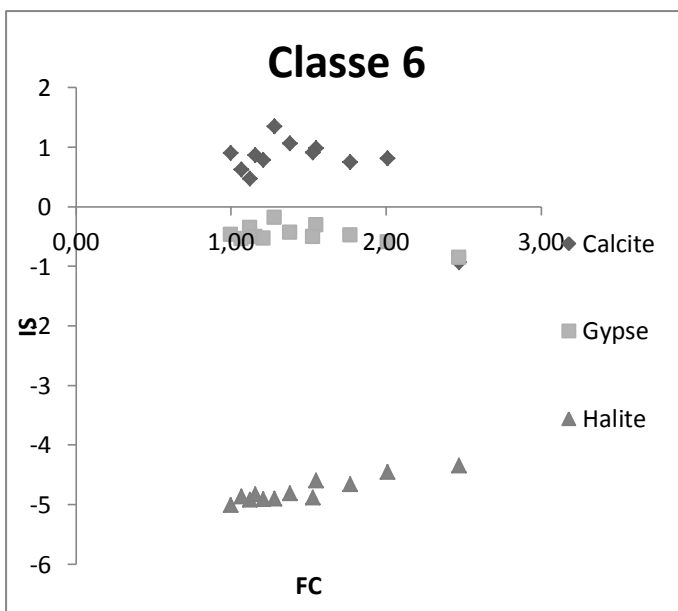
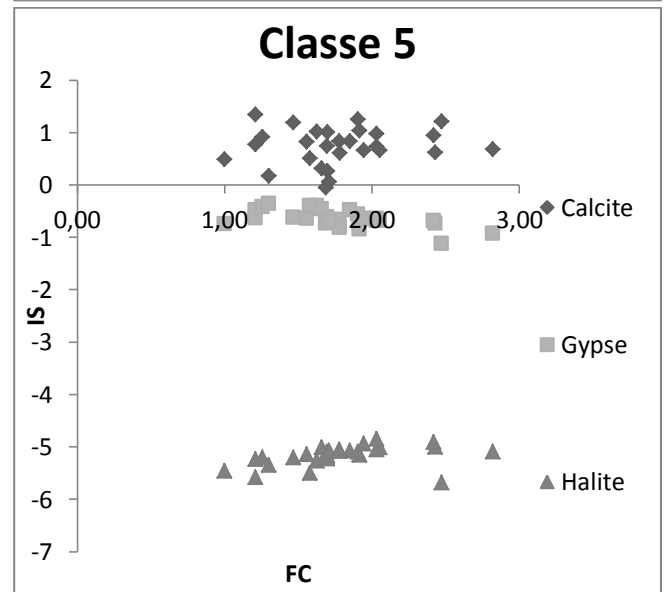
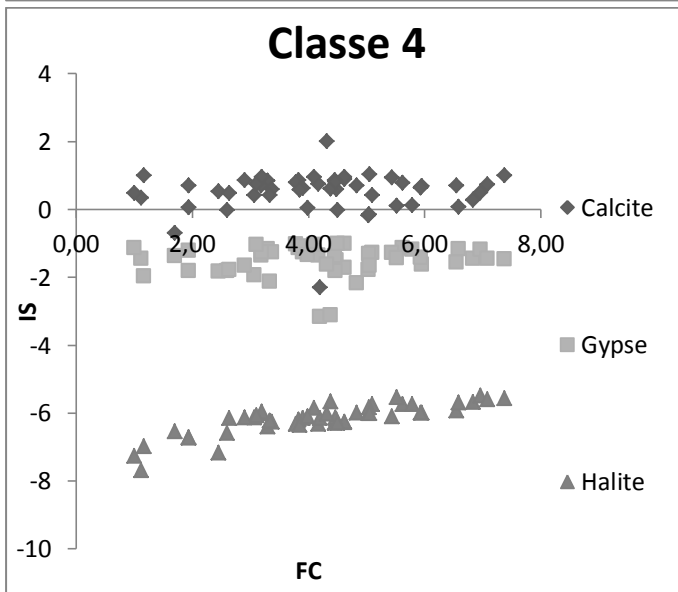
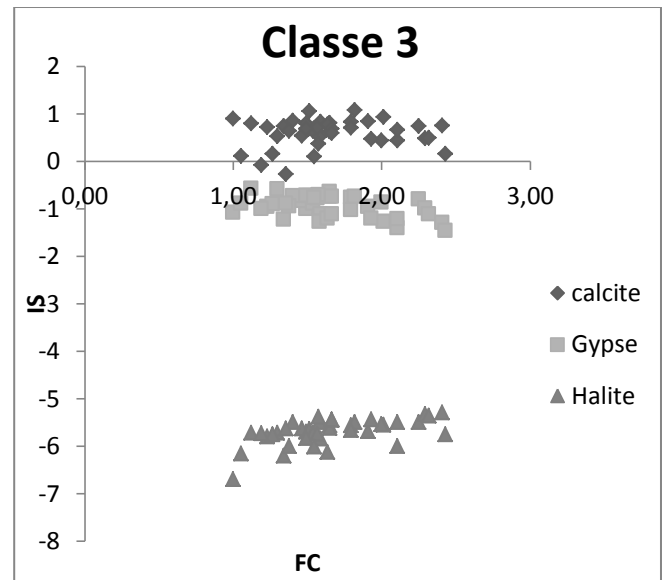
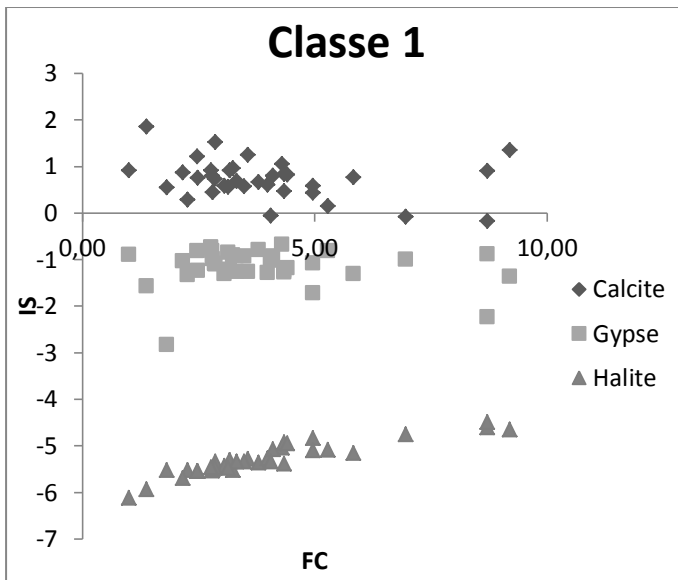


Figure 35 : Indices de saturation des classes obtenues par HCA

IV.4.2. Evaluation des risques d'utilisation des eaux souterraines des plaines de Chélif en irrigation

Dans un objectif d'appréciation des dangers d'utilisation des eaux des plaines de Chélif en irrigation en se basant sur les différentes présentations géochimiques, nous avons procédé comme suit:

On se référant à la précipitation des éléments : la présentation des concentrations de chaque élément en fonction de celle des ions Chlorures nous a permis de se rendre compte plus facilement des mécanismes en jeu par rapport à la seule concentration des eaux d'irrigation représentée par une droite de pente égale à 1 (figure 36).

Concernant le calcium, on constate qu'il se précipite plus dans les eaux du BC. Cette précipitation peut se manifester à partir des faibles concentrations. Pour les eaux des plaines de HC et MC, la précipitation de cet élément se manifeste plutôt dans les fortes concentrations.

Pour le magnésium : Il est clair que cet élément est en dessous de la courbe d'équilibre (C.à.d. qu'il précipite) en continuant son allure suivant la courbe d'équilibre. Ce ci indique qu'il précipite à une faible vitesse. Toutefois, et en général, il précipite en grande partie dans les eaux du BC et lorsque l'eau est plus concentrée.

Pour le sodium : il reste en solution et ne se précipite pas pour les eaux du BC en majorité. Pour les eaux du MC et HC cet élément ne précipite qu'à des fortes concentrations surtout pour les eaux de HC.

Les sulfates : on constate que cet élément précipite surtout pour les eaux du MC et HC. Il est en dessous de la courbe d'équilibre pour les eaux du BC mais suit l'allure de la courbe d'équilibre. Ceci montre que le gypse a un rôle important pour ces eaux.

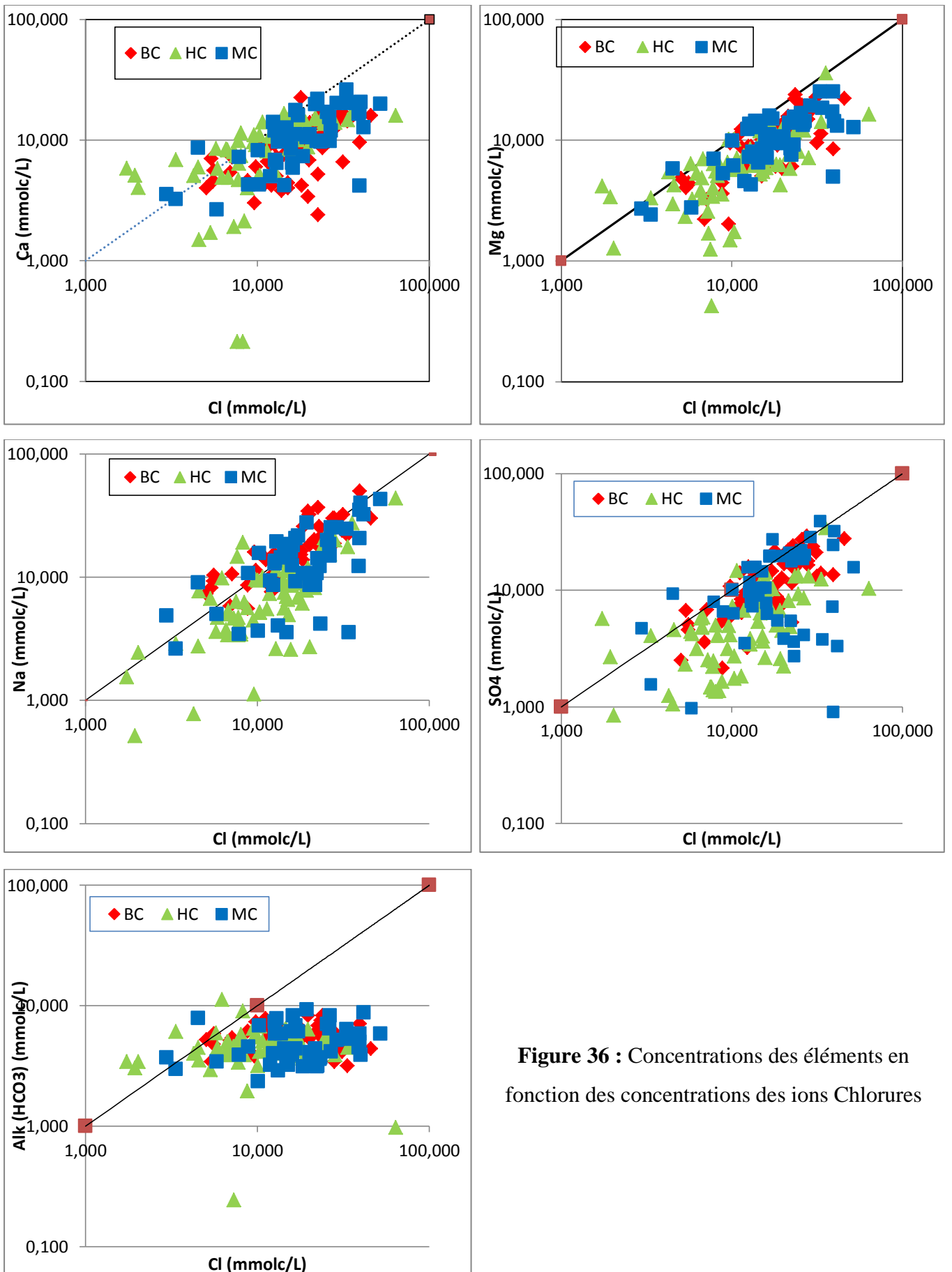


Figure 36 : Concentrations des éléments en fonction des concentrations des ions Chlorures

Les carbonates : l'alcalinité désignée par l'ion HCO_3^- précipite en général dans toutes les eaux des 3 plaines. Pour les eaux du MC et HC, il reste en solution à des faibles concentrations de chlorure.

Pour prédire l'évolution de la composition chimique d'une eau d'irrigation, le concept d'alcalinité résiduelle est utilisé. Ce concept a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (**Van Beek, et al. 1973 ; Barbiero et Valles, 1992**). Selon **Vallès, (1989)** puis **Barrios-Gonzales, (1992)**, arrivé à **Barbiéro et al. 2004 et Marlet et Job, (2006)**, préconisent tous qu'il est indispensable d'introduire l'alcalinité résiduelle comme critère d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation.

C'est pour cette raison que plusieurs types d'alcalinité résiduelle relative à la précipitation de plusieurs minéraux ont été calculés :

$$\text{AR_Ca}^{2+} = \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \text{ (alcalinité résiduelle relative à la précipitation de la calcite)}$$

$$\text{RSC} = \text{HCO}_3^- - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \text{ (alcalinité résiduelle relative à la précipitation de la calcite et sépiolite)}$$

$$\text{AR_CSG} = \text{HCO}_3^- - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) + \text{SO}_4^- \text{ (relative à la précipitation de la calcite, sépiolite et gypse)}$$

Les graphiques représentant la CE en fonction des différentes alcalinités résiduelles montrent que (figure 37) :

La calcite précipite pour des faibles valeurs de la CE pour les eaux des trois plaines de Chélif. Elle est de l'ordre de $\text{CE} < 1 \text{ dS/m}$ pour les eaux du HC et MC. Elle est un peu plus pour les eaux du BC.

Le RSC, en majorité est négatif quel que soit la valeur de la CE.

AR-CSG, marque des valeurs négatives pour les eaux du HC et MC et des valeurs positives pour les eaux du BC à partir d'une CE égale à 1 jusqu'à 3 dS/m.

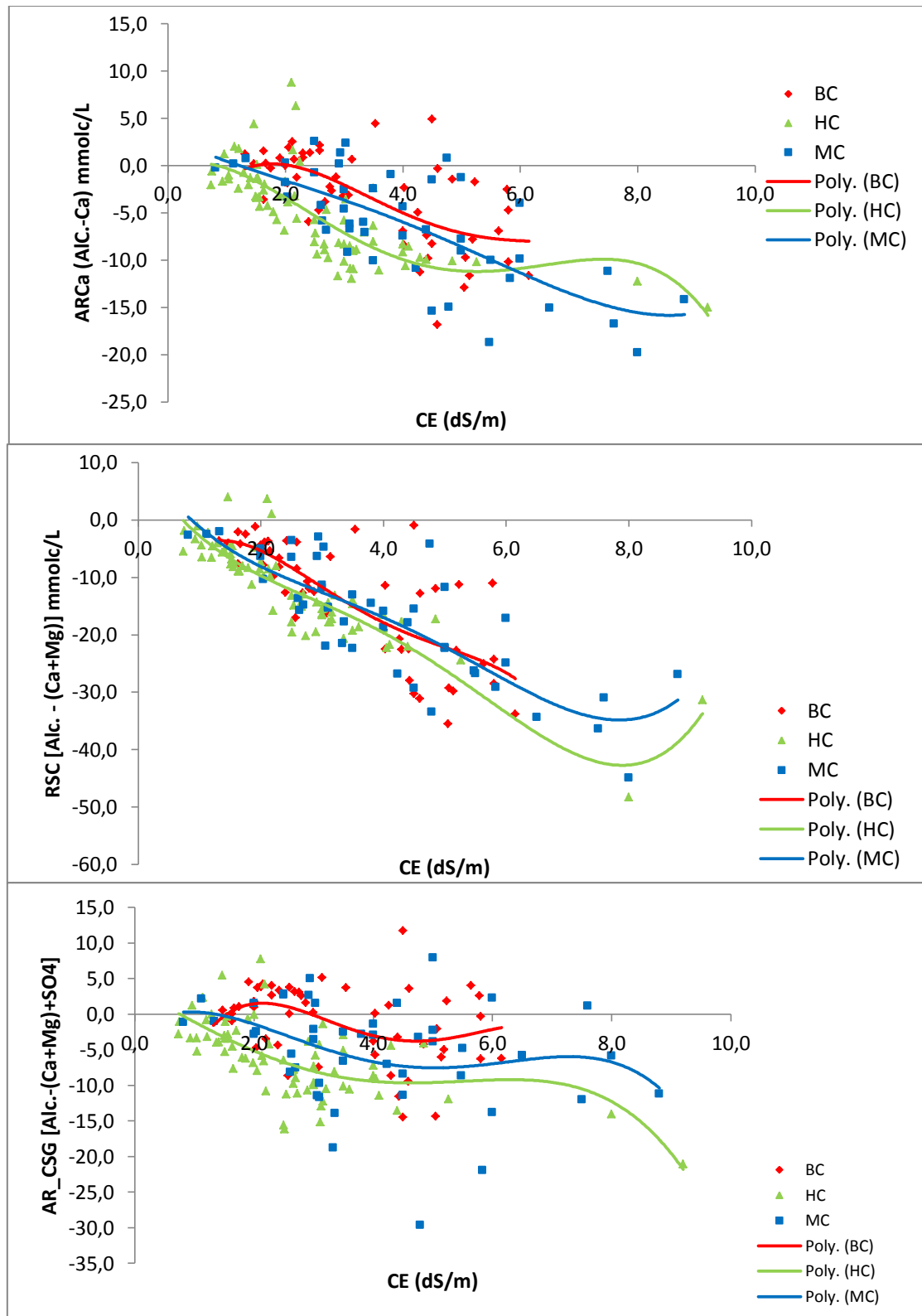


Figure 37 : L'évolution des différentes alcalinités résiduelles en fonction de la CE.

De ce comportement il ressort que :

- Les eaux des plaines de Chélif ont tendance à se précipiter sous forme de calcite et de gypse, ce qui va provoquer une consommation des ions de calcium et une diminution de la concentration de cet élément et par conséquent une augmentation du SAR (figure 38).

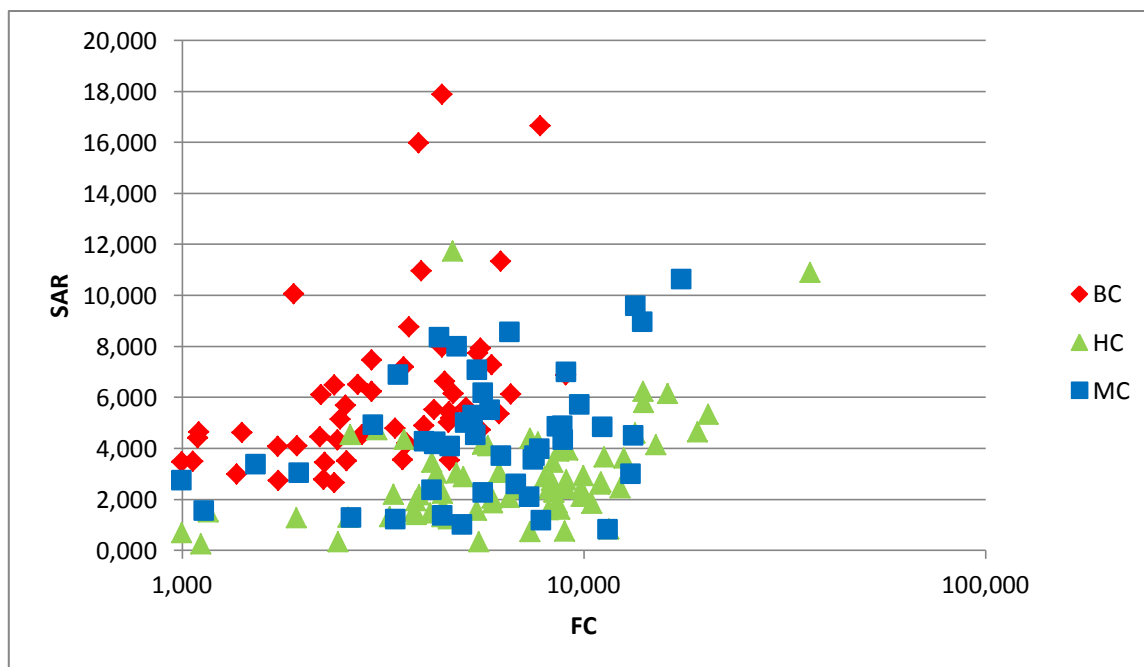


Figure 38 : Diagramme de l'évolution du SAR en fonction du facteur de concentration

L'augmentation du SAR est proportionnelle au facteur de concentration pour toutes les eaux des plaines de Chélif comme le montre le diagramme. La prédiction de l'augmentation du SAR en fonction de l'évolution géochimique devient encore plus crédible.

- Les eaux du MC et HC peuvent présenter un risque lorsque leur concentration est faible (faible valeur de Cl^-), ce qui donne des alcalinités résiduelles positives et peuvent présenter un danger lorsqu'elles se concentrent dans le sol.
- Les eaux du BC sont les plus dangereuses dans leur utilisation. Elles présentent un grand risque en particulier pour les valeurs du SAR.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

les objectifs de ce mémoire étaient de caractériser les eaux souterraines de chaque une des plaines de Chélif (haut, moyen et bas) d'une manière générale et puis de faire comparer la composition de ces eaux on faisant ressortir les ressemblances et les dissemblances entre les eaux des trois plaines. En deuxième étape on a opté pour une classification hiérarchique ascendante (HCA) pour les échantillons de toute la plaine afin de classer statistiquement ces eaux en plusieurs classes distinctes dans un but de voir si cette répartition des classes correspondrait ou pas à la répartition géographique dans la plaine de Chélif.

Pour cela nous avons procédé à l'étude de la qualité hydro-chimique de ces eaux, prédire leurs évolutions géochimiques pour évaluer le risque de leur utilisation sur la dégradation des sols.

Les résultats auxquels on a abouti ont montré que les eaux souterraines de la plaine du Haut-Chélif présentent essentiellement un faciès chloruré calcique. Une moyenne de CE de 2,60 dS/m indique que les eaux sont plus ou moins salées et sont déconseillées pour l'irrigation. D'un autre côté, une valeur moyenne de 3,22 du SAR montre qu'il n'y a pas de risque sur la dégradation physique des sols à cause de la sodicité. Le diagramme de Riverside montre que c'est la classe C3S1 suivie par les classes, C4S1 et qui sont les plus dominantes.

Pour la plaine du Moyen-Chélif, ces eaux présentent plusieurs faciès hydro-chimiques dominés principalement par des groupes chlorurés et sulfatés qui peuvent être calciques ou magnésiques. Une moyenne de CE de 4,03 dS/m indique que les eaux sont très fortement salées et qui sont déconseillées pour l'irrigation. Le SAR avec une moyenne de 5,23 indique un faible danger de sodisation des sols. Selon le diagramme de Riverside c'est les classes C4S2 suivie par C4S1 et C3S1 qui sont les plus dominantes.

Dans le Bas-Chélif les faciès dominants sont chlorurés et sulfatés qui peuvent être calciques et/ou magnésiques. Une moyenne de CE de 3,42 dS/m indique que les eaux sont très salées donc elles sont déconseillées pour l'irrigation. Le SAR avec une moyenne de 6,22 indique un faible danger de sodisation des sols. Selon le diagramme de Riverside il apparaît ce sont les classes C3S1, C3S2 et C4S2 qui sont les rependus indiquant une qualité des eaux mauvaise, car elles présentent des risque de salinité et de sodicité moyens à élevés.

L'étude comparative de la composition ionique des eaux des plaines du Chélif a montrée que les eaux du Moyen-Chélif sont les plus chargées de point de vu cationique car elles

enregistrent les moyennes les plus élevées pour les cations Ca^{+2} , Mg^{+2} et k^+ , suivies ensuite par le Bas et le Haut-Chélif. Comme pour les cations, les eaux de cette plaine sont les plus chargées de point de vu anionique (les chlorures et les sulfates), suivies par celle du Bas et du Haut-Chélif.

Comme la qualité des eaux dépend de l'interaction entre les éléments chimiques qui la composent, nous avons opté pour une analyse statistique multiparamétrique par application de l'ACP et l'HCA.

Les résultats obtenus par application de l'ACP pour chaque plaine montrent que l'axe 1 présente celui de la minéralisation géologique formé essentiellement des variables d'origine géologique (Mg, Ca, Na, Cl et SO_4) et explique près de 45 % de l'information totale à lui seul. La projection des individus sur le plan principal formé par l'axe 1 et l'axe 2 des différentes ACP a données trois groupes dans le Moyen et le Bas-Chélif et quatre groupes dans le Haut-Chélif. Ces groupes sont caractérisés par :

Une composition chimique des eaux dominée par les couples chlorure-calcium et chlorure-sodium pour les eaux du Haut-Chélif et les couples chlorure-sodium et chlorure-magnésium pour les eaux du Moyen. Les eaux du Bas-Chélif sont présentées que par le couple chlorures-sodium ce dernier est le groupe commun entre toutes les plaines.

Concernant la salinité : $\frac{3}{4}$ groupes d'eaux sont qualifiés comme inutilisables pour l'irrigation car elles présentent un risque de salinité dans la plaine de Haut-Chélif tandis que tous les groupes de la plaine du Moyen-Chélif sont désignés comme salés. $\frac{2}{3}$ groupes d'eaux du Bas-Chélif présentent un risque de salinité.

Malgré que le risque de sodicité n'a pas apparait clairement dans les groupes des différentes plaines mais il existe cependant, quelques forages qui présentent des valeurs très élevées du SAR dans toutes les eaux de la plaine de Chélif.

La classification hiérarchique nous a permet de classer les eaux de la plaine de Chélif en cinq classes distinctes de point de vus qualité des eaux d'irrigation. Il ressort que les eaux de la plaine de Chélif sont très diversifiées dans l'espace dont on trouve des eaux de très bonne qualité pour l'irrigation (principalement présentées par la classe C4 avec (30%) répartirent en gros dans le Haut et le Bas-Chélif, et des eaux qui présentent un risques de salinité : C3 (24%) répartie dans Haut et le Moyen-Chélif et C5 (17%) répartie dans le Moyen et le Bas-Chélif et en fin des eaux qui présentent les deux risque en même temps (salinité et sodicité) présentées principalement par la classe C1 (21%) repartie dans le Moyen et le Bas-Chélif.

Le recours à l'évolution géochimique des eaux pour mieux caractériser la qualité des eaux s'est fait suite à l'insuffisance des paramètres pris dans la prédiction des risques dus à l'utilisation de ces eaux à savoir la CE et le SAR.

Les eaux du Chélif ont tendance à précipiter sous forme de calcite- gypse ($\text{Alc} + \text{SO}_4 > \text{Ca}$) ce qui affecte en particulier l'ion calcium et provoquerait une augmentation du SAR. Les eaux du Moyen-Chélif et Haut-Chélif peuvent présenter un risque lorsque elles sont diluées ce qui donne des alcalinités résiduelle positive et peuvent présentées un danger lorsqu'elles se concentrent dans le sol. Les eaux du Bas-Chélif sont les plus dangereuses dans leurs utilisations. Elles présentent un grand risque en particulier pour les valeurs du SAR. L'action de ces eaux souterraines utilisée dans l'irrigation sur la qualité des sols devient donc plus apparente quand le raisonnement se fait par rapport l'alcalinité résiduelle plutôt que le SAR qui ne montre aucun risque de sodicité. L'étude de l'évolution géochimique des eaux d'irrigation s'est donc avérée nécessaire pour connaître et prédire l'impact de l'utilisation des eaux dans l'irrigation des sols.

*Références
Bibliographiques*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABH -CZ (1). (2004)** – Cadastre Hydraulique du bassin hydrographie du Cheliff-Aval du barrage de Boughzoul – Première partie : Haut et moyen Cheliff, P 62.
- ABH -CZ (2). (2004)** – Cadastre Hydraulique du bassin hydrographie du Cheliff-Aval du barrage de Boughzoul – deuxième partie : Bas Cheliff et la mina, P 52.
- Achite M; Rezak S; Benbouali A. 2003.** Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation en zone semi-aride. Cas des eaux souterraines de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss (Wilaya de Mascara). In 54th International Executive Council of ICID, 20th ICID European Conference.
- Al Droubi A., (1976)** : Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation - Modèle thermodynamique de simulation - Application aux sols salés du Tchad. Mémoire des Sciences Géologiques, University of Strasbourg, P 177.
- Al Droubi A; Fritz B; Gac J. Y. et Tadrdy Y., 1980.** Generalized residual alkalinity concept; Application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. Amer.J.,Sci., pp. 560-572.
- Allison L.E., 9614.** Salinity in relation to irrigation. Adv. Agron. 16: 139-180.
- Appelo CAJ et Prosser D., 1993.** Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema: Rotterdam, Netherlands.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1984.** La qualité de l'eau en irrigation. Bulletin d'irrigation et de drainage. 29 Rév. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.165p.
- Ayers R.S., Westcot D.W., (1988).** La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO D'irrigation et de drainage. 29 Rév. 1, P 165.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1976.** La qualité de l'eau en agriculture. Irrigation and Drainage Pap. 29. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1985.** La qualité de l'eau en irrigation. Bulletin d'irrigation et de drainage. 29 Rév. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.

- Badraoui M; Souidi B; Merzouk A; Farhat A; M'hamdi A., 1998.** Changes of soil qualities under pivot irrigation in the Bahira region of Morocco: Salinization. *Advances in Geo Ecology*, pp 503-508.
- Barbiero L et Valles V., 1992.** Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (République du Niger). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, no 2, pp 143-152.
- Barbiero L; Vallès V; Cheverry C., 2004.** Some observations with respect to sodicity hazard of irrigation waters. Letter to the Editor. *Agricultural Water Management*, P 177–184.
- Belkebir L; Labdi A; Mansour B; Bessedik M; Saint Martin J.P., 2008.** Biostratigraphie et lithologie des séries serravallo-tortonniennes du massif du Dahra et du bassin du Chélif (Algérie). Implication sur la position de la limite serravallo-tortonienne. *Geodiversitas* 30, pp 9-19.
- Bernstein L., 1965.** Salt Tolerance of Fruit Crops. U.S. Dep. Agric. Res. Serv. Agric. Inf. Bull. 292.
- Bishop C., 1995.** Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford: University Press. 498p.
- Bremond R et Vuichard R., 1973.** Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris, P 179.
- Carter L., 1969.** Effects of acidic and alkaline effluents on fish in sea water. Butterworth Scientific, New York.
- Castany G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. 2ème cycle. édit. Dunod. Paris. 236 p.
- Chapman H.D., 1966.** Diagnostic Criteria for Plants and Soils. University of California, Berkeley, California. 793 pp.
- Condom N., 2000.** Analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse Doctorat Ecole National Supérieur d'Agronomie de Montpellier, P 240.
- Couture I., 2006.** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. Communication au colloque sur l'irrigation. L'eau, source de qualité et de rendement. Québec 10 février, P13.

- Davis J.C., 1986.** Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Debieche T.H., 2002.** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. U.F.R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté. Ecole Doctorale Homme, Environnement, Santé. P 199.
- Delteil J., 1974.** Tectonique de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du Tell oranais oriental. Thèse de Doctorat d'État, université de Nice, France, P 294.
- Derron M H., (2000).** Interaction eau-roche de base température : Géochimie des eaux de sources et interaction eau-roche dans les Alpes, cours donné au Centre d'Analyse Minérale, Science de la Terre. Univ Lausanne, 20 p.
- Dervin Ch., 1992.** Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle. Collection STATITCF. 93P
- Detay M., 1997.** La gestion active des aquifères. Paris, Masson. 410 p.
- Diday E. ; Lemaire J. ; POUGET J. ; TESTU M., 1982.** Eléments d'analyse de données. Ed. BORDAS. 463p
- Douaoui A., Gascuel-Odoux C., Walter Ch., 2004.** Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. EGS, Vol. 11, N°4, pp 379-392..
- Douaoui A; Hartani T; Lakehal M., 2006.** La salinisation dans la plaine du bas Cheliff : acquis et perspectives. Economies d'eau en Systèmes irrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 mai 2006.
- Douaoui A., 2005.** Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif .Apport de la géostatistique et de La télédétection, Thèse Doctorat d'état, INA d'Alger, 258p.
- Durand J.H., 1982.** Les sols irrigables. Edit. P.U.F, Paris, 340 p.
- Eaton F.M., 1950.** Significance of carbonate in irrigation waters. Soil Sci.123-133.
- FAO, 1996.** La qualité d'eau dans l'irrigation, Bulletin n°29 de l'Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture.
- Gapon E., 1933.** On the theory of exchange adsorption in soils. J.Gen.Chem. USSR (Eng. Translation), **3** :144–163.

- Gonzales-Barrios J.L., 1992.** Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine: exemple dans la "comarc Lagunera". These de doctorat, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, multigr, P 316.
- Gouaidia, L., 2008.** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des parametres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algerien. Thèse Doctorat d'état, universite badji mokhtar-annaba, P 199.
- Hardie L.A. et Eugster H.P., 1970.** The evolution of closed -basin brines, Mineral. Society American Special Publish, v. 3,PP: 273-290.
- Harivandi A., 1999.** Interpreting turfgrass irrigation Water test result. Water journal of California, Publication 8009, University of California, Division of agriculture and natural resources. 9p.
- Hennia, K., 2006.** Contribution à la gestion qualitative des eaux souterraines dans les zones semi-arides Application au moyen Cheliff occidental. Thèse magister. Université Hassiba Ben Bouali Chlef, P 125.
- Lahlou M; Badraoui M; Soudi B; Goumari A ; Tessier D., 2002.** Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France, CEMAGREF, CIRAD, IRD.
- Lasch P; Haensch W; Naumann D; Diem M., 2004.** Imaging of colorectal adenocarcinoma using FT-IR microspectroscopy and cluster analysis. Biochim Biophys Acta.
- Lebart L; Piron M; Morineau A., 2006.** Statistique Exploratoire Multidimensionnelle, Visualisation et inférence en fouilles de données. 4^{ème} édition ; DUNOD, Paris.
- Marlet S., et Job J.O., 2006.** Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R.
- Mattauer M., 1958.** Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). Thèse Es-science, Paris. PP 296 – 313.
- Mc Donald et Bneder., 1990.** (Bureau National d'Etude pour le Développement Rural), Etude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas Chélif.
- NAS/NAE., 1973.** Water Quality Criteria 1972. Report of the U.S. National Academy of Sciences and National Academy of Engineering. Funded by U.S. Environmental Protection Agency.

- Olivier A., 2005.** Chimie et pollution des eaux souterraines. Edition Tec et Doc. Lavoisier. ISBN, P 67.
- Ollier C.H. et Poiree M., 1986.** Irrigation, les réseaux d'irrigation: Théorie, technique et économie des arrosages. Edt EYROLES, Paris, 503 p.
- Oster J.D. et J.D. Rhoades., 1984.** Water management for salinity and sodicity control. Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater. A Guidance Manual. California State Water Resources Control Board. Rep. No. 84-IWR. pp. 3-1 à 3-37.
- Philipeau G., 1992.** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales? Collection STA-ITCF. 93P
- Polvêche J., 1960.** Contribution à l'étude géologique de l'Ouarsenis oranais. Publication des Services de la Carte géologique de l'Algérie, nouvelle série 24: 1-576.
- RATA M., 2010.** Variabilité spatio-temporelle de la salinité dans La plaine du Bas Chélif - Etablissement d'une Banque de Données. Thèse Magister, UHBC,P 142.
- Rhoades J.D., 1968.** Mineral-weathering correction for estimating the sodium hazard of irrigation waters. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 648-652.
- Rhoades J.D., 1971.** Quality of water for irrigation. Soil Sci. 277-284.
- Ribolzi O; Valles V ; Barbiero L., 1993.** Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan, Science du Sol, pp. 77-95.
- Richards L.A., 1954.** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, 160 p.
- Rieul L., Ruelle P., 2003.** Irrigation- Guide pratique 3ème édition Cemagref.
- Rodier J., 1984.** L'analyse de l'eau, eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. 8ème édition: Dunode, Paris.
- Roux J., 2000.** Les secrets de la terre. L'eau source de vie. Edit. BRGM. Orléans -la campagne de livre. Paris.
- RQEC., 2008.** Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Le Conseil canadien des ministres de l'environnement, P 209.
- Samba R., 1998.** Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal: analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne

vallée en simple et double riziculture. Thèse Doc. Ing., Uni. Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). 175p

Samner M.E., 1993. Sodic Soils - New perspectives. Aust. J. of Soil Res, 683-750.

SCET – ARG1 (2)., 1985. Bilan des ressources hydriques, Etude du réaménagement et de l'extension du périmètre du moyen Chélib Rap A1.1. Pub. Ministère de l'Hydraulique. PP 4- 28.

Schoeller j., 1971. La pollution des eaux souterraines. Actes du Colloque de Moscou.

Sofreco., 2010. Etude d'actualisation du plan national de l'eau, volet 2: ressources en eau souterraine, Tome 2: monographie des aquifères, l'Union Européenne, P 353.

Tabet D.H., 1999. Intérêt d'une approche spatiale par suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Panjab (Pakistan). Thèse Doctorat ENGREF, Montpellier. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec. et Doc. Lavoisier.

Thorne DW et Peterson HB., 1954. Irrigated Soils. Constable and Company, London, UK.

Trombe F., 1977. Les eaux souterraines - QUE SAIS-JE ?-, 3e édition : 4 e trimestre, presses universitaires de France, 128 P.

Umali D.L., 1993. Irrigation-induced salinity. A growing problem for development and the environment. World Bank technical paper, p 78.

USSL., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United State Salinity Laboratory Staff, US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print.

Valiron F., 1989. Gestion des eaux: alimentation en eau, assainissement. Edit. PENPC ,501 p.

Vallés V; N'Diaye M.K.; Bernadac A ; Tardy Y., (1989). Mali. Al, Si and Mg in water concentrated by evaporation: development of a model. Arid Soil Res. Rehabil, pp 21–39.

Van Beek C.G.E.M ; Van Breemen N., 1973. Thealkalinity of alkali soils. Journal of Soil Science, vol. 24, no 1: 129-136.

Cloutier V., 2004. Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des basses laurentides dans les roches sédimentaires Paléozoïques des basses-terres du saint-laurent, québec, canada. Thèse Doctorat, Université du Québec, P 346.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Wilcox L.V., 1958. Determining the Quality of Irrigation Water. U.S. Dep. Agric. Res. Serv.
Agric. Inf. Bull. No. 197.

Yacono X., 1955. Colonisation des plaines du Chélif (de Lavigerie au confluent de la Mina).
Tome 1, Imprimerie Imbert, Alger.

Annexe

ANNEXE

Tableau 01: caractéristiques et classe des points échantillonnés.

Pleine	Point	Ca	Mg	Na	K	Cl	So4	Hco3	PH	CE	SAR	Classe
Haut-Chélif	1	10,638	7,417	7,310	0,603	11,774	6,678	4,880	7,600	2,500	2,433	3
	2	6,383	6,357	4,300	0,034	7,801	2,457	4,978	7,600	1,510	1,704	4
	3	12,340	6,781	7,482	0,151	14,283	5,376	4,002	7,700	2,660	2,420	3
	4	14,681	14,198	17,630	0,047	33,495	12,443	4,490	7,500	5,260	4,640	5
	5	4,894	6,993	5,332	0,029	6,786	5,859	4,978	7,800	1,520	2,187	4
	6	7,447	6,993	3,440	0,023	8,033	1,344	5,466	7,800	1,650	1,280	4
	7	14,043	13,139	8,901	0,083	17,183	10,290	5,466	7,600	4,100	2,414	3
	8	11,489	5,510	3,612	0,016	8,033	4,998	5,758	7,700	1,858	1,239	4
	9	5,106	10,172	5,160	0,029	10,353	2,709	6,734	7,700	2,130	1,867	4
	10	12,128	13,563	9,890	0,018	15,805	12,495	5,075	7,500	3,350	2,759	3
	11	8,085	5,934	5,504	0,002	11,397	1,827	4,197	7,700	2,050	2,079	4
	12	12,766	7,205	9,159	0,065	13,993	8,190	4,441	7,400	3,000	2,898	3
	13	12,766	4,238	7,826	0,062	19,285	2,583	3,904	7,800	3,210	2,684	3
	14	10,000	11,867	11,438	0,442	14,645	9,608	6,442	7,800	3,030	3,459	1
	15	14,894	11,655	16,770	0,390	23,418	13,178	4,294	7,900	4,050	4,603	5
	16	8,298	4,874	4,988	0,049	6,670	4,767	4,978	7,800	1,555	1,944	4
	17	5,957	2,967	2,752	0,039	4,524	1,050	4,490	7,000	1,034	1,303	4
	18	9,149	1,483	9,589	0,026	9,773	4,116	5,856	7,600	1,896	4,159	4
	19	15,319	12,079	15,351	0,029	26,390	8,505	5,368	7,800	4,400	4,148	5
	20	8,723	12,291	11,868	0,036	19,648	4,515	6,344	7,700	3,500	3,661	1
	21	5,319	8,477	11,524	0,013	12,833	3,822	5,758	8,100	2,250	4,388	4
	22	17,021	36,026	27,520	0,333	35,670	34,230	4,782	8,000	8,000	5,344	6
	23	4,043	1,271	2,451	0,023	2,030	0,840	3,416	8,300	0,749	1,504	4
	24	14,043	9,748	10,148	0,026	17,400	10,238	4,880	7,900	4,000	2,942	3
	25	8,511	6,357	3,612	0,042	5,742	4,410	5,905	7,700	1,634	1,325	4
	26	8,450	3,818	3,741	0,239	6,583	5,754	4,197	7,800	1,702	1,510	4
	27	8,000	2,573	3,397	0,039	7,250	2,520	4,587	7,700	1,512	1,477	4
	28	12,700	7,636	8,729	0,395	14,500	11,025	6,344	7,800	3,500	2,737	3
	29	13,050	5,229	6,923	0,055	14,718	6,353	4,119	7,500	2,670	2,290	3
	30	14,000	7,138	19,995	0,055	28,275	13,125	3,904	7,600	4,850	6,150	5
	31	5,800	3,237	4,687	0,052	5,858	4,200	4,490	7,700	1,537	2,205	4
	32	9,850	3,403	3,397	0,047	7,743	2,205	4,929	7,700	1,800	1,320	4
	33	13,617	11,231	8,557	0,065	15,805	14,175	5,563	7,600	3,500	2,428	3
	34	11,064	10,172	1,118	0,047	9,570	4,935	5,466	7,700	2,200	0,343	3
	35	9,650	6,557	4,472	0,044	9,454	3,150	6,442	7,700	2,160	1,571	4
	36	14,100	7,055	9,933	0,047	10,730	14,700	5,075	7,600	3,160	3,054	3
	37	5,053	5,452	0,774	0,047	4,263	1,239	4,002	7,700	1,040	0,338	4
	38	11,000	1,743	5,203	0,044	10,324	1,743	4,148	7,500	1,985	2,061	4
	39	15,450	6,308	6,106	0,065	18,270	4,988	4,490	7,600	3,160	1,851	3
	40	13,200	5,478	4,945	0,044	15,225	3,623	3,806	7,700	2,540	1,618	3
	41	15,000	7,553	8,213	0,052	21,533	8,085	3,904	7,600	3,600	2,446	3
	42	14,300	8,051	20,855	0,239	24,505	13,335	4,587	7,700	4,300	6,238	5

Haut-Chélif	43	5,106	3,391	0,516	0,296	1,943	2,667	3,026	7,600	0,735	0,250	4
	44	8,250	3,320	3,397	0,047	6,699	4,809	3,904	7,600	1,565	1,412	4
	45	15,150	5,810	11,696	0,044	21,968	4,830	3,172	7,400	3,130	3,613	3
	46	13,700	8,134	19,135	0,104	24,578	9,240	5,368	7,400	4,000	5,791	5
	47	6,850	3,320	2,881	0,049	3,364	4,074	6,100	7,600	1,292	1,278	4
	48	8,333	8,300	11,223	0,052	15,153	4,032	3,660	7,600	2,700	3,892	3
	49	12,500	12,450	2,623	0,065	12,833	3,423	5,368	7,500	2,510	0,743	3
	50	5,833	4,150	1,548	0,065	1,740	5,712	3,416	7,700	1,200	0,693	4
	51	16,350	6,889	2,580	0,091	15,660	2,625	5,466	7,400	3,110	0,757	3
	52	12,979	6,146	13,115	0,070	13,413	10,500	4,782	7,700	2,910	4,241	3
	53	1,915	1,695	4,644	0,052	7,308	0,000	0,244	6,400	0,933	3,457	4
	54	0,213	0,424	14,663	0,130	7,627	1,470	4,587	9,300	1,467	25,990	4
	55	1,489	4,238	7,697	0,078	4,582	4,557	3,514	8,300	1,139	4,548	4
	56	0,213	5,086	19,092	0,494	8,236	4,053	8,979	9,000	2,110	11,730	1
	57	14,468	10,384	6,579	0,078	15,008	9,030	4,685	7,500	2,730	1,866	3
	58	2,128	6,357	6,235	0,052	8,410	1,365	3,904	8,300	1,214	3,027	4
	59	10,000	10,808	6,837	0,047	17,183	6,657	4,197	7,700	3,000	2,120	3
	60	4,681	4,026	4,687	0,042	7,772	1,386	3,367	8,100	1,406	2,246	4
	61	1,702	2,331	6,708	0,042	5,336	2,310	2,928	8,200	0,965	4,724	4
	62	4,894	5,298	9,847	0,065	6,235	3,150	11,224	8,800	2,180	4,362	1
63	13,400	5,893	12,212	0,091	15,950	10,080	4,880	7,500	3,100	3,932	3	
64	16,550	7,802	5,590	0,091	14,283	8,768	4,880	7,400	2,900	1,602	3	
65	4,000	3,569	5,633	0,091	8,758	1,638	1,952	7,400	1,373	2,896	4	
66	7,450	1,245	6,321	0,143	7,511	1,470	4,197	9,300	1,500	3,032	4	
67	14,050	6,225	8,256	0,078	19,140	6,699	3,904	7,300	3,000	2,593	3	
68	11,489	9,748	2,709	0,130	20,155	2,226	3,416	7,400	2,500	0,831	3	
69	16,000	16,355	43,860	0,117	63,800	10,343	0,976	6,600	9,200	10,905	6	
70	4,842	5,661	9,417	0,091	10,063	7,266	3,172	7,500	2,000	4,109	4	
Moyen-Chélif	71	6,452	4,284	19,350	0,148	12,978	7,928	7,808	8,500	2,940	8,352	1
	72	15,484	13,280	18,490	0,179	26,245	18,428	6,442	8,000	5,000	4,876	5
	73	11,915	14,410	25,370	0,429	26,825	19,950	4,148	7,700	5,000	6,993	5
	74	4,255	6,146	15,695	0,010	10,237	6,300	6,832	7,400	2,500	6,882	1
	75	5,895	7,129	18,060	0,650	16,095	6,258	8,296	8,200	3,030	7,077	1
	76	17,684	15,936	9,245	0,172	16,675	19,740	6,832	8,000	4,230	2,255	5
	77	11,158	11,113	20,640	0,936	16,675	19,425	4,392	7,800	4,400	6,185	5
	78	10,526	10,484	27,735	1,222	19,430	19,635	9,272	7,800	5,000	8,557	1
	79	21,895	7,549	14,190	0,234	22,403	17,640	3,172	7,900	5,480	3,698	5
	80	4,211	6,500	18,490	0,403	14,355	8,978	4,392	8,300	2,920	7,990	1
	81	26,105	25,162	24,510	0,143	33,060	39,060	6,344	8,000	8,000	4,841	6
	82	20,632	14,259	39,990	0,715	40,020	32,130	3,904	7,900	7,600	9,574	6
	83	3,542	2,698	4,859	0,205	2,958	4,704	3,709	6,680	1,120	2,751	4
	84	3,232	2,415	2,623	0,107	3,364	1,554	2,977	7,500	0,814	1,561	4
	85	8,602	5,783	9,030	0,166	4,524	9,345	7,857	7,700	2,500	3,367	1
	86	6,452	8,782	12,470	0,164	15,950	7,770	3,904	7,800	3,000	4,518	3
	87	7,312	9,425	10,750	0,099	18,488	5,481	3,123	7,700	2,610	3,716	3
	88	11,915	7,205	12,900	0,497	12,615	9,660	7,320	7,500	3,000	4,172	1

Moyen-Chélif	89	12,766	13,139	32,250	0,000	41,615	3,297	8,784	8,000	6,000	8,961	1
	90	4,255	5,298	10,750	0,047	8,874	6,552	4,538	7,700	2,000	4,919	4
	91	15,957	15,046	21,715	0,018	17,328	27,195	6,100	7,700	6,000	5,515	5
	92	10,638	8,477	15,480	0,040	15,080	14,490	3,221	7,500	4,000	5,007	3
	93	6,809	13,563	13,545	0,172	12,688	11,708	5,856	7,500	3,800	4,244	1
	94	9,787	13,986	14,921	0,042	26,390	4,116	8,296	7,500	4,500	4,328	1
	95	10,213	14,410	14,362	0,030	13,775	15,803	5,856	7,400	4,000	4,093	5
	96	20,000	12,715	43,000	0,617	51,910	15,645	5,856	7,500	8,800	10,632	6
	97	17,021	25,218	20,640	0,041	39,440	24,360	5,856	7,700	7,500	4,491	6
	98	2,660	2,755	4,988	0,031	5,800	0,966	3,416	7,900	1,332	3,032	4
	99	17,021	16,741	19,995	0,163	25,520	21,945	7,027	7,500	5,500	4,867	5
	100	8,511	10,596	16,340	0,025	15,733	10,500	6,100	7,500	3,500	5,287	1
	101	7,234	6,993	3,440	0,039	7,830	7,896	3,904	7,100	2,040	1,290	4
	102	11,158	10,694	8,600	0,052	20,155	3,822	4,099	7,600	3,360	2,602	3
	103	9,792	8,508	10,750	0,112	22,185	5,460	3,123	7,600	3,100	3,554	3
	104	4,167	4,980	35,045	0,226	39,440	0,903	4,978	7,100	4,760	16,387	1
	105	5,000	4,565	9,331	0,065	11,890	3,507	3,221	7,600	2,000	4,267	4
	106	9,792	9,130	12,255	0,026	23,055	3,612	3,611	7,800	3,100	3,984	3
	107	16,421	17,194	12,298	0,031	38,860	7,182	4,490	7,490	5,830	3,000	5
	108	20,211	19,291	25,370	0,031	29,000	28,560	5,173	7,230	6,500	5,709	6
	109	9,684	7,968	4,042	0,031	13,195	7,266	2,879	7,780	2,700	1,361	3
	110	19,789	13,839	8,600	0,052	21,750	20,843	4,392	7,290	4,500	2,097	5
	111	8,211	9,855	3,655	0,036	10,092	10,133	2,342	7,420	2,630	1,216	3
	112	20,211	18,452	3,569	0,036	34,075	3,759	5,270	7,860	4,790	0,812	5
	113	12,632	12,791	3,569	0,029	14,790	10,500	3,465	7,080	3,060	1,001	3
114	9,684	15,517	4,171	0,026	23,273	2,709	3,709	7,180	3,330	1,175	3	
115	14,043	12,291	8,600	0,065	12,412	15,750	4,002	7,450	3,500	2,370	3	
Bas-Chélif	116	4,580	4,250	9,288	0,047	5,539	4,578	4,782	7,900	1,470	4,420	4
	117	8,818	9,278	14,405	0,060	17,183	14,543	6,149	7,600	2,790	4,789	1
	118	9,619	8,471	50,095	0,034	39,440	13,598	7,076	7,800	5,780	16,657	1
	119	13,026	15,127	20,382	0,069	23,345	19,215	5,661	7,600	4,410	5,433	5
	120	2,405	6,051	36,765	0,133	22,475	5,303	6,832	8,000	3,540	17,881	1
	121	3,006	2,017	15,953	0,091	9,599	5,732	3,821	7,600	1,910	10,067	4
	122	5,210	7,059	19,737	0,026	22,475	11,550	5,856	7,600	3,140	7,969	1
	123	4,409	5,849	13,846	0,029	11,238	7,613	6,344	7,900	2,060	6,114	1
	124	4,208	6,051	14,706	0,035	12,108	9,608	4,880	7,800	2,150	6,493	4
	125	4,409	10,085	16,770	0,029	15,008	8,505	6,002	7,900	2,590	6,230	1
	126	3,808	6,245	14,577	0,026	13,848	7,560	6,344	7,800	2,120	6,502	1
	127	5,010	7,463	14,233	0,010	12,905	10,658	5,856	7,900	2,300	5,699	1
	128	4,208	6,051	16,297	0,034	18,053	7,665	6,344	7,800	2,590	7,196	1
	129	3,407	5,849	34,401	0,046	19,648	12,653	8,296	7,700	4,500	15,991	1
	130	4,008	5,042	15,910	4,134	15,008	6,983	5,368	8,000	2,420	7,479	2
	131	5,611	4,437	10,406	0,030	5,568	5,061	5,856	8,000	1,670	4,642	4
	132	16,032	18,152	30,100	0,108	29,870	23,730	4,392	7,800	5,140	7,281	6
	133	13,226	18,152	18,748	0,072	27,985	16,380	3,416	7,800	4,430	4,733	5
	134	16,032	22,186	30,100	0,094	45,675	27,615	4,392	7,700	6,150	6,886	6

Bas-Chélif	135	17,034	22,589	23,865	0,060	31,175	21,105	4,148	7,700	5,050	5,362	6
	136	7,615	8,471	12,900	0,045	14,210	13,808	5,368	7,600	2,760	4,549	1
	137	12,024	18,152	30,100	0,051	27,550	29,085	5,124	7,620	5,640	7,749	6
	138	10,822	15,732	20,124	0,064	21,460	21,945	5,856	7,760	4,260	5,523	5
	139	6,012	9,479	11,395	0,034	9,788	10,815	7,320	7,870	2,300	4,094	1
	140	9,218	8,874	15,480	0,034	12,543	15,855	5,368	7,910	2,680	5,147	1
	141	7,014	4,034	8,213	0,041	5,394	6,678	3,416	7,930	1,630	3,494	4
	142	14,429	11,295	21,973	0,029	33,350	13,913	3,172	8,010	4,300	6,127	5
	143	9,018	11,295	14,190	0,063	11,165	14,070	7,808	8,060	2,870	4,453	1
	144	14,028	14,118	18,404	0,096	20,228	16,800	5,612	8,020	4,030	4,906	5
	145	14,830	19,564	23,306	0,096	25,810	27,195	5,124	7,800	5,070	5,620	6
	146	8,216	9,076	25,800	0,060	18,560	11,550	5,856	7,790	4,030	8,774	1
	147	6,814	10,488	32,250	0,051	19,938	7,665	5,368	7,910	4,850	10,965	1
	148	13,828	14,925	30,100	0,631	27,985	17,745	6,002	7,800	5,190	7,939	5
	149	4,008	4,841	7,310	0,032	5,046	2,499	5,222	8,050	1,320	3,475	4
	150	7,214	3,227	10,578	0,029	7,134	6,783	5,417	7,950	2,000	4,630	4
	151	6,012	6,051	10,621	0,043	12,325	3,203	4,148	7,880	2,040	4,325	4
	152	6,613	8,673	9,546	0,075	11,455	6,405	5,368	7,100	2,200	3,453	4
	153	8,617	13,110	13,846	0,073	18,343	8,768	5,466	6,900	3,080	4,201	1
	154	15,832	21,984	15,394	0,070	23,418	15,750	7,564	6,900	4,500	3,540	5
	155	8,617	12,505	19,995	0,065	23,925	16,433	8,296	7,000	4,600	6,153	1
	156	9,619	6,656	7,611	0,057	12,108	8,243	3,660	7,200	2,400	2,668	3
	157	5,411	2,219	5,848	0,070	6,931	3,570	5,124	7,100	1,750	2,994	4
	158	7,214	8,874	9,976	0,081	12,978	12,338	4,002	6,900	2,990	3,517	3
	159	8,617	12,303	8,987	0,078	11,383	8,348	3,904	7,000	2,570	2,779	3
	160	4,409	4,437	8,600	0,055	8,773	5,408	4,392	7,100	2,000	4,089	4
	161	16,032	14,118	25,800	0,120	22,838	23,993	5,856	7,100	5,800	6,645	5
	162	22,445	14,320	15,222	0,112	17,908	21,683	5,612	6,800	4,590	3,550	5
	163	4,609	3,614	5,547	0,073	8,787	2,142	6,149	8,100	1,630	2,736	4
	164	10,822	12,303	17,071	0,112	23,273	15,383	3,904	7,000	4,000	5,020	5
	165	10,621	23,799	21,500	0,107	23,563	22,208	5,905	7,000	5,800	5,183	5
	166	6,600	9,562	32,250	0,179	31,465	13,125	4,880	7,100	5,230	11,345	1

Tableau 02: Caractérisation par les variables continues des classes de la partition.

CLASSE	Effectif	Variables caractéristiques	Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test
1 / 6	35	Hco3	6,846	5,028	1,452	1,544	7,82
		SAR	7,529	4,558	3,970	3,498	5,64
		Na	19,853	13,316	9,344	9,414	4,61
		Ca	6,850	9,874	2,773	4,981	-4,03
3 / 6	40	Ca	11,926	9,874	2,543	4,981	2,98
		PH	7,525	7,664	0,223	0,410	-2,45
		Hco3	4,222	5,028	0,856	1,544	-3,78
		Na	7,989	13,316	3,257	9,414	-4,10
		SAR	2,524	4,558	1,101	3,498	-4,21
4 / 6	50	SAR	3,315	4,558	3,671	3,498	-3,00
		Hco3	4,399	5,028	1,198	1,544	-3,43
		Na	6,298	13,316	3,532	9,414	-6,29
		So4	3,692	9,708	2,131	7,516	-6,75
		Ca	5,711	9,874	2,452	4,981	-7,05
		Mg	4,329	9,183	2,071	5,541	-7,39
		Cl	7,319	16,766	2,747	10,220	-7,80
		CE dS/m	1,589	3,238	0,407	1,656	-8,40
5 / 6	28	Ca	14,991	9,874	3,183	4,981	5,94
		So4	16,670	9,708	5,264	7,516	5,36
		CE dS/m	4,746	3,238	0,622	1,656	5,27
		Mg	14,111	9,183	3,833	5,541	5,15
		Cl	24,505	16,766	5,636	10,220	4,38
		Na	17,962	13,316	5,333	9,414	2,86
6 / 6	12	CE dS/m	6,888	3,238	1,424	1,656	7,90
		So4	26,088	9,708	7,528	7,516	7,81
		Mg	20,806	9,183	5,925	5,541	7,52
		Cl	37,748	16,766	10,820	10,220	7,36
		Na	30,197	13,316	7,573	9,414	6,43
		Ca	17,745	9,874	3,429	4,981	5,67
		SAR	7,033	4,558	2,154	3,498	2,54