

Université Mohamed Kheider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydraulique et du G.Civil
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

Doctorat en Sciences

Option : SCIENCES HYDRAULIQUES

**CARACTERISATION DE LA SALINITE
D'UN COMPLEXE AQUIFERE EN ZONE ARIDE
CAS DE L'AQUIFERE D'EL-OUTAYA
REGION NORD-OUEST DE BISKRA. ALGERIE**

Présentée par:
BRINIS Nafaâ

Soutenue publiquement le : 01 décembre 2011

Devant le jury composé de:

Dr. ACHOUR Samia	Professeur	Présidente	Université de Biskra
Dr. BOUDOUKHA Abderrahmane	Professeur	Directeur de thèse	Université de Batna
Dr. DJABRI Larbi	Professeur	Examinateur	Université de Annaba
Dr. GUERGAZI Saadia	Maître de conférences "A"	Examinatrice	Université de Biskra
Dr. ROUABHIA Abdelkader	Maître de conférences "A"	Examinateur	Université de Tébessa

Dédicace

"On se lasse de tout sauf de comprendre"

*A la mémoire de mon très cher papa;
Sans ta présence toute joie n'est qu'illusion éphémère;
Sans toi rien ne sera plus comme avant.*

*A ma très chère mère
A ma femme et mes enfants
A mes frères et sœurs
A toute ma famille*

Remerciements

Il m'est très bien agréable d'adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail et ce ne sont pas ces quelques phrases si personnelles soient-elles qui arriveront à leurs exprimer mes sentiments de reconnaissances.

Je m'adresserai tout d'abord à Monsieur le Professeur BOUDOUKHA Abderrahmane de l'université de Batna d'avoir accepté de m'encadrer et suivre mon travail de près avec sa rigueur scientifique et ses conseils qui m'ont bien orienté dans l'élaboration de cette thèse. Je le remercie surtout pour sa disponibilité malgré ses responsabilités. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont également à madame ACHOUR Samia, Professeur à l'université de Biskra d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance, Monsieur le Professeur DJABRI de l'université de Annaba à qui je dois beaucoup, madame GUERGAZI Saadia, Maître de conférence à l'université de Biskra et Monsieur ROUABHIA Abdelkader, Maître de conférence à l'université de Tébessa d'avoir bien voulu assister et juger cette thèse.

Mes sincères remerciements au staff du département d'hydraulique ainsi que les responsables de la poste graduation "sciences hydrauliques" de l'université de Biskra qui m'ont permis de concrétiser ce projet de thèse en acceptant mon inscription.

Mes remerciements vont également aux responsables et cadres des directions de la wilaya de Biskra, Je cite:

Mes amis: A. Hamel ingénieur principal et chef de service de la DHW Biskra, H.Meftah directeur de l'ANRH de Biskra, F.Anani Directeur du complexe Enasel d'El-Outaya ainsi qu'aux responsables du laboratoire régional (Issam et Abdelli) du complexe, S. Chaoui Directeur du barrage Fontaine des gazelles.

Toute ma gratitude va à Monsieur le Dr. S. Bouhsina de l'université du littoral Dunkerque (France) pour ses conseils et son aide scientifique précieuse.

Mes remerciements vont également au Dr. M. Chebah pour son apport considérable dans la compréhension de la géologie, qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance au Professeur J. Mania pour son aide pour l'élaboration de la publication, je le remercie aussi pour ses encouragements.

Mes remerciements les plus sincères vont également à ma famille pour leur soutien moral et leur patience pendant les moments difficiles dans la réalisation de ce travail. Grâce à eux, les moments de découragement furent rares et brefs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Toute ma reconnaissance à tous les propriétaires des points d'eau qui m'ont autorisé à effectuer sans difficulté des prélèvements d'échantillons et autres mesures.

Et enfin, je tiens à remercier tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser cette thèse, je cite spécialement mes collègues du Département des sciences de la terre de l'université de Batna ainsi que ceux du département de géologie et d'hydrocarbure de l'université de Ouargla.

Résumé

CARACTERISATION DE LA SALINITE

D'UN COMPLEXE AQUIFERE EN ZONE ARIDE

Cas de l'aquifère d'El-Outaya – Région NW de Biskra – ALGERIE

La plaine d'El-Outaya (la grande plaine) se trouve dans la wilaya de BISKRA au sud algérien. Une région aride où se pose le problème de la salinité des eaux souterraines. Elle est le siège d'une activité agricole intense avec le lancement d'un programme ambitieux de la mise en valeur de ses terres. Et hormis un barrage réalisé à l'amont, l'essentiel des besoins en eau proviennent et continueront de provenir des eaux souterraines.

L'étude de ces eaux fait apparaître l'importance du faciès gypso-salifère sous l'influence de la dissolution des formations évaporitiques (Trias et Néogène). Ces eaux contiennent des teneurs élevées en sulfates, chlorures, et sodium. Les concentrations en sels sont très variables d'une zone à autre et se regroupent en trois familles chimiques: sulfatée magnésienne, sulfatée sodique et chlorurée sodique. L'évolution du chimisme est en étroite relation avec les axes des écoulements des eaux souterraines

Le couplage entre les outils géologique, chimique, thermodynamique et statistique dans l'étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya, nous a permis, de déterminer l'origine de cette salinité et son mode d'acquisition ainsi que sa répartition dans l'espace.

L'utilisation du facteur de concentration (Fc), du rapport Sr/Ca et la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ca⁺, Na⁺, Mg²⁺, K⁺) confirme l'origine évaporitique de cette salinité.

Afin de protéger les sols de la plaine contre la salinisation, une délimitation des zones selon l'aptitude des eaux à l'irrigation a été effectuée. Ainsi qu'une solution a été proposée pour l'utilisation des eaux de mauvaise qualité en mélangeant celles-ci avec les eaux du barrage.

Mots-clés: Plaine d'El-Outaya, eaux souterraines, Trias, Néogène, salinité, strontium, facteur de concentration (Fc), indice de saturation (SI), irrigation.

Abstract

Characterization of the Salinity Of a Complex Aquifer in Arid Zone

Case of El-Outaya's aquifer – Northern-west of Biskra's region - ALGERIA-

The plain of El-Outaya (the big plain) is located in southern Algeria (Biskra). It is an arid region where the salinity of groundwater consist a serious problem. It is the seat of an intense agricultural activity. An ambitious program is launched by the development of the plain. And except a dam realized in this region, the majority of irrigation's water came from groundwater.

The study of water's quality indicates the importance of gypsum and halite ions as a main compound in waters. Mineralization is the result of the dissolution of evaporitic's rocks (Trias, Neogen) .

The salinity is very different from the east to west and from north to south. This variability at different zones indicates the relationship between characteristics of chemical composition of water, the nature of aquifer lithology and the main directions of drainage.

Coupling between the geologic, chemical tools, thermodynamics and statistics in the study of the quality of the groundwater of El-Outaya's plain, allowed us, to determine the origin of this salinity, how it is acquired and its distribution in the space.

The use of the factor of concentration (Fc), the ratio Sr/Ca and the simulation of the concentration of major ions (Cl, SO₄, HCO₃, Ca, Na, Mg, K) confirms the evaporitic origin of this salinity.

To protect soils of the plain from risk of Stalination, a delimitation of zones according to the quality of water is done and a solution was given for using water with height mineralization by mixing this one with the water of the dam.

Key words: Plain of El-Outaya, groundwater, Trias, Neogen, salinity, strontium, factor of concentration (Fc), saturation indice (IS), irrigation.

ملخص

دراسة ملوحة المياه الجوفية في المناطق الجافة

حالة طبقة مياه سهل الوطاية

- منطقة شمال غرب بسكرة - الجزائر

يوجد سهل الوطاية (السهل الكبير) في ولاية بسكرة بالجنوب الجزائري ، منطقة جافة أين يشتكي المزارعون من ملوحة المياه الجوفية المستعملة في السقي.

يعرف سهل الوطاية نشاطا فلاحيا مكثفا بعد إدراجه في البرنامج الوطني الذي يهدف إلى رد الاعتبار إلى الأراضي البور الغير مستغلة .

فيما يخص مصادر مياه السقي، تعتبر المياه الجوفية المصدر الأساسي بالإضافة إلى مياه سد منبع الغزلان والتي تكتسي أهمية اقل.

من خلال دراستنا لنوعية المياه الجوفية لمسنا التأثير الواضح للصخور الملحية عليها مما ترتب عنه احتواءها كميات كبيرة من شوارد معادن هذه الصخور التابعة للحقتين الجيولوجيتين الترياس والميولوسين.

ساعدنا استغلال الوسائل الجيولوجية و الكيمائية و الترموديناميكية و الإحصائية في استكشاف مصدر ملوحة المياه وماهية التفاعلات الجيوكميائية التي تجري بين الصخور والمياه الجوفية بالإضافة إلى توزيع تركيزات هذه الملوحة في طبقة المياه الجوفية.

من جهة أخرى وفي نفس السياق، فان استعمال معامل التركيز (Fc) ومعامل التشبع (SI) للمياه الجوفية بالمعادن المسؤولة على ملوحة المياه شكل دليلا إضافيا على تأثير طبيعة الصخور على كيمياء مياه سهل الوطاية.

أخيرا ومن اجل حماية تربة سهل الوطاية من الملوحة جراء استعمال المياه الغير مناسبة لها، قمنا بدراسة صلاحية هذه المياه للسقي التي بينت أنها تصنف إلى عدة أقسام حسب درجات الملوحة ثم قمنا بتحديد نطاقات هذه الأقسام، بعد ذلك اقترحنا وسيلة للتقليل من ملوحة المياه الجوفية واستغلالها دون التأثير على التربة وذلك بخلطها بنسب ملائمة مع مياه سد منبع الغزلان ذات الملوحة المعتدلة.

الكلمات المفتاح: سهل الوطاية، المياه الجوفية، الترياس، الميولوسين، الملوحة، معامل التركيز (Fc)، معامل التشبع (SI)، السقي.

Sommaire		Page
Dédicace		i
Remerciements		ii
Résumé		iv
Abstract		v
ملخص		vi
Sommaire		vii
Liste des figures		xiv
Liste des tableaux		xix
Introduction générale		1- 7
Première partie: Présentation de la plaine d'El-Outaya (Conditions naturelles)		
I: Situation géographique et cadre physique		9 - 16
II: Cadre géologique régional et local		17 - 49
1. Introduction		18
2. Géologie régionale		19
2.1. Le Mésozoïque		19
2.1.1. Le Trias		20
a. Les affleurements triasiques dans la région		21
2.1.2. Le Jurassique		21
a. Le Lias		21
b. Le Kimméridgien		21
c. Le Portlandien et le Berriasien		22
2.1.3. Le Crétacé		23
A. Le Crétacé inférieur		23
a. Le Valanginien		23
b. L'Hauterivien		23
c. Le Barrémien		24
d. L'Aptien		24
e. L'Albien		24

B.	Le Crétacé supérieur.....	25
a.	Le Cénomaniens.....	25
b.	Le Turonien.....	26
c.	Le Sénonien.....	26
2.2.	Le Tertiaire.....	27
2.2.1.	Le Paléogène (Nummulitique)	27
a.	Le Paléogène marin.....	27
b.	Le paléogène continental	28
2.2.2.	Le Néogène.....	29
a.	Introduction.....	29
b.	Historique des recherches sur la géologie du Néogène.....	29
c.	Aquitano-burdigalien - (Miocène 1-2).....	30
d.	Langhien-Serravalien -Tortonien (Miocène 3).....	31
e.	L'ensemble gréseux messénien (Miocène 4).....	31
f.	L'ensemble conglomératique (Pliocène).....	31
3.	Synthèse litho-stratigraphique de la région de Biskra.....	32
4.	Synthèse géologique du bassin d'El-Outaya.....	36
5.	Etude de quelques coupes et corrélation.....	38
5.1	Corrélations E-W dans le bassin d'El Outaya.....	38
5.2	Les coupes.....	39
6.	Tectonique.....	42
a.	L'accident Sud Atlasique.....	42
b.	Le domaine atlasique.....	43
•	Les plis.....	43
a.	Les plis atlasiques.....	44
b.	Les plis post-pliocènes.....	45
•	Les cassures.....	46
7.	Paléogéographie.....	47
8.	Conclusion.....	48
III : Hydroclimatologie.		50 - 72
1.	Introduction.....	51

2. Stations de mesure.....	51
3. Pluviométrie.....	52
3.1. Carte des moyennes pluviales.....	52
3.2. Variation interannuelle de la pluviométrie	53
3.3. Variation des moyennes mensuelles des précipitations.....	54
3.4. Précipitations saisonnières.....	55
3.5. Précipitations journalières.....	56
3.6. Le quotient pluviométrique.....	57
4. Les températures.....	57
5. Les vents.....	59
6. Régime climatique.....	60
6.1. Courbes ombrothèrmiques.....	60
6.2. Indice d'aridité.....	61
6.2.1. Indice d'aridité de Martonne.....	62
6.2.2. Climatogramme de Peguy.....	64
6.2.3. La classification bioclimatique d'Emberger.....	65
7. L'évapotranspiration.....	66
7.1. L'évapotranspiration potentielle.....	66
7.1.1. Définition.....	66
7.1.2. Formule de Thornthwaite.....	67
7.1.3. Formule de Serra.....	67
7.2. L'évapotranspiration réelle.....	69
7.2.1. Formule de Turc.....	69
7.3. Méthode de Thornthwaite.....	69
8. Le ruissellement.....	70
8.1. Méthode de Thornthwaite.....	70
8.2. Méthode de Tixeront-Berkaloff.....	70
9. Bilan hydrologique.....	71
10. Conclusion.....	73
IV : Hydrogéologie.	
	74 - 91
1. Introduction.....	75
2. L'outil géologique.....	75
2.1. Contact du Néogène avec le substratum.....	76

2.1.1. Bordure nord de la plaine	77
• Coupe de l'oued bou Guecha	77
• Coupe de l'Oued Biskra - El Outaya..	78
2.1.2. Bordure sud de la plaine.....	78
• Coupe de selga.....	78
3. L'outil géophysique	83
4. Epaisseur de l'aquifère Néogène.....	86
5. Piézométrie	88
6. Conclusion.....	91

Deuxième partie:

Présentation et Interprétation des Paramètres

92 - 175

Physico-Chimiques des eaux de la plaine d'El-Outaya

Introduction.....	93
Méthodologie et stratégie du travail.....	94

I : Présentation des variables chimiques des eaux

97 – 115

1. <u>Analyse d'ensemble</u>	97
1.1. Présentation de la qualité des eaux souterraines.....	97
1.2. Présentation des résultats du Strontium (Sr) dans les eaux souterraines.....	99
1.3. Présentation de la qualité des eaux de surface (Barrage Fontaine des gazelles)...	99
1.4. Présentation de la qualité chimique des saumures (rejet industriel).....	100
1.5. Présentation de la qualité des eaux du forage El-Outaya (1990-1999).....	101
2. <u>Analyse détaillée</u>	102
2.1. Le calcium.....	102
2.2. Le magnésium.....	104
2.3. Le sodium.....	105
2.4. Le potassium.	107
2.5. Les chlorures.	108
2.6. Les sulfates.	109
2.7. Les bicarbonates.	110

2.8. Les nitrates.	111
2.9. La conductivité électrique.	112
2.10. Le potentiel d'hydrogène (pH).	115
<u>II: Faciès chimiques des eaux</u>	116 - 128
1. Type des faciès chimiques des eaux souterraines d'El-Outaya.	116
1.1. Les eaux chlorurées sodiques.	116
1.2. Les eaux sulfatées magnésiennes.....	116
1.3. Les eaux sulfatées sodiques.	116
2. Relation entre les faciès chimiques des eaux souterraines.	117
3. Répartition spatiale des faciès chimiques.	120
3.1. Evolution du rapport (SO ₄ /Cl).	121
3.2. Evolution du rapport (Mg/Na).	124
4. Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimique des eaux souterraines.....	126
5. Faciès chimique du forage El-Outaya (1990-1999).	127
6. Faciès chimique des eaux de surface stockées dans le barrage fontaine des gazelles.....	128
III : Interprétation globale des paramètres chimiques mesurés.	129 – 157
1. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques	131
1.1. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques	131
1.2. Classification Ascendante Hiérarchique (C.A.H).....	132
1.2.1. Principe de la méthode	132
1.2.2. Classification des variables.....	133
1.2.3. Classification des observations.....	134
Interprétation des résultats de la classification des observations.....	135
2. Origines des éléments chimiques	136
2.1. Origine des sulfates et des chlorures.....	136
2.1.1. La relation SO ₄ -Cl.....	136
2.1.2. La relation Conductivité-SO ₄ /Cl.....	137

2.2.	Origine du sodium.....	139
2.2.1.	La relation Na-Cl.....	139
2.3.	Origine du calcium.....	139
2.3.1.	La relation $Ca/(HCO_3+SO_4) - Na/Cl$.....	140
2.3.2.	La relation $Ca/(HCO_3) - Na/Cl$.....	140
2.3.3.	La relation $Ca/(SO_4) - Na/Cl$.....	141
2.4.	Origine du magnésium.....	142
2.4.1.	La relation $Mg/(HCO_3+SO_4) - Na/Cl$.....	142
2.4.2.	La relation $Mg/(HCO_3) - Na/Cl$.....	143
2.4.3.	La relation $Mg/(SO_4) - Na/Cl$.....	144
2.4.4.	La relation Mg-SO₄.....	144
2.5.	Origine du potassium.....	145
2.6.	Relation entre éléments responsables de la minéralisation (SO₄/Cl-Mg/Na)	145
2.7.	Evolution spatiale des éléments chimiques.....	146
2.7.1.	Evolution des anions.....	146
2.7.2.	Evolution des cations.....	147
3.	Processus géochimiques de l'acquisition de la salinité des eaux souterraines.....	148
3.1.	Détermination du facteur de concentration (Fc).....	149
3.2.	Evolution des paramètres physico-chimiques.....	149
3.2.1.	La conductivité.....	149
3.2.2.	L'alcalinité carbonatée.....	150
3.2.3.	Le calcium.....	151
3.2.4.	Le sodium.....	151
3.2.5.	Le magnésium et les sulfates.....	151
3.3.	Conclusion.....	152
4.	Autres arguments hydrochimique-thermodynamique en faveur de l'origine évaporitique de la salinité	153
4.1.	Etude du strontium (Sr).....	154
4.2.	Etude de l'état des minéraux dissouts dans l'eau; Détermination de l'indice de saturation (SI).....	155

IV: Aptitude des eaux à l'irrigation	158 – 165
1. Risque de sodicité et de salinité (<i>Méthode de Richard</i>).....	158
2. Influence de la sodicité et de la salinité sur la perméabilité du sol (<i>Méthode de Wilcox</i>)	161
3. Synthèse de l'utilisation des eaux pour l'irrigation.....	163
4. Recommandation pour l'utilisation des eaux pour l'irrigation.....	164
V. Etude des saumures (rejet industriel)	166 – 170
1. Système d'évacuation des saumures.....	166
2. Etude physico-chimique des effluents.....	167
2.1. A la sortie de la chaudière dans le complexe.....	167
2.2. Dans les bassins de décantation.....	169
Conclusion de la deuxième partie.	171 - 175
Conclusion Générale.....	176 - 181
Bibliographie.....	182 - 191
Annexes.....	192 - 230

Liste des figures

N° de figure	Titre	Page
Figure N° 1	Situation et limites administratives de la wilaya de Biskra	11
Figure N° 2	Limites naturelles de la plaine d'El-Outaya.....	15
Figure N° 3	Situation géographique et axes de communications de la plaine d'El-Outaya.....	16
Figure N° 4	Situation du bassin d'El-Outaya dans les principaux ensembles géomorphologique du nord de l'Algérie (<i>d'après un plan original de Guiraud, 1990</i>).....	22
Figure N° 5	Synthèse litho-stratigraphique de la région de Biskra.....	34
Figure N° 6	Situation du bassin d'El-Outaya dans le contexte sud-atlasique.....	36
Figure N° 7	Carte géologique de la plaine d'El-Outaya.....	37
Figure N° 8	Situation des coupes (1, 2 et 3)	40
Figure N° 9	Coupes géologiques au niveau de la plaine d'El-Outaya (<i>In chebbah 2007</i>).....	40/41
Figure N° 10	Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord.....	52
Figure N° 11	Variation interannuelle des précipitations (Biskra/Outaya 70-89)	53
Figure N° 12	Variation interannuelle des précipitations (Biskra 70-08).....	53
Figure N° 13	Variation des moy mensuelles des précipitations (Biskra).....	54
Figure N° 14	Variation saisonnière des précipitations (Biskra).....	55
Figure N° 15	Précipitations saisonnières en % (Biskra 1913 - 1938).....	56
Figure N° 16	Précipitations saisonnières en % (Biskra 1976 - 2008).....	56
Figure N° 17	Températures moyennes mensuelles (C°)(Biskra 1976 - 2008)..	58
Figure N° 18	Températures moyennes mensuelles (C°) (Biskra et FDG).....	59
Figure N° 19	Amplitude entre max et min des températures moy (Biskra)	59
Figure N° 20	Courbe ombrothèrmique à Biskra (1913-1938).....	60

Figure N° 21	Courbe ombrothèrmique à Biskra (1976-2008).....	61
Figure N° 22	Indice annuel d'aridité de De.Martonne...(Biskra).....	63
Figure N° 23	Indice mensuel d'aridité de De.Martonne (Biskra).....	63
Figure N° 24	Climatogramme de peguy (Biskra).....	64
Figure N° 25	Classification d'Emberger (Biskra).....	66
Figure N° 26	Evolution ETP à Biskra.....	68
Figure N° 27	Evolution ETP à FDG.....	68
Figure N° 28	Bilan hydrique (Biskra)	71
Figure N° 29	Coupe géologique passant par El-Mazouchia- El-madher et Bir labrache.....	77
Figure N° 30	Contact Néogène-Substratum.....	80
Figure N° 31	Disposition lithologique au niveau des bordures.....	81
Figure N° 32	Diagraphie du forage Driss Amor.....	82
Figure N° 33	Carte des résistivités apparente en ligne AB=200 m.....	85
Figure N° 34	Carte des résistivités apparente en ligne AB=3000 m.....	85
Figure N° 35	Carte du toit du substratum.....	86
Figure N° 36	Coupe géoelectrique du profil (N).....	87
Figure N° 37	Coupe géoelectrique du profil (M).....	88
Figure N° 38	Carte piézométrique de la nappe du Néogène.....	89
Figure N° 39	Taux de l'écart type par rapport à la moyenne des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines	98
Figure N° 40	Variation de l'ion calcium dans les eaux de la plaine d'El- Outaya.....	104
Figure N° 41	Variation de l'ion magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	105
Figure N° 42	Variation de l'ion sodium dans les eaux de la plaine d'El- Outaya.....	107
Figure N° 43	Variation des chlorures dans les eaux de la plaine d'El- Outaya.....	109
Figure N° 44	Variation des sulfates dans les eaux de la plaine d'El- Outaya.....	110

Figure N° 45	Variation de l'alcalinité carbonatée dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	111
Figure N° 46	Variation des nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	112
Figure N° 47	Variation de la conductivité dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	114
Figure N° 48	Répartition spatiale de la conductivité dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya ($\mu\text{S.Cm}^{-1}$).....	114
Figure N° 49	Variation du potentiel d'hydrogène (pH) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	115
Figure N° 50	Représentation triangulaire des paramètres chimiques des eaux El-Outaya (Diagramme de Piper).....	118
Figure N° 51	Evolution du rapport (SO ₄ /Cl) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	119
Figure N° 52	Evolution du rapport (Mg/Na) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	119
Figure N° 53	Evolution du rapport (Mg/Ca) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya	120
Figure N° 54	Carte représentant les axes de suivi des faciès dans la plaine d'El-Outaya.....	121
Figure N° 55	Evolution du rapport (SO ₄ /Cl) Axe Nord-Sud (Partie centrale).....	122
Figure N° 56	Evolution du rapport (SO ₄ /Cl) Axe Nord-Sud (Partie Est)	122
Figure N° 57	Evolution du rapport (SO ₄ /Cl)Axe Nord-Sud (Partie Ouest)	123
Figure N° 58	Evolution du rapport (SO ₄ /Cl) Axe Est-Ouest.....	123
Figure N° 59	Evolution du rapport (Mg/Na) Axe Nord-Sud (Partie centrale).....	124
Figure N° 60	Evolution du rapport (Mg/Na) Axe Nord-Sud (Partie Est)...	124
Figure N° 61	Evolution du rapport (Mg/Na)Axe Nord-Sud (Partie Ouest)	125
Figure N° 62	Evolution du rapport (Mg/Na) Axe Est-Ouest.....	125

Figure N° 63	Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimiques	127
Figure N° 64	Evolution du chimisme (les cations) des eaux du forage El-Outaya (1990 – 1999).....	127
Figure N° 65	Evolution du chimisme (les anions) des eaux du forage El-Outaya (1990 – 1999).....	128
Figure N° 66	Evolution la solubilité de certains minéraux en fonction de la température.....	130
Figure N° 67	Solubilité du gypse en fonction de la teneur en NaCl dans la solution dissolvante.....	131
Figure N° 68	Classification ascendante hiérarchique des variables (C.A.H)	133
Figure N° 69	Classification ascendante hiérarchique des observations (C.A.H).....	135
Figure N° 70	La relation (SO ₄ -Cl).....	137
Figure N° 71	La relation (SO ₄ /Cl - Conductivité).....	138
Figure N° 72	La relation (pH-Conductivité).....	138
Figure N° 73	La relation (Na-Cl).....	139
Figure N° 74	La relation (Ca/(HCO ₃ +SO ₄ ²⁻)-Na+ / Cl-).....	140
Figure N° 75	La relation (Ca/(HCO ₃)-Na+ / Cl-).....	141
Figure N° 76	La relation (Ca/(SO ₄)-Na+ / Cl-).....	142
Figure N° 77	La relation (Mg ²⁺ /(HCO ₃ +SO ₄ ²⁻)-Na+ / Cl-).....	143
Figure N° 78	La relation (Mg/(HCO ₃)-Na/Cl).....	143
Figure N° 79	La relation (Mg/(HCO ₃)-Na/Cl).....	144
Figure N° 80	La relation (SO ₄ -Mg).....	145
Figure N° 81	La relation (SO ₄ /Cl – Mg/Na).....	146
Figure N° 82	Evolution spatiale des éléments chimiques (Anions et cations) suivant les axes d'écoulement.....	147
Figure N° 83	Relation entre facteur de concentration (Fc) et conductivité	150
Figure N° 84	Diagramme de concentration de l'alcalinité carbonatée.....	150
Figure N° 85	Diagramme de concentration du calcium.....	152
Figure N° 86	Diagramme de concentration du sodium.....	152

Figure N° 87	Diagramme de concentration des sulfates.....	153
Figure N° 88	Diagramme de concentration du magnésium.....	153
Figure N° 89	Répartition spatiale du rapport Sr/Ca dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	155
Figure N° 90	Etat des minéraux carbonatés dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya.....	157
Figure N° 91	Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya.....	157
Figure N° 92	Classification des eaux pour l'irrigation (méthode de S.A.R)	160
Figure N° 93	Synthèse de la répartition spatiale du S.A.R dans la plaine d'El-Outaya.....	161
Figure N° 94	Classification des eaux pour l'irrigation (méthode de Wilcox).....	163
Figure N° 95	Répartition spatiale du % du sodium dans la plaine d'El-Outaya.....	164
Figure N° 96	Schéma du système d'évacuation des saumures.....	167
Figure N° 97	Variation dans le temps des chlorures et du sodium dans les saumures (A la sortie du complexe).....	168
Figure N° 98	Variation dans le temps du potentiel d'hydrogène (pH) dans les saumures (A la sortie du complexe).....	168
Figure N° 99	Variation des cations dans les saumures (dans les bassins de décantation).....	170
Figure N° 100	Variation des anions dans les saumures (dans les bassins de décantation).....	170

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre	Page
Tableau N° 1	Taux d'exploitation des eaux mobilisées (<i>millions m³</i>)....	13
Tableau N° 2	Litho-stratigraphie du Néogène dans la région de Biskra.	35
Tableau N° 3	Caractéristiques des stations pluviométriques.....	52
Tableau N° 4	Précipitations moyennes interannuelle.....	54
Tableau N° 5	Précipitations moyennes mensuelles.....	54
Tableau N° 6	Précipitations moyennes saisonnières.....	55
Tableau N° 7	Jours de pluies par mois.....	56
Tableau N° 8	Coefficient de fréquence et intensité des précipitations à Biskra.....	57
Tableau N° 9	Quotient pluviométrique.....	57
Tableau N° 10	Moyennes mensuelles des températures (Biskra).....	58
Tableau N° 11	Indice mensuel d'aridité.....	62
Tableau N° 12	Résultats de l'E.T.P.....	67
Tableau N° 13	Résultats de l'E.T.R.....	69
Tableau N° 14	Bilan hydrique (Biskra).....	71
Tableau N° 15	Description lithologique du sondage S6.....	90
Tableau N° 16	Statistique élémentaire des variables physico-chimiques mesurées (Eaux souterraines) (mg/l).....	97
Tableau N° 17	Statistique élémentaire des résultats du rapport Sr/Ca (Eaux souterraines) (mg/l).....	99
Tableau N° 18	Caractéristiques des paramètres physico-chimiques des eaux de surface (Barrage Fontaine des gazelles) (mg/l)	100
Tableau N° 19	Statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques des saumures à la sortie du complexe Enasel) (mg/l)	100
Tableau N° 20	Statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques des saumures (Dans les bassins de décantation) (mg/l).....	101

Tableau N° 21	Statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques des eaux du forage El-Outaya (1990- 1999).....	101
Tableau N° 22	Normes algériennes et valeurs guide OMS et CEE..	102
Tableau N° 23	Statistique élémentaire de l'ion calcium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	103
Tableau N° 24	Statistique élémentaire de l'ion magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	105
Tableau N° 25	Statistique élémentaire de l'ion sodium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	106
Tableau N° 26	Statistique élémentaire de l'ion potassium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	107
Tableau N° 27	Statistique élémentaire des chlorures dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	108
Tableau N° 28	Statistique élémentaire des sulfates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	109
Tableau N° 29	Statistique élémentaire de l'alcalinité carbonatée dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	110
Tableau N° 30	Statistique élémentaire des nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	111
Tableau N° 31	Statistique élémentaire de la conductivité dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	113
Tableau N° 32	Statistique élémentaire du potentiel d'hydrogène (pH) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.....	115
Tableau N° 33	Solubilité des différents sels dans l'eau à 20°C d'après <i>J.D'ANS et E.LAX in G. GAUCHER et S. BURDIN, 1974....</i>	129
Tableau N° 34	Solubilité du gypse en fonction de la teneur en NaCl dans la solution dissolvante.....	130
Tableau N° 35	Corrélation entre les paramètres physico-chimiques mesurés.....	132
Tableau N° 36	Barycentres (Centre de gravité) des variables par classes...	134
Tableau N° 37	Barycentres (Centre de gravité) des classes	134

Tableau N° 38	Distance entre les barycentres des classes.....	134
Tableau N° 39	Résultats de l'analyse du strontium.....	154
Tableau N° 40	Etat des minéraux dans l'eau en utilisant l'indice de saturation (SI).....	156/157
Tableau N° 41	Résultats du S.A.R et du % du sodium.....	158
Tableau N° 42	Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (In M.Louvrier 1976 (B.R.G.M).....	159
Tableau N° 43	Tableau récapitulatif de la qualité des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation.....	163
Tableau N° 44	Tableau récapitulatif des paramètres de traitement des eaux par dilution	164

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale:

Le bassin d'El-Outaya se trouve dans la wilaya de BISKRA au sud algérien. Il constitue une ressource importante pour l'eau d'irrigation mais aussi, et de moindre importance, pour l'eau potable. Sa population dépasse 11 000 habitants dont 80% sont concentrés dans les agglomérations (chef lieu de la commune et des localités secondaires) et le reste, sont ou bien des nomades ou bien localisés dans des habitations éparses.

La plaine d'El-Outaya (la grande plaine) est largement tournée vers l'agriculture. Elle a porté jadis plus de 100 fermes romaines dont on voit encore les ruines. L'oasis d'El Outaya est, donc, d'origine romaine (ce serait l'ancienne Mesar Felta); placée sur la route de tous les envahisseurs qui se dirigeaient du Sahara vers le Tell, elle a toujours subi le contre-coup des bouleversements qui agiterent cette région. En 1831 les Ben Ganah détruisirent entièrement l'oasis et le pays fut abandonné. Un seul palmier s'y trouvait lorsque le duc d'Aumale y passa en 1844. Ce n'est qu'en 1858 que les plantations de palmiers aujourd'hui existantes furent créées.

L'oasis d'El Outaya est peu importante au point de vue de la culture des palmiers; la plus grande partie de l'eau est utilisée pour la culture des céréales qui se fait sur une grande échelle dans toute la plaine.

Plusieurs barrages ont été établis sur l'oued pour l'irrigation de la plaine d'El-Outaya; ce sont ceux des Aouda; Dufourg, Haniet Ben Menani, Mekimnat et du col des chiens appelé El Melaga (point de rencontre). C'est à cet endroit que s'opère (rive gauche) la jonction de l'oued Biskra avec son principal affluent l'oued Abdi. (*Monographie des Aurès, Delartigue, 1904*).

La superficie totale de la plaine atteint 33000 Ha. Actuellement, seuls 1530 ha ont été déclarés, par une étude pédologique, valables pour une mise en valeur y compris les terres d'Arch. Le reste des terres étant non exploitables à cause des sols salés (conductivité entre 12 et 35 m.mhos/cm avec une texture lourde et imperméable). (*Aménagement hydro-agricole de Outaya (950 Ha), Juillet 2004*).

Les autorités concernées estiment, dans un bilan récent (2009) basé sur des études pédologiques plus fines, que la surface de la plaine destinée à l'agriculture est de 9 884

hectares dont seulement 5491 sont irrigués (eaux souterraines et de surface) soit 57 %. (*Monographie de la Wilaya de Biskra 2009*). Ce qui est au dessous des espérances des agriculteurs de la région qui demandent davantage d'eau pour exploiter ce qui reste des terres agricoles. La mise en valeur de terres nouvelles demande un effort considérable pour de nouvelles recherches des eaux souterraines. Ces recherches doivent tenir en compte la bonne gestion des ressources hydriques.

Les besoins en eau proviennent, en partie, d'un barrage réalisé à l'amont (barrage Fontaine des gazelles). Mais l'essentiel de ces besoins provient et continuerait de provenir des eaux souterraines. Les eaux de la plaine servent à l'irrigation et les eaux potables sont amenées par des conduites à partir du village de fontaine des gazelles au Nord de la plaine (nappe des calcaires maëstrichtiens).

Le barrage de Fontaine des gazelles d'une capacité totale de 55 Hm³ est entré techniquement en service en mai 2000. Son exploitation pour l'irrigation de la plaine a effectivement commencé après 2004 (à cause des travaux du transfert des eaux vers la plaine). Il régularise un volume annuel de 14 Hm³ destiné dans un premier temps à:

- L'irrigation du périmètre Al-Hazima qui occupe la zone sud de la plaine au pied du Djebel Boughezal au lieu dit M'Kimnet (880 Ha).
- Trois piquages pour l'irrigation de la zone de Magraoua (58 Ha), la ferme Driss Amor (5 Ha) et la palmerai de Smala (7 Ha).
- Cinq piquages le long de l'adduction pour l'irrigation de cinq chapelets de palmeraies couvrant une surface de 187 Ha.

Ce qui ramène la surface totale irrigable par les eaux du barrage à 1137 Ha.

L'irrigation du reste des terres exploitées soit plus de 70% se fait par les eaux souterraines qui proviennent de la nappe du Néogène-Quaternaire.

A l'état actuel des choses, la plaine compte 16 forages avec une longueur totale de 2535 ml (moyenne par forage de 158 ml) donnant au totale 220 l/s ainsi que, 292 puits privés officiellement autorisés et une source donnant un débit de 3 l/s. (*monographie de la Wilaya de Biskra 2009*).

Les eaux de cette nappe présentent, par endroit, une salinité assez élevée (résidu sec atteint 5g/l et conductivité entre 1110 et 5940 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). L'utilisation de ces eaux doit donc faire l'objet d'une étude détaillée à la fois de sa qualité pour déterminer l'origine de cette salinité et de son impact sur le sol.

La région possède un climat aride avec une faible moyenne annuelle des précipitations ainsi qu'une irrégularité assez marquée. L'évapotranspiration consomme pratiquement toutes les précipitations donnant ainsi un déficit sur toute l'année.

Cette thèse est en réalité la continuité d'un travail déjà entrepris, dans le cadre du mémoire de magister, sur la plaine d'El-Outaya. Elle vise l'amélioration de la connaissance de l'aquifère Néogène-Quaternaire sur les thèmes suivants:

- ✓ Préciser la lithologie et la géométrie du réservoir, pour estimer la variabilité latérale et verticale des différents niveaux de cet aquifère;
- ✓ Identifier les axes des écoulements souterrains;
- ✓ Définir l'état qualitatif de la nappe et préciser les variations et les origines de la salinité des eaux dans la plaine.

Ce programme nécessiterait donc, l'acquisition des données quantitatives et qualitatives.

Les données quantitatives ont été acquises tout d'abord en utilisant les documents bibliographiques existants, ensuite à partir d'investigations de terrain et simultanément par la réinterprétation de données de prospection électrique. Ces investigations de terrain regroupent les mesures faites sur des forages déjà en fonctionnement, les échanges d'informations avec les entreprises de forages (suivi de chantier en cours de réalisation) mais aussi les informations recueillis auprès des exploitants. Elles ont abouti à la constitution d'une base de données.

Cependant, devant la complexité de cet aquifère très hétérogène et la dégradation de sa qualité (la salinité), nous avons axé notre travail d'investigation sur une approche principalement qualitative. Cette approche est basée sur l'utilisation des outils

géochimiques (éléments majeurs) et le strontium (élément en trace). Ces outils ont montré leur efficacité pour appréhender le fonctionnement des systèmes hydrogéologiques complexes. Ils permettent ainsi la caractérisation de la salinité des eaux de notre aquifère en réponse à la problématique posée:

Ce mémoire de thèse s'articule en plusieurs **chapitres** regroupés en **deux parties**:

La première partie: Présentation de la plaine d'El-Outaya:

Cette partie concerne la présentation du site étudié. Elle traite les aspects suivant :

- **Une situation géographique et cadre physique (I):** qui montre la situation de la plaine dans le contexte régional et local (wilaya de Biskra);
- **Cadre géologique régional et local (II).** qui retracera la géologie et la tectonique régionales ainsi qu'à l'échelle locale. Les affleurements du Trias au Néogène. Une attention particulière sera donnée à la lithologie du Néogène. Ainsi que la mise en perspective des informations reportées dans la base de données
- **Aperçu sur le climat de la région (III):** Cette étude permettra présentera les paramètres climatiques de la région étudiée. Elle sera basée sur 03 stations proches de la plaine. Nous établirons à la fin un bilan hydrologique de la région.
- **Hydrogéologie du bassin d'El-Outaya (IV).** Il présentera la piézométrie du secteur étudié et la géométrie de l'aquifère Néogène-Quaternaire. Nous tenterons de définir la nature du contact de cet aquifère avec le substratum aux limites de la plaine.

La deuxième partie: Présentation et Interprétation des paramètres physico-chimiques:

Cette partie concerne l'interprétation des paramètres physico-chimiques mesurés.

En préambule à cette partie, les secteurs d'échantillonnages et les analyses développées au cours de ce travail sont présentés. Elle est divisée en cinq sous-parties qui présenteront tour à tour:

- **Analyse d'ensemble et détaillée des paramètres physico-chimiques (I):** Il s'agit de la présentation des résultats et la comparaison des concentrations en éléments majeurs à la norme algérienne définies par l'arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00) relatif aux spécifications des eaux de boisson préemballées et aux modalités de leur présentation émanant du ministère du commerce.
- **Les faciès chimiques (II):** On présentera les types des familles chimiques des eaux ainsi que leur évolution, origine et répartition dans la plaine.
- **Interprétation globale des paramètres physico-chimiques (III) :** Dans cette partie nous effectuerons une interprétation des résultats d'analyses chimiques pour déterminer l'origine des éléments chimiques des eaux et mettre en évidence les mécanismes géochimiques d'acquisition de la minéralisation. Nous étudierons quelques arguments en relation avec l'origine de la salinité des eaux souterraines.
- **Aptitude des eaux à l'irrigation (IV):** L'utilisation des méthodes qui permettront la classification des eaux de l'aquifère Néogène-Quaternaire selon leurs aptitudes à l'irrigation ainsi que la répartition de ces classes dans la plaine.
- **Etude des saumures (rejet industriel) (V):** Il s'agit d'une caractérisation physico-chimique des effluents rejetés dans la plaine par le complexe Enasel (production de sel).

Ce travail a pu voir le jour grâce à la collaboration de divers cadres et responsables d'organismes publics et privés (accès aux archives pour la constitution de la base de données) : Il s'agit surtout des directions de la wilaya de Biskra; Direction d'Hydraulique (DHW), Direction des services agricoles (DSA), des agences et organismes nationaux (ANBT (*Barrage FDG*), ANRH (*Antenne de Biskra*), ONHYD (*Biskra*)) ou Unité économique (*Enasel El-Outaya*) et le bureau d'étude AREAU.

Les résultats des interprétations, durant les années de recherche de la présente thèse, ont fait l'objet de trois publications et de cinq présentations orales:

- **Publication, 2009:** *La salinité des eaux souterraines de la zone Est de la plaine d'El-Outaya (Région de Biskra, Algérie). Publication au Bulletin du Service Géologique National. /Vol.20, N°1, pp.49-61, 14 fig., 2 tabl.*
- **Publication, 2010:** *Evolution des Facies Chimiques des Eaux Souterraines dans da Plaine D'El-Outaya, Biskra, Algérie. Publication au Journal International Environmental Conflict Management, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 98-105.*
- **Publication, 2011:** *Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (W) de Biskra. Algérie. Publication au courrier du savoir- N°11, pp.41-46.*
- **Communication orale, 2005:** *Influence des roches évaporitiques sur la dégradation des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. 1^{er} séminaire national sur la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau 12 et 13 dec. Dpt d'Hydraulique en collaboration avec le laboratoire de recherche en Hydraulique appliquée. Univ.Batna.*
- **Communication orale, 2006:** *Aspects Géochimiques de la Salinité des Eaux du Mio-Plio-Quaternaire et Equilibres Entre Minéraux et Solutions dans la Plaine d'El-Outaya . ALGERIE. Watmed 3, Université Libanaise. Tripoli . Liban du 1^{er} au 3 Nov .*
- **Communication orale, 2008:** *La salinité des eaux souterraines dans la région d'El-Outaya (Biskra) Algérie. Journée d'étude et de sensibilisation à la gestion de la ressource en eau dans les régions arides et semi arides. Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Arides (CRSTRA). Biskra le 15 Mars.*
- **Communication orale, 2009:** *Evolution des faciès chimiques des eaux souterraines dans la plaine d'El-Outaya. Biskra, Algérie. Séminaire international sur la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Département des sciences de la terre, Univ. De Batna. 10 et 11 Nov.*
- **Communication orale, 2010:** *Arguments hydrogéochimiques de l'origine évaporitique des eaux de l'aquifère Néogène d'El-Outaya, Biskra -Algérie- Watmed 5, Lille, France, du 26 au 28 Mai.*

PREMIERE PARTIE:

PRESENTATION DE LA PLAINE D'EL-OUTAYA

I : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE PHYSIQUE;

II : CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL ET LOCAL;

III : HYDROCLIMATOLOGIE DE LA REGION;

IV : HYDROGEOLOGIE.

I : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE PHYSIQUE.

1. Situation géographique:

La plaine d'El-Outaya se trouve dans les territoires de la wilaya de Biskra. C'est une wilaya située au Sud-Est de l'Algérie, Elle est constituée de deux domaines assez différents du point de vu relief, climat et végétation.

- Un domaine au nord de la flexure sud atlasique comportant les communes d'El-Outaya, Djemourah, Branis, El-Kantara et Ain Zaatout. Ce domaine se trouve dans la limite sud des Aurès, c'est d'ailleurs cette chaine qui représente la limite naturelle entre le Sud et le Nord de l'Algérie dans cette région. C'est dans ce domaine que se concentrent les reliefs.
- Un domaine au Sud de la flexure sud atlasique et qui annonce le début de la plate forme saharienne. Il s'agit essentiellement des terrains plats et monotones, dépourvus de végétations.

La wilaya de Biskra s'étale sur une superficie de 21 509.80 Km² et compte 33 communes réparties sur 12 Daïras. Elle est limitée par (figure N° 1):

- Au nord par la wilaya de Batna;
- Au NW par la wilaya de M'sila;
- Au NE par la wilaya de Khenchela;
- Au SW par la wilaya de Djelfa;
- Au SE par la wilaya d'El-Oued;
- Au sud par la wilaya de Ouargla.

2. Cadre physique:

2.1. Les montagnes:

Les montagnes se trouvent essentiellement au nord et couvrent 13 % seulement de la superficie de la wilaya. Nous citons Dj. El-Kaid, Dj. Hmara, Dj. El-Kssoum (1087 m), Dj. Rebaa (712m), Dj. El-melah (627 m), Dj. Gouara, Dj. Aroussine (755 m), Dj. Mekrizane (766 m) Dj. Boughzel, Dj. Melili (1496 m), Dj. Houdja (1070m), Dj. Ahmar Khadou, Dj. Maghraoua et le point culminant est

cependant Dj Taktiout avec 1942 m d'altitude. La majorité de ces montagnes sont pauvre en végétations.

2.2. Les collines:

La colline la plus importante est celle d'Ouled Djellal (Ouled djellal, Sidi Khaled) qui se trouve au Sud-Ouest de la wilaya.

2.3. Les plaines:

Elles s'étendent sur l'axe El-Outaya-Tolga et se prolongent vers l'Est au sud de la flexure sud atlasique où se trouvent les plaines de Sidi Okba et Zeribet El-Oued.

2.1. Les dépressions:

Se localisent dans la partie Sud-Est de la wilaya. Il s'agit de terrains argileux où se déversent les eaux des oueds venant du Nord. Le plus important est le Chott Melghir qui se trouve à (-33 m) au dessous du niveau de la mer.

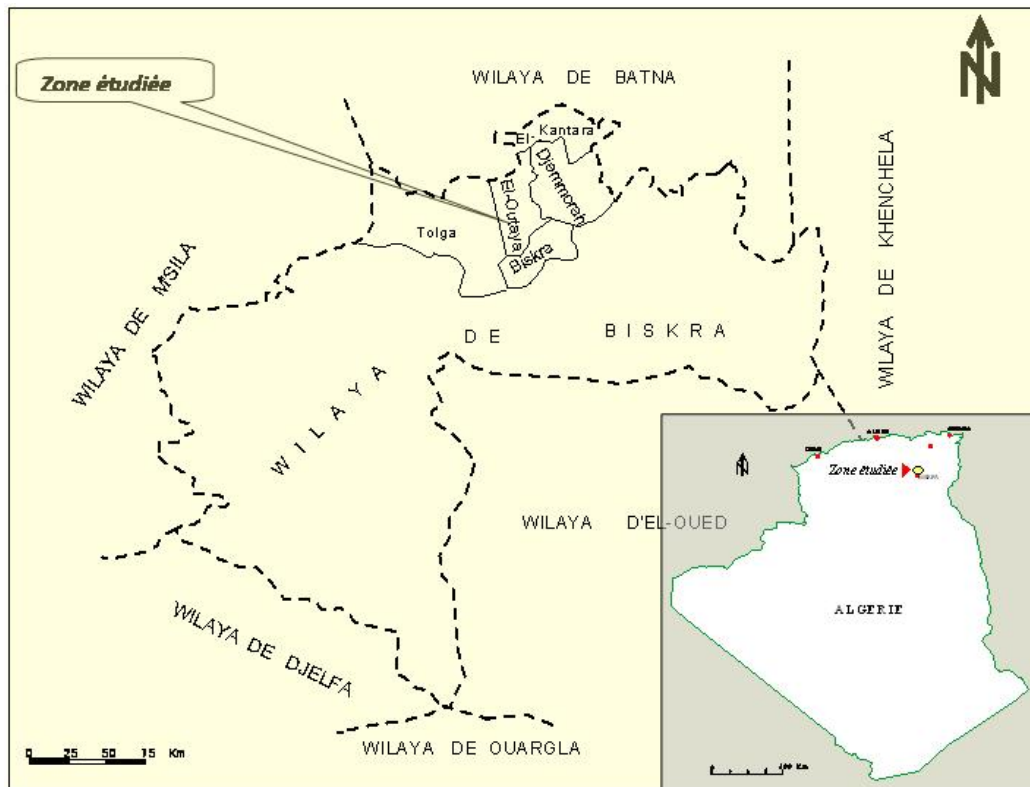


Figure N° 1: Situation et limites administratives de la wilaya de Biskra

2.5. Hydrographie:

La wilaya de Biskra est traversée par plusieurs oueds qui constituent un réseau hydrographique simple qui ne fonctionne qu'en hivers ou pendant les pluies exceptionnelles. Ces Oueds prennent naissance dans le massif des Aurès. Leur importance dépend des bassins versants qu'ils drainent.

Les oueds les plus importants sont; oued El-Hai sur lequel est construit le barrage Fontaine des Gazelles, oued Abdi qui forme avec le précédent oued Biskra. Oued El-Arab (sur lequel est programmé un barrage) et Oued Kattane qui forment l'oued Zeribet. L'oued Abiod sur lequel est construit le barrage Foug El-Kharza. Nous citons enfin l'Oued Djedi qui constitue le collecteur naturel de tous les oueds de l'atlas saharien dans la région. Il draine un bassin versant de **26000 Km²** et atteint **500 Km** de longueur.

2.6. Ressources hydriques:

L'état des réserves de la wilaya en eaux fait l'objet d'une étude détaillée par l'ANRH Ouargla et les résultats ne sont pas encore communiqués. Nous nous intéressons, cependant, aux volumes mobilisés qui atteignent **832,92 millions de m³**, dont **22 millions m³** des eaux de surface soit (**2,64 %**) et **810,92 millions m³** des eaux souterraines soit **97,36%**.

Les eaux de surface mobilisées proviennent de deux barrages et destinés à l'irrigation:

- Fontaine des gazelles d'une capacité totale de **55 millions m³** et régularise annuellement **14 millions m³**. Il assure l'irrigation du périmètre de M'kimnet (**950Ha**) et plusieurs palmerais.
- Foug El-Kharza d'une capacité initiale de **47 millions m³** et régularise annuellement **8 millions m³**. Il assure l'irrigation de **130000** palmiers du côté de Sidi-Okba.

Les eaux souterraines représentent l'essentiel de la ressource et partagées comme suit:

- **500,45 millions m³** soit **89,37 %** pour l'irrigation.
- **58,80 millions m³** destiné à l'A.E.P.
- **0,75 millions m³** destiné à l'industrie.

Tableau N° 1: Taux d'exploitation des eaux mobilisées (millions m³)

Ressources	Eaux souterraines	Eaux de surface	Total
Mobilisée	810,92	22,00	832,92
Exploitée	560,00	12,00	572,00
Taux d'exploitation	69,06	54,55	68,67

Source: DHW Biskra, (2008)

Le taux d'exploitation de ces eaux mobilisé est reporté au tableau N° 1. Il montre un excès dans la ressource et que le taux d'exploitation n'atteint pas 70%. Il est à noter par ailleurs, que cette ressource n'est pas uniformément répartie (contrainte naturelle). Et si on note, dans certaines zones, un excès; d'autres zones, par contre, connaissent un déficit et nécessitent davantage de recherches.

3. Situation géographique et cadre physique de la plaine d'El-Outaya :

La plaine d'El-Outaya occupe une place importante dans la wilaya de Biskra par sa superficie qui dépasse 30000 Ha. Elle appartient, administrativement, à trois daïra: celle d'El-Outaya, de Djemmorah et de Tolga. Figure N° 1.

Elle est délimitée:

- Au Nord par la commune d'El-Kantara .
- A l'Est par la wilaya de Batna.
- A l'Ouest par la commune de Tolga.
- Au Sud par la commune de Biskra.

La plaine d'El-Outaya est un glacis en pente extrêmement douce qui s'étale au sud-ouest du djebel Maghraoua et du pied des Aurès à des altitudes qui s'abaissent d'une manière très régulière et presque imperceptible de 250 à 180 m. Les vallées ne s'y marquent guère, seuls les talwegs des oueds qui coulent lors des pluies exceptionnelles s'y enfoncent de 1 à 3 m et y montrent une nappe de graviers.

Elle est relayée vers le Nord par la dépression d'El-HODNA ; elle a 17 Km de large à l'Est entre le Djebel Maghraoua au Nord et Dj.Bou Rhezal au Sud, elle s'étrangle en un goulet de 7 Km entre l'Aurès et le mont El-Melaga (Bou-mengouche). Le Djebel Melah se trouve au point où s'amorce ce rétrécissement ;

plus au Nord, on trouve d'autres chaînes de l'Aurès, dans leur extrémité occidentale, notamment le Djebel Metlili au delà d'El-Kantara.

Cette plaine fait partie de la région de M'Doukal - Biskra qui forme une zone charnière raccordant les deux grands ensembles atlasiens : L'Atlas Saharien et l'Aurès.

Les hauteurs qui l'entourent (Figure N°2) sont des crêtes ouest-est ou sud-ouest - nord-est, correspondant à la tranche des couches plissées ; elles constituent des arêtes à flancs dissymétriques conformes aux structures et prennent souvent l'allure de cuestas ; elles culminent aux altitudes dépassant 1000 m sur le secteur Ouest (Dj El-Kessoum). Ces altitudes sont moins importantes sur les autres secteurs (Djebel Bou Rhezal, 415 m et Djebel Maghraoua 483 m.). Le Djebel Melah a une autre configuration ; il se dresse jusqu'à 627 m sans s'intégrer dans les autres alignements ; au contraire, il constitue un dôme escarpé et raboteux.

Le réseau hydrographique de la région est squelettique. Il comporte un tronç principal, l'Oued Biskra (El-Hai), qui fait partie du bassin fermé du chott melrhir et reçoit sur sa rive gauche quelques tributaires issus de l'Aurès et du Djebel Melah ces oueds étalent leurs graviers sur une largeur de 50 à 400 m entre des berges abruptes de 1 à 3 m de haut.

L'Oued Biskra est à sec, sauf lors des pluies exceptionnelles (à l'exception de l'endroit à l'aval du barrage Fontaine des Gazelles), il subsiste toutefois, entre les crues, quelques mares comme celle du passage de la route de Djemmorah (W 54). Le principal affluent, l'Oued Branis, montrait avant les années de sécheresse qui frappe la région de l'eau courante jusqu'à son débouché dans l'Aurès ceci n'apparaît pas de nos jours. D'autres oueds moins importants sont à signaler (Oued Selsou, Oued Bougatou, et Oued El-Barbass).

Il existe également, à l'ouest de l'Oued de Biskra, tout un réseau de seguias, canaux d'irrigation qui étaient alimentés autrefois par un petit barrage. Ces seguias ne sont plus utilisées que pendant les crues (tarissement des sources au niveau de l'oued). Jadis les axes principaux avaient un débit permanent important ; certains d'entre eux paraissent emprunter le tracé d'anciens affluents de l'oued.

Mentionnant toutefois les filets d'eau saumâtre qui s'écoulent presque en permanence dans de profondes encoches à la périphérie du Djebel Melah, comme l'Oued Melah ainsi que l'existence d'une importante source thermique (35-40°) du Hammam Sidi El-Hadj à environ 7 Kms au nord de la zone étudiée.

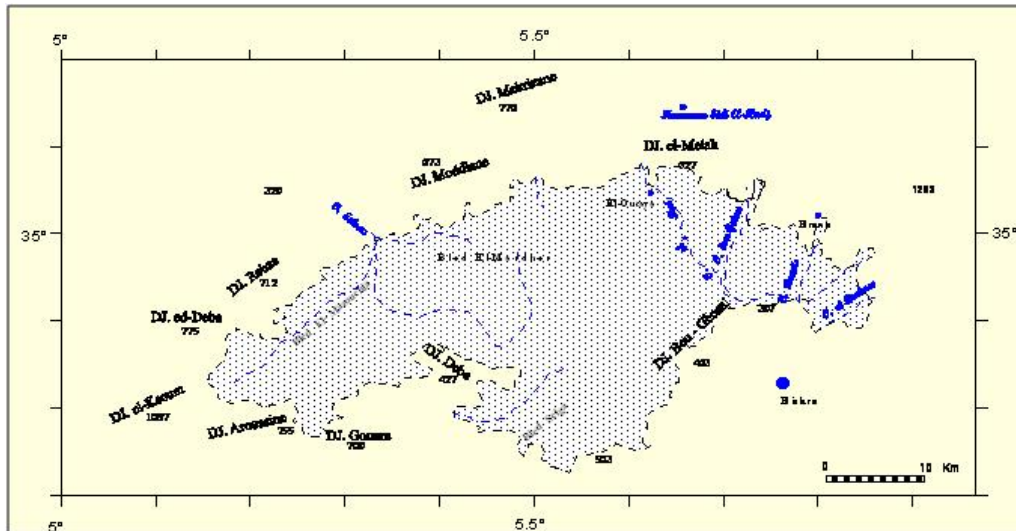


Figure N° 2: Limites naturelles de la plaine d'El-Outaya

Peu de chose à dire de la végétation spontanée, plus saharienne que sahélienne, résultant à la fois des conditions climatiques et des dégradations de causes anthropiques. Sauf sur les surfaces irriguées, on trouve que des touffes espacées d'alfas et autres plantes herbacées; les reliefs en sont pratiquement dépourvus, quoique l'Aurès a dû être anciennement boisé.

La plaine d'El-Outaya se situe à l'intersection de deux grands axes de communication avec la ville de Biskra et le Sud (figure N° 3) :

- Celui de Annaba et Constantine, par Batna.
- Celui de Bejaia et Sétif, par Barika.

L'activité principale de la population est l'agriculture. Le secteur en relation avec l'activité industrielle n'étant pas très développé. On cite:

- Plusieurs carrières implantées sur le versant sud de la plaine (Dj. Bou-Mengouche et Dj. Boughezal);
- Une unité de production de sel (Enasel) implantée près du Dj.El-Melah;
- Une unité de production d'aliments de Bétail;
- Deux stations de pompage de la SONATRACH;

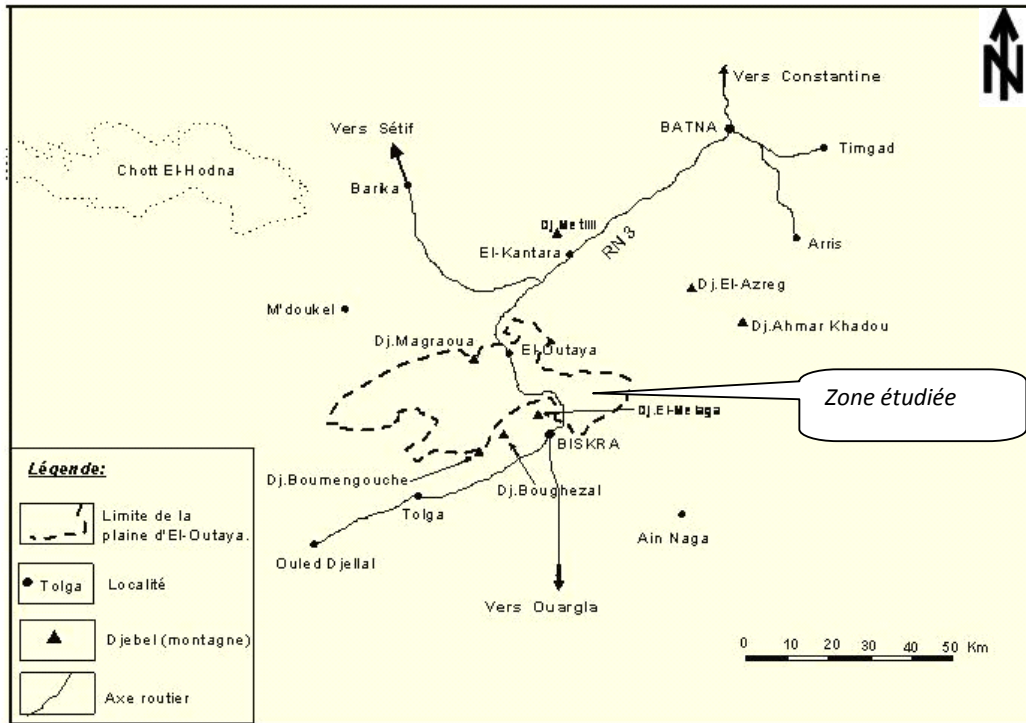


Figure N° 3: Situation géographique et axes de communications de la plaine d'El-Outaya.

Dans le domaine de la recherche scientifique, la plaine compte un centre d'expérimentation dirigé par le Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Arides (CRSTRA). En plus d'un Institut Technique de Développement des Agricultures Sahariennes (ITDAS) appartenant au ministère de l'agriculture.

II : CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL ET LOCAL

1. Introduction :

La composition chimique des eaux souterraines reflète la composition minéralogique des roches de l'aquifère surtout si des causes anthropiques ne viennent pas perturber cette minéralisation. De ce fait, La connaissance de la nature lithologique des terrains de l'aquifère permet d'expliquer certains paramètres chimiques des eaux qui s'y trouvent. Cette interaction eau-roche est d'autant plus importante dans le cas ou les minéraux de la roche se dissolvent facilement. C'est justement le cas des roches évaporitiques.

L'objectif visé par cette étude est de donner une image synthétique du substratum du Néogène puis une description de ce dernier à l'échelle régionale et locale (la plaine).

Parmi les nombreux auteurs qui ont travaillé sur la région; essentiellement les Aurès et El-Hodna (Figure N° 1), nous avons exploité les descriptions fournies par Laffitte (1939), et Guiraud (1973, 1990) ainsi que les conclusions des travaux de M.Chebbah (2007). Nous pensons que ces travaux assez cohérents peuvent nous donner une conclusion sur les aspects recherchés dans cette thèse. Nous présenterons, par l'occasion, quelques coupes et cartes établies dans ces travaux.

Cette synthèse litho-stratigraphique tectonique sera développée en traitant les aspects suivants:

- ▶ Une description litho-stratigraphique des formations anté-Néogènes qui affleurent dans la région des Aurès et El-Hodna d'une façon générale. Ces formations représentent le substratum du Néogène. Il s'agit du Trias, Le Jurassique et Le Crétacé.
- ▶ Une description lithologique du Néogène à l'échelle régionale.
- ▶ Une synthèse litho-stratigraphique de la région de Biskra.
- ▶ Géologie du remplissage de la plaine d'El-Outaya.
- ▶ Tectonique de la région.
- ▶ Un résumé paléogéographique du bassin d'El-Outaya

2. GEOLOGIE REGIONALE:

La plaine d'El-Outaya est formée par un remplissage Néogène. Elle se trouve dans une région qui constitue une des zones les plus franches de transition entre les domaines atlasiques montagneux et plissés du Nord (Algérie méditerranéenne) et les étendues plates et désertiques du Sahara septentrional au Sud (Algérie saharienne).

Deux domaines très contrastés, tant du point de vue géomorphologique que géologique, sont séparés par l'accident sud atlasique. (figure N° 4)

Cette région est formée d'un ensemble de bassins et (ou) sous bassins alignés presque parallèlement Nord-sud.

La partie Nord de la région se présente sous la forme d'une chaîne, grossièrement, orientée Nord-est – Sud-ouest : l'Atlas saharien qui inscrit dans son prolongement oriental le massif de l'Aurès culminant à 2328 m ; Le relief est de type jurassien et se présente sous la forme de plis courts et espacés, tantôt creusés par de profondes combes de flanc, tantôt festonnés de chevrons sous l'effet de l'attaque du ruissellement.

Au sud de Biskra, la plaine saharienne se présente comme un piémont sans relief marqué qui relie par une pente douce les chaînons atlasiques aux étendues sahariennes proprement dites. Elle est formée par toute une série de glacis d'érosion modelés par le ruissellement et où se localisent des oasis.

Le substratum des formations néogènes du bassin d'El-Outaya et les Aurès en général est formé de dépôts d'âge secondaire et paléogènes. Ces dépôts, bien représentés dans la chaîne atlasique (Aurès et Atlas saharien Oriental) et les dépressions qui l'entourent, ont fait l'objet d'études détaillées par plusieurs auteurs. Dans ce qui suit, nous essayons de donner l'essentiel de la lithologie de ces formations allant du Trias au Néogène.

2.1. LE MESOZOIQUE

Dominé par des formations argilo-carbonatées, Le mésozoïque représente les principaux reliefs dans la région des Aurès.

2.1.1. LE TRIAS

On ne connaît pas dans la plaine d'El-Outaya et les régions voisines des formations plus anciennes que le Trias. Il se rencontre en position stratigraphique anormale ou éjecté au sein des séries encaissantes à la faveur des cassures.

Dans la région d'El-Outaya, le Trias se manifeste en un grand dôme (Dj. El Melah) où il est associé à des lambeaux dolomitiques liasiques.

Le Trias est formé d'argiles et des marnes bariolées, de couleurs verdâtre, rougeâtre à violacée (renfermant du quartz bipyramidé, oligiste, barytine, dolomite...). Des blocs calcaire-dolomitique, de couleur gris-bleuté à noirâtre à passées marneuses. Des évaporites sous forme d'amalgames intensément replissés formés de sel qui constitue l'élément dominant et des gypses. Englobant des amas de roches diverses de l'ensemble de la couverture post-triasique.

Nous donnerons dans ce qui suit, les ensembles du Trias de la base vers le sommet décrits par Guiraud (1973):

- ▶ **Le Trias gréseux**: Une formation détritique gréseuse qui forme la base du Trias saharien ou encore des hauts plateaux mais absente au niveau de notre terrain d'étude. Elle est probablement restée solidaires avec le Paléozoïque lors du détachement de la couverture plastique.

- ▶ **Le Salifère principal**:
 - Une formation évaporitique inférieure, peu épaisse.
 - Des passées calcaire-dolomitiques.
 - Une puissante formation évaporitique supérieure.

a. Les affleurements triasiques dans la région:

Des affleurements triasiques, de taille et de constitution variable, perçant leur couverture mésozoïque et cénozoïque de façon anormale, s'observent en une dizaine de points dans l'Aurès ou sur ses bordures. En dehors de quelques intrusions mineures, dans la région d'étude, celle de Dj. El Melah d'El Outaya est la plus importante. Il s'agit d'un dôme salifère triasique, long de 4 km, dont les sommets dominant la plaine d'El Outaya de plus de 300 m. Dans ce secteur, le Trias est délimité par des accidents que jalonnent les lambeaux arrachés aux séries encaissantes, et entouré par des formations miocènes (marno-grésos-conglomératiques). Cependant, dans la région d'El Outaya le Néogène est affecté par de nombreux accidents d'orientation voisine de NW-SE ou E-W dont plusieurs convergent vers Djebel El Melah ce qui permet de lui attribuer un âge post-pliocène et dont l'accession continue, probablement, encore ; Et, il est à noter que les injections ou extrusions du Trias se sont toujours faites en faveur d'accidents importants et peu après le jeu de ces derniers.

2.1.2. LE JURASSIQUE

a. Le Lias:

Comme le Trias, le Lias est inconnu en position normale et quand on le rencontre, il est emballé dans le Trias sous forme de lambeaux constitués de dolomies foncées éventuellement pyritifères souvent fissurées, parfois brèchoïdes ; constitue à la bordure sud et nord-ouest du Djebel El Melah des paquets en relief pouvant atteindre 500 X 200 m ; il en existe également plusieurs blocs de 50 m à 150 m dans le massif, notamment à son point culminant.

A l'Ouest de l'Aurès (Atlas saharien oriental), il est représenté par des calcaires jaunes et bleus à Bélemnites et Foraminifères du Toarcien inférieur. Par contre, sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne, il est formé de calcaires oolithiques et de dolomies et se charge en anhydrite en allant vers le sud.

b. Le Kimméridgien:

Il s'agit des terrains les plus anciens reconnus en position normale dans le massif de l'Aurès. Constitué de deux ensembles lithologiques:

- ▶ **Ensemble carbonaté basal:** d'une épaisseur de 250 à 300 m, formé de calcaires marneux, de marnes jaunâtres, de calcaires silicifiés multicolores à

intercalations de marnes rouges surmontés de calcaires, de marnes et de calcaires bréchoides avec présence de cristaux de quartz. Puis des conglomérats à intercalations marneuses à débris d'organismes récifaux associés à des bélemnites, des calcaires et des calcaires marneux ou granuleux. Cet ensemble se termine par une alternance de calcaires et de marnes.

- **Un ensemble marneux sommital:** d'une épaisseur de 400 m, avec des intercalations de calcaires marneux à lamellibranches (dans sa partie médiane). Cet ensemble forme le cœur de l'anticlinal de Dj. El Ezreg.

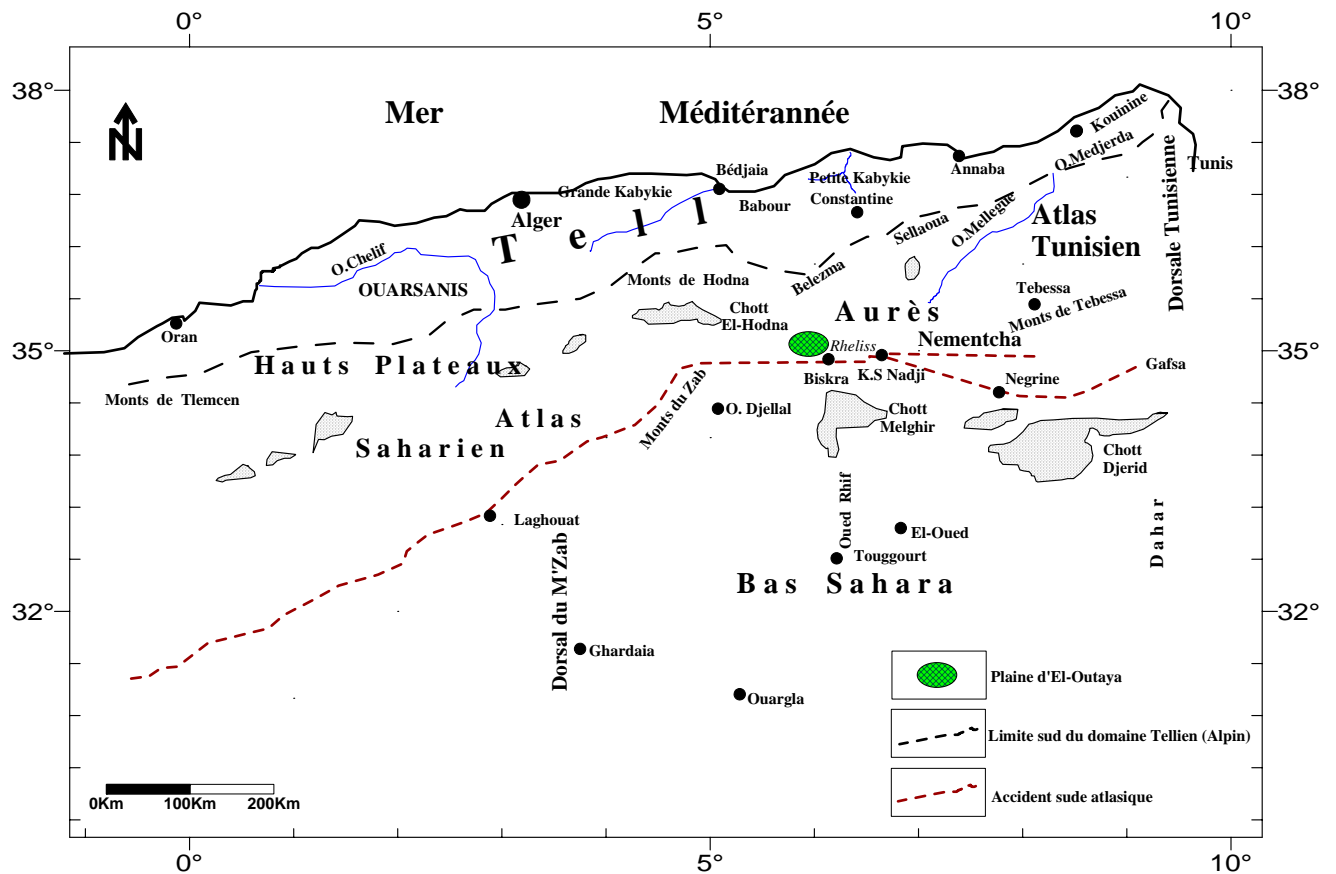


Figure N°4: Situation du bassin d'El-Outaya dans les principaux ensembles géomorphologiques du nord de l'Algérie (d'après un plan original de Guiraud, 1990)

c. Le Portlandien et le Berriasien:

Ce niveau atteint une épaisseur de 250 à 300 m et présente un passage latéral progressif de faciès du NO vers le SE dans le massif des Aurès allant d'un faciès calcaire-marneux à un faciès dolomitique:

- ▶ **L'ensemble calcaro-marneux:** constitué de calcaires en bancs siliceux blanchâtres violacés surtout à radiolaires et de marnes à ammonites pyriteuses avec des intercalations de calcaires argileux et de calcaires pisolithiques à brachiopodes, lamellibranches, polypiers et échinodermes à leur sommet.
- ▶ **L'ensemble dolomitique:** est formé de dolomies azoïques à rares passées de calcaires et de marnes à bélemnites et forme en majeure partie le flanc sud de DJ. El Azereg.

2.1.3. LE CRÉTACE

La majorité des affleurements dans les limites de la plaine d'El-Outaya et les Aurès en général sont d'âge Crétacé. Les auteurs décrivent deux séries dans les formations crétacées :

- une série gréseuse basale du Crétacé inférieur (Berriasien - Albien).
- une série marno-calcaire sommitale du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Maestrichtien).

A. Le Crétacé inférieur

a. Le Valanginien:

Ce niveau présente dans les Aurès une succession de faciès indiquant une diminution progressive de la profondeur de la mer (milieu de sédimentation). Il a une épaisseur de 150 à 200 m et subdivisé en trois parties:

- ▶ La partie basale du (Valanginien inférieur) est formée d'argiles et qui n'affleure qu'au niveau de Dj El Ezreg (centre des Aurès). Ces argiles présentent des ammonites pyriteuses et à petits cristaux de gypse.
- ▶ La partie moyenne du Valanginien est caractérisée par une intercalation des calcaires à Ostracées et des grés.
- ▶ La partie supérieure: formée de grés et de calcaires pisolithiques.

b. L'Hauterivien:

La présence d'algues dans ce niveau a été signalée par R.Lafitte. Ce qui témoigne d'un milieu de sédimentation très peu profond. Deux faciès principaux caractérisent ce niveau dans les Aurès:

- ▶ Un faciès calcaire-gréseux caractérisé par des calcaires pisolitiques à algues se trouvant dans la région Sud-ouest.
- ▶ un faciès gréseux et dolomitique peu fossilifère au Nord-est.

c. Le Barrémien

Le Barrémien représente dans le massif des Aurès, une période régressive. Dans le Sud Ouest, il est caractérisé par un faciès continental très net: grès à dragées, marnes rouges. En se déplaçant vers le Nord-Ouest les couches passent à des quartzites sans fossiles. Dans le Nord et le Nord Ouest, ces quartzites sans fossiles présentent surtout à la base de l'étage, des intercalations de calcaires marins à foraminifères ou même à Céphalopodes. L'épaisseur de l'étage varie de 400 m au sud à 200 m vers le Nord. Prés de la ville de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il n'est représenté que par quelques mètres d'argiles rouges à bois fossiles.

d. L'Aptien

On le rencontre dans tous les grands anticlinaux de la région (Dj. Metlili, Dj. El Ezreg, Ahmar Kadou, Bou Rhezal.). Il possède une épaisseur de 250 m.

Le faciès continental est toujours présent dans cet étage. Il est caractérisé par un faciès gréseux et à Céphalopodes se localisant dans la partie inférieure et moyenne. Alors que la partie supérieure est caractérisée par des calcaires à Orbitolines pouvant alterner avec des marnes et des grés. Il existe vers le haut de la série des Rudistes et des polypiers, surmontés par une formation peu épaisse de marnes ou calcaires marneux.

Au SE du massif de l'Aurès, le caractère gréseux des faciès s'accroît avec la présence d'une importante alternance de couches gréseuses et de calcaires. Plus au Sud (Dj. Bou Rhezal) seul l'Aptien supérieur est présent avec des calcaires clairs et tendres à orbitolines.

e. L'Albien:

L'Albien est très répandu, comme l'Aptien, dans les grands anticlinaux de l'Aurès. Il est constitué de:

- ▶ Des alternances de grés et de marnes qui atteignent 150 à 200 m d'épaisseur, avec des minces bancs de calcaire. Ces calcaires deviennent

bariolées à rougeâtre vers le Sud-Ouest. Puis les calcaires tendent à se substituer progressivement aux grés.

- ▶ Des alternances de calcaires et des marnes noires sur une épaisseur de 40 m. Avec à la base un niveau à orbitolinidés, puis une couche noduleuse phosphatée ou glauconieuse riche en Ammonites.

La série la plus complète s'observe au environ de Dj Metlili.

Près de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il est formé d'une alternance de grés friables, de marnes sableuses et (ou) gypseuses rouges, de calcaires dolomitiques ou des dolomies contenant quelques passages de lumachelles, de calcaires et d'argiles calcaires.

B. Le Crétacé supérieur:

Il est bien développé dans le massif de l'Aurès et ses régions limitrophes et forme l'essentiel des affleurements mésozoïques dans la région. Il est caractérisé par:

- Les variations de faciès et d'épaisseur.
- Le développement des carbonates aux dépens des marnes du Nord vers le Sud.

a. Le Cénomanién:

Il existe dans tous les grands anticlinaux de l'Aurès. Il est caractérisé au Sud-est du massif (El-Kantara et Biskra) par une faune abondante. Il est formé d'alternances de marnes, de calcaires et de calcaires dolomitiques avec présence de Foraminifères arénacés, d'Echinidés, d'Ostracés, de Nérinées et de Rudistes. R. Laffitte signalait la présence du gypse et brèche sédimentaires, aux environs de Biskra. Cette présence confirme la faible épaisseur de l'eau dans le milieu de sédimentation. Et même que les conditions pouvaient devenir lagunaires. Au centre du massif les marnes sont riches en Céphalopodes et les calcaires en Ostracés avec d'autres fossiles néritiques.

L'épaisseur des sédiments dans cette zone atteint 1000 m (anticlinal du Dj Azreg). A l'Est de Biskra (flanc sud d'Ahmar Khaddou), le Cénomanién est représenté par des marnes à ammonites et des calcaires à ostracées, huîtres et polypiers au sommet. Par contre à l'Ouest (Dj. Bou Rhezal où l'épaisseur est réduite : 200 m), il est formé d'une alternance de marnes et de calcaires à ostracées et radiolites et se termine par des marnes à

huîtres contenant, à leur sommet, des bancs gypseux. Le Cénomaniens se caractérise par l'absence des niveaux gréseux.

b. Le Turonien:

Le Turonien est celui de tous les étages crétacés qui occupe les plus larges surfaces à l'affleurement dans l'Aurès et sa périphérie. A la périphérie du massif, il est formé de récifs et de calcaires à rudistes avec une épaisseur de 100 à 300 m. Alors que la partie centrale est dominée par des marno-calcaires peu fossilifères à rares Céphalopodes et des Echinidés. Dans cette zone l'épaisseur des formations atteignent 800 m.

Dans la partie occidentale de l'Aurès (Dj. Metlili, El Kantara), il débute par des calcaires bréchoïdes à rudistes et nodules siliceux qui sont surmontés par des alternances de marnes et de calcaires à oursins, gastéropodes et polypiers et se termine par des calcaires graveleux et ferrugineux. Prés de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il est formé de calcaires, de calcaires marneux ou dolomitiques, de marnes et de gypse au sommet.

c. Le Sénonien:

Le Sénonien affleure dans les anticlinaux et les synclinaux de la région. Mais il n'est pas très répandu comme les étages précédents. Il est très épais et peut atteindre 1500 à 2000 m et même plus au niveau d'El-Kantara, il s'agit d'une série marine marno-calcaire présentant une certaine homogénéité d'ensemble avec une réduction Nord – sud des épaisseurs.

Au niveau d'El-Kantara le Sénonien est formé de marnes noires à gypse dans lesquelles s'intercalent deux barres calcaires crayeux blanchâtres surmontées de 400 m de calcaires massifs.

Au centre et dans la partie orientale du massif (Dj. El Ezreg, Ahmar Khaddou) il est formé de marnes contenant quelques bancs de calcaires marneux coniacien-santonien, des calcaires à inocérâmes, lumachelles et marnes noires à ostracés campaniennes et s'achève par des calcaires crayeux blanchâtres à orbitolines et des calcaires massifs à bryozoaires et incérâmes maestrichtiens.

Au niveau du Dj. El Melah (d'El Outaya), le Sénonien est formé par des marnes noires et des calcaires crayeux campaniens assez fossilifères. Au nord de ces marnes, affleurent des calcaires massifs maestrichtiens.

A l'Ouest de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il présente une épaisseur de 400 à 500 m. Il est formé de calcaires massifs ou bréchoides (ou encore pseudo-oolithiques) à radiolarites surmontés de calcaires marneux puis des marnes jaunes et enfin des calcaires massifs.

2.2. LE TERTIAIRE

2.2.1. LE PALEOGENE (NUMMULITIQUE)

Le Paléogène est bien représenté car on le trouve dans tous les synclinaux du versant sud du massif de l'Aurès et du Sillon présaharien. Il se subdivise en deux séries:

- Une série marine à la base (Eocène Inférieur – Eocène Moyen)
- Une série continentale au sommet (Eocène supérieur - Oligocène)

A. Le Paléogène marin:

Il vient en concordance sur le Danien. C'est dans le SE de l'Aurès (synclinal de Ouled Rechaich, flexure Khanguet Sidi Nadji - Séiar et Chaîne de Rhellis) que le paléogène marin, conservé surtout dans les dépressions synclinales, est le plus développé.

Dans le synclinal d'Ouled Rechaich, R.Laffitte décrivait la série que nous présentons en résumé de bas en haut comme suit:

- ▶ marnes blanches à minces bancs de gypse ou de silex admettant à leur sommet quelques intercalations calcaires. Ces derniers sont souvent coquillés.
- ▶ Alternance de marnes blanches et de calcaires marneux en petits bancs.
- ▶ Alternances de marnes et de calcaires.
- ▶ Une couche de phosphate glauconieux.
- ▶ Alternance de calcaires et des marnes avec quelques silex.
- ▶ Une alternance de marnes blanches et de calcaires marneux.
- ▶ Marnes blanches sans fossiles.
- ▶ Marnes blanches et calcaires marneux à silex.
- ▶ Calcaires massifs à silex.
- ▶ Calcaires, marnes et calcaires marneux avec gypses.
- ▶ Calcaires et marnes jaunes avec petits bancs phosphatés.
- ▶ Calcaires et marnes jaunes.
- ▶ Marnes jaunes gréseuses.

Dans les régions axiales (synclinal de Rhassira et celui de Bouzina), le Paléocène est représenté par des calcaires contenant quelques bancs marneux, l'Eocène inférieur par des marnes blanches et des calcaires marneux à silex et nummulites et le Lutétien par des calcaires à silex; Avec manifestation de quelques intercalations détritiques principalement, des conglomérats à la base et au sommet de la série dans le synclinal de Bouzina.

Au niveau d'El-Kantara, le Paléocène est formé de calcaires et de calcaires marneux à gastéropodes, milioles et lamellibranches de marnes jaunes et de calcaires marneux ou dolomitiques.; l'Eocène inférieur (Londonien) est formé de calcaires lacustres, de marnes rouges de grés et de conglomérats (poudingues) consolidés et l'Eocène moyen (Lutétien) de calcaires et marnes à gastéropodes et lamellibranches admettant avec quelques passages gréseux ou contenant des lentilles conglomératiques à la base.

B. Le paléogène continental :

Le Paléogène continental (Eocène supérieur et Oligocène) est formé de sédiments de nature très varié mais toujours de couleur rouge. Leur épaisseur ne dépasse pas 200 m. Il se rencontre soit dans des synclinaux en concordance sur le Lutétien et supportant par endroit en concordance apparente le Burdigalien, soit en discordance sur tous les termes des séries plus anciennes jusqu'au Trias.

Lorsque ce paléogène n'est pas recouvert par le Burdigalien marin. Il pose le problème de confusion avec le Néogène supérieur (possédant le même faciès).

Dans le synclinal d'El-Kantara, il est formé de marnes rouges et de conglomérats grossiers à gastéropodes que Laffitte rattache à l'Aquitaniens et non à l'Oligocène.

Sur le versant sud du massif (Rhassira, Bouzina), il est constitué de marnes rouges localement gréseuses, de conglomérats grossiers à éléments souvent diversifiés.

Au NW, la série conglomératique repose directement en discordance sur le Lutétien. Plus au Sud (Khanguet Sidi Nadji et Séiar), la série est complètement détritique (grés, sables et conglomérats).

2.2.2. LE NEOGENE

a. Introduction:

Le Néogène ou le Continental terminal est défini pour la première fois dans le Sahara septentrional par Kilian (1931). Il correspond à des formations continentales, souvent rubéfiées et d'âge Mio-pliocène. Ces formations peuvent être identifiées par le seul fait qu'elles soient souvent discordantes ou ravinantes sur un substratum tectonisé lors de la phase Atlasique Eocène. De même, il est surmonté par des dépôts quaternaires légèrement discordants ou ravinants dans bien des cas (Guiraud, 1978).

Par la suite le terme a été étendu à l'ensemble des formations rouges tertiaires de l'atlas saharien et de l'Aurès plus au Nord.

Ces formations représentent de larges étendues en affleurement avec leur puissante épaisseur. Elles peuvent atteindre plus d'un millier de mètres parfois.

b. Historique des recherches sur la géologie du Néogène:

- **H. Fournel (1849):** signalait les dépôts à *Ostrea crassissima* aux environs d'El-Outaya. Il s'agit du Néogène du dit « Continental Terminal ».
- **Coquand (1862):** Parlait aussi du gisement néogène d'El-Outaya en donnant une coupe sommaire de l'ensemble.
- **Ficheur (1900):** établi la carte géologique générale de l'Algérie ou il représente l'extension de l'Oligocène continental notamment au sud du Hodna et dans les Aurès.
- **Flamand (1908 et 1911)** a donné une coupe montrant la superposition des formations rouges du côté du Branis. Il identifie par ailleurs un certain nombre de fossiles découvert dans ces formations.
- Un vif débat s'est déclenché par la suite sur l'âge de ces formations rouges entre Ficheur, Joleaud, Dalloni et Savornin.
- **Laffitte (1939):** a réalisé la carte géologique au 1/50 000 en donnant une étude géologique détaillées du Massif des Aurès et des régions voisines en particulier le Nord-est de Biskra.
- **N.Gousskov (1962):** établit la carte géologique de la feuille de Biskra au 1/200 000, synthèse de travaux cartographiques et hydrogéologiques.

- **G.Glaçon et R. Guiraud (1970)**: mènent une étude générale du Mio-pliocène de la région.
- **Guiraud (1970, 1973, 1975, 1978, 1990)**: apporta de nouveaux éléments en étudiant le Bassin du Hodna et ses régions limitrophes.
- **Chebbah (2007)** traite les bassins Néogènes de part et d'autre de l'accident sud atlasique. Une étude sédimentologique et lithostratigraphique donnant entre autres des informations sur les paramètres mécaniques (granulométrie) et chimiques (calcimétrie, minéraux argileux) des dépôts néogènes à partir d'une série importantes des essais de laboratoire.

Le Néogène comporte plusieurs ensembles (ou formations). Ce découpage tient compte à la fois de la nature, de l'association et du milieu de dépôt des faciès constitutifs. Il permettra une reconnaissance rapide en sondage et sur le terrain, de ces différents ensembles. Il constitue, donc, des repères cartographiques indispensables en l'absence de données biostratigraphiques fiables.

Nous adoptons dans l'étude du Néogène, le découpage donné par Guiraud, (1973, 1990) et repris par Chebbah, (2007). Il est constitué de:

c. Aquitano-burdigalien - (Miocène 1-2):

Caractérisé par des formations continentales détritiques et parfois lagunaires de couleur généralement rouge se trouvant en discordances sur les terrains les plus anciens (Eocène inf, ou moyen ou le Mésozoïque). On le rencontre sur les bordures orientales des bassins néogènes (El Outaya, El Kantara et El-Hodna plus au Nord-ouest).

Du côté de Branis, la série débute (base) par des argiles brunes gypsifères et se termine (sommet) par des argiles vertes fossilifères à huîtres. Par contre, à l'Est de Dj. El Melah, la série comprend des marnes que surmonte une puissante formation conglomératique à gros blocs calcaires du substratum pouvant atteindre 1 m de long. A l'ESE du Djebel El Melah, les séries détritiques rouges à passées très grossiers du Miocène 1 et du Miocène 2 sont recouvertes par quelques dizaines de mètres de marnes jaunes verdâtres légèrement gypseuses et de calcaires argileux. Un petit banc de calcaire micro-conglomératique à Pectens, marque le début d'une sédimentation marine. Plus au nord, le

Miocène 1 et le Miocène 2 affleurent sur de plus grandes épaisseurs permettant de petites passées gréseuses et au sommet de minces lits gypseux.

d. Langhien-Serravalien -Tortonien (Miocène 3):

Il s'agit ici d'une sédimentation marine marquée par des formations carbonatées discordantes sur le Miocène 2. Au niveau du Djebel Mohr entre Branis et la plaine d'El-Outaya le Miocène 3 est constitué de 150 à 200 m de Molasses jaunâtres, renfermant parfois des galets que surmontent plusieurs centaines de mètres de marnes gris verdâtres. Alors qu'au Branis il est formé d'argiles brunes à gypse avec des intercalations métriques de bancs gypseux. Et d'une alternance de grés, de grés argileux parfois brun ou rouge et d'argiles gypseuses avec apparition de petits bancs de calcaires marneux ou de gypse à El Outaya.

e. L'ensemble gréseux messénien (Miocène 4):

Il est formé de grés moyens à grossiers bruns- rouges à quelques passages de lits graveleux ou de conglomérats ou encore des intercalations d'argiles rouges à gypse. Vers le sud les lits de graviers sont plus abondants et la proportion des argiles augmente. Dans le secteur Droh – M'chounech il est discordant sur les argiles rouges à gypse tortoniennes.

Ces grés renferment à leur sommet des hélix - Tissoti Baryan – et sont semblables et en continuité avec les grés de Djérid en Tunisie datés par une faune de mammifères du Messinien (Laffitte, 1939).

f. L'ensemble conglomératique (Pliocène):

Il est formé de conglomérats grossiers peu consolidés et très hétérogènes à lentilles gréseuses à leur base. Il est bien développé à Ras Chicha et à Dj. Rhémiss dont il forme les hauteurs de ces deux chaînons.

Les faciès sont, généralement, constants. Ils sont très grossiers sur les bordures des bassins et montrent une diminution de la proportion et de la taille des galets qui tendent à disparaître au toit de l'ensemble en direction des parties centrales des cuvettes de sédimentation.

Il repose en concordance ou en légère discordance sur le Messinien et surmonté, à son tour en nette discordance, par des conglomérats très consolidés du Quaternaire ancien. Par conséquent, son âge se déduit aisément de sa position entre le Messinien supérieur et le quaternaire ancien comme le signalaient Laffitte et Guiraud.

3. Synthèse litho-stratigraphique de la région de Biskra:

Les affleurements à l'échelle régionale ne sont pas tous représentés dans la région de Biskra. La figure N°5 montre selon la succession lithologique dans cette région que la série est plus ou moins continue du Turonien au Néogène. Elle est caractérisée par:

Le Crétacé est constitué dans sa majorité de calcaires et de marnes avec au sommet un peu d'argiles. Le Crétacé constitue avec ses différents niveaux de bons réservoirs dans la région. Il s'agit d'aquifères karstique très intéressant en quantité et en qualité bien qu'ils soient à des profondeurs parfois grandes.

Le Néogène présente une variation dans sa lithologie. Il s'agit essentiellement d'un remplissage hétérogène caractérisé par des argiles souvent sableuses et gypseuses de couleur brune ou rouge, ainsi que des grés et des conglomérats. Les niveaux gréseux et conglomératiques peuvent constituer des réservoirs d'eau. La qualité des eaux qui s'y trouvent est remise en cause si la présence des argiles et des gypses dans ces niveaux est importante.

Dans cette région, les terrains néogènes sont bien représentés et occupent une grande superficie. Les affleurements principaux se localisent en bordures de bassins (piémonts et dépressions où ils sont souvent recouverts par une faible épaisseur de formations quaternaires et entaillées par des petits ravins). Par contre, dans les centres de ces bassins ces dépôts néogènes sont enfoncés sous d'épaisses formations récentes du quaternaire qui viennent les couvrir en discordance. Cependant de nombreux sondages ainsi que diverses prospections géophysiques permettent dans de nombreux cas de suivre leur évolution en profondeur, des marges vers les centres de ces bassins.

La série néogène repose souvent en discordance, selon les endroits et les niveaux atteints par l'érosion post-tectonique, sur des formations d'âges différents (Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur).

Lorsqu'elle est complète, elle comporte plusieurs ensembles litho-stratigraphiques Tableau N°3. Il s'agit d'unités lithologiques à valeur régionale dont les limites et les appellations diffèrent d'un auteur à l'autre. Le découpage de Guiraud (1973, 1990) suscitée, basé sur l'âge de ces formations, demeure le plus affiné.

En général la majorité des auteurs donnent au Néogène la superposition suivante :

- ▶ A la base des argiles vertes ou brunes et des calcaires aquitano-burdigaliens.
- ▶ Des argiles, souvent, brunes à intercalations de bancs gypseux langho-serravaliens.
- ▶ Des argiles rouges gypseuses tortoniennes.
- ▶ Des grès ou sables bruns-rouges messéniens.
- ▶ Au sommet, des poudingues rouges pliocènes.

Cette description de la succession lithologique est très simplifiée. Ces formations, par contre, présentent sur le terrain d'importantes variations latérales et verticales de faciès.

A l'affleurement ou en sondages, les différentes coupes montrent plusieurs alternances, souvent désordonnées, d'argiles, d'argiles sableuses, de grès ou sables parfois argileux et des conglomérats au sommet, avec la présence de faciès évaporitiques (gypseux) dans presque tous les niveaux ou quelques bancs carbonatés.

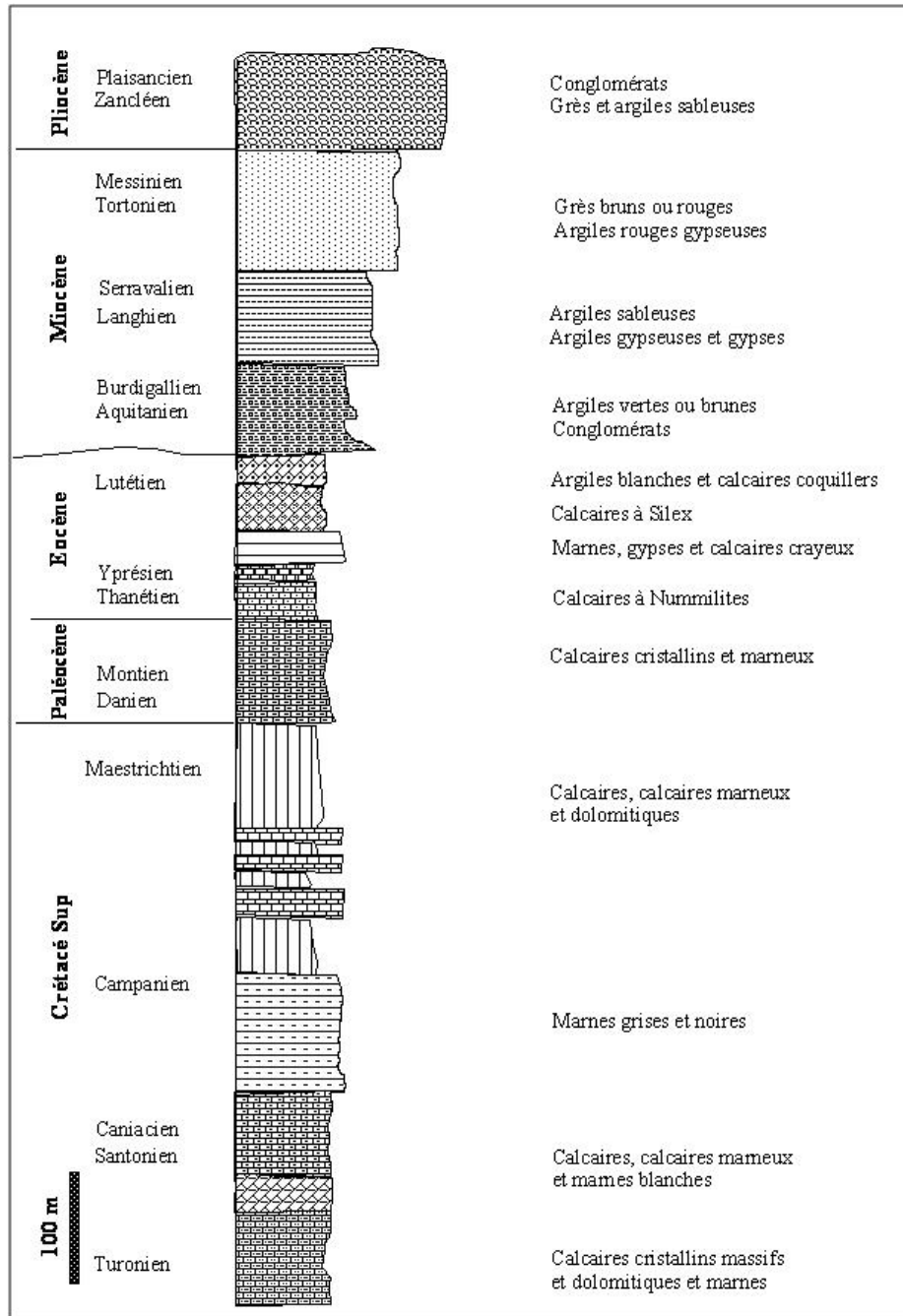


Figure N°5 : Synthèse litho-stratigraphique de la région de Biskra

Tableau N°2 : Litho-stratigraphie du Néogène dans la région de Biskra.

Formations	Époque	Age	Age Ma	
Conglomérats grossiers, grés grossiers	PLIOCENE	Supérieur	PLAISANCIEN	1.8
Grés, conglomérats à lentilles de grés		Inférieur	ZANCLÉEN	3.6
Grés bruns rouges	MIOCENE	Supérieur	MESSINIEN	5.3
Argiles rouges gypseuses			TORTONIEN	7.1
Argiles brunes gypseuses, gypse		Moyen	SERRAVALLIEN	11.2
Argiles vertes Calcaires			LANGHIEN	14.8
Argiles brunes vertes gypseuses, conglomérats		Inférieur	BURDIGALIEN	16.4
			AQUITANIEN	20.5
				23.8

4. Synthèse géologique du bassin d'El-Outaya:

Le bassin d'El Outaya fait partie de la région de M'Doukal - Biskra qui forme une zone charnière raccordant les deux grands ensembles atlasiens : L'Atlas Saharien et l'Aurès décalés selon un mouvement dextre (Guiraud, 1973, 1990) ; Une région qui se caractérise sur toutes les cartes quelle qu'en soit l'échelle et ceci pour les raisons suivantes :

- Parce que ses limites avec les domaines voisins sont, dans l'ensemble, nettes et lui donnent une forme approximativement trapézoïdale.
- Car elle correspond à la zone dans laquelle le domaine atlasique est le plus étroit en Algérie.
- Parce que de nombreux accidents, de directions diverses, l'ont affectée à plusieurs reprises, morcelant les structures et favorisant l'accumulation des séries néogènes puissantes et variées (Guiraud R., 1990).

C'est un bassin particulier par ses dimensions réduites (30 X 70 Km), sa forme losangique limitée par des failles (E-W, NW-SE et NE-SW) ainsi que par sa position dans le domaine atlasique (figure N° 6).

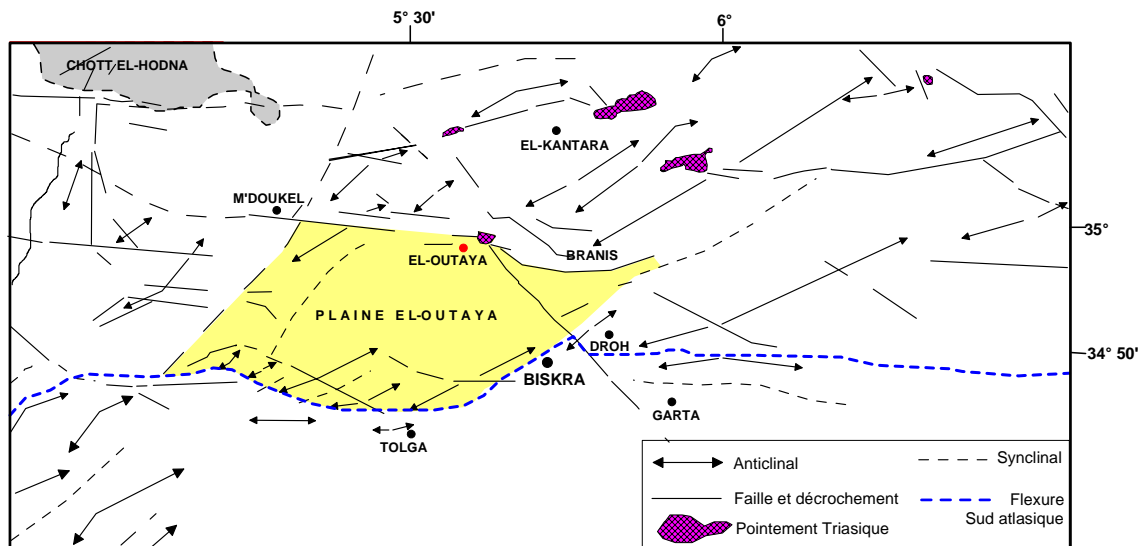


Figure N°6: Situation du bassin d'El-Outaya dans le contexte sud-atlasique

Il s'agit d'un bassin subsident superposé à un synclinal orientée sensiblement E.NE – W.SW et située entre deux anticlinaux. Elle se trouve au nord de l'anticlinal du Dj.Bou Rhezel (Biskra) et au sud du dôme de Djebel El Melah (El-Outaya) et sous laquelle s'annoient les plis de l'Aurès. Sa structure résulte de la superposition de deux phases tectoniques majeurs reconnues dans toute la région, la phase atlasique (alpine) globalement N60 à 80 E du Lutétien et la phase du Quaternaire basal globalement E-W (Lafitte, 1939; Guiraud, 1973, 1990; Guiraud et Bellion, 1995).

C'est dans ce bassin, près du village de Branis, que le continental terminal (miopliocène) a été signalé pour la première fois dans les Aurès par Fournel. C'est aussi dans ce bassin que les principaux termes de la série néogène ont été différenciés, ultérieurement, par Laffitte. Il s'agit d'un bassin néogène, bien développé, qui a fonctionné comme un bassin de sédimentation pendant tout le Néogène. Il est constitué à la base par un Miocène laguno-marin (Bled Zemala, Branis, El Outaya), recouvert par du Messinien (Pontien) gréseux fluviatile, puis par des poudingues pliocènes (Ras Chicha). Les termes supérieurs, plus particulièrement pliocènes, sont fortement inclinés vers le centre du bassin où ils disparaissent sous une épaisseur considérable du Quaternaire; Leur relèvement à la périphérie du bassin indique que celui ci a été affecté par les mouvements les plus récents (Quaternaire basal).

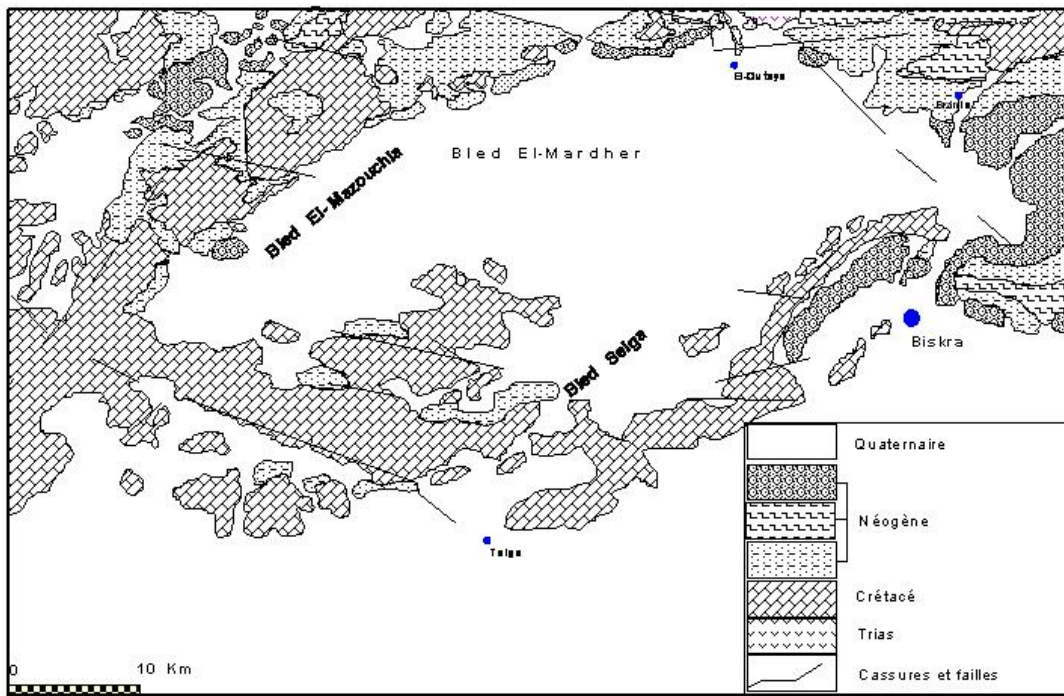


Figure N°7 : Carte géologique de la plaine d'El-Outaya

Au Néogène, le bassin d'El-Outaya est comblé, par des dépôts silicoclastiques confinés, d'épaisseurs variables et contrôlés par les rejeux d'anciens accidents hérités de l'orogénèse atlasique (Aissaoui, 1984 – Harkat, 1999). Il se rattache à un ensemble de bassins intercontinentaux considérés au Néogène, comme des bassins de type pull-apart, (Kazi tani, 1986), de bassins transportés (Ghandriche, 1991) ou de bassins d'effondrement encadrés par des failles (Harkat, 1999).

Son évolution au cours du Néogène, liée au découpage préexistant de la couverture post-triasique par des accidents NW/SE (Aissaoui, 1984 – Guiraud, 1973, 1990) accompagnaient un processus d'effondrement du domaine atlasique lors d'une tectonique en extension post-tecto-orogénique qui s'intègre dans un modèle de plate forme associé à un bassin d'avant pays.

Ces dépôts, souvent azoïques, fournissent peu d'arguments pour des datations précises et fiables. Bien qu'ils aient été signalés dès le milieu du XIX^e siècle dans la localité de Branis (Fournel, 1848), aucune étude détaillée et aucune corrélation n'ont été proposées à ce jour, depuis les travaux de Lafitte et Guiraud qui ont associé les formations du post-Miocène moyen à des milieux continentaux. La carte de la figure N° 7 montre que les affleurements néogènes sont important dans le secteur Est de la plaine (Région, chicha et Branis) ainsi qu'au N et NW alors qu'au sud les affleurements sont surtout du Crétacé. Le Trias affleure au nord représenté par Dj. El-Melah.

5. Etude de quelque coupes et corrélation:

La plaine d'El-Outaya a fait l'objet de plusieurs coupes et corrélations réalisées par plusieurs auteurs. Nous avons exploité certaines que nous pensons représentatives pour donner une idée sur la disposition des formations du Néogène.

5.1. Corrélations E-W dans le bassin d'El Outaya

La description de cette coupe (In Chebbah, 2007) de direction E-W synthétise la variation de la disposition lithologique sur la bordure septentrionale dans le bassin d'El-Outaya. Ce bassin partagé en deux sous-bassin; entre Branis - El Outaya (sous bassin oriental) et entre El Outaya - Bled el Mazouchia (sous bassin occidental).

Dans le sous-bassin oriental, les quatre premiers ensembles sont bien développés et montrent d'importantes variations de faciès et d'épaisseurs ; alors que dans le sous-bassin occidental, seuls les deux premiers ensembles affleurent montrant une certaine homogénéité de faciès avec une augmentation des épaisseurs du NE au SW.

L'ensemble 1 (400 - 100 m) aquitano-burdigalien, discordant sur tous les terrains antérieurs, est laguno-marin et présente plusieurs variations latérales de faciès et d'épaisseurs. Il est formé : i) à la base, d'une molasse calcaire ou de conglomérats à gros blocs calcaires (olistostromes) surmontés d'argiles brunes gypseuses ; ii) à l'Est, d'argiles vertes à huîtres et échinides (Branis), au centre de calcaires et de calcaires argileux à lamellibranches et globigérinoïdes (El Outaya) et à l'Ouest d'argiles brunes et des conglomérats (El Outaya -Bled el Mazouchia).

L'ensemble 3 (200 - 250 m), tortonien-messinien, débute par des grès argileux et se poursuit par des argiles rouges gypseuses et des grès (ou sables) brunâtres à fines intercalations carbonatées.

L'ensemble 2 (100 - 200 m), langhien-serravalien, repose en concordance sur l'ensemble 1 et est constitué d'argiles brunes gypseuses présentant à leur sommet des intercalations de gypse à l'Est et de grès à algues contenant, aussi, des intercalations de calcaires marneux à l'Ouest.

L'ensemble 4 (environ 100 m), pliocène inférieur, discordant sur le précédent, débute par une épaisse couche conglomératique que surmontent des grès rouges à lentilles de conglomérats.

L'ensemble 5 (80-100m), pliocène supérieur, est formé d'une épaisse série conglomératique grossière et ne se rencontre qu'au NE de Branis (Dj. M'hor).

5.2. Les coupes:

L'observation des coupes figure N°9 montre:

- La plaine est affectée par des failles de direction diverses qui affectent l'ensemble du Néogène et même le Crétacé. Ces failles dessinent des grabens et des horsts et peuvent favoriser la remontée du Trias.
- Le Néogène est formé dans les coupes 1 et 2 d'un niveau Pliocène ainsi que trois niveaux Miocènes. Alors que dans la coupe N° 3, le Pliocène est formé de deux niveaux (Zone de Chicha); il semble que le pliocène supérieur ait résisté à l'érosion.

- On remarque que dans la coupe (2), le Néogène ne vient pas directement en contact avec Dj.1-Melah mais repose sur les formations d'âge Crétacé.

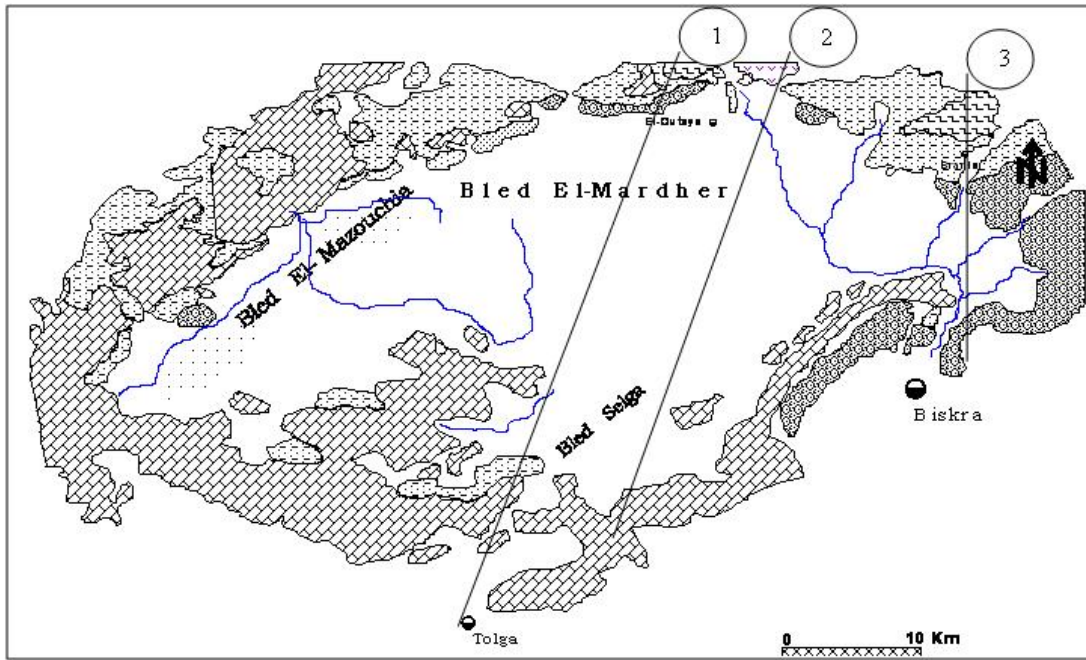
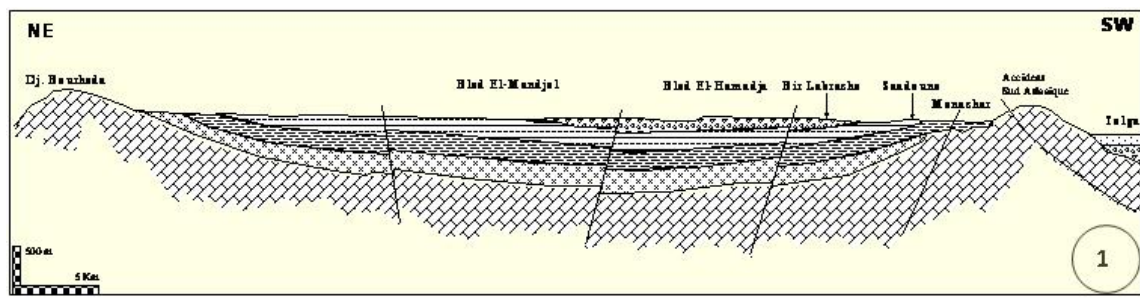


Figure N°8 : Situation des coupes (1, 2 et 3)



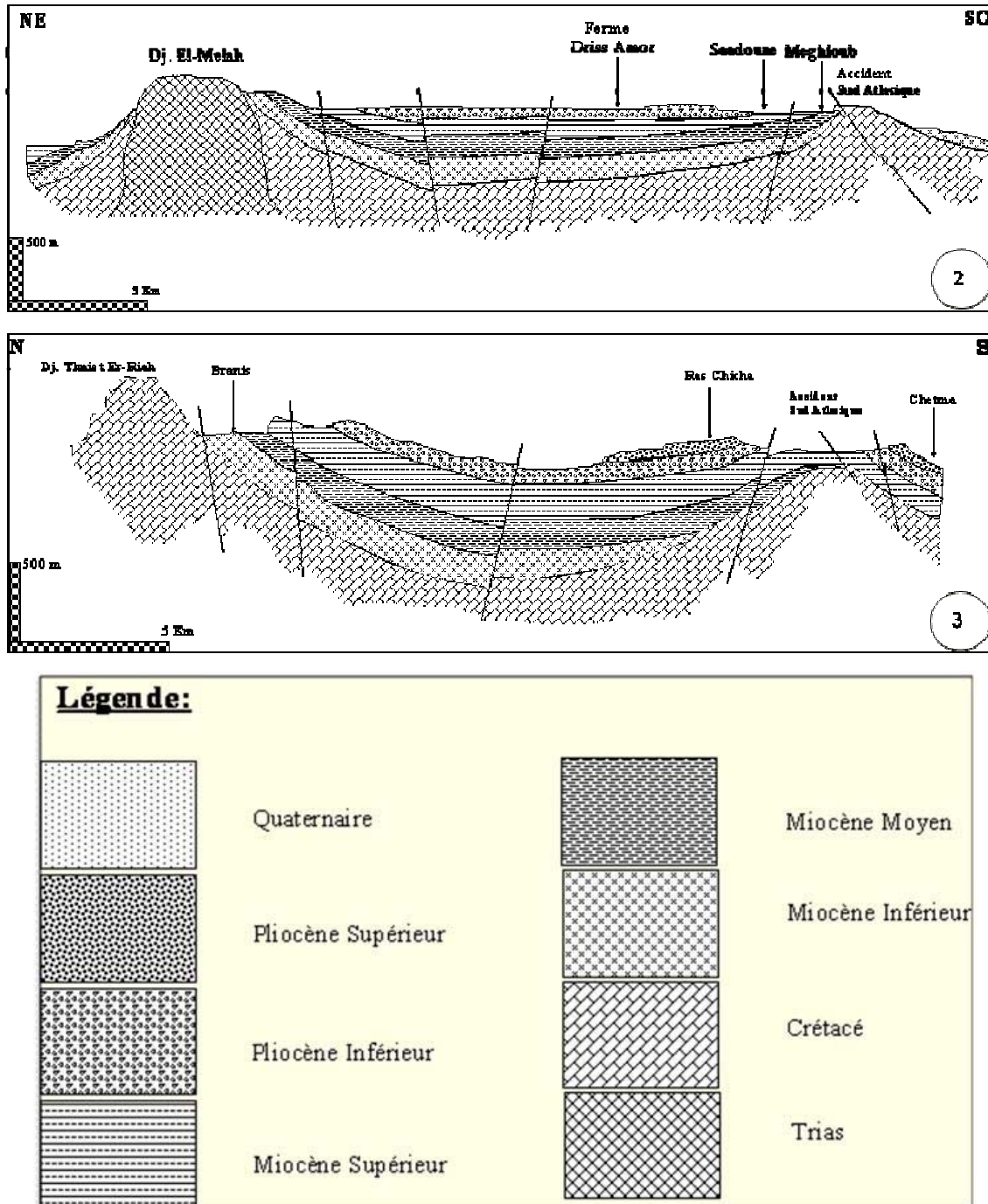


Figure N°9 : Coupes géologiques au niveau de la plaine d'El-Outaya

(In Chebbah, 2007)

6. TECTONIQUE

a. L'accident Sud Atlasique:

L'accident Sud Atlasique (ou atlasien) est une ligne continue de failles et de flexures qui met en contact les vastes étendues monotones du domaine saharien et les chaînes montagneuses du domaine atlasique. Il s'agit d'un alignement très remarquable désigné le plus souvent par l'une des expressions suivantes : Accident Sud-atlasique (ou atlasien), Flexure Saharienne ou Accident Nord-saharien ;

La description de cet accident par Laffitte semble la plus complète, et de laquelle Guiraud R. (1990) tire les conclusions suivantes :

- Continuité de l'accident entre Agadir au Maroc et Khanget Sidi Nadji à l'Est de Biskra.
- Difficultés de fixer parfois le tracé précis ou un tracé unique suite à la présence de plis assurant un effondrement assez progressif des structures, au sud de l'atlas saharien en particulier.
- Présence d'une gouttière synclinale discontinue aux pieds des premiers reliefs du domaine atlasique (domaine pré-africain).
- Age fin pliocène de la surrection du domaine atlasique avec cependant des mouvements antérieurs à des époques variables dans des secteurs localisés.
- Obliquité de l'accident par rapport aux plis atlasiques mais parallélisme avec les chaînes récentes (chaîne de Rhélliss).

Dans le détail, il s'agit d'une ligne brisée dont les tronçons successifs de celle-ci se répartissent en trois familles principales de cassures de directions proches d'E – W, NE – SW et NW – SE (cette direction ne se rencontre que dans la région de Biskra). Aussi, il représente une limite assez complexe tant du fait de son tracé que de son histoire, car il correspond à une succession d'accidents indépendants les uns des autres ayant joués ou rejoués lors de diverses phases tectoniques. (Guiraud R. 1990).

Dans la région de Biskra on note, qu'entre Chaiba (Ouest) et Foug El Gherza (Est), les accidents NW – SE à WNW – ESE sont liés à des décrochements dextres et se poursuivent dans le domaine atlasique. Cependant, il semble que la faille de Chaiba, limitant le bassin d'El Outaya à l'Ouest, n'ait pas rejoué après le Miocène, ce qui n'est pas le cas pour les décrochements qui se manifestent à l'Est de Biskra (Chetma, Foug El Gherza) et qui décalent les séries pliocènes de façon dextre en les laminant parfois (principalement entre Biskra et Chetma) (Guiraud R. 1973).

L'âge des déformations est atlasique - Eocène moyen - dans le secteur Ouest (Chaiba) et fin-pliocène ailleurs (Biskra – Khanguet Sidi Nadji).

b. Le domaine atlasique:

Le domaine atlasique correspond à deux grands ensembles morphostructuraux bien individualisés : l'Atlas Saharien et l'Aurès décalés selon un mouvement dextre et se raccordent par une zone charnière : la région M'Doukal-Biskra ; celle ci présente la particularité de contenir l'ensemble des traces des principales déformations ayant affecté ce domaine. De ce fait, avant de décrire les principales structures dans cette région, nous donnerons ses limites ;

L'ensemble structural de M'Doukal – Biskra est limité par : -

- L'accident sud – atlasien au Sud
- Le faisceau de failles sur lesquelles s'interposent les plis de l'Aurès, entre Kef Nsara et Foug el Kherza.
- L'accident de Roumana- Chaiba à l'Ouest
- L'accident nord – atlasien qui longe tout d'abord le flanc sud du Djebel Meharga, et ensuite légèrement décalé de façon senestre à partir de l'Oued el Melah et se poursuit au Nord des djebels Saoura et Fozna en direction de la pointe nord –occidentale du Djebel Metlili.

Les plis:

Dans la région de Biskra, comme dans l'ensemble du domaine atlasique, on distingue deux types de plis présentant des dimensions et une géométrie différentes qui se succèdent en se superposant ou en s'interférant.

a. Les plis atlasiques:

Les terrains anté-néogènes dessinent diverses structures plus au moins masquées par le Miocène et découpées par de nombreuses cassures.

On peut reconnaître, en se déplaçant du NW vers le SE :

- Une zone haute culminant dans le jurassique entre les Fennd Guelalia et le Djebel Zarhouane, tronquée par l'accident nord- atlasien et auréolée au Sud et à l'Est par des épaisses séries du crétacé inférieur et du Cénomaniens qui forme une sorte de vaste péri-anticlinal.
- Plusieurs replis anticlinaux et synclinaux qui se dessinent dans le Cénomaniens et le Turonien des djebels Sahbana, Dokhane, Bou Kabza et Guelb el Akhal ; entre le Djebel Fozna et l'anticlinal de Djebel Ahmar se place au contraire une large cuvette au fond de laquelle le Sénonien est probablement conservé sous le remplissage néogène, d'après plusieurs profils de sondages électriques.
- Un long synclinal qui se poursuit depuis le Djebel Chems jusqu'au Djebel Gueraat el Guetoul.
- Une série de chaînons (Ksoum, Lefaa, Moddiane, Mekrizane) ayant appartenu à un même anticlinal dont le flanc nord est très découpé contrairement au flanc sud qui se poursuit régulièrement.
- Le vaste synclinal de Bled el Mazouchia, dessiné par le Crétacé supérieur et l'Eocène dont les pendages sont dans l'ensemble assez faibles, et qui doit se prolonger sous la plaine d'El Outaya ;
- Divers replis affectant le Sénonien au Nord de Tolga et qui sont pris en écharpe par la grande flexure limitant ici le domaine sahariens.
- La dépression synclinale de Bled Selga.
- L'anticlinal des djebels Tenia et Bou Rhezal.

Ces structures dont l'ensemble est décrit en détail par Laffitte, sont toutes assez souples et opaques. Elles correspondent à des plis vastes (quelques dizaines de kilomètres)

assez réguliers et souples dont leur orientation moyenne est voisine de N 60 E et dont les anticlinaux sont légèrement déjetés vers le sud.

À divers points du massif de l'Aurès, des étranglements ou des dilatations de plis sont produites dans des zones où certaines structures s'entroient (un anticlinal pouvant ainsi se trouver dans le prolongement d'un synclinal ou réciproquement). De telles anomalies traduisent selon Guiraud le rejeu d'accidents profonds au niveau de la couverture post-triasique;

Cette phase de plissement est intra (infra) lutétienne. Période où se forment des horizons détritiques grossiers concordants sur leur substratum et résultant donc principalement de mouvements de surrection verticale. La phase de serrage majeure doit se placer immédiatement après les dépôts de ces derniers qui sont recouverts en discordance très nette par le Miocène.

Elles présentent des directions qui varient de N10 E à N 80 E, cet éventail pouvant se rencontrer en partie au sein du même pli (Bou Rhezal par exemple) ; ce qui démontre l'intervention de torsions probablement contemporaines des plissements ; ceux ci se sont produits lors de la phase atlasique ; l'apparition en concordance de formations conglomératiques grossières rouges à la base comme au sommet de la série éocène à divers endroits, démontre l'existence de mouvements prémonitoires, à composante principalement verticale.

b. Les plis post-pliocènes:

Dans l'Aurès le Miocène supérieur est déformé par le rejeu plus ou moins important de certaines structures atlasiques et de l'apparition sur les bordures du massif de structures nouvelles obliques sur les précédentes ; ce deuxième épisode de plissement, dans lequel le Pliocène est impliqué lorsqu'il est conservé, est attribué à la phase du Quaternaire basal.

La chaîne de Djebel Rhéllis, dont la formation est liée pour l'essentiel à cette dernière phase, mérite une attention particulière ; orientée d'Est en Ouest, elle comporte une succession discontinue de petits chaînons montrant un net déversement vers le Nord et tendant à recouvrir en faille inverse des séries du Miocène supérieur ou de la base du

Pliocène. Cette chaîne est limitée à ses deux extrémités par des sortes de couloirs NW-SE jouant en décrochements dextres.

Les structures affectant franchement le Néogène se limitent à la partie orientale de la région. Plus à l'Ouest, les séries mio-pliocènes ne présentent que de légers gauchissements accentués parfois au contact de certains accidents.

Ces plissements sont plus inclinés sur l'Est dans l'ensemble que les structures liées à la phase atlasique ; ce caractère est plus net lorsque le Miocène s'est déposé sur des vestiges de plis atlasiques démantelés antérieurement par de grandes cassures. Cependant, il est à noter les inflexions très nettes du profond synclinal d'El Outaya qui montre en outre la particularité de s'orienter au Sud Est sur près de 20 kilomètres de longueur.

La phase de déformation majeure se situe à la base du quaternaire. Mais l'instabilité des rivages qui se manifeste dès la base du Miocène moyen (Miocène 3) implique la présence de mouvements verticaux dans une aire très vaste ; Enfin, la subsidence locale de la plaine d'El Outaya jusqu'à la fin du quaternaire moyen a provoqué une accentuation de la cuvette synclinale post-pliocène.

Les cassures:

C'est dans cette région, qu'on rencontre des nombreux accidents, de diverses orientations et qui ont joué de façon variable au cours des phases anté, intra ou post Miocène. Cet ensemble de fractures se répartit en quatre familles principales selon leur orientation : N-S à N 30° E, N 45 ° E, N80 à 100° E et N 120 à 160° E. les deux dernières directions, les plus fréquentes, montrent dans plusieurs secteurs un passage progressif de l'une à l'autre.

- Cassures faiblement inclinées à L'Est (N – S à N 30° E) : quoi que soient rares, revêtent une grande importance ; Ce sont des failles bordières qui délimitent en partie la région ; elles sont anté-miocènes.
- Les cassures voisines de N 45° E se localisent surtout à l'Ouest de la région. Quelques cassures d'orientation voisine de N60°E se rencontrent surtout dans la région de Branis. Elles montrent souvent un jeu post-miocène provoqué par une phase cassante ultérieure à laquelle sont aussi liés les quelques accidents

qui affectent les zones de raccordement entre structures anticlinales et synclinales.

- Les cassures orientées entre N 80 et N 100° E : plusieurs accidents importants montrent des directions voisines de E – W, le plus évident correspond à l'accident nord atlasien qui avait joué en décrochement dextre à l'ouest de Dj. El Melah pendant les plissements atlasiques et après le Miocène. Aussi, de petits grabens et bassins à matériel néogène, sont limités le plus souvent, par des cassures E-W dont les rejets apparents sont importants et qui se sont superposés à des accidents anciens du Lutétien ou localement intra Miocène inférieur ; Les mouvements les plus récents, post-pliocènes, se traduisent par des failles inverses.
- Cassures orientées N 120 et N 160° E : la majorité des accidents affectant la région M'Doukal-Biskra se rangent dans cet éventail de directions. En dehors des deux zones bordières, il s'agit d'accidents mineurs dont celui affectant le Crétacé supérieur des premiers chaînons atlasiques au nord de Tolga.

Enfin, la limite occidentale de L'Aurès est liée à la présence d'une série d'accidents obliques sur l'Ouest ayant joué principalement avant le Miocène avec cependant des rejeux intra ou post-miocènes et post-pliocène ; les mouvements relatifs des différentes structures en présence correspondent tantôt à des jeux de failles normales, tantôt à des jeux en décrochements dextres. Le plus spectaculaire est celui situé à l'extrémité occidentale du massif de l'Aurès entre la pointe du Dj. Metlili et Sidi Khelil, qui résulte du jeu de plusieurs accidents NW-SE décalés par des accidents E -W qui servent en quelque sorte de relais (R.Guiraud, 1990).

7. Paléogéographie:

Après la phase tectogénique Lutitienne responsable de la formation de la chaîne atlasique (Atlas saharien et Aurès), l'ensemble de la région des Aurès et de Zibans est exondée et connaît une pénéplanation pendant l'Oligocène; la mer recouvre alors la région correspondant actuellement au massif de l'Aurès au NE de la zone d'étude.

Au début du Miocène, la tectonique active, extensive se manifeste par la formation de failles normales d'orientation NW-SE qui favorisent l'individualisation de dépression, envahis par la mer le long des chenaux plus ou moins bien développés du réseau fluvial antérieur.

Au Miocène inférieur, la mer venant du Nord envahit des dépressions plus méridionales, ce qui induit la juxtaposition de secteurs confinés à l'Est et à l'Ouest, ou plus ouverts dans la portion centrale, ainsi, la paléogéographie est caractérisée par la juxtaposition de plusieurs milieux:

A l'Ouest et au Sud, une zone de relief dont l'érosion alimente un bassin côtier, à milieu détritique et de plate-forme interne; ce bassin représente une réelle zone de stockage des éléments détritiques grossiers; il est séparé de la haute mer par un haut-fond qui constitue une barrière naturelle réduisant les apports détritiques aux zones plus externes formant ainsi un système d'horsts et grabens. C'est probablement au cours de ces épisodes extensifs que les masses salifères se mettent en place dans la région.

Au Miocène moyen, la transgression marine se poursuit vers le Sud, mais la mer tend à devenir moins profonde en raison du comblement des différents sous-bassins, la vitesse de sédimentation étant supérieure à celle de la subsidence en raison d'une accalmie tectonique. Le confinement devient de plus en plus marqué dans les zones orientales.

Au Miocène supérieure, la transgression tend à recouvrir les zones méridionales, alors qu'en périphérie du horst occidental, les réajustements tectoniques favorisent des apports de matériaux triasiques dans le sous-bassin oriental.

Au Pliocène, les premières manifestations, qui ont débuté dès le Messinien, vont se traduire par la formation des Aurès, à l'Est et provoquent le début du soulèvement de l'ensemble de la région et la régression progressive de la mer vers le Nord. Dès alors la sédimentation est continentale.

8. Conclusion:

En conclusion, il ressort que la structure de la région de Biskra, comme celle du domaine atlasique, résulte de l'action conjuguée de plusieurs tectoniques de style et d'extension variables dont la tectogénèse majeure se situe durant l'Eocène moyen (phase atlasique) ; Elle a engendré de vastes plis (concentrique orientés entre N 40 et N 60° E) et

de nombreux accidents à la faveur desquels des pointements triasiques ont vu le jour et qui a été suivit d'une autre phase de rajeunissement des reliefs à l'Oligocène. La phase du Quaternaire basal n'a sérieusement affecté que les régions méridionales particulièrement la chaîne de Rhéllis. Les accidents montrent des directions très variées et leur répartition n'est pas homogène dans l'ensemble du domaine atlasique ; seule la région M'Doukal-Biskra est affectée par toute la gamme des accidents qu'on peut rencontrer dans ce domaine et se distingue donc en cela, des deux portions de la chaîne atlasique qu'elle sépare nettement, l'Atlas saharien à l'Ouest et les Aurès à l'Est.

La plaine d'El-Outaya est un bassin Néogène, bien développé, qui a fonctionné comme un bassin de sédimentation pendant tout le Néogène. Le découpage du Néogène en cinq unités basées sur la nature et le milieu de dépôt des faciès constitutifs montre la synthèse suivante:

- à la base: Miocène laguno-marin (Bled Zemla, Branis, El Outaya);
- Recouvert par le Messinien (Pontien) gréseux fluvatile;
- Puis par des poudingues pliocènes (Ras Chicha).

Les termes supérieurs, plus particulièrement pliocènes, sont fortement inclinés vers le centre du bassin où ils disparaissent sous une épaisseur considérable du Quaternaire ; Leur relèvement à la périphérie du bassin indique que celui ci a été affecté par les mouvements les plus récents (Quaternaire basal).

Le Néogène repose souvent en discordance, selon les endroits et les niveaux atteints par l'érosion post-tectonique, sur des formations d'âges différents (Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur). Ce contact avec le substratum peut se faire suivant les cas par deux ensembles lithologiques possibles :

- soit par des conglomérats d'une épaisseur dépassant les 100 m
- soit par des argiles.

Les affleurements néogènes sont importants dans le secteur Est de la plaine (Région, chicha et Branis) ainsi qu'au N et NW alors qu'au sud les affleurements sont surtout Crétacés. Le Trias affleure au nord représenté par Dj. El-Melah.

III: CADRE HYDROCLIMATOLOGIQUE

1. Introduction :

La climatologie donne un premier aperçu sur la relation qui peut exister entre la nappe et son environnement immédiat.

La plaine d'El-Outaya se trouve dans une région aride au sud algérien. L'étude du climat dans son contexte scientifique dans ce type de région est confrontée à l'inadaptation des méthodes hydrologiques utilisées et les formules appliquées pour l'estimation de certains paramètres. Face au manque de données représentatives, on se trouve obligé d'utiliser des formules élaborées en pays humides et tempérés qui ne sont pas adaptées à nos régions arides. L'étude de l'aridité pose déjà le problème d'une définition scientifique commune pour toutes les régions concernées. Dans l'ensemble, elle ne peut être définie uniquement par les faibles moyennes annuelles de précipitation mais aussi par leur irrégularité dans l'espace et dans le temps en plus d'une forte évaporation. Dans cette analyse climatique, nous allons essayer d'étudier les précipitations et les températures ainsi que l'évapotranspiration potentielle et réelle. Ces paramètres seront calculés avec différentes méthodes empiriques (ETR, ETP, R) et des mesures sur terrain (P, T°), un bilan hydrologique sera élaboré à la fin. Une attention particulière sera donnée au régime climatique selon les méthodes de D.Martonne, de Piguy et d'Emberger pour placer la région étudiée dans son contexte climatique.

2. Stations de mesures:

On dispose des données de trois stations dont les caractéristiques sont reportées au tableau N°3:

- la première se trouve à l'intérieur de la plaine d'El-Outaya. C'est une station pluviométrique. La série de données est relativement courte est présentant plusieurs lacunes. Elle s'étale sur une période de vingt années (1970-1989). Cette station se trouve actuellement à l'arrêt.
- La deuxième est celle de Biskra. Elle se trouve au sud de la plaine. C'est une station pluviométrique présentant une série de données relativement longue et assez cohérente qui s'étale sur une période de 39 ans (1970-2008).
- Signalons l'installation depuis quelques années d'une station pluviométrique au niveau du barrage Fontaine des gazelles à l'amont de la plaine (*pluviométrie incomplète*).

Tableau 3: Caractéristiques des stations pluviométriques (ANRH).

Station	Code	X	Y	Z	Observations
El-Outaya	06 12 05	5°36'15" N	35°01'41" E	275 m	A l'arrêt
Biskra	06 14 16	5°43'48" N	34°51'40" E	120 m	Fonctionnelle
Fontaine des gazelles	06 12 01	5°35'12" N	35°06'32" E	361 m	Fonctionnelle (avec lacunes)

3. Pluviométrie :

3.1. Carte des moyennes pluviales :

L'extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord (figure 10) de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) pour la période 1965-95, montre que:

- La partie nord de la plaine d'El-Outaya est caractérisée par une pluviométrie comprise entre 200 et 250 mm;
- La pluviométrie du reste de la région étudiée varie dans un intervalle limité par les isohyètes 100 et 200 mm.

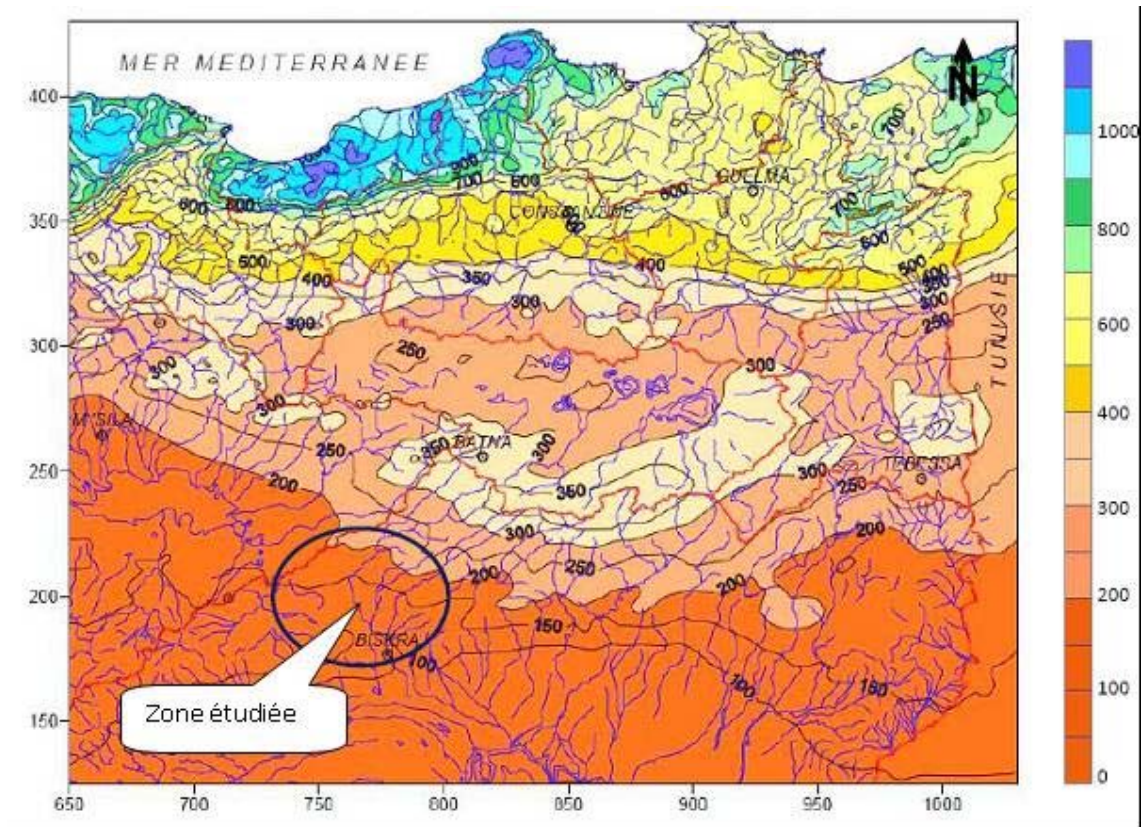


Figure N°10: Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord. Période 1965-95. (ANRH-GTZ, 2003)

3.2. Variation interannuelle de la pluviométrie:

- **Période commune:** L'observation des courbes de la variation interannuelle des précipitations des deux stations (Biskra/Outaya) (figure 11) sur une période commune (1970-1989) montre presque la même évolution avec une valeur moyenne de Biskra avoisinant 113.64 mm et celle d'El-Outaya de l'ordre de 107.14 mm.

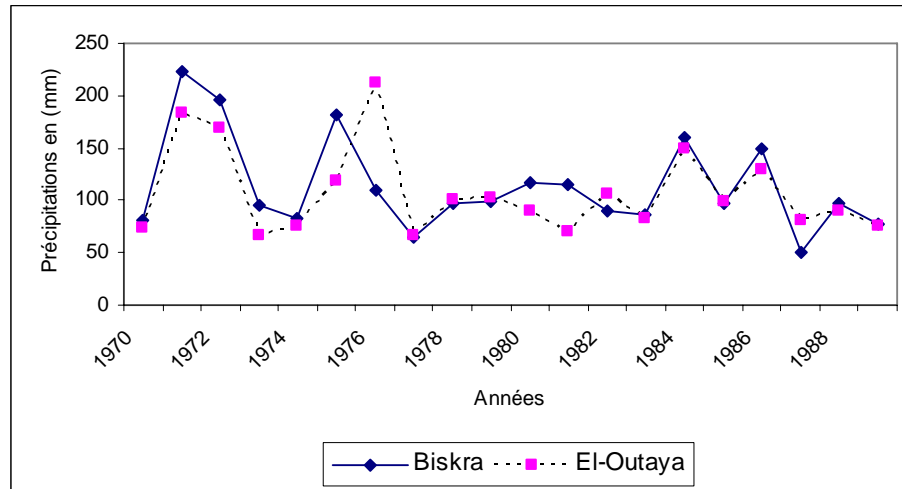


Figure N°11: Variation interannuelle des précipitations. Stations Biskra/Outaya (1970-1989)

- **Station de Biskra:** Avec une série d'observation relativement longue (1970-2008) la courbe de variation de la pluviométrie interannuelle montre une irrégularité assez marquée (figure12); ceci témoigne du caractère aride de la région. La moyenne enregistrée égale à 129.04 mm. Les années déficitaires par rapport à la moyenne sont nettement supérieures par rapport à celles excédentaires.

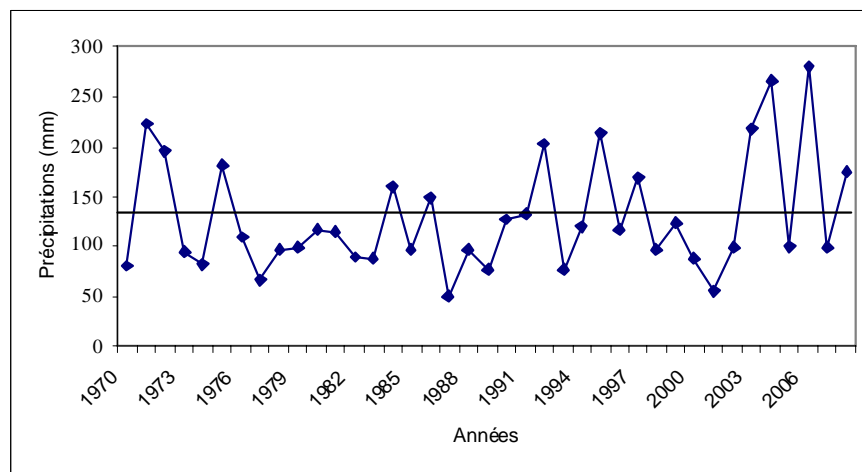


Figure N° 12: Variation interannuelle des précipitations, Station de Biskra (1970-2008)

- Un aperçu sur une série ancienne (1913-1938) enregistrée par P.Seltzer (climat de l'Algérie) a montré une pluviométrie annuelle de l'ordre de 156 mm. Ce Qui donne une diminution dans la série récente par rapport à l'ancienne de 17%. Les résultats de la pluviométrie interannuelle sont reportés au tableau N°4

Tableau 4: Précipitations moyennes interannuelles (Outaya/Biskra).

Station	1970 – 1989 (mm)	1970 – 2008(mm)
El-Outaya	107.14	-----
Biskra	113.64	129.04

Variation des moyennes mensuelles des précipitations :

Pour la variation moyenne mensuelle à la station de Biskra, on a exploité une série s'étalant sur une période de 32 ans (1976-2008) et une autre plus ancienne d'une durée de 26 ans (1913-1938) (tableau N° 5). Les graphes tracés de ces séries (figure 13) montre en général la même répartition de la pluviométrie sur les mois de l'année pour les deux périodes présentées. L'ensemble de la pluviométrie enregistrée présente une variation dans un intervalle d'environ 20 mm. Le mois le plus arrosé est décembre avec une valeur de 21 mm pour la série récente et novembre avec 22 mm, pour la plus ancienne. Alors que le plus sec reste juillet pour les deux séries donnant seulement 1 mm pour la plus récente et 2 mm pour la plus ancienne.

Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles Station de Biskra (1913-1938 / 1976-2008)

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
1913-1938	17	15	22	18	17	10	19	10	15	8	2	3
1970-2008	17,9	12,2	18,5	21,1	18,2	10,9	11,7	14,6	10,4	3,4	1,0	4,4

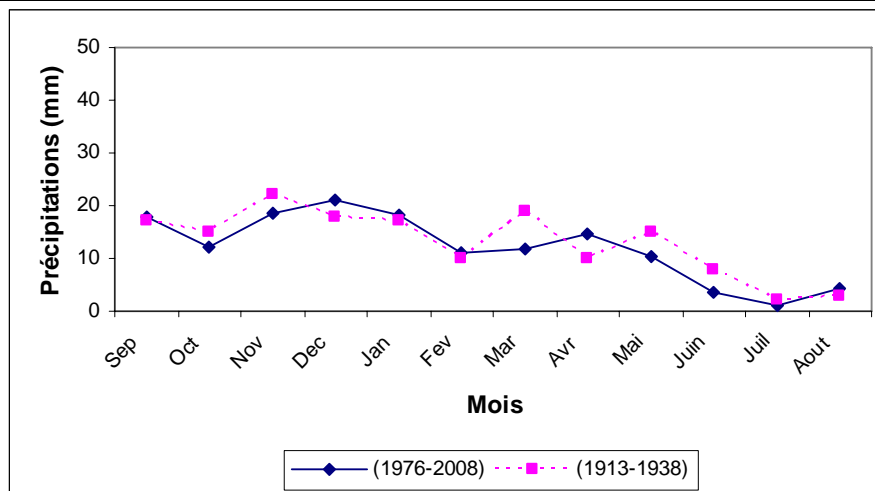


Figure N° 13: Variation des moyennes mensuelles des précipitations:
Station de Biskra (1913-1938 / 1976-2008)

3.3. Précipitations saisonnières :

Les résultats des précipitations saisonnières pour la station de Biskra pour les deux séries sont reportés au tableau N° 6

Tableau N° 6: Précipitations moyennes saisonnières.

Station	Période	Moyenne	A	H	P	E	Année	Indice saisonnier
Biskra	1913-1938	Moyenne saisonnière en mm	54	45	44	13	156	A.H.P.E
	 en %	34.61	28.84	28.2	8.33		
Biskra	1976-2008	Moyenne saisonnière en mm	48,6	50,2	36,7	8,8	144,3	H.A.P.E
	 en %	33,68	34,78	25,43	6,09		

On constate d'après les figures N°14, 15 et 16 pour la station de Biskra un changement du régime pluviométrique, en effet on passe d'un type A.H.P.E pour la période d'observation 1913-1938 à un régime de type H.A.P.E pour la période 1976-2008. L'automne dans la série ancienne est plus arrosé que l'hiver, contrairement à la série récente. Ceci peut s'expliquer par les orages très présents en fin d'été ainsi que l'irrégularité du régime pluviométrique en zones arides. On remarque par ailleurs, que pour la série ancienne les moyennes saisonnières enregistrées en hivers et en printemps sont presque identiques.

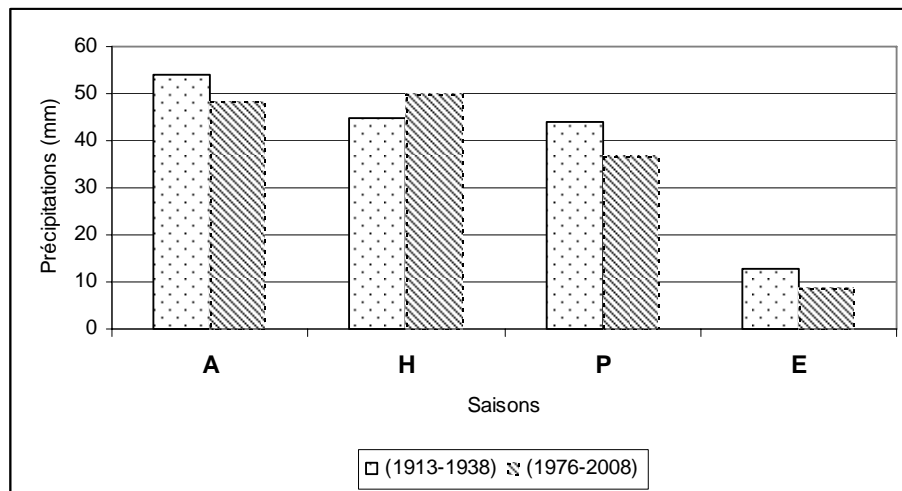


Figure N° 14: Variation saisonnière des précipitations.

(Station de Biskra)

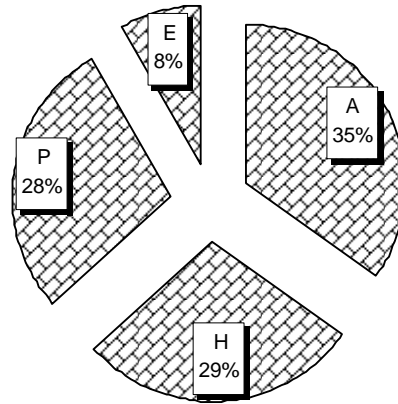


Figure N° 15: Précipitations saisonnière en % (Biskra 1913-1938)

Indice A.H.P.E

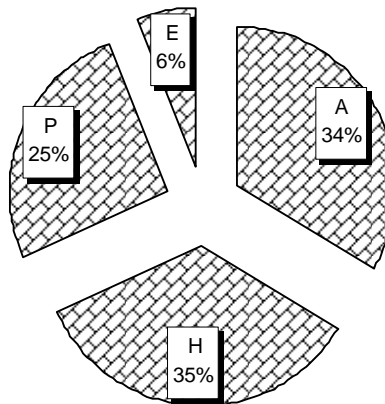


Figure N° 16: Précipitations saisonnière en % (Biskra 1976-2008)

Indice H.A.P.E

3.4. Précipitations journalière :

On utilise les données disponibles relatives à la période (1913-1938) pour la station de Biskra. Le tableau N° 7 comporte le nombre moyen de jours de pluies par mois.

Tableau N° 7 : Jours de pluies par mois.

	Jan	fev	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	dec	Année
Biskra	4	3	5	2	3	2	2	3	3	3	4	3	37

On définit :

- Jours de pluies du mois

• Un coef de fréquence = $\frac{\text{Jours de pluies du mois}}{\text{Jours du mois}}$
- Précipitation mensuelle

• Un coef d'intensité = $\frac{\text{Précipitation mensuelle}}{\text{Nbre de jours de pluie}}$

Les résultats des deux coefficients sont reportés au tableau 8:

Tableau N° 8: Coefficient de fréquence et intensité des précipitations à Biskra

	Jan	fev	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	dec
coef de fréquence	0.13	0.11	0.16	0.07	0.1	0.07	0.06	0.1	0.1	0.097	0.13	0.097
coef d'Intensité	4.25	3.33	3.8	5	5	4	1	1	5.67	5	5.5	6

A Biskra les pluies sont plus fréquentes en mois de mars et plus intense en décembre.

3.5. Le quotient pluviométrique :

Il représente le rapport entre les précipitations pendant les deux saisons les plus humides et celles pendant les plus sèches :

Les résultats sont reportés au tableau 9.

Tableau N° 9 : Quotient pluviométrique.

Station	Quotient pluviométrique (1913-1938)	Quotient pluviométrique (1973-2001)
Biskra	1.74	2,171

Les résultats obtenus montrent un écart considérable dans la valeur du quotient pluviométrique entre les deux séries d'observations. Ceci peut être expliqué par une variation saisonnière importante durant les périodes étudiées.

4. Les températures:

La température est le second facteur après la précipitation qui conditionne le climat d'une région. Elle permet aussi d'estimer le déficit d'écoulement.

On dispose des données de deux séries de la station de Biskra ainsi que celle du barrage de fontaine des gazelles:

- Biskra sur une période de 26 ans (1913-1938)
Et 33 ans (1976-2008)
- Fontaine des gazelles (au nord d'El-Outaya) sur une période de 11 années (2000-2010).

**Tableau N° 10 : Variation de la moyenne mensuelle des températures
station de Biskra (1976-2008)**

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Moy. annuelle
Minimale(mm)	17	12	6	3	3	3	5	8	13	18	22	22	11
Moyenne(mm)	28	22	16	12	12	13	16	20	25	30	33	33	21,17
Maximale(mm)	40	33	26	22	21	24	28	33	38	42	45	44	33
amplitude	23	21	20	19	18	21	23	25	25	24	23	22	22
% amplitude	82	95	125	158	150	162	144	125	100	80	70	67	104

Les données du tableau N° 10 résume les mesures de la température moyenne mensuelle à la station de Biskra (période 1976-2008). L'observation de la figure 17 montre que les mois les plus froids sont janvier et février avec une valeur de 12 C° alors que les mois les plus chauds sont juillet et Aout avec une moyenne observée sur la période d'observation de l'ordre de 21,17 C°.

On constate d'après La figure 18 que les courbes des variations des moyennes mensuelles des températures des deux séries d'observations de la station de Biskra ainsi que celle de fontaine des gazelles présentent la même évolution et se superposent dans presque leurs totalité. On ne note pas de variation dans le temps pour la station de Biskra et dans l'espace entre Biskra et Fontaine des gazelles, par contre, l'amplitude entre les minimas et maximas observés à Biskra (1976-2008) représentée dans la figure 19 est très considérable et dépasse parfois la valeur de la moyenne du mois considéré.

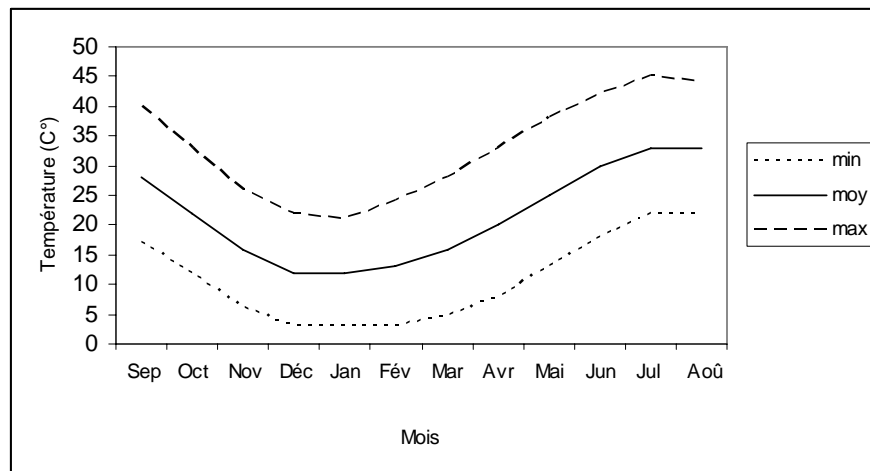


Figure N° 17: Températures moyennes mensuelles (C°) Station de Biskra (1976-2008)

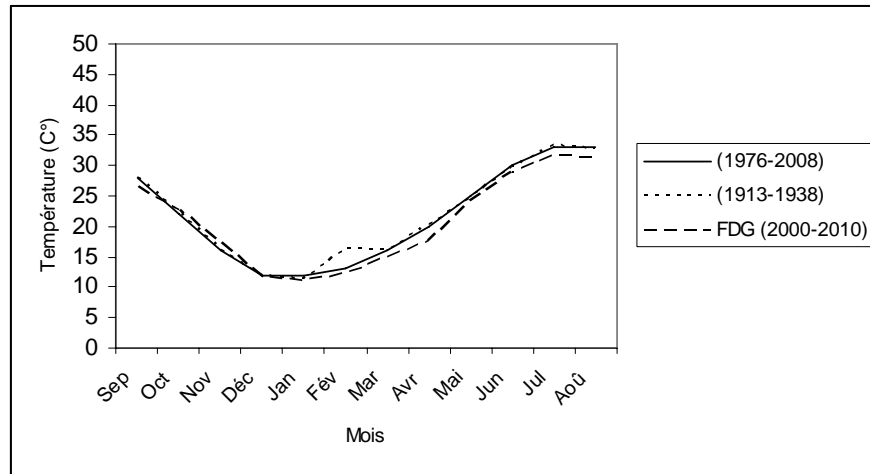


Figure N° 18: Températures moyennes mensuelles (C°) Station de Biskra (1913-1938 / 1976-2008) et FDG (2000-2010)

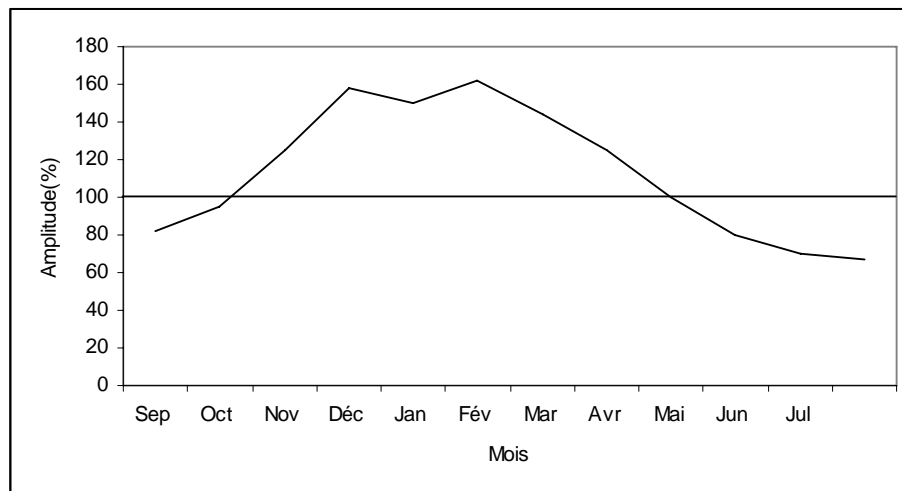


Figure N° 19: Amplitude entre max et min des Températures moyennes mensuelles (C°) Station de Biskra (1976-2008)

5. Les vents :

Les vents dominants à Biskra sont orientés comme suit :

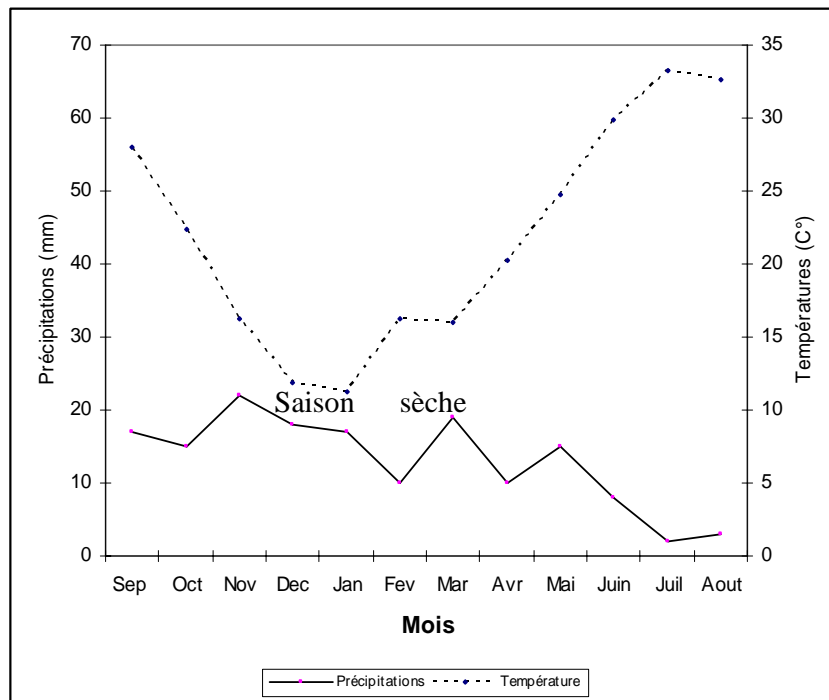
- A 7 :00H - direction sud-est durant les mois chauds du Juin à Septembre.
 - direction Nord-Ouest durant l'automne, l'hiver et le début du printemps.
- A 13 :00H- direction -Sud-Est durant fin printemps et été.
 - direction Nord-Ouest automne, hiver et début printemps.
- A 18 :00H- direction Sud-Est durant la saison chaude.
 - direction Nord-Ouest en automne, hiver et début du printemps.

Le sirocco est fréquent surtout de Mai à Septembre.

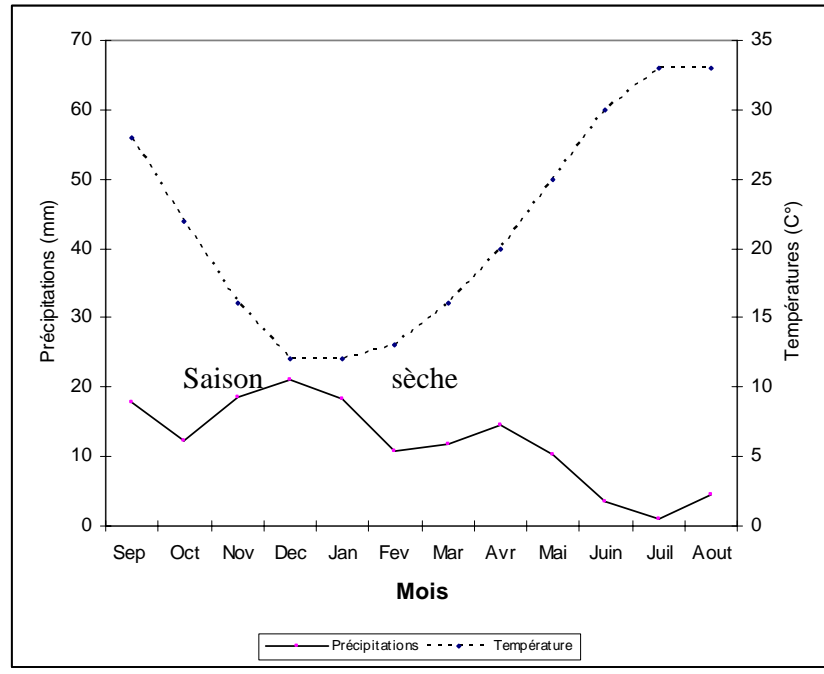
6. Régime climatique :

6.1. Courbes Ombrothèrmiques:

L'observation des figures N° 20 et 21 relatives aux courbes ombrothèrmiques montrent que pour les deux périodes considérées, le climat de la région étudiée est caractérisé par une seule saison sèche s'étalant sur toute l'année. C'est d'ailleurs un des paramètres marquant le climat des zones arides en plus de la forte évaporation et l'irrégularité dans le régime pluviométrique.



**Figure N° 20: Courbe Ombrothèrmique
Station de Biskra (1913-1938)**



**Figure N° 21: Courbe Ombrothermique
Station de Biskra (1976-2008)**

6.2. Indice d'aridité:

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents *indices d'aridité* conventionnels et empiriques, la plupart est un simple rapport hydro-thermique fondé principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de température, qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial. Ils ont été proposés par des climatologues, des morphologues, des géographes, des botanistes. Les plus connus sont ceux de E. de Martonne (1926), L. Emberger (1932), C.W. Thornthwaite (1948), J. Dubief (1950), R. Capot-Rey (1951), H. Gaussen, F. Bagnouls (1952) et P. Birot (1953).

Suivant l'ampleur du déficit hydrique déterminant, plusieurs degrés d'aridité peuvent être différenciés, se définir par des classes d'indices d'aridité convenues et recevoir des qualifications particulières applicables à des zonalités climatiques. Il est devenu classique de distinguer *trois degrés dans l'aridité*.

- Hyper-aride
- Aride
- Semi-aride

6.2.1. Indice d'aridité de E. de Martonne :

Il est défini par la relation :

$$A = P / (T + 10) \quad \left| \begin{array}{l} P : \text{Précipitations annuelles moyennes (mm)} \\ T : \text{Températures annuelles moyennes (C}^\circ \text{)} \end{array} \right.$$

- Pour $20 < A < 30$: Climat tempéré.
 $10 < A < 20$: Climat semi-aride.
 $7.5 < A < 10$: Climat steppique.
 $05 < A < 7.5$: Climat désertique.
 $A < 5$: Climat hyperaride.

Pour la station de Biskra durant la période (1913-1938). L'application numérique donne une valeur de $A=4,89$ et pour la période (1970-2008) une valeur de $4,07$ ce qui correspond pour les deux périodes à un climat hyperaride. (Figure 22).

Un indice d'aridité peut être calculé par mois :

Il est défini par :

$$a = 12p / (t + 10) \quad \left| \begin{array}{l} p : \text{précipitations mensuelles moyennes (mm)} \\ t : \text{températures mensuelles moyennes (C}^\circ \text{)} \end{array} \right.$$

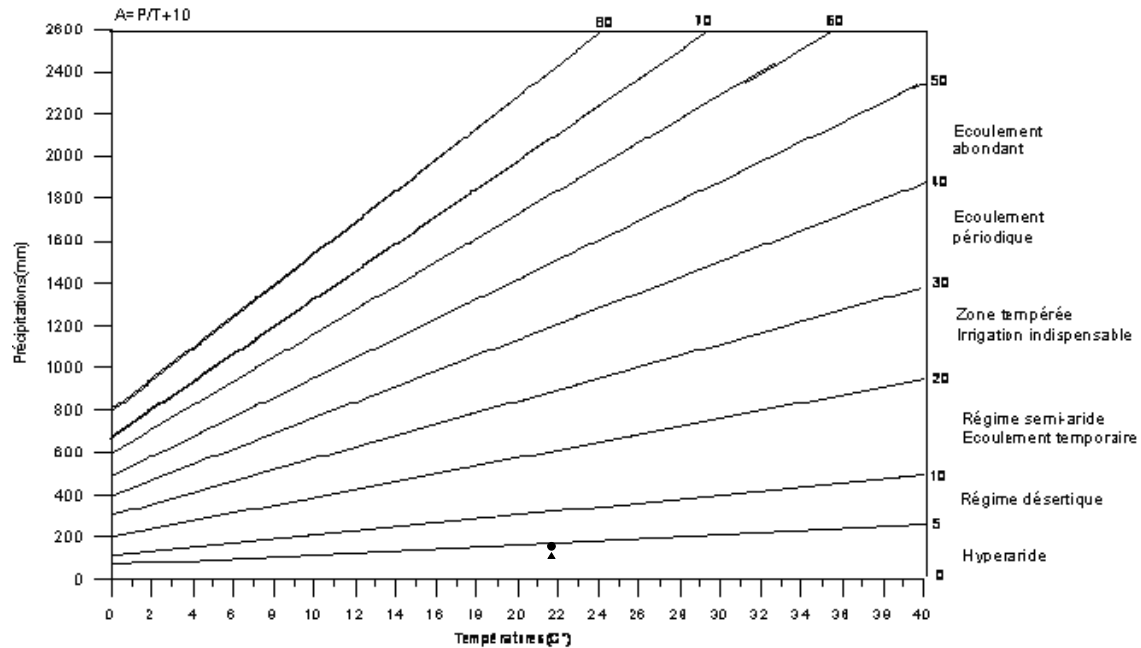
Les valeurs de l'indice d'aridité mensuel sont reportées au tableau N° 11

Tableau N° 11 : Indice mensuel d'aridité

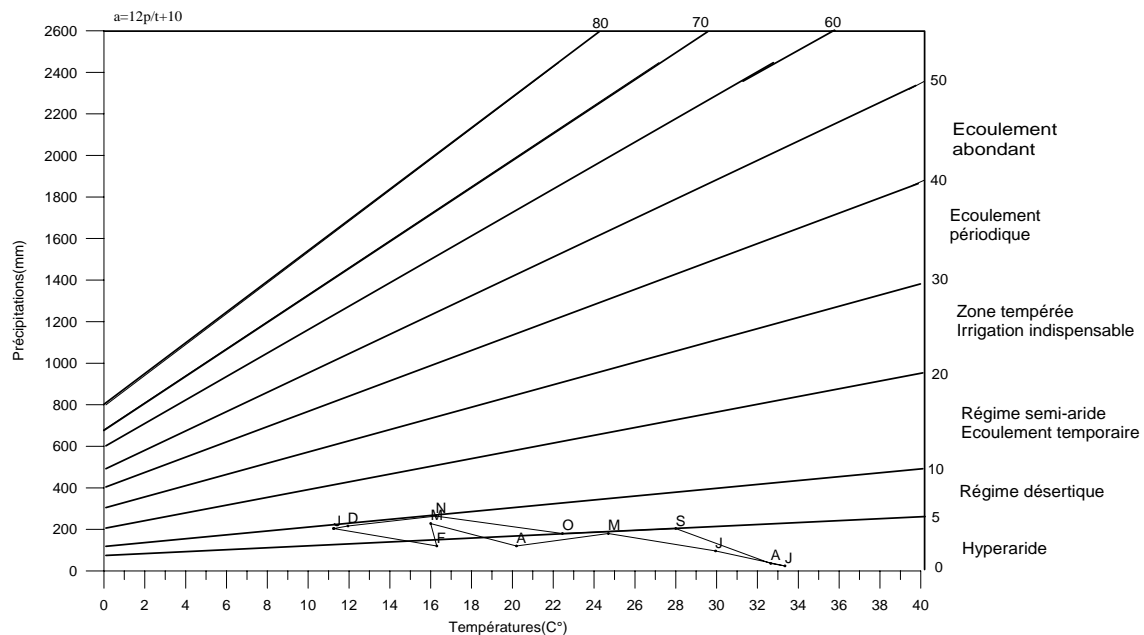
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
1913-1938	5,37	5,56	10,08	9,86	9,60	4,56	8,77	3,97	5,19	2,41	0,55	0,85
1976-2008	5,65	4,58	8,54	11,51	9,93	5,69	5,40	5,84	3,57	1,02	0,28	1,23

La figure N°23 pour la période d'observation (1913-1938), montre que les mois de février, avril, juin, juillet et Aout présentent les caractéristiques d'un climat hyperaride. Les mois de septembre, octobre et mai les caractéristiques d'un climat désertique. Le reste soit les mois de novembre, décembre et janvier les caractéristiques steppiques.

Concernant la série récente, Les mois d'octobre, mai, juin, juillet et aout présentent les caractéristiques d'un climat hyperaride. Les mois de septembre, février, mars et avril un climat désertique. Alors que Novembre et janvier un climat steppique. Seule le mois de décembre se trouve à la limite entre le climat steppique et celui du semi-aride.



**Figure N° 22: Indice annuel d'aridité de De.Martonne.
Station de Biskra (1913-1938) et (1970-2008)**



**Figure N° 23: Indice mensuel d'aridité de De.Martonne
Station de Biskra (1913-1938).**

6.2.2. Climatogramme de Peguy :

Sur un graphique on porte en abscisses les températures mensuelles et en ordonnées les précipitations d'une station donnée. On réunit alors par une ligne brisée les 12 points déterminés pour chaque mois. Sur la grille du climatogramme on porte divers lignes divisant le plan de la figure en secteurs ; pour chacun de ceux-ci le couple précipitations-température permet de reconnaître pour le mois considéré un caractère déterminé. La classification selon les caractères requis est simplifiée et comporte trois secteurs:

- Le secteur "F" correspond aux mois froids et tempérés;
- Le secteur "O" les mois tempérés;
- Alors que le secteur "A" les mois arides.

On constate que pour les deux périodes d'observations, cette méthode graphique nous donne un caractère aride pour tous les mois de l'année. Les mois se placent dans le secteur "A". La Figure N° 24 montre un exemple de la période d'observation (1976-2008)

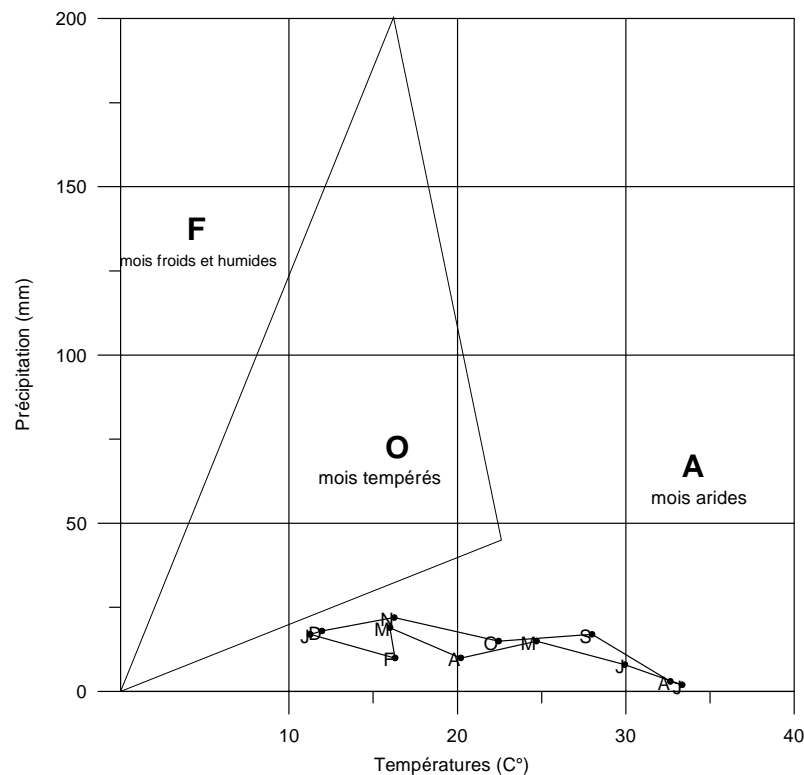


Figure N° 24: Climatogramme de peguy (Biskra).

Station de Biskra (1976-2008)

6.2.3. La classification bioclimatique d'Emberger:

L'indice climatique d'Emberger, est défini par la formule:

$$Q = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

Avec :

- Q: quotient pluviométrique d'Emberger
- M: la moyenne des températures du mois le plus chaud en °K
- m: la moyenne des températures du mois le plus frais en °K.
- P: pluviométrie annuelle en mm.

Le diagramme correspondant délimite cinq différents types de climats méditerranéens, depuis le plus aride au plus humide.

La formule est parfois adaptée sous la forme suivante (formule de Stewart) :

$$Q_3 = 3.43 * P / (M - m)$$

L'abaque de L. Emberger (modifié par Stewart), comporte en ordonnées les valeurs de Q_3 de Stewart, et en abscisses la température moyenne des minimas de la saison froide en °C.

L'application à la station de Biskra (1970-2008) donne une valeur de **10,53** et la moyenne des minimas de la saison froide est égale à **3,6°C** ; le point correspondant placé sur l'abaque (figure.25) montre que la zone étudiée appartient à l'étage bioclimatique saharien.

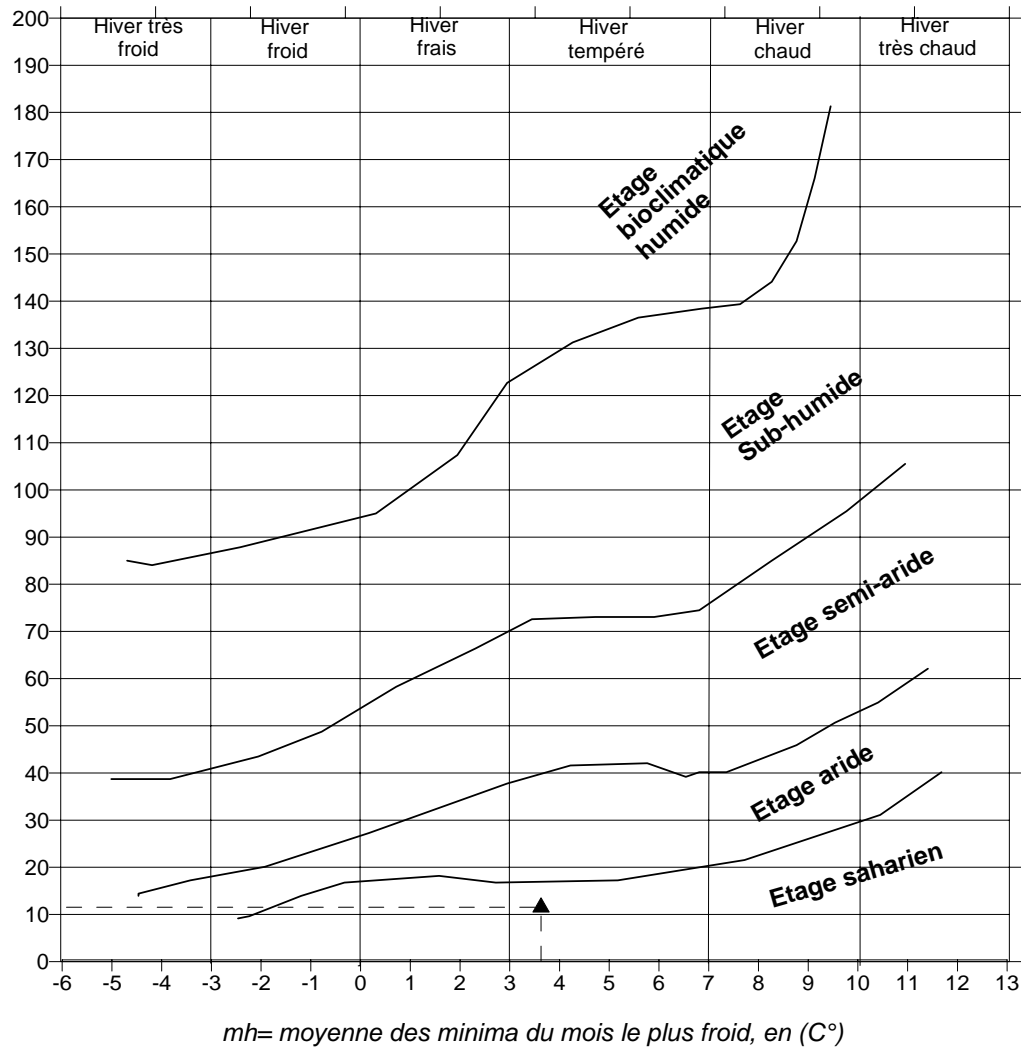


Figure N° 25: Classification d'Emberger
Station de Biskra (1976-2008)

7. L'évapotranspiration :

7.1. L'évapotranspiration potentielle :

7.1.1. Définition :

L'ETP est un facteur déterminant dans l'évaluation du bilan hydrique d'une région. C'est un phénomène important du cycle hydrologique. Elle résulte de deux phénomènes, l'un physique; l'évaporation et l'autre biologique; la transpiration. Elle est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation, vitesse de turbulence du vent, pression atmosphérique, du couvert végétal et du sol). Pour l'estimation de ce paramètre, on utilise les formules de Thornthwaite et de Serra.

7.1.2. Formule de Thornthwaite :

$$E.T.P(mm) = 16 (10 T/I)^a$$

T : température moyenne mensuelle

$$I = \sum i \text{ avec } i = (T/5)$$

$$I = \sum i \text{ avec } i = (T/5)$$

$$a = 0.492 + 1.79 \cdot 10^{-2} I - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6.75 \cdot 10^{-7} I^3$$

7.1.3. Formule de Serra :

$$E.T.P(mm) = 16 (10 T/I)^a$$

T : température moyenne mensuelle

$$I = \sum i \text{ avec } i = (0.09T)$$

$$I = \sum i \text{ avec } i = (0.09T)$$

$$a = 1.6 I/100 + 0.5$$

Les résultats de l'ETP sont reportés au tableau 12.

Tableau N° 12 : Résultats de l'ETP selon Thornthwaite et Serra

E.T.P de Biskra (1976-2008). Thornthwaite													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total et moy
T (C°)	28,00	22,00	16,00	12,00	12,00	13,00	16,00	20,00	25,00	30,00	33,00	33,00	21,67
i	7,30	5,53	3,83	2,75	2,75	3,01	3,83	4,95	6,41	7,91	8,83	8,83	65,91
a	1,53												
ETP(mm)	146,34	101,18	62,16	40,02	40,02	45,24	62,16	87,45	123,04	162,63	188,16	188,16	1246,56
E.T.P: Fontaine des gazelles (2000-2010) Thornthwaite													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total et moy
T (C°)	26,55	22,54	17,29	11,54	10,94	12,21	14,91	17,50	24,02	28,89	31,48	31,38	20,77
i	6,87	5,68	4,19	2,62	2,47	2,80	3,53	4,24	6,12	7,57	8,36	8,33	62,78
a	1,48												
ETP(mm)	125,57	98,58	66,62	36,62	33,87	39,82	53,51	67,79	108,30	142,31	161,62	160,83	1095,44
E.T.P de Biskra (1976-2008). Serra													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total et moy
T (C°)	28,00	22,00	16,00	12,00	12,00	13,00	16,00	20,00	25,00	30,00	33,00	33,00	21,67
i	4,00	2,79	1,73	1,12	1,12	1,27	1,73	2,41	3,38	4,44	5,12	5,12	34,22
a	1,05												
ETP(mm)	134,85	105,60	76,45	57,11	57,11	61,94	76,45	95,87	120,21	144,62	159,30	159,30	1248,80
E.T.P: Fontaine des gazelles (2000-2010). Serra													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total et moy
T (C°)	26,55	22,54	17,29	11,54	10,94	12,21	14,91	17,50	24,02	28,89	31,48	31,38	20,77
i	3,69	2,89	1,94	1,06	0,98	1,15	1,55	1,98	3,18	4,19	4,77	4,75	32,13
a	1,01												
ETP(mm)	136,18	115,36	88,18	58,49	55,45	61,95	75,87	89,23	123,03	148,37	161,90	161,36	1275,36

On constate que pour les deux stations et quelque soit la méthode l'ETP est supérieur aux précipitations. Et donc un déficit agricole qui représente la différence entre ces deux facteurs. Les valeurs de l'E.T.P estimées par la méthode de Thornthwaite sont supérieures à celles calculées par la méthode de Serra.

L'observation des graphiques N°26 et 27 correspondant à l'évolution de l'ETP calculée par différentes méthodes dans les deux stations montre un passage graduel des valeurs minimales observées entre décembre et février vers les valeurs maximales enregistrées en juillet et aout. Ce passage indique par ailleurs, une amplitude considérable entre ces deux extrêmes.

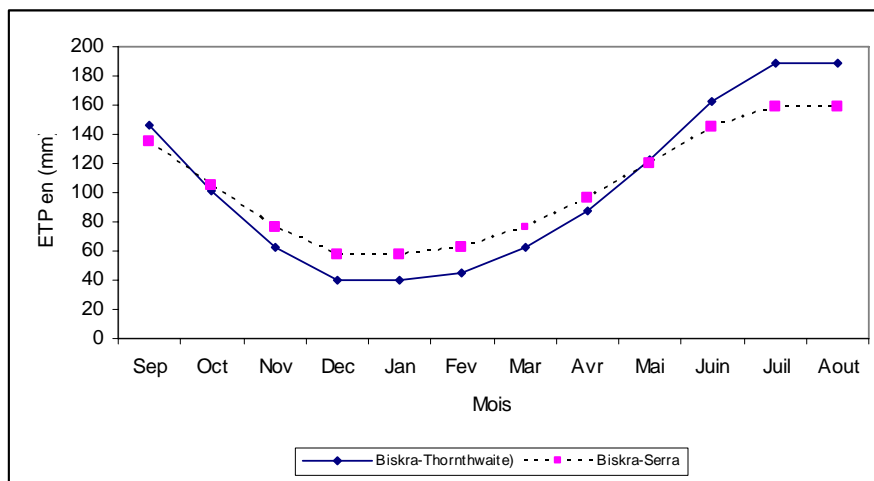


Figure N° 26: Evolution de l'ETP à la station de Biskra
Selon *Thornthwaite* et *Serra*

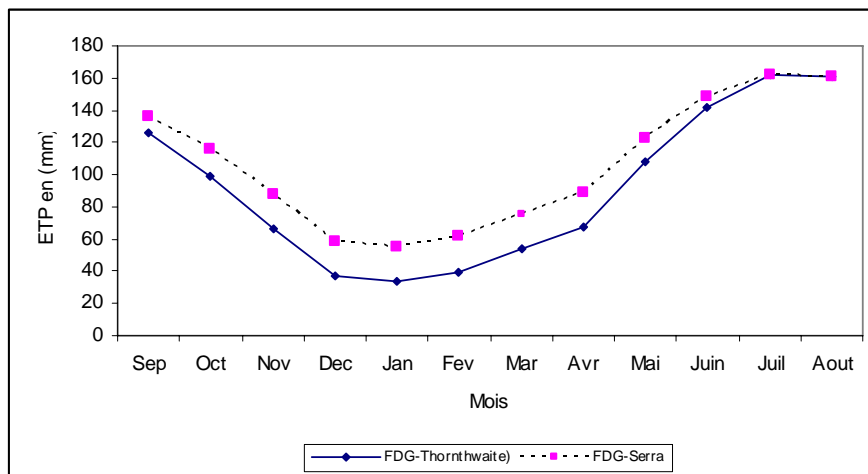


Figure N° 27: Evolution de l'ETP à la station de Fontaine des Gazelles
Selon *Thornthwaite* et *Serra*

7.2. Evapotranspiration réelle :

Le calcul de l'ETR peut se faire à partir de plusieurs formules. On utilise la formule de Turc et le bilan hydrique de Thornthwaite.

7.2.1. Formule de Turc :

$$E.T.R \text{ (mm)} = P / \sqrt{0.9 + P^2/L^2}$$

P : pluviométrie moyenne annuelle en(mm).
L=300+25T+0.05 T³ .
T : température moyenne annuelle en C°.

Les résultats des deux stations sont reportés au tableau 13.

7.2.2. Méthode de Thornthwaite :

Pour le calcul de l'ETR par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite, deux cas sont à considérer :

- E.T.R = E.T.P Si les précipitations sont supérieures à l'E.T.P.
- E.T.R = Précipitations Si les précipitations sont inférieures à l'E.T.P.

On prend la réserve facilement utilisable égale à 11 mm pour la station de Biskra. Nous pensons que si un max de 100 mm est adopté pour la RFU comme proposé par Thornthwaite, toutes les zones arides et bon nombre de zones semi-aride seraient sans RFU. Or ce n'est pas toujours vrai. Les résultats sont reportés au tableau 13.

Tableau N° 13: Résultats de l'ETR

On constate que :

L'E.T.R calculé par la méthode de Turc dépasse de peu les précipitations. L'E.T.R estimé par la méthode de Thornthwaite représente la totalité des précipitations pour la station de Biskra durant la période (1976-2008).

Concernant le déficit d'écoulement, il s'étale sur toute l'année avec une valeur de l'ordre de 1102,26 mm ce qui représente 763,87 % des précipitations. On ne constate pas de reconstitution de la réserve utile. (Figure 28)

	Biskra
T° C	21,7
Précipitations (mm)	144,30
E.T.R(mm) Turc	151,15
E.T.R=% des précipitations	104.75%
E.T.R(mm) Thornthwaite	144.30
E.T.R=% des précipitations	100%

8. Le ruissellement :

Il ne s'agit pas ici de l'estimation du ruissellement issu des sources (drainage de la nappe phréatique) qui peuvent exister, mais seulement du ruissellement temporaire provenant de l'excédent du le bilan hydrique.

La mesure de l'apport liquide de l'oued El-Hai qui draine la plaine d'El-Outaya est confrontée à l'absence de stations hydrométriques. La seule station contrôlant l'oued en question se trouve au Nord et à l'amont de la plaine, à El Kantara, avec une aire de réception de 1170 km².

Les débits moyens mensuels et annuels ainsi que les apports de l'oued El Hai durant la période 1986 - 1992 indiquent un apport moyen annuel de l'oued El Hai de 9.4 hm³ ; donnant en conséquence, une lame ruisselée de **8,04mm**. (Haouchine, 2010)

Sachant que le débit enregistré à l'oued El-Hai provient notamment d'une partie des pluies tombant sur le flanc sud ouest des Aurès. Ce débit n'est pas lié donc uniquement aux précipitations dans la région.

8.1. Méthode de Thornthwaite :

Le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite donne une approximation de la valeur du ruissellement. Cette valeur étant égale à la moitié de l'excédent enregistré durant le mois considéré, l'autre moitié s'infiltré.

On constate que pour la station de Biskra et selon cette méthode (tableau 14), on n'a pas de ruissellement.

8.2. Méthode de Tixeront-Berkaloff :

Définit par la relation :

$$R = P^3 / 3.E^2$$

R : ruissellement en m.
P : précipitations annuelles en m.
E : évapotranspiration annuelle en m.

On prend la valeur de l'E.T.P de Thornthwaite.

- **Station de BiskraR= 1,5 mm.** Ce qui représente 1 % des précipitations.

Ces valeurs restent à titre indicatif dans la mesure où la nature du terrain qui n'est pas prise en compte est un facteur important pour l'estimation du ruissellement en plus de l'apport liquide provenant de dehors de la plaine.

On retient donc la lame ruisselée mesurée à partir de la station hydrométrique d'El-Kantara et qui atteint une valeur de 8.04mm soit presque 6% des précipitations.

9. Bilan hydrologique :

En utilisant la relation du bilan : $P = E + R + I$

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

E : ETR moyenne annuelle en mm.

R : ruissellement moyen annuel en mm.

I : infiltration moyenne annuelle en mm.

Tableau N° 14 .Bilan hydrique Biskra

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
T C°	28,0	22,0	16,0	12,0	12,0	13,0	16,0	20,0	25,0	30,0	33,0	33,0	21,67
PP(mm)	17,9	12,2	18,5	21,1	18,2	10,9	11,7	14,6	10,4	3,4	1,0	4,4	144,3
ETP(mm)	146,34	101,18	62,16	40,02	40,02	45,24	62,16	87,45	123,04	162,63	188,16	188,16	1246,56
P-ETP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
RFU(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ETR(mm)	17,9	12,2	18,5	21,1	18,2	10,9	11,7	14,6	10,4	3,4	1,0	4,4	144,3
DE(mm)	128,44	88,98	43,66	18,92	21,82	34,34	50,46	72,85	112,64	159,23	187,16	183,76	1102,26
Ex(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

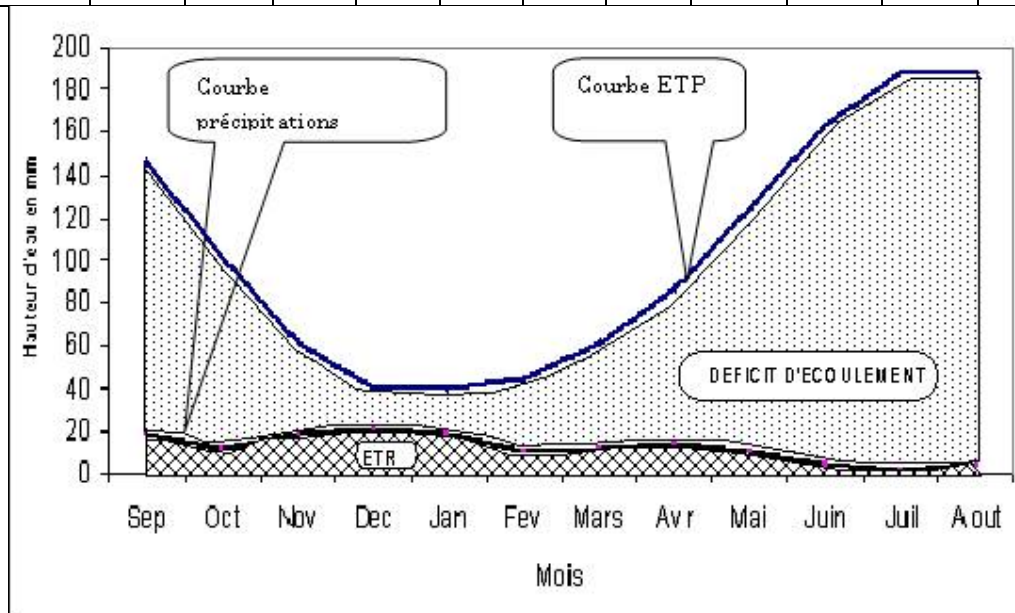


Figure N° 28: Bilan hydrique de la station de Biskra (1976-2008)

On constate que le terme évaporation est largement supérieur aux précipitations ce qui veut dire que le bilan est déficitaire. Ce déficit impose l'irrigation pour l'agriculture.

10. Conclusion :

La plaine d'El-Outaya est caractérisée par un climat hyperaride à steppique avec des tendances sahariennes caractérisée par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année.

L'importance de la pluviométrie est influencée par la position géographique ; elle augmente du sud vers le nord de la région. Elle est caractérisée par une irrégularité et oscille entre 107 mm et 144 mm (selon les périodes et les stations d'observations).

Les mois d'hiver sont les plus arrosés mais la différence entre les saisons est parfois négligeable. Concernant les températures, on constate une stabilité et les variations des moyennes dans le temps ne dépassent pas 2 C°. Elle varie entre 20 et 21 C° mais elle présente une variation entre le max et le min très importante.

Les méthodes estimant l'indice d'aridité (De.Martonne, Peguy et Emberger) s'accordent en donnant un caractère hyperaride à saharien au climat de la région.

L'évapotranspiration potentielle varie entre 1095 mm et 1275 mm par an et consomme la totalité des précipitations donnant un déficit sur toute l'année qui dépasse 1200mm imposant alors l'irrigation des cultures.

Selon les méthodes empiriques (*Thornthwaite, Tixeront-Berkaloff...*), les termes ruissèlements (R) et infiltrations (I) sont nuls et le bilan hydrologique est largement déficitaire. Par contre, les mesures effectuées à la station hydrométrique d'El-Kantara donnent une lame ruisselée moyenne sur 7 ans de l'ordre de 8,04 mm soit 6% des précipitations.

En résumé, tous les facteurs par lesquels se manifeste l'aridité à savoir; les faibles moyennes annuelles de la pluviométrie avec une irrégularité dans l'espace et dans le temps ainsi que les fortes évaporations sont réunis dans le climat de la plaine d'El-Outaya.

IV: HYDROGEOLOGIE

1. Introduction:

L'aquifère Néogène représente la plus importante ressource de la plaine d'El-Outaya utilisée pour l'irrigation. Cet aquifère peut être décrit selon les études géologiques comme un réservoir multicouche à cause de nombreuses passées argileuses ou bien grésifiées. C'est un aquifère complexe par sa composition lithologique hétérogène, et sa structure tectonique. Le problème posé par les exploitants lié à cette ressource est plutôt qualitatif que quantitatif.

Cet aquifère est constitué d'une alternance d'argiles, de sable, de graviers et conglomérats avec des passages gypseux. Il repose sur un substratum formé par les assises imperméables du Miocène marin et de l'Eocène moyen. L'aquifère Néogène est en relation directe avec la nappe d'infléflux de l'Oued Biskra (El-Hai) (Chabour, 2008).

La géométrie de l'aquifère Néogène dans tous les endroits de la plaine reste mal connue et demande davantage de recherche. Les conclusions tirées dans cette partie sont en fait une synthèse des travaux géologiques de Guiraud (1973, 1990), les résultats d'une campagne géophysiques réalisée par la CGG (1974) et les logs de quelques forages réalisés pour le compte de la DHW Biskra ainsi que les travaux de Gousskov (1955). La complexité de l'aquifère Néogène provient essentiellement de l'hétérogénéité du remplissage et de la tectonique bien développée qui peut occasionner la remontée du Trias. La plaine est limitée au nord par un diapir triasique et au sud par la flexure sud-atlasique.

Pour que nous puissions donner une image sur l'aquifère étudié, nous avons exploité les outils ci-cités: (La géologie, la géophysique et les sondages mécaniques).

2. L'outil géologique:

Le remplissage du bassin d'El-Outaya a fait l'objet de plusieurs études géologiques. Celle de Guiraud explique mieux la composition lithologique de l'aquifère Néogène. Nous pensons que le découpage adopté dans cette étude (Miocène 1,2,3,4,5,) reflète le système multicouche qui caractérise cet aquifère. Il est constitué à la base par un Miocène lagunomarin (Bled Zemla, Branis, El Outaya), recouvert par du Messinien (Pontien) gréseux fluviatile, puis par des poudingues pliocènes (Ras Chicha). Les coupes Figure N°9 (*page*

41) décrites dans le chapitre géologie montrent la superposition des formations ainsi que la structure faillée du bassin.

On retient la superposition des formations telles qu'elles étaient décrites par différents auteurs (du haut en bas) comme suit:

- Une couverture quaternaire d'épaisseur variable de 2 à 30 m. Elle est presque absente sur les limites de la plaine. Elle est bien développée au centre de celle-ci et surtout au niveau de l'oued El-Hai;
- Le Pliocène est constitué de conglomérats polygéniques grossiers et rouges (Pliocène supérieur) et de conglomérats à lentilles de grés (Pliocène inférieur). Le terme supérieur du pliocène est bien développé en affleurement au niveau de Ras Chicha à l'Est de la plaine. Le Pliocène représente un niveau aquifère intéressant et de bonne qualité son épaisseur peut atteindre plus de 200 m;
- Miocène supérieur constitué au sommet par des grés bruns rouges et à la base d'argiles rouges gypseuses et grés bruns;
- Miocène moyen constitué d'argiles brunes et de gypses;
- Miocène inférieur constitué au sommet par des d'argiles vertes et brunes, des calcaires et des conglomérats. A la base des argiles brunes gypseuses, des molasses calcaires et des conglomérats à grands blocs.

Par ailleurs, la coupe établie par N.Gousskov (1955). Figure N° 29 met en évidence le prolongement de l'anticlinal de Dj Deba sur la partie Sud de la plaine. Nous pensons que l'écoulement souterrain ne se fait pas de la même manière de part et d'autre de cet anticlinal.

2.1. Contacts du Néogène avec le substratum:

L'aquifère Néogène repose souvent en discordance, selon les endroits et les niveaux atteints par l'érosion post-tectonique, sur des formations d'âges différents (Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur). Ce contact avec le substratum peut se faire suivant les cas par deux ensembles lithologiques possibles :

- soit par des conglomérats d'une épaisseur dépassant les 100 m pouvant permettre un échange important d'eau;
- soit par des argiles.

Au contact avec le diapir, Le Néogène ne vient pas au contact directement, en discordance, sur le Trias (Dj.El Melah) mais sur les roches encaissantes. Figure N° 30.

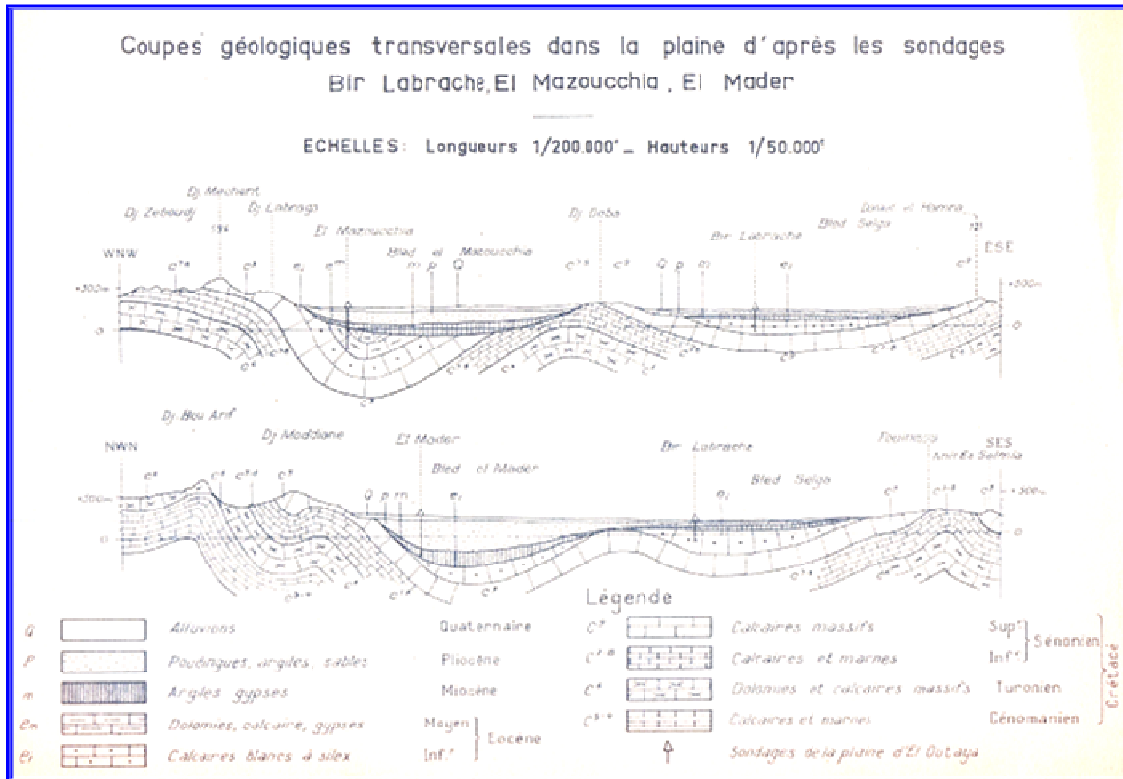


Figure N° 29: Coupe géologique passant par El Mazouchia, El Madher et Bir Labrache (Gousskov, 1955)

Ces contacts sont illustrés dans les descriptions des coupes suivantes relevées sur les bordures nord et sud de la plaine.

2.1.1. Bordure nord de la plaine :

- Coupe de l'Oued bou Guecha : La coupe décrite par Chebbah (2007) dans ses travaux (déjà décrite par Guiraud 1973), levée le long de l'Oued Bou Guecha au SE de Dj. El Melah montre de bas en haut deux ensembles pétrographiques. Figure N° 31 (3 C) :

- 1^{er} ensemble conglomératique;
- 2^{ème} ensemble argilo-carbonaté.

Le contact du Miocène avec le substratum se fait avec l'ensemble conglomératique d'une épaisseur dépassant les 100 m pouvant permettre l'échange d'eau.

○ **Coupe de l'Oued Biskra - El Outaya :**

La coupe a été levée le long de la rive gauche de l'Oued Biskra à environ 2 Km au N.NW du village d'El Outaya. Figure N° 31 (3 D). Les formations néogènes reposent en discordance sur les calcaires sénoniens ou éocènes. Ce contact se fait avec des argiles miocènes d'environ 160 m d'épaisseur.

De bas en haut, quatre ensembles pétrographiques se différencient dans la composition lithologique de l'aquifère Néogène :

- 1^{er} ensemble argilo (marno)-calcaire
- 2^{ème} ensemble grés-conglomératique
- 3^{ème} ensemble : argilo (marno) – grés – calcaires
- 4^{ème} ensemble gréseux.

2.1.2. Bordure sud de la plaine :

- **Coupe de selga :** Elle est située au sud de la zone étudiée. Elle montre de bas en haut deux ensembles pétrographiques. Figure N° 31 (3 E) :

- 1^{er} ensemble conglomératique
- 2^{ème} ensemble argileux

Le contact avec le substratum se fait avec l'ensemble conglomératique (plus de 100 m d'épaisseur)

En conclusion de l'apport de la géologie, on constate que le Néogène de la plaine d'El-Outaya est formé de plusieurs niveaux pouvant contenir de l'eau et constituer des aquifères. Ces niveaux peuvent être décrits comme suit:

- Tout d'abord, nous mentionnons les terrasses le long de l'oued El-Hai (Biskra) qui représentent une nappe en relation directe avec l'oued. Ces dernières sont

constituées de deux niveaux conglomératiques séparées par une faible épaisseur d'argile. Les terrasses atteignent 40 m d'épaisseur.

- Un autre niveau plus important proche de la surface regroupe des formations quaternaires et pliocènes. Ces dernières sont constituées de conglomérats dont l'épaisseur dépasse 200 m. Il est bien développé dans la zone Est (Ras Chicha) et diminue en allant vers le centre. Ses eaux sont de qualité acceptable.
- Les niveaux miocènes constituent le reste du remplissage. Il s'agit dans l'ensemble de faibles niveaux sableux, graveleux ou conglomératique et même parfois gréseux ou calcaires superposés, séparés par des couches d'argiles. Ces niveaux constituent des aquifères et sont exploités par les agriculteurs. Ils sont importants au centre de la plaine sur l'axe El-Outaya selga saadoun passant par la ferme Driss Amor. Les eaux de ces niveaux sont chargées en sels. Les résultats d'une diagraphie réalisés sur le forage Amor Driss au centre de la plaine (figure N° 32) montrent l'intercalation des niveaux perméables et imperméables dans le Miocène confirmant le caractère multicouche de l'aquifère (Le Pliocène étant absent dans cet endroit).

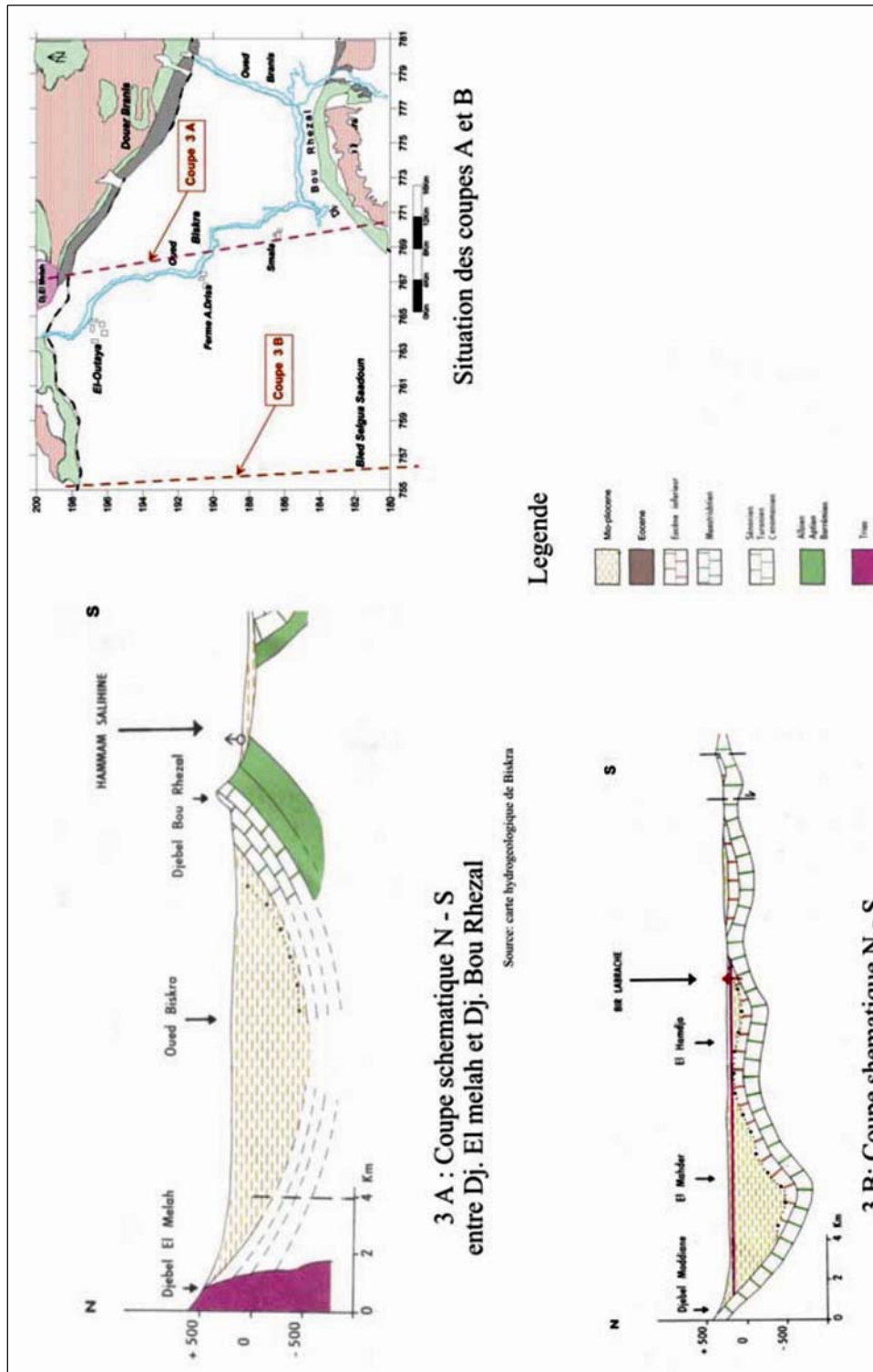


Figure N°30: Contact Néogène- Substratum.

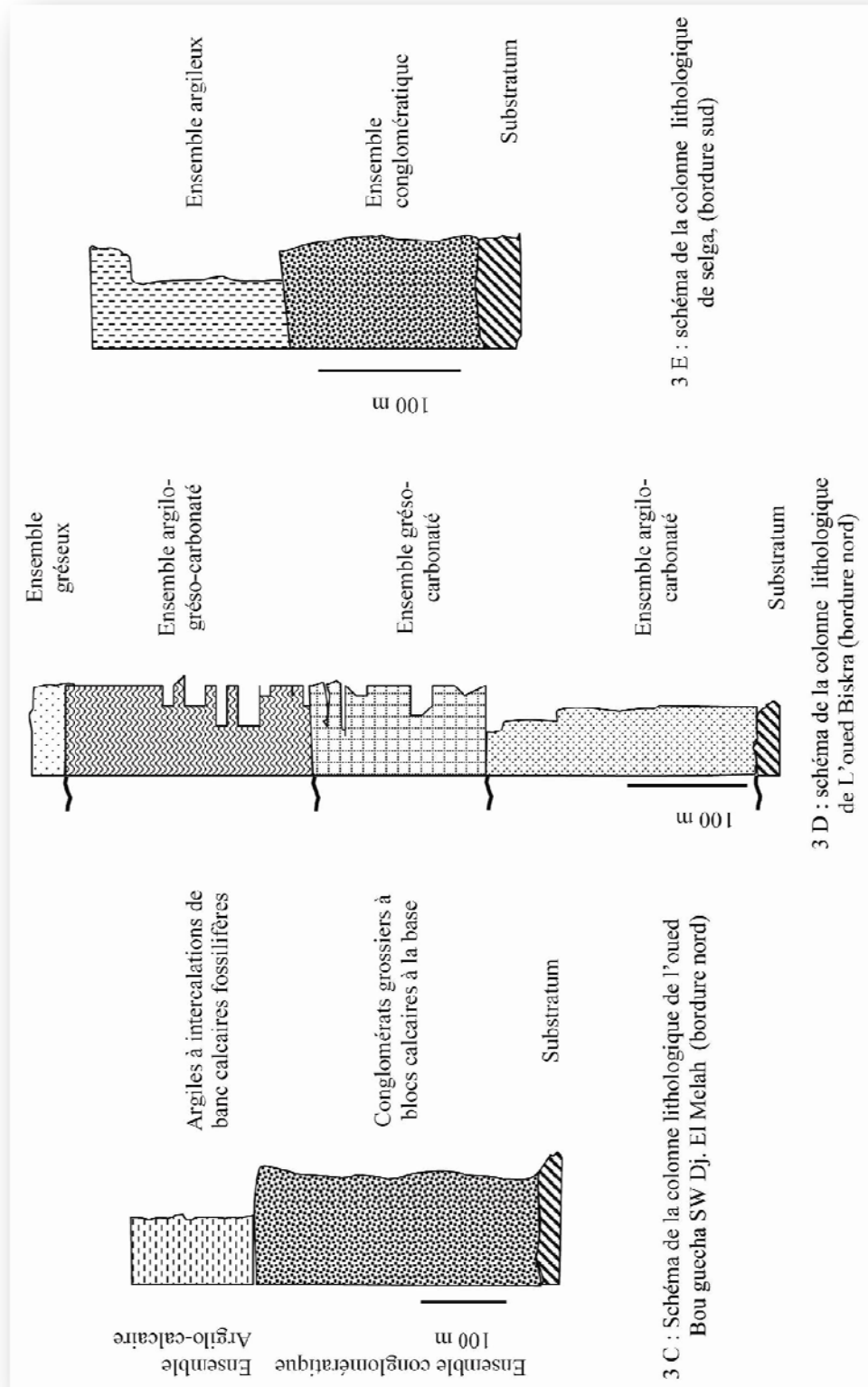


Figure N° 31: Disposition lithologique au niveau des bordures

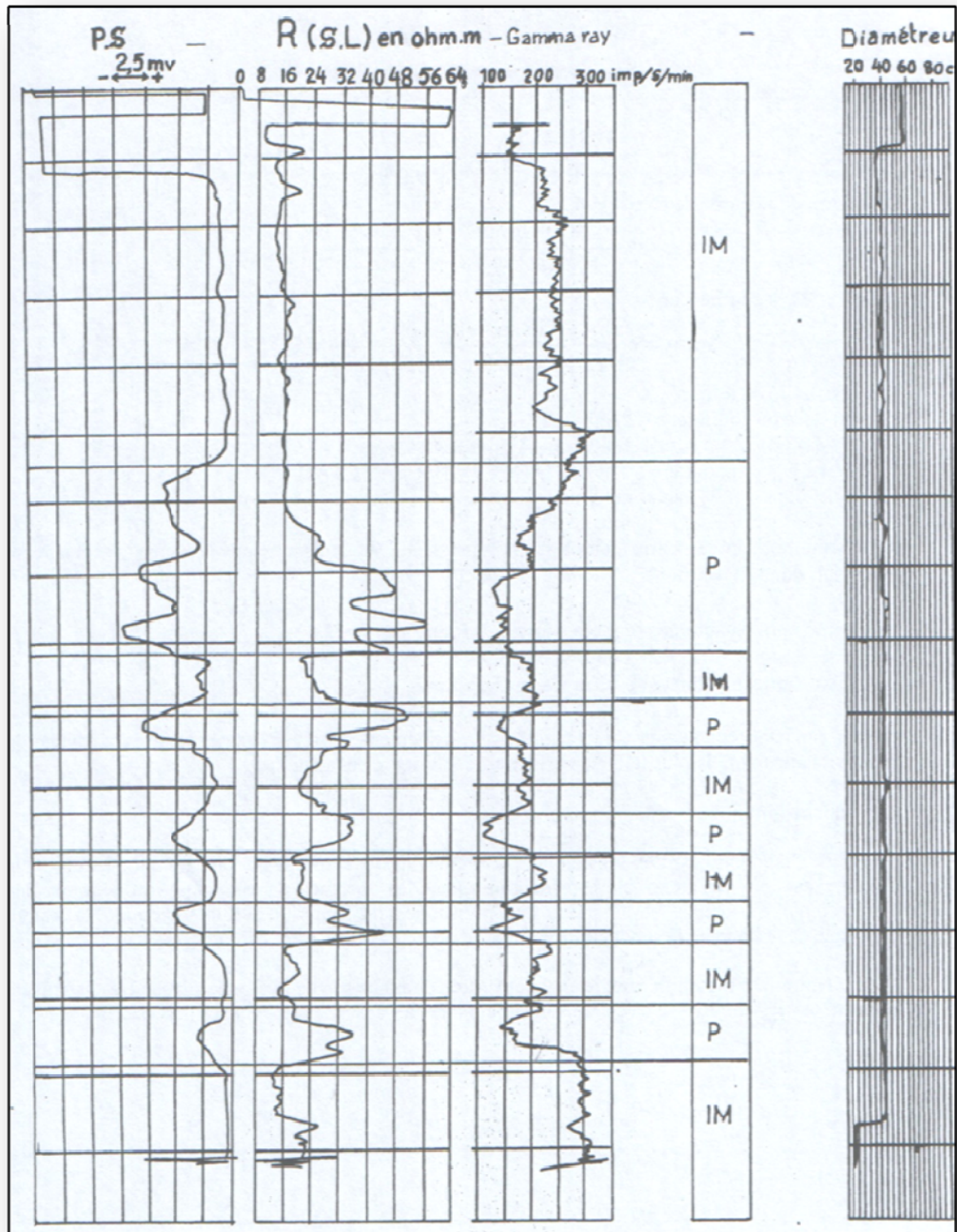


Figure 32: Diagraphie du forage Driss Amor

3. L'outil géophysique:

L'étude géophysique réalisée par la C.G.G sur la plaine d'El-Outaya en 1971, a pour objectifs:

- De suivre le substratum calcaire, principal horizon résistant sous le remplissage Néogène;
- De préciser l'envoyage, vers le nord-est de l'axe de l'anticlinal du djebel Deba;
- De mettre en évidence des horizons résistants dans le remplissage Néogène;
- De suivre les accidents transversaux ou longitudinaux susceptibles de compartimenter les nappes.

Les sondages ont été répartis, grossièrement, suivant des directions Nord-Sud ou NW-SE. L'espacement entre les sondages est d'environ 2 Km.

La carte de résistivité apparente AB=200 m (figure N° 33) nous donne des informations sur le remplissage en sub-surface, sur une profondeur ne dépassant pas 30 à 40 m. Il s'agit surtout des formations quaternaires et par endroit Pliocènes. L'examen de la carte montre des zones à résistivité supérieure à 100 ohms.m à l'Est et à l'Ouest. Les zones à faibles résistivités (inf à 10 ohms.m) se situent au centre et au Sud-Est. Alors que les résistivités entre 10 et 50 se trouvent à l'Ouest et au Nord.

On remarque donc, que les terrains de faibles résistivités se trouvant en sub-surfaces sont en relation avec les terrains salés d'origine évaporitique. Alors que les terrains présentant de valeurs de résistivité assez forte (Sup à 50 ohms.m), ils sont liés aux terrasses de l'oued ou probablement au niveau Pliocène conglomératique.

La carte de résistivité apparente AB=3000 m avec une profondeur d'investigation comprise entre 500 et 700 m concerne le remplissage Néogène et le substratum. Les résistivités présentent des variations liées sans doute à la nature du remplissage, à l'allure du substratum et à la structure tectonique du bassin. L'observation de la carte (figure N° 34) montre qu'une large plage de résistivité supérieure à 100 ohms.m se situe à l'ouest (Bled El-Mazouchia) ce qui peut être expliqué par l'existence de formations calcaires d'âge Eocène à faibles profondeurs à cause du soulèvement du substratum dans ces endroits.

Les plages de faibles résistivités se trouvant sur l'axe El-Outaya – Bir Labrache sont la conséquence du remplissage Néogène formé essentiellement d'argiles.

La carte du toit du substratum (figure N° 35) montre l'importance du remplissage Néogène dans la partie centrale occasionné par la subsidence du bassin lié à la tectogénèse. Alors qu'on remarque que ce remplissage diminue en allant vers les bordures de la plaine.

Globalement, on retient de l'étude géophysique:

- L'importance des conglomérats Pliocènes à l'Est de la plaine. Ils atteignent une épaisseur de 200 m. Ils présentent des résistivités assez élevées. Ce niveau aquifère diminue en épaisseur et en résistivité en allant vers l'Ouest;
- Présence d'un deuxième niveau résistant indéterminé;
- Deux niveaux alluvionnaires productifs sont mis en évidence le long de l'Oued El-Hai d'une dizaine de mètres chacun, séparés par un faible niveau argileux; C'est la nappe alluviale de l'Oued;
- Le prolongement de l'anticlinal du Dj.Deba jusqu'à la partie centrale de la plaine. Cet anticlinal a provoqué le soulèvement des calcaires près de la surface dans la partie Sud-Ouest et l'extrême Ouest;
- L'importance du remplissage au centre de la plaine;
- L'importance des niveaux salées en surface, sur l'axe El-Outaya-Bir labrache-Selga Saadoun;
- Enfin, un substratum résistant décrit par l'étude comme le Miocène marneux, mais nous pensons qu'il s'agit plutôt du Miocène marin ou des calcaires Eocènes.

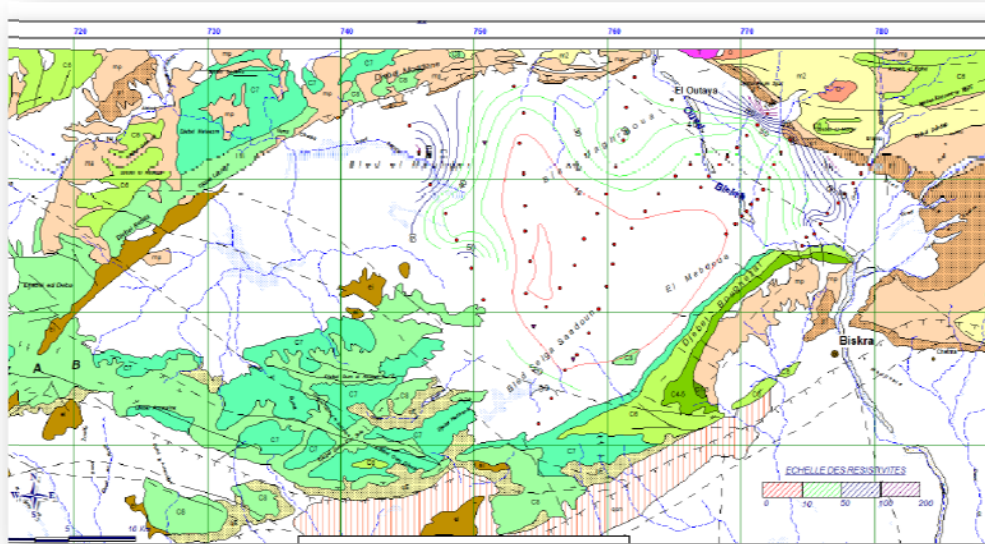


Figure N° 33: Carte des résistivités apparentes en ligne AB =200 m
(CGG, 1971, traitée par Haouchine 2010)

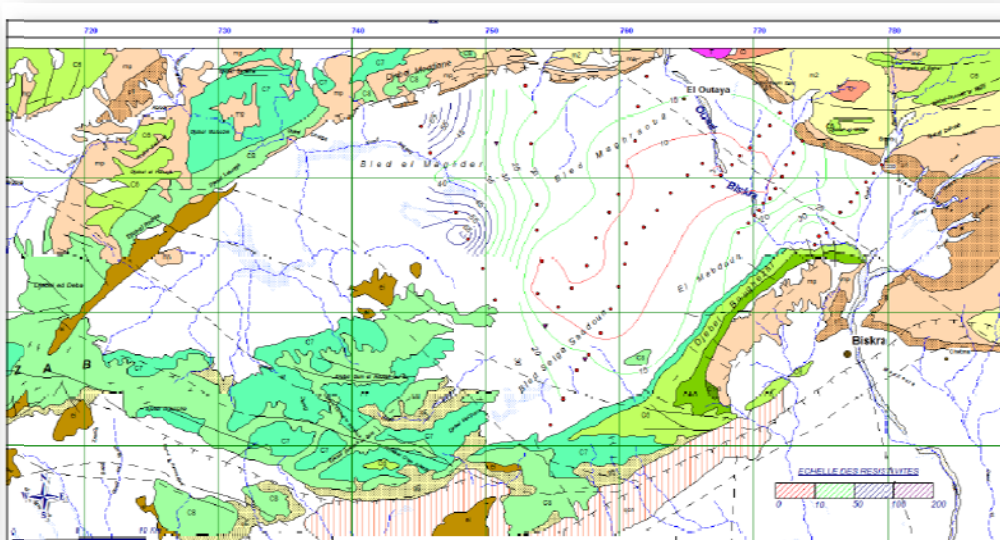


Figure N° 34: Carte des résistivités apparentes en ligne AB =3000 m
(CGG, 1971, traitée par Haouchine 2010)

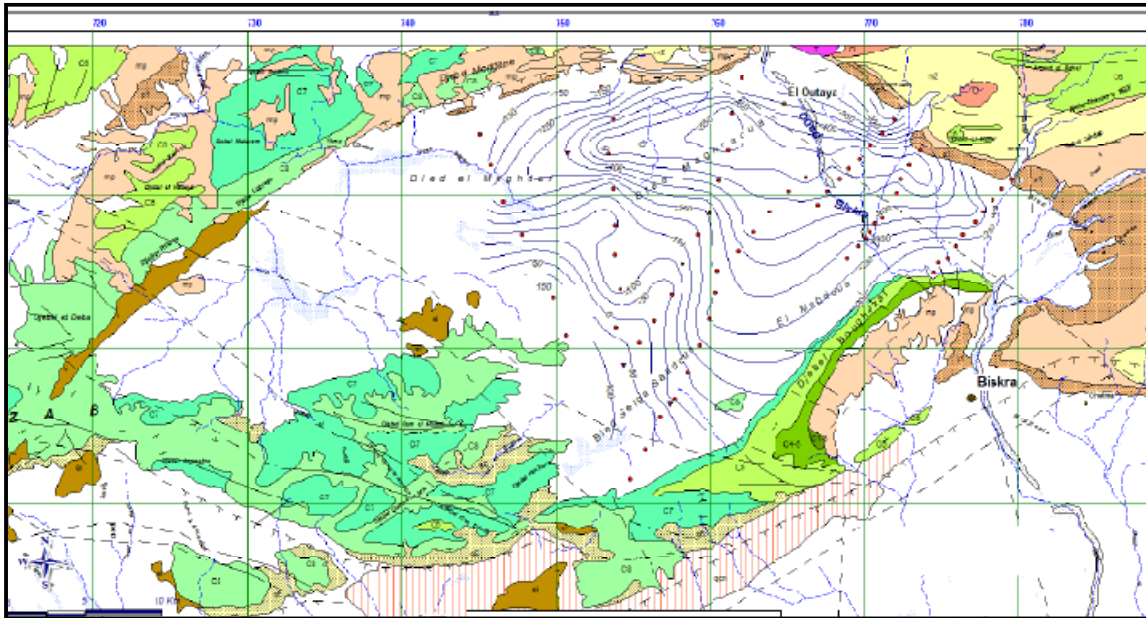


Figure N° 35: Carte du toit du substratum
(CGG, 1971, traitée par Haouchine 2010)

Concernant les caractéristiques hydrauliques : la porosité moyenne de l'aquifère Néogène est estimée à 30 %. La transmissivité est très hétérogène et varie de 4 à 7.10^{-3} m²/s. Le coefficient d'emmagasinement varie de 0.5 à 0.1. (Chabour, 2008)

4. Epaisseur de l'aquifère Néogène:

On dispose de trois éléments pour donner une approche sur l'épaisseur de l'aquifère étudié :

- Apport de la géophysique.
- Apport des sondages mécaniques
- Carte hydrogéologique de la région de Biskra. (DEMRRH, 1980)

La zone étudiée est caractérisée par une structure plissée, il s'agit d'un synclinal. Le sondage S6 (Tableau N° 14) réalisé dans la partie Est de la plaine, à gauche de l'oued Biskra traverse l'aquifère Néogène dans sa totalité et en partie l'éocène moyen (à partir de 416 m soit à la côte -171 m). Il s'agit des marnes brunes. Puis l'éocène inférieur avec des intercalations calcaires et marnes. Ceci nous permet de dire que l'épaisseur de l'aquifère étudié dans cette zone atteint 416 m ce qui concorde avec les résultats

géophysiques (Profil N, figure N° 36) réalisés dans la même région qui a donné une épaisseur de 450 m.

En s'approchant du centre de la plaine cette épaisseur augmente. Elle va jusqu'à 600 m (Profil M, figure N° 37).

Les courbes d'égalités profondeurs du toit de l'éocène inférieur (la carte hydrogéologique 1979) nous donnent dans la même zone du S6 une profondeur entre 400 et 500 m, alors que vers le centre de la plaine elle dépasse 500 m. Malheureusement on ne dispose pas de forages assez profonds au niveau du centre de la plaine pour déterminer avec exactitude l'épaisseur de cet aquifère. Cependant en se basant sur la carte ci-citée, on estime le remplissage au centre de la plaine à 1000 m.

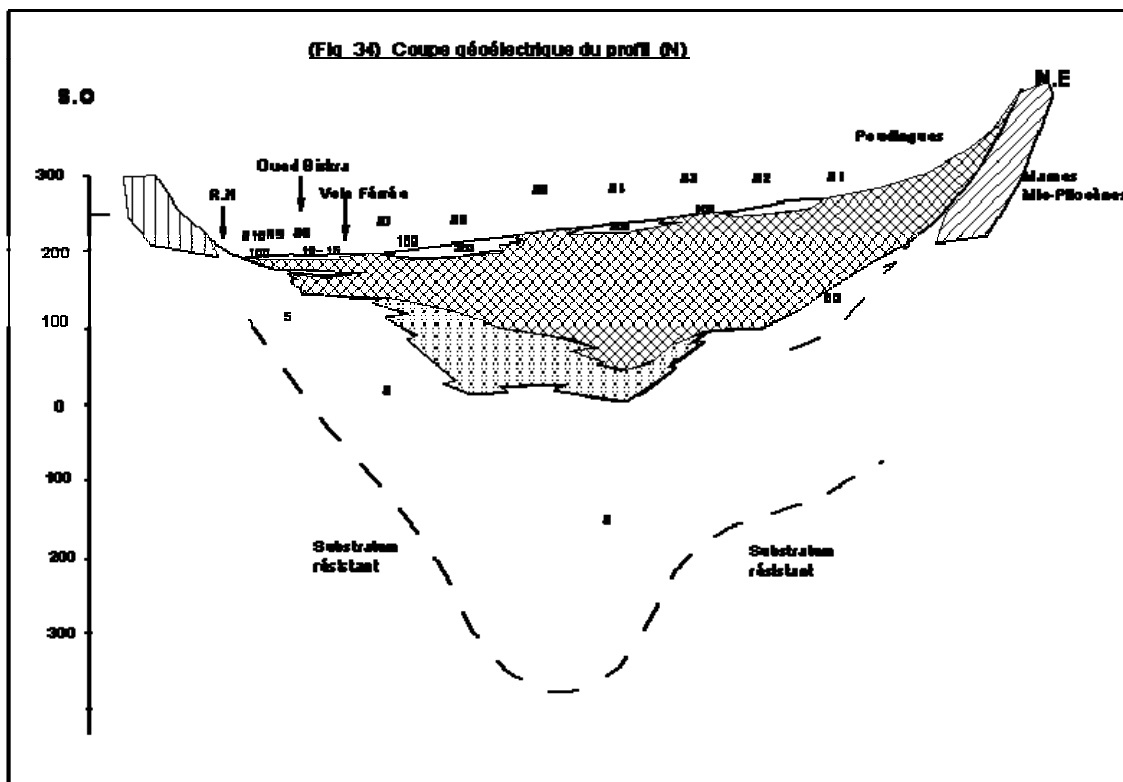


Figure N° 36 : Coupe géoélectrique du profil (N)

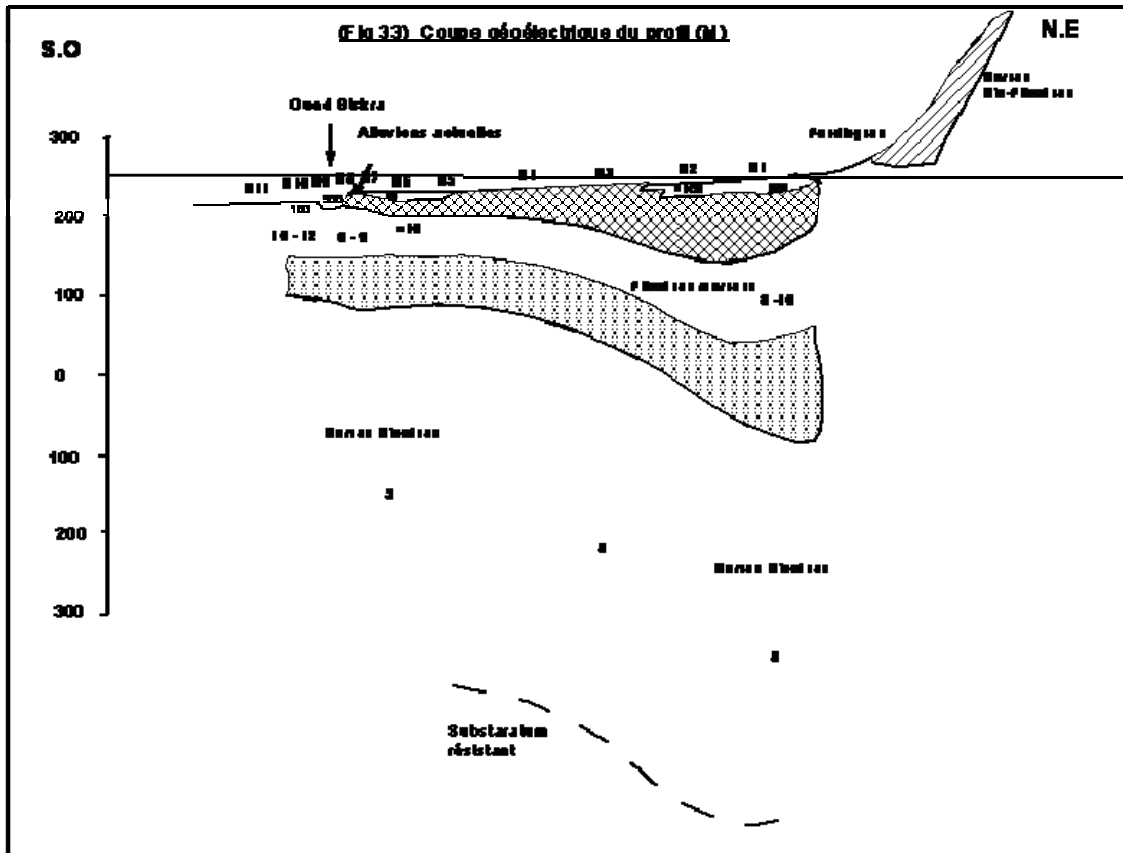


Figure N° 37 : Coupe géoélectrique du profil (M)

5. Piézométrie:

"Dans les zones les plus septentrionales, l'essentiel de l'alimentation provient des massifs des Aurès. Ces zones surélevées alimentent par ruissellement les aquifères qui forment les piémonts. L'écoulement se fait vers le sud pour la région d'El-Outaya" (Chabour, 2008).

Nous avons essayé d'exploiter les résultats d'une campagne piézométrique (ANRH) dont le traçage de la carte a donné (figure N° 38):

On remarque tout d'abord que le rôle des bordures n'est pas clair dans la carte. Mais on note en général deux grandes directions d'écoulement:

- Un écoulement de l'Est vers l'Ouest. Il se fait à partir des conglomérats Pliocènes (Chicha), et Sud-Est (Dj. Boughazel) vers le centre de la plaine.

- Un écoulement Nord-Sud, dans la partie centrale de la plaine.

Ces directions privilégiées des écoulements peuvent être dues en grande partie à la topographie du substratum soulevé sur les bordures et au nord.

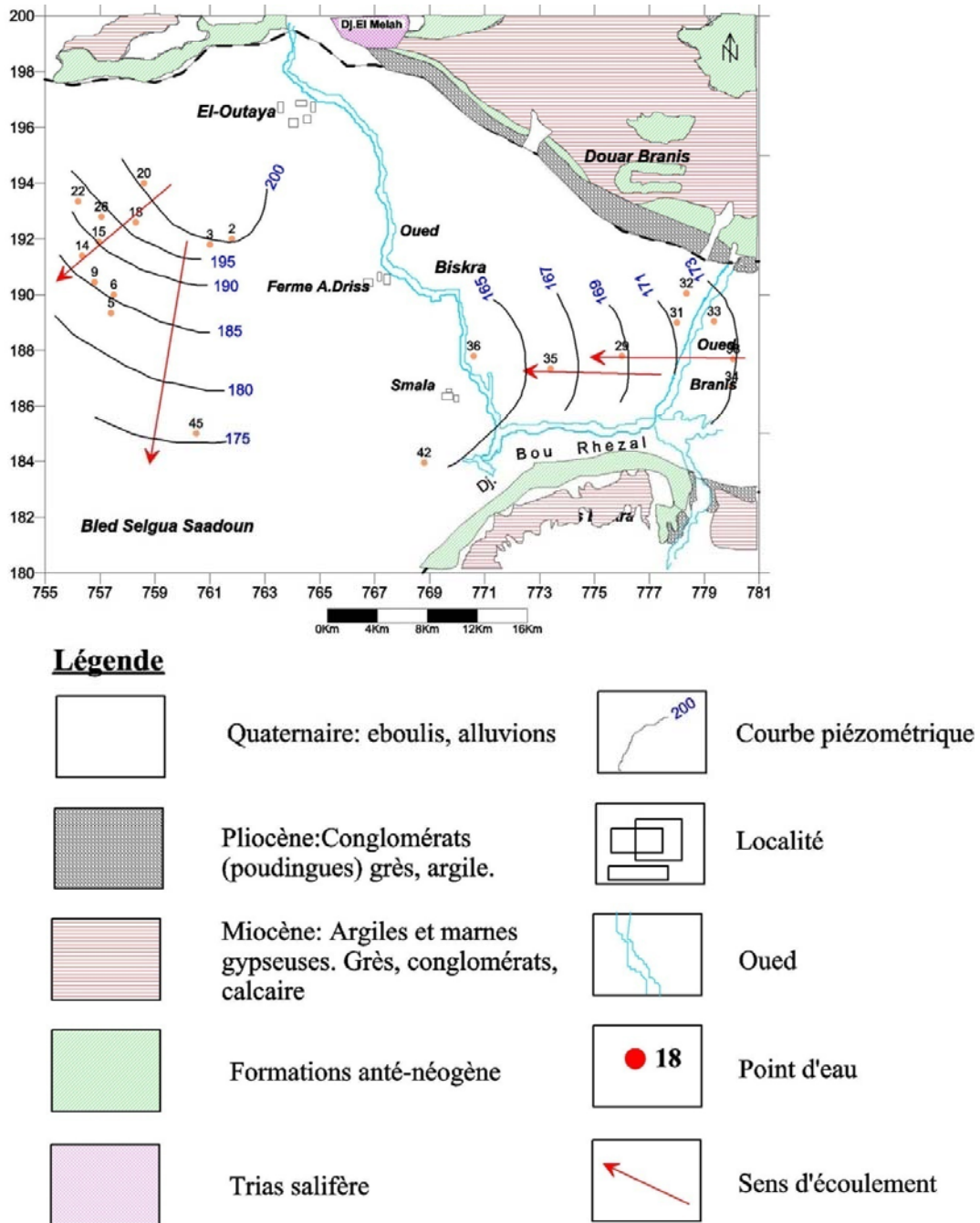


Figure N° 38: Carte piézométrique de la nappe du Néogène

Tableau N° 14: Description lithologique du sondage S6 :**X : 774.60****Y : 190.75****Z : 245**

0-23	Graviers de calcaire à sables et argiles	M i o - P l i o c è n e
23-44	Graviers et galets calcaires	
44-100	Graviers avec passées d'argiles	
100-115	Argiles brunes (marnes)	
115-222	Graviers des calcaires et sables	
222-230	Argiles brunes (marnes)	
230-280	Graviers et sables à argiles	
280-287	Argiles et marnes brunes à passages de sables	
287-416	Galets, graviers et sables à passages d'argiles	
416-532	Argiles brunes plastiques avec marnes	
532-703	Argiles brunes plastiques à quelques passages de sables	
703-777	Intercalations des calcaires beiges et marnes grises et jaunes	
777-797	Calcaires durs et jaunes	
797-943	Marnes à intercalations de calcaires	
943-1000	Calcaires jaunes et marnes grises	

Réalisé en 1981 pour le compte de la D.H.W (Biskra) dans le cadre des reconnaissances. Il est situé à Dar Arous (Branis) à gauche de la CW (en allant vers Branis et Djemourah). Il fait 1000 m de profondeur et traverse la totalité de l'aquifère du Néogène et touche le substratum (Eocène).

6. Conclusion:

L'aquifère Néogène représente la source principale pour l'irrigation de la plaine d'El-Outaya. Il est le résultat d'un remplissage hétérogène constitué d'alternances fines de couches de nature lithologique sableuse, conglomératiques, graveleuse et argileuse ou marneuses avec présence de gypse. Cet aquifère est constitué de:

- Poudingues Pliocènes bien développées surtout à l'Est (Chicha). Ce niveau est progressivement érodé en allant vers le centre. Il peut atteindre jusqu'à 200 m et présente de fortes valeurs de résistivité. Ce niveau constitue une nappe importante en quantité et en qualité.
- Des formations d'âge Miocène bien développées au centre de la plaine sur l'axe El-Outaya – Bir labrache. Elles sont constituées d'argiles de sables avec présence de gypse et peuvent atteindre une épaisseur d'une centaine de mètres. Le Miocène est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées de la sédimentation marine et des épisodes détritiques très variés. C'est un aquifère constitué d'une intercalation de niveaux perméables et imperméables.
- Enfin nous notons la présence de deux niveaux alluvionnaires grossiers, séparés par un niveau argileux au droit de l'Oued Biskra, leurs épaisseurs varient entre 15 et 20 m.

Au niveau de la partie Est, le niveau exploité est conglomératique (Pliocène), au centre c'est essentiellement le Miocène et la nappe alluviale de l'Oued El-Hai. Sur la limite Ouest de la plaine où le remplissage Néogène est assez faible, les exploitants tendent à capter les calcaires d'âge Eocène qui sont proche de la surface et qui constituent le substratum de l'aquifère étudié.

DEUXIEME PARTIE:

PRESENTATION ET INTERPRETATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE LA PLAINE D'EL-OUTAYA

I : PRESENTATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX;

- *Analyse d'ensemble;*
- *Analyse détaillée;*

II : FACIES CHIMIQUES DES EAUX;

- *Type des faciès chimiques;*
- *Relation entre faciès chimiques;*
- *Répartition spatiale des faciès chimiques;*

III : INTERPRETATION GLOBALE DES PARAMETRES CHIMIQUES MESURES;

- *Analyse Statistique;*
- *Origine des éléments chimiques;*
- *Processus hydrogéochimique de l'acquisition de la salinité*
- *Autres arguments hydrochimiques-thermodynamique en faveur de l'origine évaporitique de la salinité;*

IV : APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION.

V : ETUDE DES SAUMURES (REJETS INDUSTRIELS).

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Introduction:

Le tout n'est pas de trouver l'eau. Encore faut-il que cette eau soit utilisable. Or, dans les régions arides, les eaux souterraines sont très fréquemment salées. Bien souvent le facteur de contrôle n'est plus alors la quantité, mais la qualité. (*Schoeller, 1962*)

L'étude de la chimie des eaux souterraines a une importance considérable, particulièrement dans les régions arides. Il s'agit en fait d'une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, de l'évolution hydrodynamique des écoulements de la nappe, de la profondeur de cette dernière et de la zone climatique. Elle donne de précieux renseignements sur les conditions de gisement et le mouvement des eaux souterraines.

La base de l'étude hydrochimique est la classification des eaux souterraines en faciès hydrochimiques.

La principale question est de savoir comment les eaux souterraines acquièrent leur composition chimique, puis comment celle-ci peut évoluer. La réponse à cette question nous permet sans doute, de délimiter les zones favorables à l'exploitation notamment pour l'irrigation sans aucun risque ni de dégradation de la ressource ni sur les sols.

La première acquisition de la minéralisation des eaux se fait déjà dans le sol cultivable qui n'est lui-même qu'un résidu de l'attaque des roches par les eaux d'infiltration. Au cours de l'infiltration dans la zone d'aération, peu de modifications auront l'occasion d'intervenir. C'est un lieu de passage rapide.

Dans les nappes, au contraire, l'écoulement souterrain de l'eau s'effectue le plus souvent d'une façon très lente, de telle sorte que le contact eau-roche prend un temps important et par conséquent, les réactions entre ces dernières auront le temps de s'accomplir de manière plus complète. Des phénomènes tels que les échanges de bases et les concentrations peuvent intervenir et contribuer ainsi à l'enrichissement des eaux souterraines et leurs donner des caractéristiques tout à fait différentes.

Méthodologie et stratégie de travail:

Dans la présente partie, nous allons traiter les résultats d'analyse physico-chimiques disponibles pour déterminer l'origine ainsi que les mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux de l'aquifère du Néogène-Quaternaire. Pour cela, nous avons exploité plusieurs méthodes utilisées par différents auteurs et qui ont donné des résultats satisfaisants (Droubi et al 1976, Vallès 1980, Bakalowicz 1988, Barbeiro 1992, Hsissou et al, 1996, Abdesselem et al 2000, Debieche 2002). Nous avons aussi exploité ces résultats pour donner un résumé sur l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation, (méthode de Richard et celle de Wilcox). Tous ces aspects seront développés dans cette partie selon le plan suivant :

- ▶ Premièrement, une analyse d'ensemble puis détaillée des différents prélèvements effectués dans les eaux de la plaine ainsi qu'un traitement statistique des paramètres mesurés. Ceci concerne:
 - 34 prélèvements des eaux souterraines de l'aquifère du Néogène-Quaternaire. Ces analyses concernent la qualité ainsi que la répartition spatiale dans la plaine des variables mesurées. Elles servent aussi à la détermination de l'origine des éléments chimiques et l'aptitude des eaux à l'irrigation. Elles nous permettront de déterminer l'origine de la salinité et le mode d'acquisition du chimisme des eaux. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire ANRH Ouargla.
 - 21 prélèvements utilisés pour le dosage du strontium. Cet élément trace nous permettra de confirmer l'origine de la salinité des eaux. Le dosage du strontium a été réalisé au laboratoire de l'Ecole Polytechnique de Lille (France)
 - 20 analyses représentant un suivi dans le temps, du chimisme des eaux à partir d'un forage à El-Outaya destiné à l'alimentation en eau brute du complexe Enasel durant la période allant du 1990 à 1999. Ce suivi nous

donnera une idée sur l'évolution temporelle de la minéralisation. Ces analyses sont effectuées au laboratoire central Enasel (El-Outaya)

- Un prélèvement des eaux de surface effectué au niveau de la cuvette du barrage Fontaine des gazelles. Il nous permettra la caractérisation de la qualité des eaux de surface mobilisées et destinées à l'irrigation des terres de la plaine essentiellement le périmètre El-Hazima. L'analyse de cette eau était effectuée au laboratoire ANRH Ouargla.
- 20 analyses de sodium, de chlorures et de pH effectuées sur des rejets des saumures. Les échantillons prélevés périodiquement (période 1990-1999) concernent les eaux de la purge de la chaudière du complexe Enasel et sont analysées au laboratoire central Enasel (El-Outaya)
- 5 prélèvements à partir des différents points des bassins où sont déversées ces saumures. L'objectif est de caractériser le chimisme de ces rejets et suivre son évolution après avoir séjournés dans les bassins. Ces rejets sont analysés dans le laboratoire central Enasel (El-Outaya) et le laboratoire ANRH Constantine.

► Deuxièmement, On donnera un détail des faciès chimiques des eaux souterraines de l'aquifère d'El-Outaya, ainsi que leurs répartitions spatiales dans la plaine et l'origine de chaque faciès. Un aperçu sera donné aussi sur les faciès chimiques des eaux de surface.

► Troisièmement, une interprétation globale des paramètres physico-chimiques sera présentée. On commencera par une analyse statistique des variables et des observations en utilisant la classification hiérarchique ascendante (C.A.H). Puis on déterminera l'origine de la salinité des eaux et les mécanismes d'acquisition du chimisme en utilisant l'évolution des éléments chimiques et leurs relations les uns par rapport aux autres. Nous développerons dans cette partie:

- ✓ L'origine et évolution des éléments chimiques;
 - ✓ Le processus géochimique de l'évolution de la salinité en utilisant le facteur de concentration (Fc);
 - ✓ L'étude du strontium et le rapport (Sr/Ca).
 - ✓ Une simulation à l'aide de la thermodynamique sera effectuée.
- Quatrièmement, l'aptitude des eaux à l'irrigation en utilisant deux méthodes (Richard et Wilcox) sera abordée, ce qui nous permettra de faire des recommandations pour l'optimisation de l'utilisation de la ressource hydrique pour l'irrigation.
- Cinquièmement, une caractérisation physico-chimique des saumures issues du processus de transformation de sels rejetés par le complexe Enasel El-Outaya implanté dans la plaine sera donnée.

L'échantillonnage des eaux souterraines a été réalisé de manière à obtenir un maillage le plus régulier possible, compte tenu de la disponibilité des puits et des forages en exploitation ainsi que l'autorisation des propriétaires. Malgré nos investigations sur terrain, certains secteurs n'ont pas fait l'objet de prélèvements, faute d'ouvrages disponibles (l'irrigation dans ces secteurs se fait avec les eaux de surface à partir du barrage Fontaine des gazelles ou zones non exploitées). La relative homogénéité des points prélevés permet par simple interpolation spatiale par krigeage, d'avoir une image acceptable de la qualité physico- chimique des eaux souterraines sur toute la plaine.

I : Présentation des paramètres physico-chimiques des eaux d'El-Outaya:

1. Analyse d'ensemble:

Toute série de données peut donner lieu au calcul d'une moyenne (m). Pour que cette moyenne soit réellement représentative de l'ensemble de la série, il faut que les données ne s'écartent pas trop de sa valeur. La dispersion autour de la moyenne est mesurée par le coefficient de variation (CV) qui représente le rapport de l'écart-type à la moyenne : $CV = \sigma/m$. Par convention, on estime que la série est homogène lorsque $CV < 50\%$.

1.1. Présentation de la qualité des eaux souterraines:

Une campagne de prélèvements des eaux de l'aquifère du Néogène-Quaternaire a permis d'apprécier le contexte géochimique et définir les caractéristiques fondamentales des eaux de la plaine d'El-Outaya. La recherche de contrastes de ces paramètres entre différents points de mesures facilite d'une part, la détection des anomalies hydrochimiques (salinité élevée) et d'autre part, la mise en évidence de zones d'alimentation, de pollution ou de contamination.

Les paramètres physiques (conductivité, pH) et éléments chimiques majeurs (Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃) ont été dosés aux différents laboratoires. Tableau N° 16. Le contrôle de la validité de ces résultats d'analyse chimique est effectué à l'aide de la balance ionique; où nous n'avons retenu que les analyses ayant une balance ionique inférieure à 6%.

Tableau N° 16 Statistique élémentaire des variables

Physico-chimiques des eaux souterraines

Variable	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	% Ecart de la moy
Ca	mg/l	96.000	348	200.618	66.767	33.28%
Mg	mg/l	77.000	250	183.882	55.863	30.38%
Na	mg/l	92	997	440	254.106	57.75%
K	mg/l	2	6	3.735	1.310	35.07%
HCO ₃	mg/l	98	314	149.559	45.411	30.36%
SO ₄	mg/l	420	1672	959.412	371.117	38.68%
Cl	mg/l	219	1328	725.676	353.823	48.76%
NO ₃	mg/l	0	30	10.088	5.786	57.35%
TDS	mg/l	1080	4980	2999.412	1198.439	39.96%
Con	μS.cm ⁻¹	1110	5940	3475	1423	40.96%
pH		7.4	8.82	7.849	0.280	3.57%

Ces résultats physico-chimiques sont utilisés pour la caractérisation de la salinité des eaux et leurs répartitions spatiales dans la plaine.

On remarque que l'écart à la moyenne est considérable pour certains éléments tels que le sodium, les chlorures et les nitrates. Figure N° 39. Le pourcentage de l'écart avoisine 50 % de la valeur de la moyenne.

Ces anomalies peuvent être expliquées par l'écart important qui existe entre les valeurs minimales (supposées normales) et les valeurs maximales (anomalies).

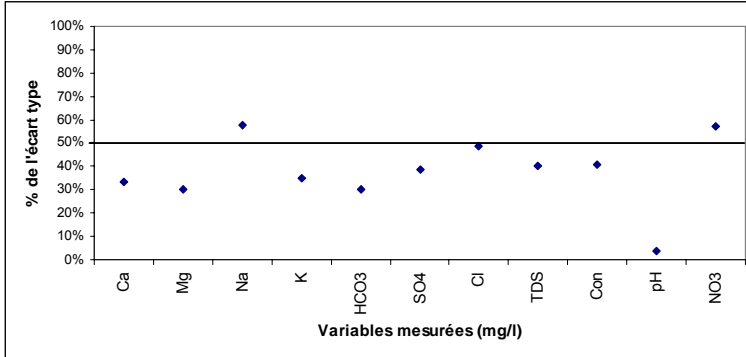


Figure N° 39: Taux de l'écart par rapport à la moyenne des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines

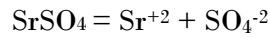
- La grande variabilité des nitrates est due probablement à une utilisation spatiale sélective des engrais. Les endroits concernés présentent des valeurs relativement importantes;
- En ce qui concerne le sodium et les chlorures qui proviennent de la dissolution de la halite, on pense que les concentrations élevées sont limitées dans l'espace et ne concernent pas toute la plaine. En effet, elles sont en liaison avec les affleurements du Trias salifère.

La déviation du reste des paramètres par rapport à la valeur moyenne est de l'ordre de 30%. Ceci peut être expliqué par une répartition assez régulière de la concentration de ces paramètres dans l'espace.

1.2. Présentation des résultats du Strontium (Sr²⁺) dans les eaux souterraines :

La salinité assez élevée des eaux souterraines de la région étudiée nous a conduit à sélectionner 21 points d'eau pour l'analyse du strontium. Tableau N° 17. L'intérêt de cet élément trace réside spécialement dans l'identification de l'origine de la salinité des eaux. Cette salinité étant en général causée par la dissolution des terrains évaporitiques ou par une invasion des eaux marines.

Le strontium est un métal alcalino-terreux. Il est lié aux évaporites. Dans la nature, on le trouve sous forme de strontianite (SrCO₃) et de célestite (SrSO₄). La célestite accompagne généralement les formations évaporitiques et se dissout selon la relation suivante :



Le strontium est peu adsorbé par les argiles. Les rapports des concentrations molaires Sr²⁺/Ca²⁺ sont utilisés avec d'autres méthodes pour l'identification de l'origine de la salinité.

**Tableau N° 17: Statistique élémentaire des résultats
Du rapport Sr/Ca dans les eaux souterraines**

	Min	Moy	Max	E. Type
Sr (mg/l)	1.79	6.49	17	3.882
Ca (mg/l)	138.5	302.45	512	101.282
Sr/Ca (meq/l) ‰	5.912	9.279	18.783	3.273

Ces analyses montrent une influence des évaporites très marquée par la présence en grandes teneurs du strontium dans les eaux de la région. Le rapport Sr/Ca dépasse dans tous les cas 5‰.

1.3. Qualité des eaux de surface; Cas du barrage Fontaine des gazelles:

Loin des eaux souterraines, nous avons effectué un prélèvement des eaux du barrage de Fontaine des Gazelles destinées à l'irrigation de la plaine d'El-Outaya (périmètre El-Hazima). Les résultats sont reportés dans le tableau N° 18. Les eaux de surface mobilisées par ce barrage sont moins chargées que les eaux de l'aquifère Néogène. La minéralisation

est semblable pratiquement aux valeurs minimales de celles des eaux souterraines de la région.

Tableau N° 18 : Caractéristiques physico-chimiques des paramètres des eaux de surface (barrage Fontaine des gazelles).

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	Con	pH
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μS.cm ⁻¹	
100	148	114	4	140	490	292	8	1284	1.37	7.55

1.4. Qualité physico-chimique des saumures (rejets industriels):

Par ailleurs, nous avons examiné les résultats des analyses des saumures provenant du complexe Enasel qui exploite le Trias salifère (Dj. El melah) et implanté dans la plaine. Ces saumures sont collectées après la purge de la chaudière et rejetées dans la nature dans des bassins excavés directement dans le sol de la plaine sans aucune protection. Les paramètres mesurés par le laboratoire du complexe s'étalent sur une période de dix années (1990-1999) et qui concernent les chlorures, le sodium et le potentiel d'hydrogène. Les résultats sont reportés dans le tableau N° 19.

Tableau N° 19 : Statistique élémentaire des paramètres Physico-chimiques des saumures à la sortie du complexe Enasel

Paramètre	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum	Ec-Type
pH		9.4	10.77	11.57	0.66
Cl	mg/l	443.74	6502.18	35311.85	10558.62
Na	mg/l	287.51	4212.72	22878.1	6840.85
NaCl	mg/l	731.25	10714.9	58189.95	17399.47

Ces saumures sont basiques et extrêmement chargées en chlorures de sodium ce qui représente sans doute un risque majeur à la fois pour les eaux souterraines et pour le sol. Des prélèvements de ces rejets ont été effectués à la sortie du complexe, à l'entrée des bassins de décantation et au milieu du lac créé par ces rejets. Les résultats sont reportés dans le tableau N° 20. On remarque qu'après un séjour dans ces bassins, Ces eaux deviennent davantage chargées en sels. Cet enrichissement est causé surtout par l'évaporation intense dans la région.

**Tableau 20 : Statistique élémentaire des paramètres
Physico-chimiques de saumures prélevées dans les bassins de décantation.**

Paramètre	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
Ca	mg/l	155	429.2	900	328.90
Mg	mg/l	90	282.2	445	142.97
Na	mg/l	32680	56912	95800	27686.87
Cl	mg/l	50440	88384	140900	33914.31
SO4	mg/l	1120	1648	2210	428.80
HCO3	mg/l	170	180.2	220	22.25
NaCl	mg/l	83120	145296	236700	56218.77
Cond	µS.cm ⁻¹	44444.4	90847.48	161100	51346.17
TDS	mg/l	88000	147211.6	262500	66805.31
pH		6.8	7.262	7.5	0.29

1.5. Qualité des eaux du forage El-Outaya (1990 – 1999):

Les eaux du forage El-Outaya ont fait l'objet d'une série d'analyse chimique par le laboratoire Enasel pendant une dizaine d'années (1990 – 1999). Tableau N° 21. Ces eaux appelées brutes et utilisées par cette entreprise dans le procédé de transformation du sel.

Bien qu'il s'agisse de la même eau, on note que l'écart est parfois important entre les valeurs minimales et maximales. A titre d'exemple, le magnésium (l'écart représente 50.63% de la moyenne). Cette variation reste inexpliquée, néanmoins, nous pensons que la le facteur humain (manipulation au laboratoire) et la période de prélèvement peuvent avoir une influence sur la variation du chimisme de cette eau.

**Tableau N° 21 : Statistique élémentaire des paramètres
Physico-chimiques des eaux du forage El-Outaya (1990 - 1999)**

	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-Type	% Ecart-Type
Ca	mg/l	253.70	299.81	400.80	35.92	11.98%
Mg	mg/l	85.12	135.29	325.20	68.50	50.63%
Na	mg/l	218.50	405.21	598	78.59	19.39%
Cl	mg/l	479.25	662.27	994	132.40	19.99%
SO4	mg/l	989.60	1159.34	1594.95	141.21	12.18%
HCO3	mg/l	195.20	236.72	329.40	35.90	15.17%
pH	mg/l	7.00	7.45	8.50	0.37	4.97%
Cond	µS.cm ⁻¹	2600	3478.68	4600	461.81	13.28%

2. Analyse détaillée:

Dans ce qui suit, nous allons étudier plus au moins en détail les éléments majeurs présents dans les eaux de la région. Nous commencerons par une statistique élémentaire puis la position de la concentration de chaque élément par rapport à la norme algérienne définies par l'arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00) relatif aux spécifications des eaux de boisson préemballées et aux modalités de leur présentation émanant du ministère du commerce. Ces normes ont été adoptées par les différentes directions de l'hydraulique. Dans le tableau N° 22, nous avons ajouté, à titre indicatif, les valeurs guides OMS ou CEE.

Tableau N° 22 : Normes Algériennes et valeurs guides de l'OMS et de la CEE

Paramètres	Unité	Norme algérienne (Eau de boisson)	Valeur guide OMS ou CEE
pH	-----	6.5 – 8.5	6.5 à 8.5
Conduct. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$	2 800	400
HCO ₃ (mg/l)	mg/l	-----	-----
Cl (mg/l)	mg/l	200 – 500	250
NO ₃ (mg/l)	mg/l	50	50
SO ₄ (mg/l)	mg/l	200 – 400	250
Ca (mg/l)	mg/l	75 – 200	100
Mg (mg/l)	mg/l	150	30
Na (mg/l)	mg/l	200	200
K (mg/l)	mg/l	20	10

2.1. Le Calcium (Ca²⁺):

Les sels de calcium sont très fréquents dans les eaux naturelles. La teneur en calcium dépend de La nature géologique des terrains traversés par les eaux souterraines. Cette teneur entre, pour une large part, dans la définition de la dureté de l'eau.

L'ion calcium est obtenu, en majorité, par l'attaque par le CO₂ dissous (acide carbonique) des roches calcaires et dolomitiques ou par simple dissolution sous la forme de sulfates de calcium dans le cas de gypse ((CaSO₄)₂H₂O).

L'analyse des ions calcium a été effectuée au laboratoire, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau N° 23.

Ce tableau montre que la plupart des points d'eau de la plaine présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux. On remarque que les eaux de surface stockées dans le barrage ainsi que les valeurs minimales des eaux souterraines sont de bonne qualité. Les rejets, par contre, présentent des valeurs élevées. (Figure N° 40).

A part les saumures, les écarts types des observations mesurées ne sont pas importants et sont dans une limite maximale de 30% par rapport aux moyennes.

**Tableau N° 23 : Statistique élémentaire de l'ion calcium
dans les eaux de la plaine d'El-Outaya**

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Laboratoire
Eaux souterraines (mg/l)	96.000	200.618	348.000	66.767	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	253.70	299.81	400.80	35.92	Enasel
Saumures (mg/l)	155	429.2	900	328.90	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	100	-----	-----	ANRH <i>Valeur unique</i>
Normes (mg/l)	75 - 200				Algérienne (JO n° 51/00)

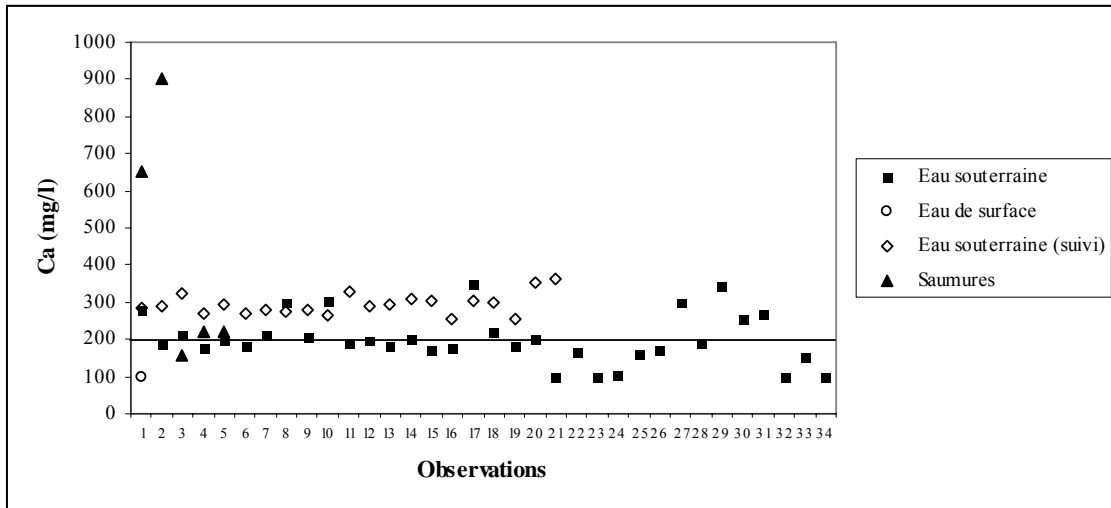


Figure N° 40 : Variation de l'ion calcium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.2. Le Magnésium (Mg^{+2}) :

La majorité des eaux souterraines dans les régions arides présentent des teneurs en magnésium assez importantes. La teneur en magnésium dépend, comme celle du calcium, de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonate, de bicarbonate et de magnésite (les calcaires dolomitiques et les roches évaporitiques).

Le magnésium contribue à la dureté de l'eau. Il est important dans les formations évaporitiques avec un rapport Mg/Ca dépassant en général "1". Par contre, dans les eaux bicarbonatées ce rapport est en général inférieur à "1".

Le tableau N° 24 englobe les résultats de l'ion magnésium. Les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya sont très riches en magnésium. Comme le calcium, les eaux de surface et les valeurs minimales des eaux souterraines sont dans les limites de la norme utilisée, alors que les valeurs extrêmes correspondent aux rejets (figure 41).

Tableau 24 : Statistique élémentaire de l'ion magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Laboratoire
Eaux souterraines (mg/l)	77.000	250.000	183.882	55.863	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	85.12	135.29	325.20	68.50	Enasel
Saumures (mg/l)	90	282.2	445	142.97	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	148	-----	-----	ANRH Valeur unique
Normes (mg/l)	150				Algérienne (JO n° 51/00)

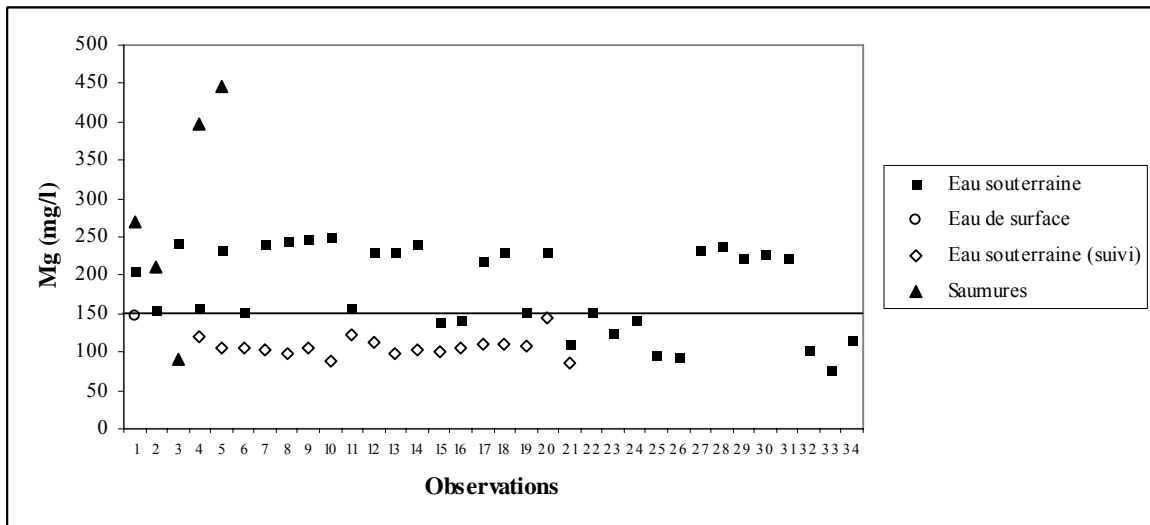


Figure 41 : Variation de l'ion magnésium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.3. Le Sodium (Na⁺) :

Les teneurs élevées en sodium dans l'eau proviennent de la dissolution des terrains salés. Le diapir de sel au nord de la région d'El-Outaya peut constituer une source principale de cet élément. Il peut aussi provenir de l'activité humaine qui utilise beaucoup de sels de sodium. Les saumures rejetées par le complexe de transformation de sel implanté dans la plaine peuvent constituer une cause de l'augmentation des concentrations en sodium.

En agriculture, il constitue, à des doses acceptables, associé aux autres éléments alcalins et alcalino-terreux, un élément de maintien de la perméabilité des sols.

Les teneurs dans les eaux de surface et les valeurs minimales en cet élément dans les eaux souterraines sont inférieures à la norme. Par contre, on remarque que les moyennes des concentrations en sodium dans les rejets de saumures dépassent 56 g/l alors que les valeurs maximales avoisinent 100 g/l (tableau N° 25 et figure N° 42). Ces valeurs anormalement élevées se concentrent dans le temps après séjour dans les bassins de décantation à cause de l'évaporation intense. Les écarts par rapport à la moyenne sont importants.

**Tableau N° 25 : Statistique élémentaire de l'ion sodium
dans les eaux de la plaine d'El-Outaya**

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	92.00	440.00	997.00	57.75	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	218.50	405.21	598.00	78.55	Enasel
Saumures (mg/l)	32 680.00	56 912.00	95 800	27 686.87	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	114	-----	-----	ANRH <i>Valeur unique</i>
Normes (mg/l)	200				Algérienne <i>(JO n° 51/00)</i>

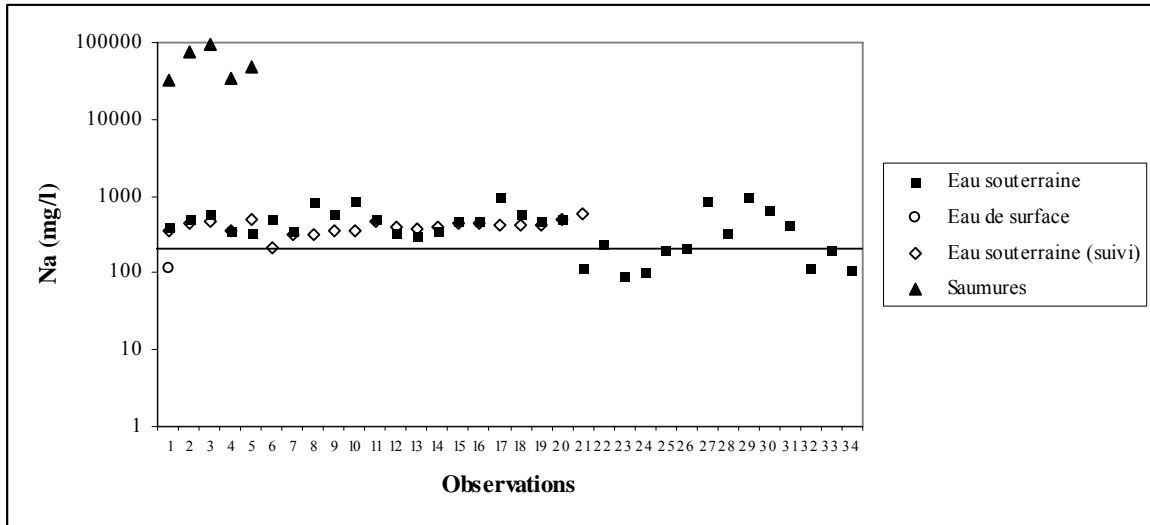


Figure N° 42 : Variation de l'ion sodium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.4. Le Potassium (K⁺) :

Le potassium est un élément normal des eaux, avec des concentrations largement inférieures à celles du sodium. Nous ne disposons pas de mesures sur tous les aspects des eaux étudiées. Les valeurs dont on dispose (tableau N° 26) montrent des concentrations ne dépassant pas la norme.

Tableau N° 26 : Statistique élémentaire de l'ion potassium dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	2.00	3.735	6.00	1.31	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	-----	-----	-----	-----	Enasel
Saumures (mg/l)	-----	-----	-----	-----	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	4	-----	-----	ANRH Valeur unique
Normes (mg/l)	20				Algérienne (JO n° 51/00)

2.5. Les Chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être naturelle avec la dissolution des terrains salées ou anthropique (pollution).

Les teneurs rencontrées dans les eaux souterraines en ion chlorure sont généralement faibles, mais peuvent atteindre des valeurs importantes au contact de certaines formations géologiques (Trias). C'est justement le cas de la plaine d'El-Outaya. Les moyennes des concentrations dont on dispose dépassent dans tous les cas la limite de la norme à l'exception des valeurs minimales dans les eaux souterraines et les eaux de surface qui sont dans les normes. Les rejets des saumures, par contre, sont très chargés et présentent une moyenne de l'ordre de 88 g/l (figure N° 43). Les écarts types sont relativement importants et dépassent 50% par rapport à la moyenne (tableau N° 27).

**Tableau N° 27 : Statistique élémentaire des chlorures
dans les eaux de la plaine d'El-Outaya**

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	219.00	725.676	1328.00	353.823	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	479.25	626.27	994.00	132.4	Enasel
Saumures (mg/l)	50440.00	88384.00	140900.00	33914.00	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	292	-----	-----	ANRH <i>Valeur unique</i>
Normes (mg/l)	200 - 500				Algérienne <i>(JO n° 51/00)</i>

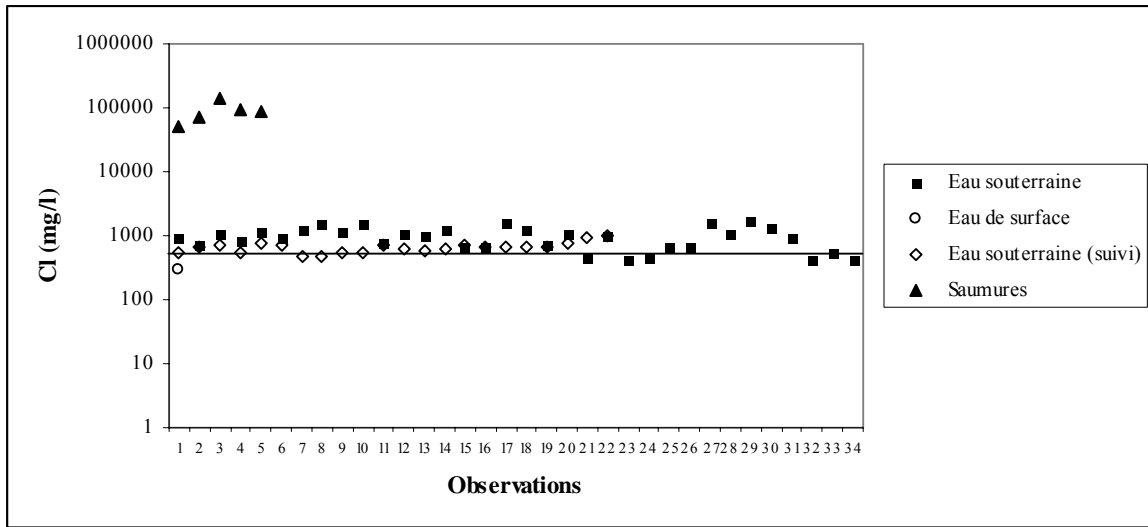


Figure N° 43 : Variation des chlorures dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.6. Sulfates (SO_4^{2-}) :

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ($CaSO_4, 2H_2O$). Les sulfates peuvent provenir de l'activité humaine mais il est difficile de préciser l'origine. On peut citer comme sources anthropiques les ateliers de décapage métallique, les tanneries, les textiles et l'industrie papetière.

Les eaux d'El-Outaya sont très riches en sulfates et les valeurs mesurées (Tableau N° 28) sont dans leurs majeures parties dominantes par rapport aux autres éléments. Ces valeurs dépassent dans tous les cas la norme. (figure N° 44). L'origine est sans doute due à la dissolution des formations évaporitiques du Néogène. Les écarts types sont importants.

Tableau N° 28 : Statistique élémentaire des sulfates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	420.00	959.412	1672.00	371.117	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	989.60	1159.34	1554.95	141.21	Enasel
Saumures (mg/l)	1120.00	1648.00	2210.00	428.80	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	490	-----	-----	ANRH Valeur unique
Normes (mg/l)	200 - 400				Algérienne (JO n° 51/00)

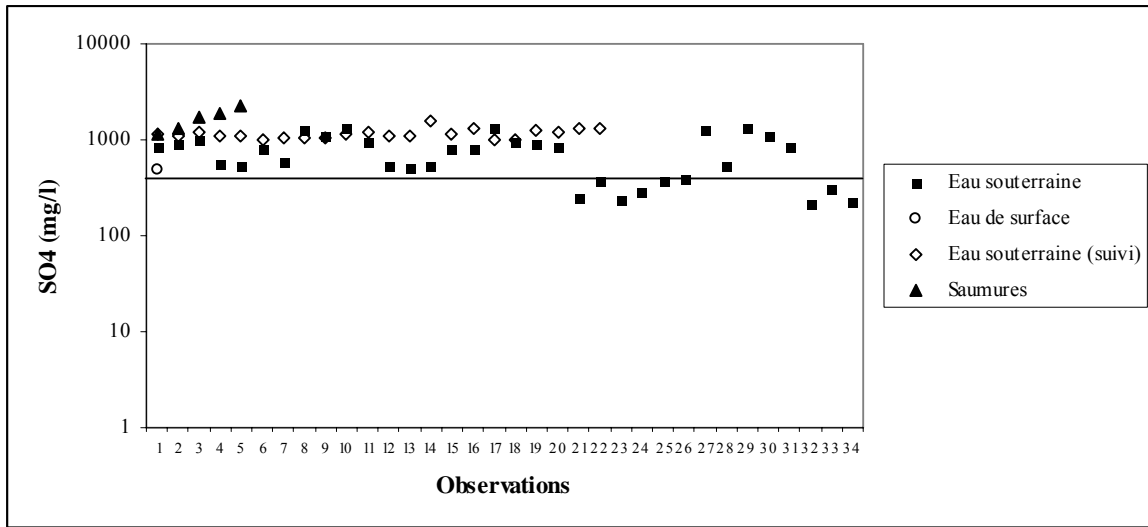
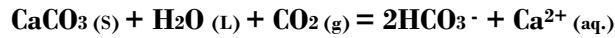


Figure N° 44 : Variation des sulfates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.7. Bicarbonates (HCO₃⁻) :

Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂) selon l'équation suivante:



Les concentrations de cet élément sur l'ensemble de la plaine sont reportées au tableau N° 29. La teneur de cet élément dans les eaux de surface est proche de celle des eaux souterraines (Figure N° 45). L'écart type n'est pas important.

Tableau 29 : Statistique élémentaire de l'alcalinité carbonatée dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	98.00	149.559	314.00	45.411	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	195.20	236.72	329.40	35.90	Enasel
Saumures (mg/l)	170.00	180.20	220.00	22.25	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	140	-----	-----	ANRH Valeur unique
Normes (mg/l)	-----				Algérienne (JO n° 51/00)

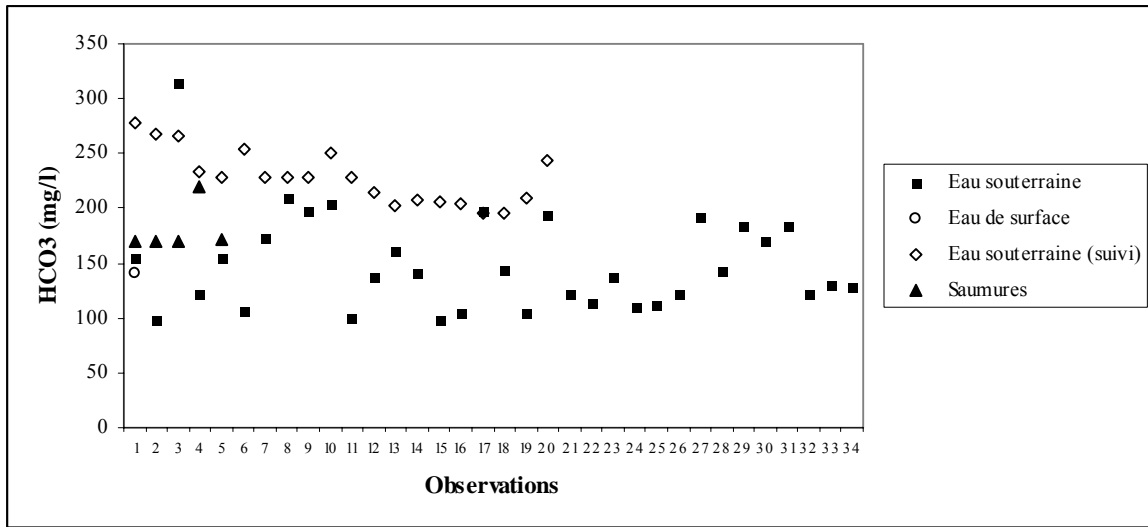


Figure N° 45 : Variation de l'alcanité carbonatée dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.8. Nitrates (NO₃) :

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux sont accentuées par l'activité humaine. Elle accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais sur les sols cultivés. Les eaux d'irrigation et de pluie s'infiltrent dans les nappes, ce qui modifie la teneur de ces éléments sur les sols subissant l'érosion et participant à l'infiltration des eaux, par les décharges d'eaux usées domestiques, par les rejets des industries minérales et d'engrais azotés. Les teneurs enregistrées dans la région (tableau N° 30) sont sans danger selon la norme. (figure N° 46). La présence des nitrates dans les eaux de la plaine est très faible et elle est en général au dessous de 30 mg/l.

Tableau N° 30 : Statistique élémentaire des nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (mg/l)	00	10	30	5.78	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (mg/l)	-----	-----	-----	-----	Enasel
Saumures (mg/l)	-----	-----	-----	-----	Enasel
Eau de surface (mg/l)	-----	8	-----	-----	ANRH Valeur unique
Normes (mg/l)	50				Algérienne (JO n° 51/00)

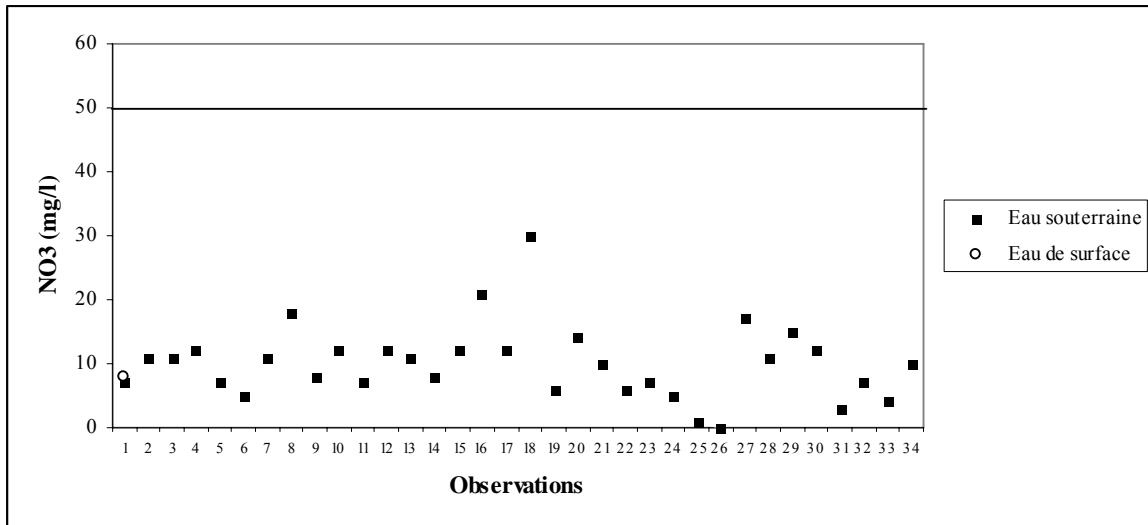


Figure N° 46 : Variation des nitrates dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

2.9. Conductivité électrique:

La minéralisation de l'eau peut être déterminée soit par la conductivité électrique (méthode rapide), soit par la teneur en ions dissous obtenue par sommation des concentrations des anions et des cations car celles-ci sont fortement corrélées dans toutes les formations aquifères.

La conductivité électrique est un paramètre important en hydrogéologie ; sa variation est liée, à température constante, aux modifications de la minéralisation des eaux souterraines.

Elle constitue une bonne appréciation des matières en solution. En effet, dans les eaux naturelles qui constituent des solutions peu concentrées en sels minéraux, pratiquement tous les éléments dissous sont ionisés et contribuent donc à la conductibilité d'une eau. Elle n'est pas, toutefois, proportionnelle à la masse des éléments en solution ou au total des milliéquivalents présents car il n'y a pas de proportionnalité entre la milliéquivalence ou la masse atomique des ions et leur conductibilité. Le degré d'ionisation de la majorité des sels en solution diminue avec l'augmentation de la concentration et varie selon la nature des éléments en présence. La relation conductibilité-salinité n'est donc ni linéaire ni univoque. Une conductibilité élevée traduit, soit des pH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée, celle-ci pouvant être naturelle ou due à des rejets salins.

Sur l'ensemble des points d'eau prélevés (tableau N° 31), peu nombreux sont les échantillons qui ont des valeurs inférieures à la limite exigée (figure N° 47). Les valeurs maximales dans les eaux souterraines peuvent atteindre 4900 (μ .siemens.cm⁻¹) alors que dans les saumures, elles sont de l'ordre de 160000 (μ .siemens.cm⁻¹). La carte de la répartition de ce paramètre (figure N° 48) montre que les faibles conductivités se trouvent au niveau de la partie Est alors qu'au centre et au nord se situent les valeurs moyennes et élevées.

Tableau 31 : Statistique élémentaire de la conductivité dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines (μ .siemens.cm ⁻¹)	1110	3475	5940	1423	ANRH
Suivi du forage El-Outaya (μ .siemens.cm ⁻¹)	2600.00	3478.68	4600.00	461.81	Enasel
Saumures(μ .siem.cm ⁻¹)	44444	90847.48	161100	51346.17	Enasel
Eau de surface (μ .siemens.cm ⁻¹)	-----	1370	-----	-----	ANRH <i>Valeur unique</i>
Normes	2800				Algérienne (JO n° 51/00)

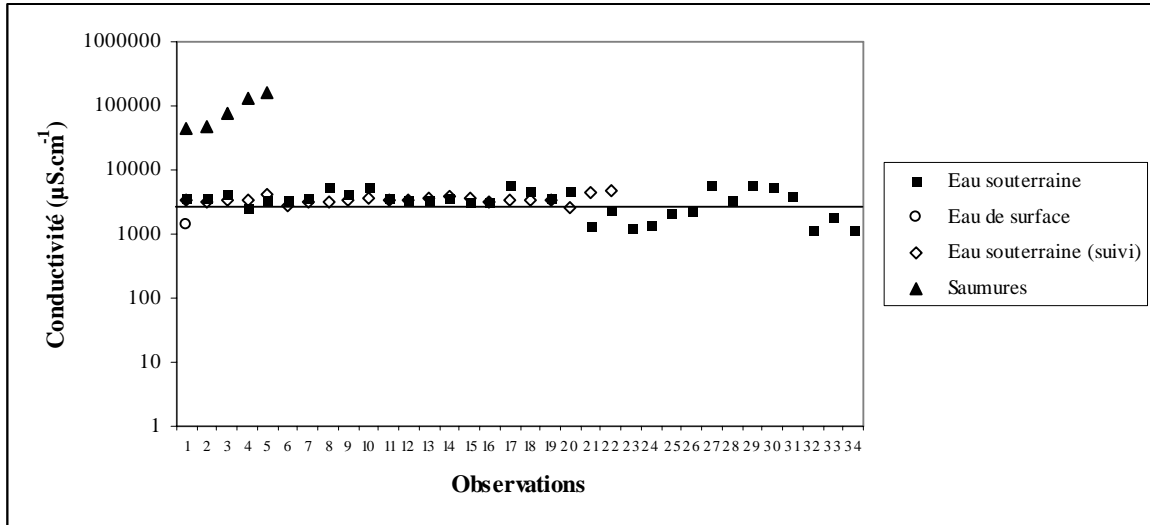


Figure N° 47 : Variation de la conductivité dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

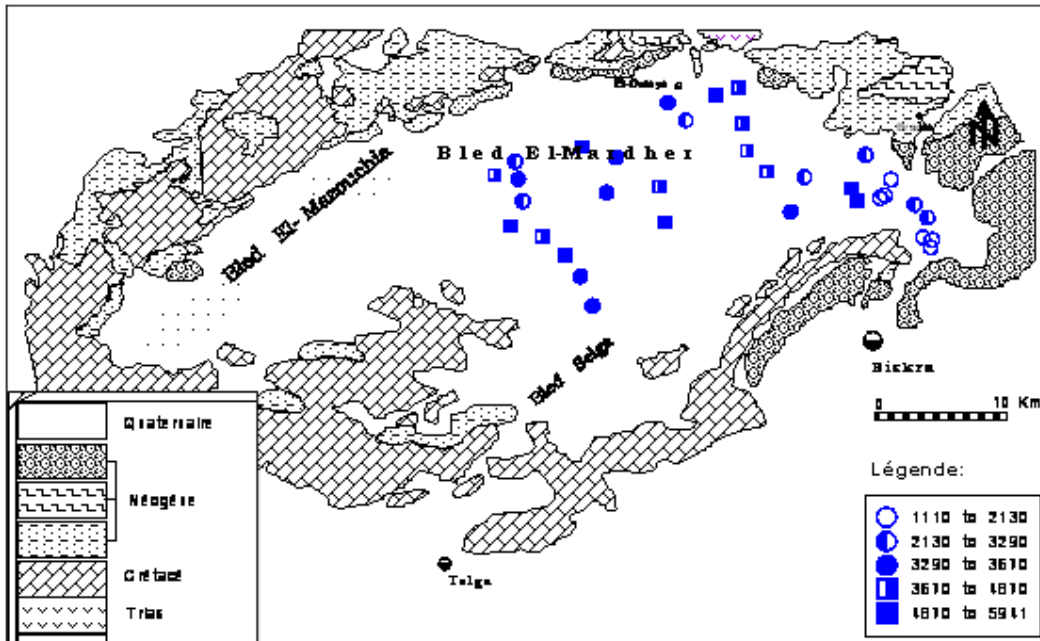


Figure N° 48 : Répartition spatiale de la conductivité électrique dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

2.10. Le potentiel d'hydrogène (pH):

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H⁺ dans l'eau. Cette mesure est très importante car la valeur du pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Dans les eaux naturelles, c'est-à-dire non soumises aux rejets importants résultant de l'activité humaine, le pH dépend de l'origine de ces eaux et de la nature géologique des terrains traversés. La totalité des points échantillonnés sont dans les limites de la norme (figure 49). L'écart des valeurs par rapport à la moyenne n'est pas important (tableau N° 32).

Tableau N° 32 : Statistique élémentaire du potentiel d'hydrogène (pH) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya.

Endroit	Min	Moy	Max	Ecart-type	Observations
Eaux souterraines	7.4	7.84	8.82	0.28	ANRH
Suivi du forage El-Outaya	7.00	7.45	8.50	0.37	Enasel
Saumures	6.8	7.26	7.5	0.29	Enasel
Eau de surface	-----	7.55	-----	-----	ANRH <i>Valeur unique</i>
Normes	6.5 - 8.5				Algérienne <i>(JO n° 51/00)</i>

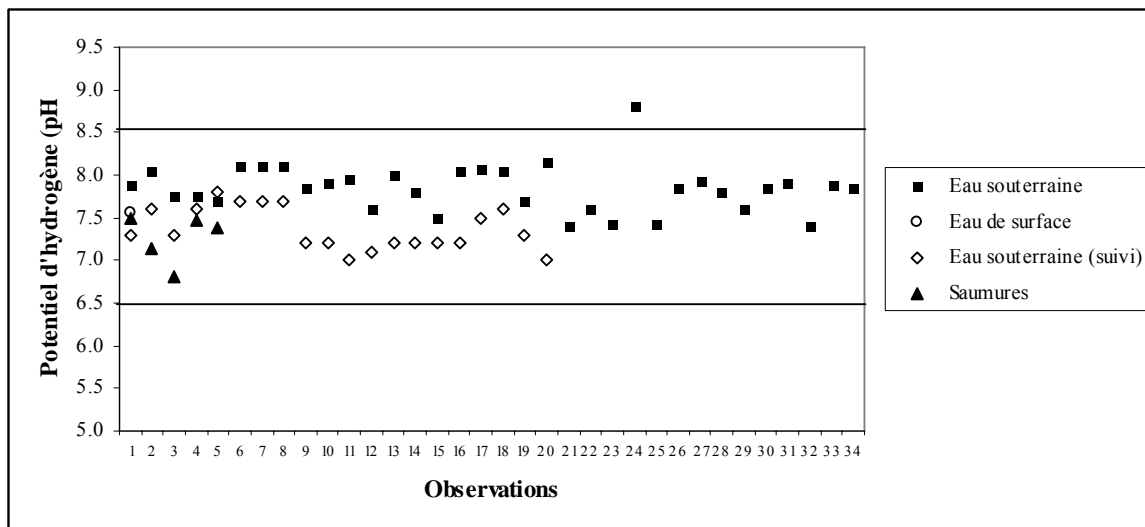


Figure N° 49 : Variation du potentiel d'hydrogène (pH) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

II : Faciès chimiques:

1. Type des faciès chimiques des eaux souterraines d'El-Outaya:

Le dépouillement des analyses chimiques a aboutit à trois faciès chimiques:

- Le faciès chloruré sodique.
- Le faciès sulfaté magnésien.
- Le faciès sulfaté sodique.

Le faciès chloruré sodique est dominant avec 53 % des échantillons, alors que les deux autres faciès représentent respectivement 35 et 12 %.

L'influence des formations évaporitiques est bien marquée par la dominance des chlorures, des sulfates et du sodium; indice de contamination à grande échelle.

1.1. Les eaux chlorurées sodiques :

Le faciès caractéristique est le suivant:

$$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ HCO}_3$$

$$r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$$

La conductivité de ces eaux varie entre 3220 et 5940 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. On remarque que ces eaux ont des valeurs extrêmes de la conductivité et dépassent presque dans tous les cas la moyenne (3475 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) calculée sur toute la plaine. Le rapport $r\text{Cl} / r\text{SO}_4$ varie entre 1.03 et 1.74. Il s'agit des eaux chlorurées sodiques secondairement sulfatées.

1.2. Les eaux sulfatées magnésiennes :

Le faciès caractéristique est le suivant:

$$r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl} > r \text{ HCO}_3$$

$$r \text{ Mg} > r \text{ Na} > r \text{ Ca}$$

La conductivité de ces eaux varie entre 1110 et 3560 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Contrairement au faciès précédent, ces eaux regroupent pratiquement les valeurs de la conductivité inférieure à la moyenne. Le rapport $r\text{SO}_4 / r\text{Cl}$ varie entre 1.19 et 1.95. Ce rapport montre que par endroit, la concentration molaire de l'ion sulfate représente le double de celles des chlorures. Mais globalement ces eaux sont secondairement chlorurées.

1.3. Les eaux sulfatées sodiques :

Le faciès caractéristique est le suivant:

$$r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl} > r \text{ HCO}_3.$$

$$r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}.$$

La conductivité varie entre 1780 et 2520 $\mu\text{S. cm}^{-1}$. Ces eaux présentent un rapport $r \text{SO}_4 / r \text{Cl}$ qui varie entre 1.13 et 1.31. Alors que le rapport $r \text{Na} / r \text{Mg}$ se situe entre 1.21 et 1.36. Il semble que ce faciès est intermédiaire entre les deux faciès précédents à cause des rapports caractéristiques qui sont proches de 1 dans cette famille d'eau. Ces rapports traduisent le caractère mixte de ces eaux.

2. Relation entre les faciès chimiques des eaux souterraines:

Bien que les eaux se regroupent dans trois familles chimiques d'apparence différentes, mais on peut penser qu'elles ont la même origine et sont interdépendantes. Elles sont toutes le résultat de la dissolution des roches évaporitiques. Ce caractère mixte des eaux étudiées nous amène à définir la relation entre les familles chimiques caractérisant ces eaux.

Les résultats d'analyse portés sur le diagramme de Piper (figure N° 50) confirment l'origine commune de ces eaux. Elles se regroupent en un seul pôle influencé par la dissolution des minéraux évaporitiques. Cette dissolution a générée plusieurs éléments chimiques, notamment les sulfates, les chlorures, le magnésium, le calcium et le sodium.

Les points sur le triangle relatifs aux cations se mettent au milieu (partie mixte) avec un nombre très limité d'observations avec une tendance vers le sodium ou le magnésium.

Cette concentration au centre des observations n'est pas assez marquée pour le triangle des anions. Ces dernières ont tendance à s'aligner selon le cas vers les sulfates ou vers les chlorures. La dominance de l'un par rapport à l'autre n'est cependant pas très visible.

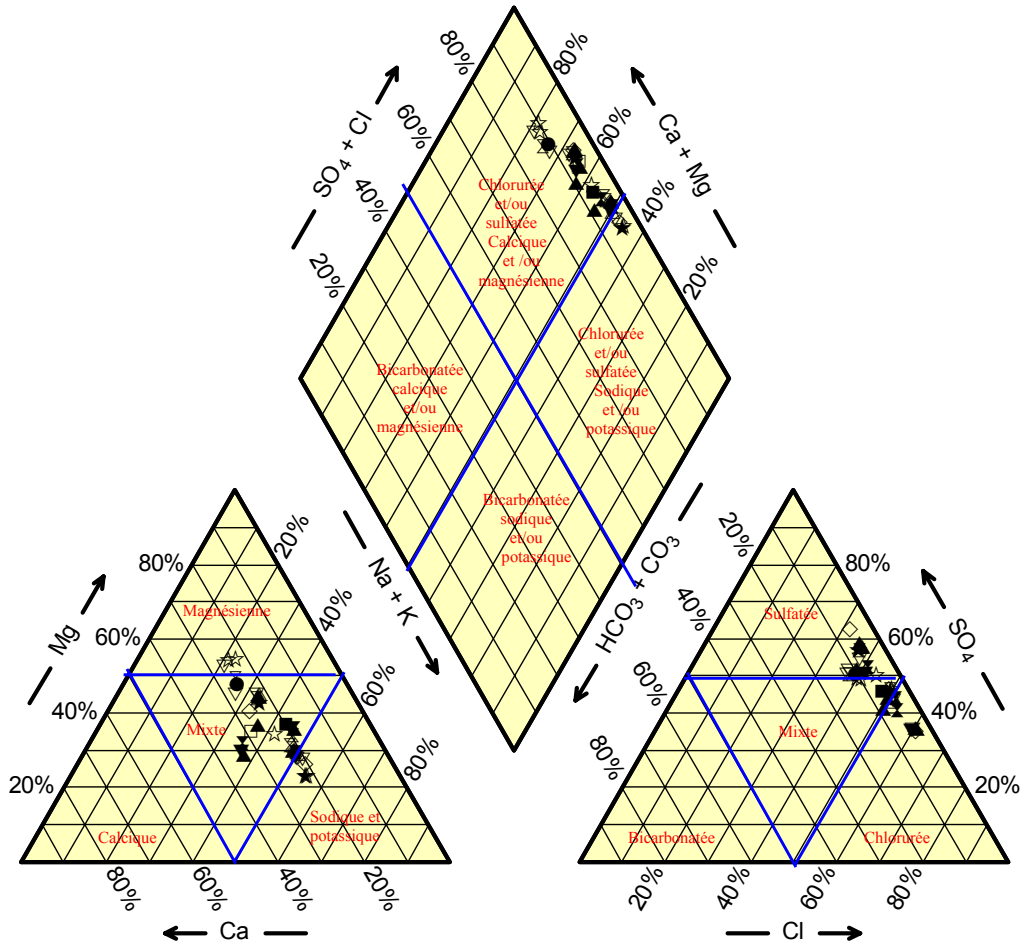


Figure N° 50 : Représentation triangulaire des paramètres chimiques des eaux El-Outaya

Un autre moyen pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région est l'étude des deux rapports caractéristiques suivants: SO_4/Cl et Mg/Na . Ce suivi touche l'ensemble des échantillons analysés indépendamment du lieu de prélèvement.

L'examen des graphiques tracés (figure N° 51) montre que la majorité des points (rapports) tourne autour de "1". La prédominance des sulfates sur les chlorures ou l'inverse dépend de deux facteurs essentiels;

- Le premier est sans doute le lessivage à des degrés variables. des formations évaporitiques très solubles.
- Le deuxième facteur est lié à l'état de ces minéraux (qui génèrent ces éléments) dans l'eau (équilibre, sursaturé, sous-saturé).

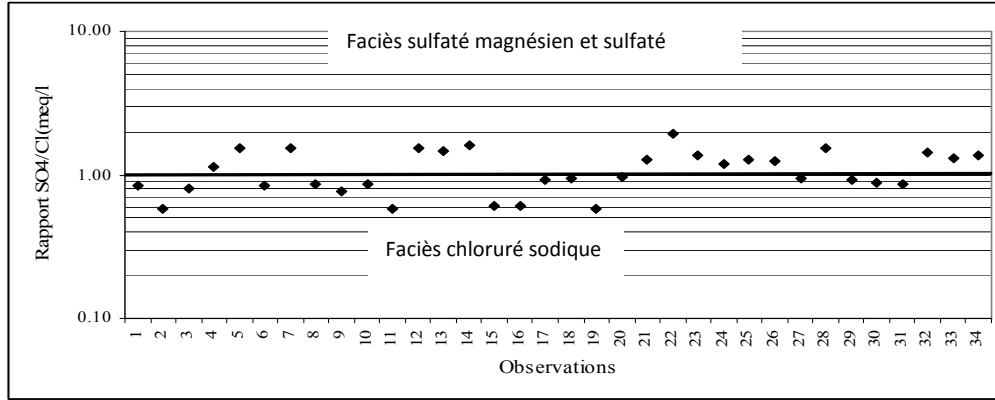


Figure N° 51 : Evolution du rapport (SO4/Cl) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Cette relation se confirme pour le deuxième paramètre du faciès (cations) dans le graphique magnésium-sodium (figure N° 52), bien que la dispersion par rapport à "1" soit légèrement plus importante.

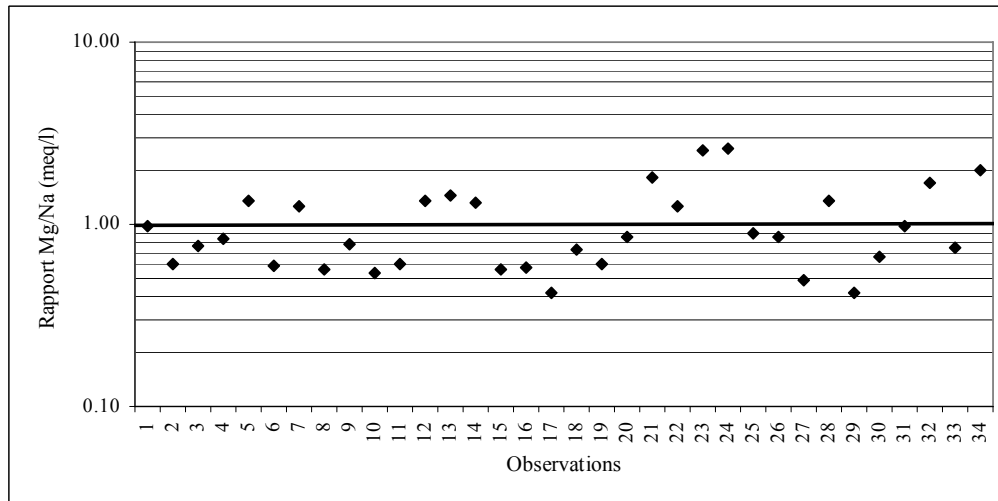
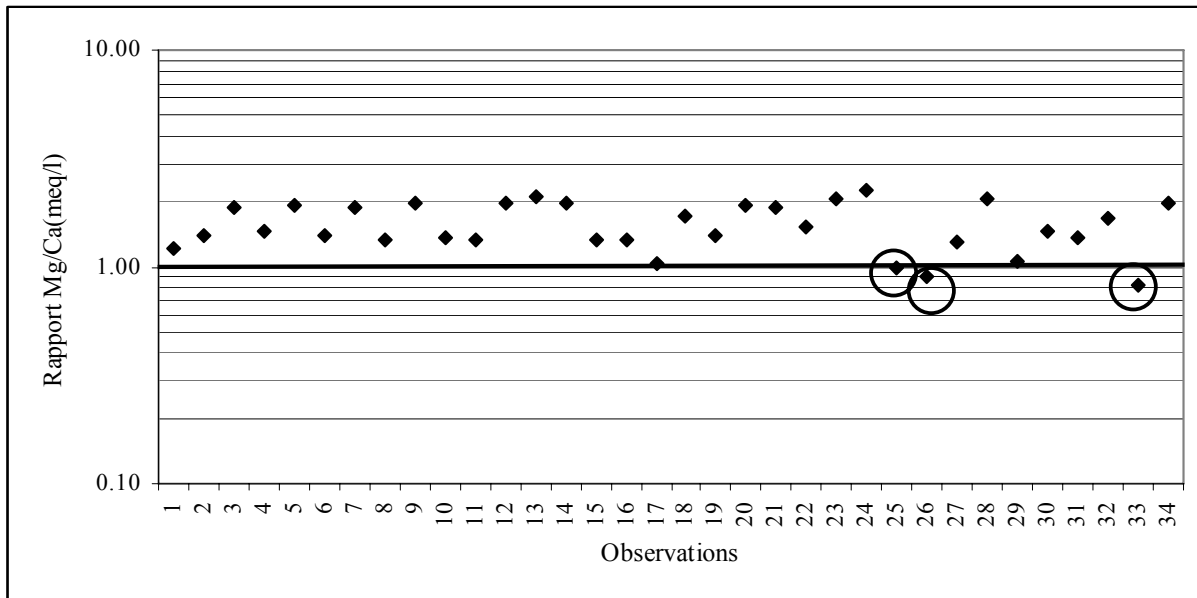


Figure N° 52 : Evolution du rapport (Mg/Na) dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

Concernant l'absence du faciès calcique normalement généré par la dissolution du gypse est du probablement à la participation d'une partie de l'ion calcium en phase de précipitation de la calcite ou de l'aragonite. Le reste de l'ion calcium en réaction n'est pas assez important et est masqué par la dominance du magnésium figure N° 53. Les 3 observations dans la figure ou le calcium semble dominer légèrement. C'est le sodium dans ce cas qui domine l'un et l'autre (Points d'eau N°: 25, 26, 33 graphique N°53).



**Figure N° 53 : Evolution du rapport (Mg/Ca)
dans les eaux de la plaine d'El-Outaya**

3. Répartition spatiale des faciès chimiques:

L'étude de la répartition spatiale des faciès n'est qu'en réalité que l'étude de la répartition des paramètres chimiques caractérisant ces faciès sur toute la plaine. Les paramètres dominants des eaux souterraines d'El-Outaya sont les sulfates, les chlorures, le sodium et le magnésium.

Nous allons suivre l'évolution de ces variables dans la plaine selon trois axes de direction nord-sud et un axe de direction Est-ouest. Figure N° 54. Ces deux directions (Nord-Sud et Est-Ouest) correspondent aux axes des écoulements des eaux souterraines.

L'étude de l'évolution du rapport SO_4/Cl , selon les axes choisis, nous donne des renseignements à la fois sur les sulfates et les chlorures. De même pour le rapport Mg/Na .

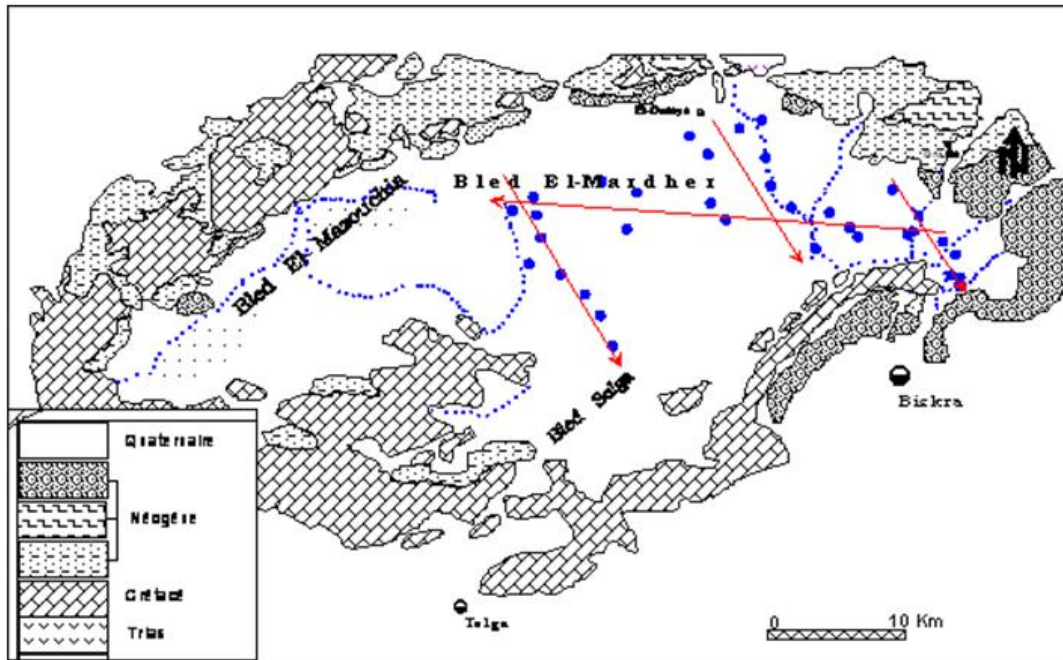
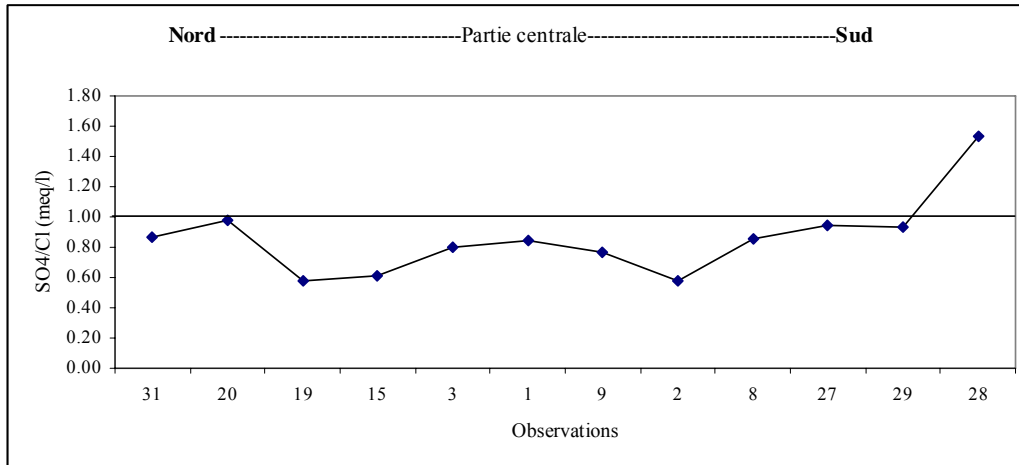


Figure N° 54 : Carte représentant les axes de suivi des faciès dans la plaine d'El-Outaya

3.1. Evolution du Rapport SO_4/Cl :

3.1.1. Axe Nord-Sud - partie centrale-

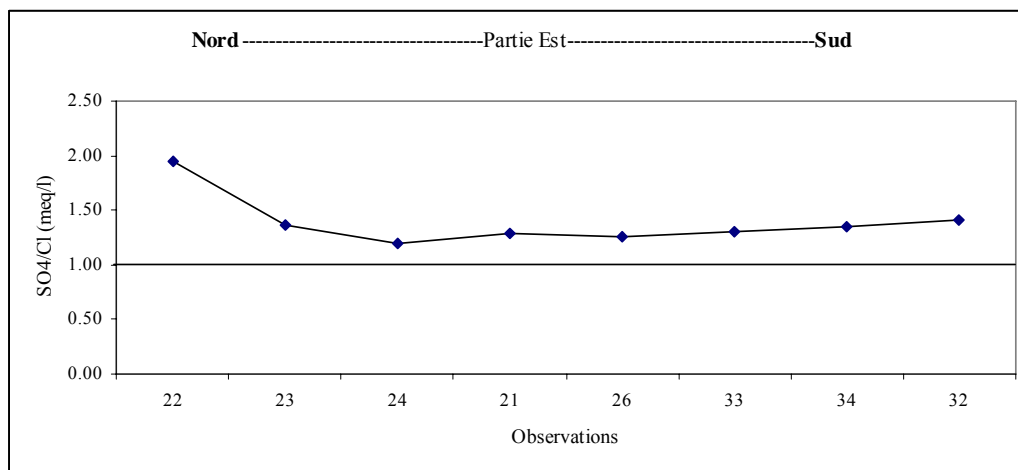
L'évolution de ces deux éléments selon la direction Nord-Sud (partie centrale) montre l'importance du faciès chloruré par rapport au faciès sulfaté. Figure N° 55. Cette dominance est due à l'influence de la dissolution de la halite. L'enrichissement des eaux en NaCl peut provenir du lessivage puis de l'infiltration à partir de la surface vers l'aquifère selon une direction Nord sud. Cet enrichissement est favorisé par la proximité du diapir.



**Figure N° 55 : Evolution du rapport (SO4/Cl)
Axe Nord-Sud (Partie centrale)**

3.1.2. Axe Nord-Sud - partie Est-

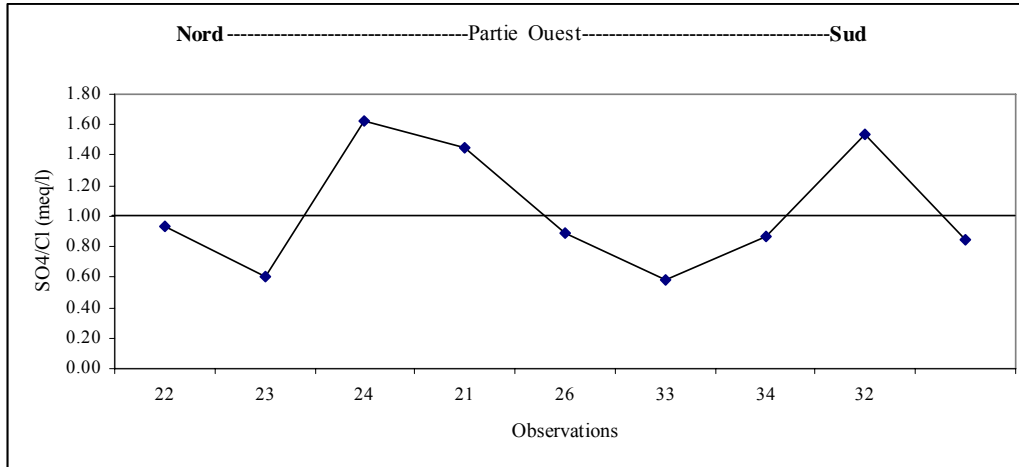
Loin de l'influence du diapir, les eaux à l'Est (axe Nord-Sud partie Est) de la plaine sont sulfatées. Figure N° 56. Ce faciès est le résultat de la dissolution des formations néogènes évaporitiques riches en gypse. Une dominance totale des sulfates.



**Figure N° 56 : Evolution du rapport (SO4/Cl)
Axe Nord-Sud (Partie Est)**

3.1.3. Axe Nord-Sud - partie Ouest-:

Selon la direction toujours Nord-Sud mais dans la partie Ouest figure N° 57. Nous avons un mélange des eaux sulfatées et chlorurées. Ce mélange est le produit de la convergence des eaux chlorurées provenant du Nord (côté localité El-Outaya) et les eaux sulfaté provenant de l'Est.



**Figure N° 57 : Evolution du rapport (SO4/Cl)
Axe Nord-Sud (Partie Ouest)**

3.1.4. Axe Est -Ouest:

L'évolution des sulfates et des chlorures suivant la direction Est-Ouest figure N° 58 résume la répartition spatiale des faciès chloruré et sulfaté dans la plaine. Cet axe recoupe les trois autres. Il montre les trois types des eaux décrites précédemment:

- Une dominance des sulfates dans la partie Est;
- Une dominance des chlorures dans la partie Centrale;
- Un mélange des deux faciès dans la partie Ouest.

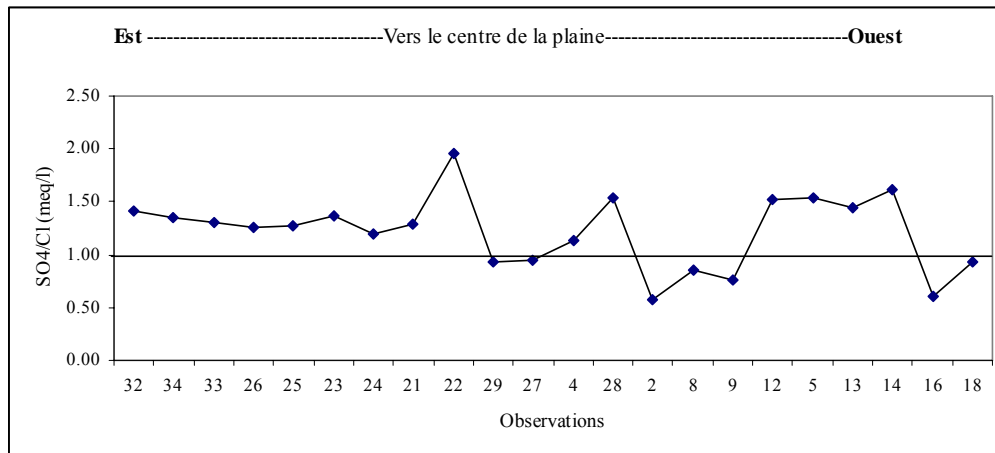


Figure 58 : Evolution du rapport (SO4/Cl) -Axe Est-Ouest-

3.2. Evolution du rapport Mg/Na:

Le sodium et le magnésium sont les deux cations qui accompagnent les anions dans les faciès chimiques. Leur évolution est comme suit:

Dans la partie centrale de la direction Nord-Sud, on a une dominance totale du sodium sur le magnésium. Le sodium accompagne les chlorures dans cette direction. Figure N° 59.

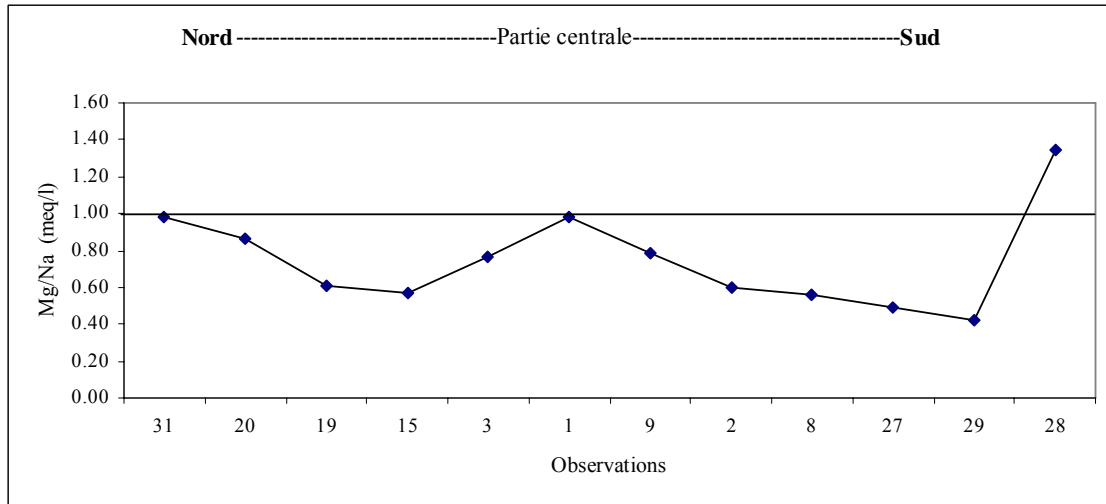


Figure N° 59 : Evolution du rapport (Mg/Na)

Axe Nord-Sud (Partie centrale)

Dans la partie Est, on a une dominance du magnésium, sauf pour deux observations. Le magnésium dans ces eaux accompagne les sulfates. (figure N° 60)

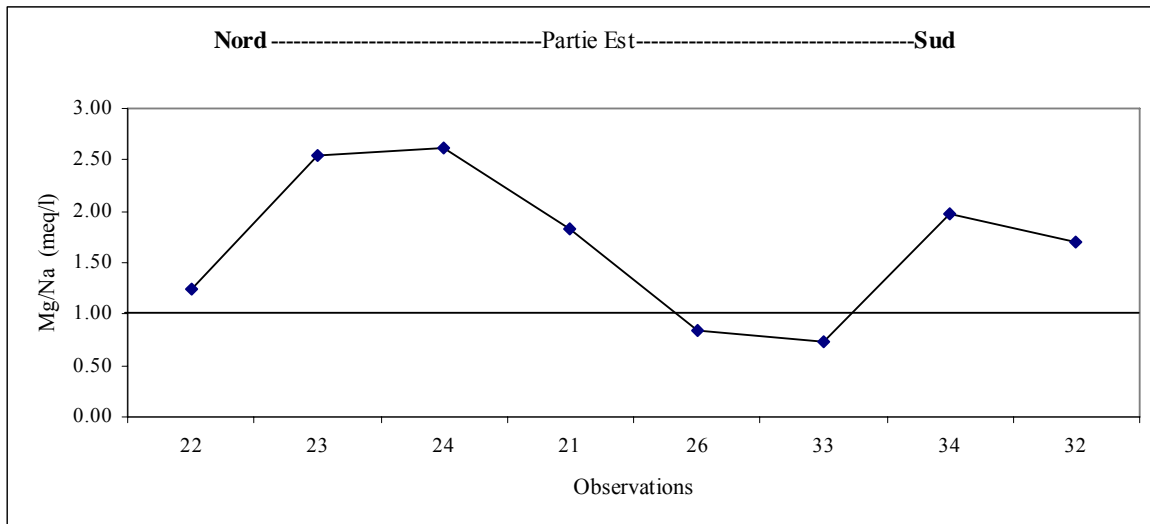
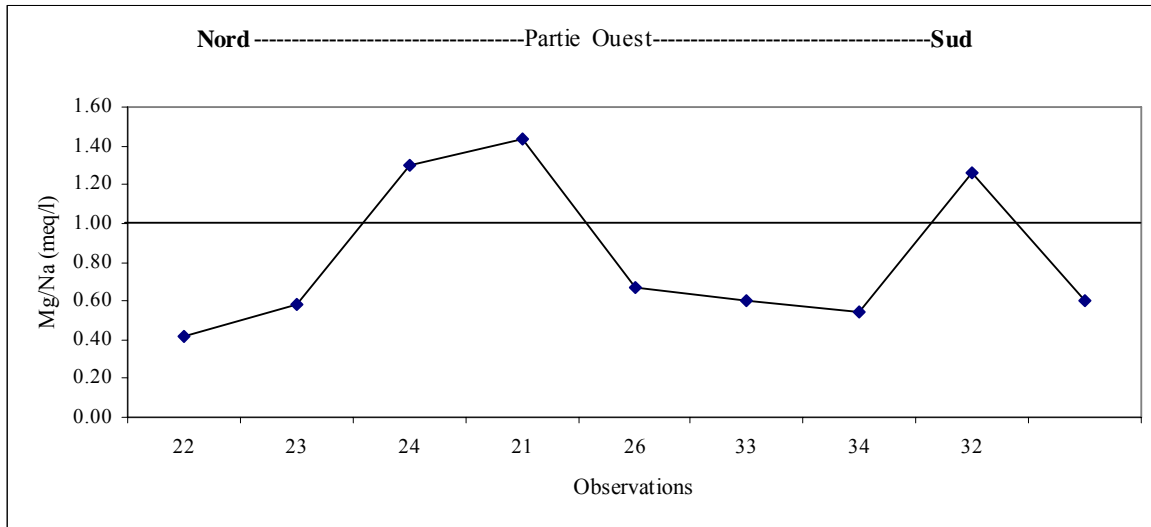


Figure N° 60 : Evolution du rapport (Mg/Na)

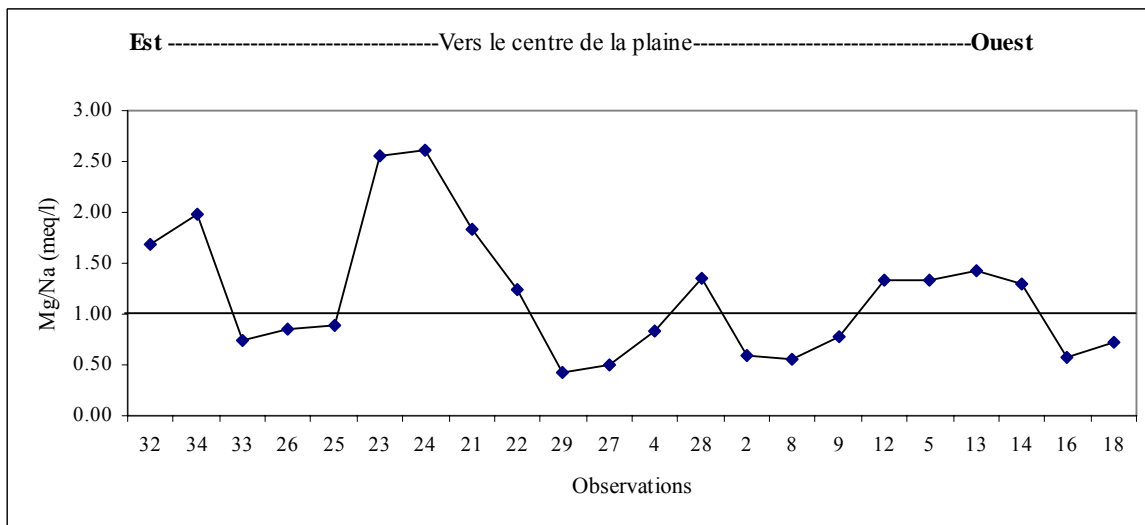
Axe Nord-Sud (Partie Est)

Au niveau de la zone Ouest (figure N° 61), le mélange des eaux sulfatées et chlorurées décrit dans l'étude du rapport SO_4/Cl se confirme avec dans ce cas une légère dominance du sodium.



**Figure 61 : Evolution du rapport (Mg/Na)
Axe Nord-Sud (Partie Ouest)**

L'axe Est-Ouest semble être partagé entre le sodium et le magnésium. La différence avec le graphique du rapport SO_4/Cl selon cette direction est dans l'évolution du sodium qui se fait selon le cas avec les chlorures et les sulfates. (Figure N° 62)



**Figure N° 62 : Evolution du rapport (Mg/Na)
Axe Est-Ouest**

4. Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines:

Les eaux de la zone Est de la plaine sont sulfatées où cet élément dépasse jusqu'à 1.5 fois les chlorures. C'est une zone proche des aires d'alimentation et les eaux ne sont pas trop chargées en sels (Figure N° 63). Dans cette zone qui correspond au "CHICHA" au sud de Branis. Les teneurs en chlorures sont relativement faibles. Donc l'influence du diapir n'atteint pas cette zone (absence du faciès chloruré).

Vers le centre, les eaux deviennent chlorurées. Nous pensons que ces eaux proviennent du nord (contact avec le diapir). Les eaux de ruissellement après lessivage du dj. El-Melah s'infiltrent à partir de la surface. Ces eaux sont chargées et l'absence du faciès sulfaté est due en grande partie à l'importance des concentrations des chlorures qui dominent les sulfates.

Vers l'Ouest, on trouve cependant un mélange des eaux sulfatées avec les eaux chlorurées. Ce mélange est le produit de la convergence des écoulements souterrains provenant du Nord et de l'Est.

Par ailleurs, la présence de deux observations chlorurées (N° 27 et N°29) et une observation sulfatée sodique (N° 4) à la limite ouest de la zone à dominance sulfatée nous amène à penser que le mélange commence déjà au contact des eaux chlorurées venant du Nord et sulfatées venant de l'Est au niveau des observations sus citées mais un peu plus vers le sud de la plaine au niveau du périmètre El-Hazima (zone non couverte par des forages).

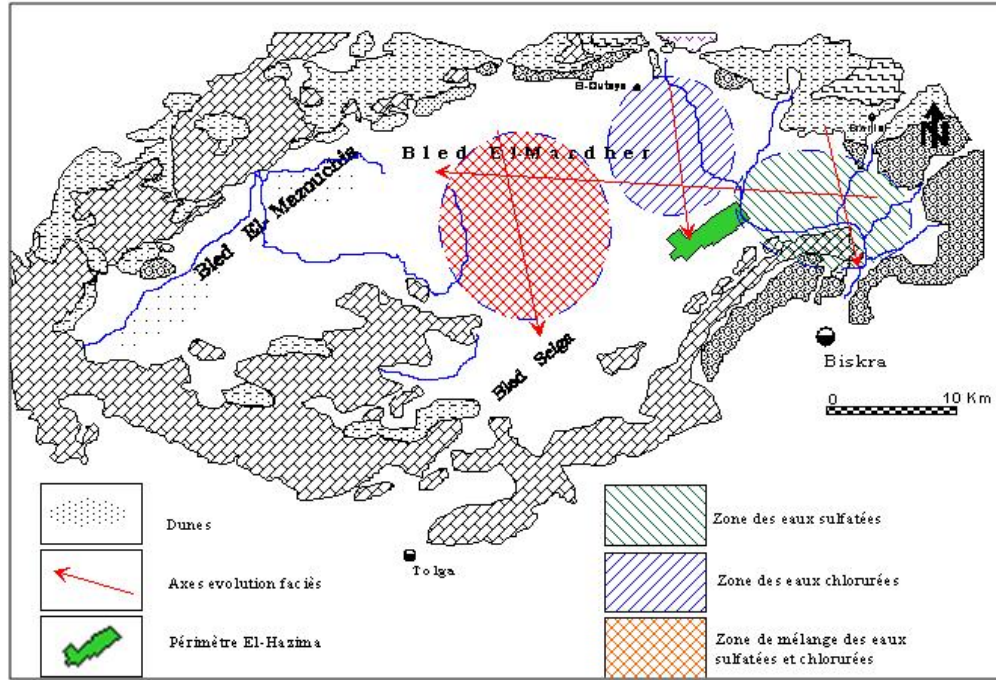


Figure N° 63 : Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimiques

5. Faciès chimique des eaux du forage EL-Outaya (1990 – 1999):

Ces eaux présentent un faciès sulfaté sodique. On ne remarque pas de changement pendant la période du suivi. Mais on note que le rapport SO_4/Cl change légèrement dans le temps. Il est relativement stable. Figures N° 64 et N° 65. Nous pensons que les fluctuations remarquées sur les diagrammes traduisent plutôt des erreurs dues aux manipulations au laboratoire qu'une évolution proprement dite.

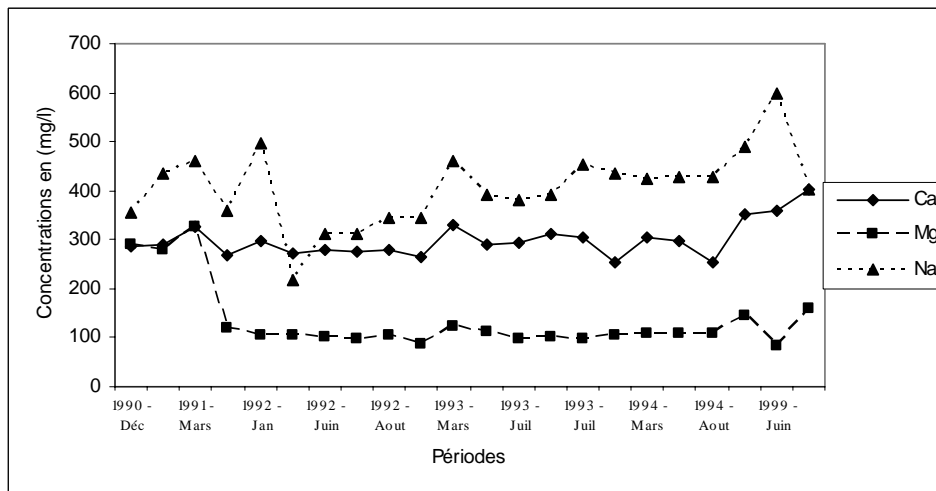
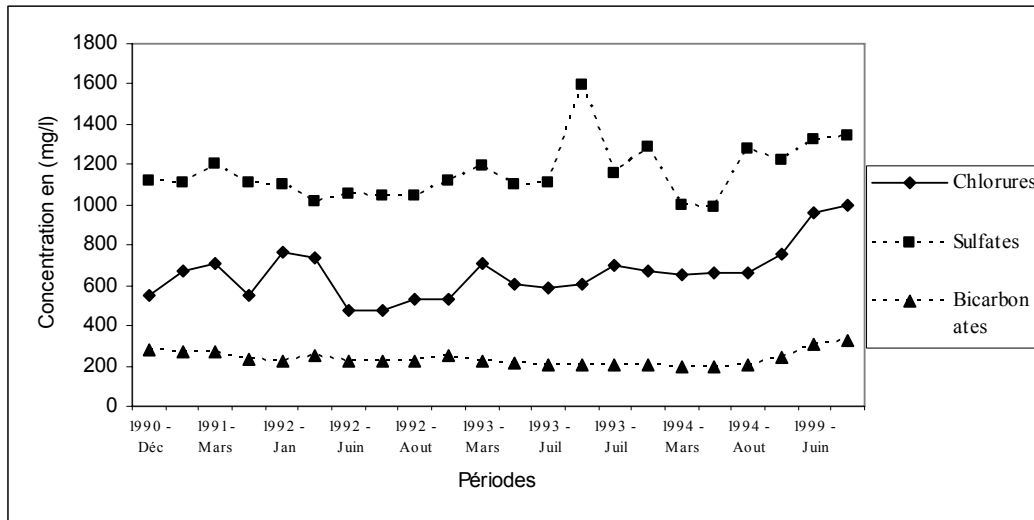


Figure N° 64 : Evolution du chimisme (les cations)



**Figure N° 65 : Evolution des anions
des eaux du forage El-Outaya (1990 – 1999)**

6. Faciès chimique des eaux du barrage Fontaine des Gazelles:

Ces eaux sont sulfatées magnésiennes. Notons que ce faciès peut évoluer vers le faciès chloruré après séjour dans la cuvette du barrage. Ce changement sera causé par l'effet de l'évaporation intense dans la région. Cette évolution est très probable. Elle est possible grâce à la combinaison de deux facteurs internes des eaux:

- Le rapport SO_4/Cl proche de "1" (1.24). Les eaux sont secondairement chlorurées.
- Les sels de sulfates précèdent les chlorures dans l'ordre de précipitation.

III : Interprétation globale des paramètres chimiques mesurés

Avant d'aborder l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya, il est important de rappeler certains principes de la solubilité de quelques sels. On s'intéresse aux sels des évaporites dont la dissolution a donné les faciès déjà cités. Il s'agit de: Chlorure de sodium (NaCl), Sulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), Sulfate de magnésium (MgSO_4)

Les eaux des roches évaporitiques, source de sels solubles, renferment en proportion variable les anions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , et les cations Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} et K^+ .

Ces sels dissous possèdent généralement une grande solubilité dans l'eau comme en témoigne le tableau N° 33 concernant quelques espèces minérales simples.

Parmi ces différents sels simples, seul le gypse présente une faible solubilité et sera le premier à précipiter.

Tableau N° 33 : Solubilité des différents sels dans l'eau à 20° C
d'après J.D'ANS et E.LAX in G. GAUCHER et S. BURDIN, 1974. (In Schoeller 1962)

Désignation du sel	Formule chimique	Solubilité en g pour 100 cc d'eau à 20°C
Chlorure de sodium	NaCl	36.0
Sulfate de sodium	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	19.3
Sulfate de magnésium	MgSO_4	34.8
Sulfate de calcium	Ca SO_4	0.19

La solubilité de ces sels de certaines espèces minérales dans l'eau augmente avec la température.

La figure N° 66 montre que cette augmentation n'est pas linéaire. Elle est importante dans le cas des sulfates de sodium. Alors qu'elle est faible pour les chlorures de sodium.

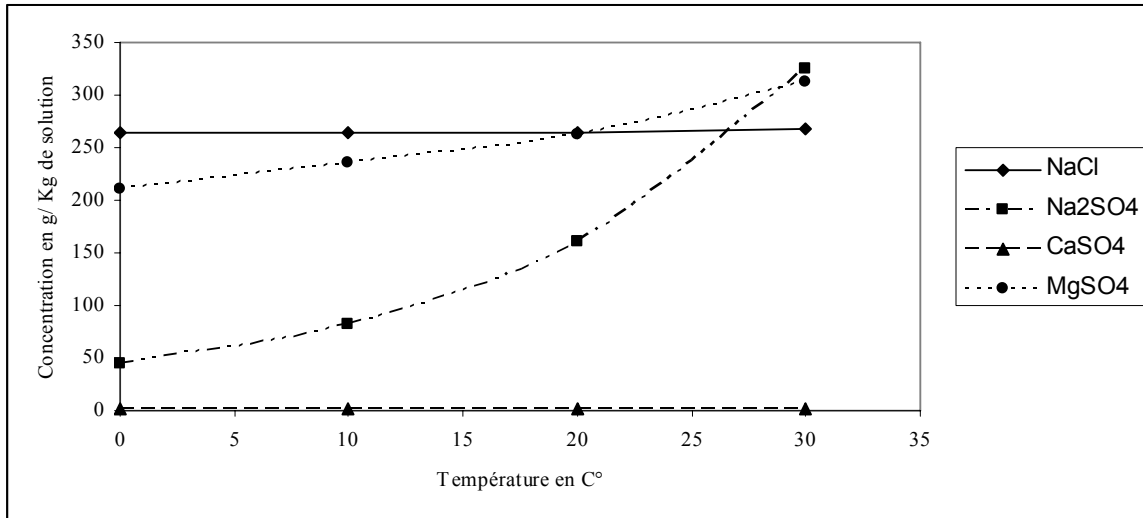


Figure N° 66 : Evolution de la solubilité dans l'eau de quelques sels à différentes températures (en g par kg de solution); d'après LANDOLT et BORNSTEIN (In Schoeller – 1962)

Il est important, par ailleurs, de citer un autre facteur qui influe sur la solubilité de certains sels. Il s'agit de la composition ionique de la solution dissolvante.

Cette solubilité augmente avec l'augmentation de la composition ionique de la solution dissolvante "La solubilité du sulfate de chaux augmentant avec la teneur en chlorures, les eaux chlorurées sodiques peuvent avoir une teneur en SO₄ et Ca plus élevée que les eaux seulement sulfatées calciques". (Schoeller 1962). L'exemple du gypse (tableau N° 34 et figure N° 67) est particulièrement intéressant puisque sa solubilité dans une solution de NaCl augmente jusqu'à un certain taux de halite puis diminue progressivement.

Tableau 34 : Solubilité du gypse en fonction de la teneur en NaCl dans la solution dissolvante

NaCl	g/kg	0.00	2.92	14.62	58.50	131.60	204.70	292.60
Ca SO ₄ 2H ₂ O	g/kg	2.10	3.15	4	6	7.30	6.30	5.30
À 20°	Me/kg	31	40	59	88	107	93	78

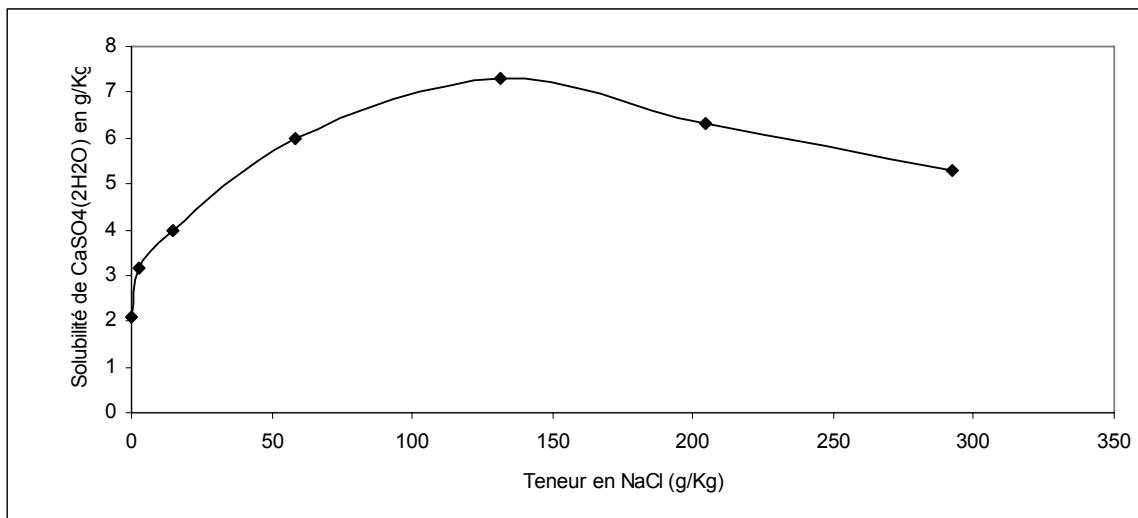


Figure N° 67 : Solubilité du gypse en fonction de la teneur en NaCl dans la solution dissolvante

I. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques:

Cette analyse concerne les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines de la plaine. Elle nous permettra d'avoir une vision globale des relations qui peuvent exister entre différents paramètres mesurés ainsi que les tendances que présentent les observations. Ces relations vont être interprétées au fur et à mesure.

Nous commençons en premier lieu par une simple matrice de corrélation entre les variables. Puis nous passerons à une classification selon la méthode C.A.H (Classification ascendante hiérarchique).

1.1. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques:

On remarque une dépendance étroite entre quelques paramètres (Ca, Mg, Na, SO₄, Cl). Cette relation se traduit par les coefficients de corrélation se rapprochant de "1" (tableau N° 35). Les liens significatifs peuvent être probablement attribués à des origines communes de ces éléments.

Tableau N° 35 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques mesurés

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	Con	pH	NO3
Ca	1									
Mg	0.699	1								
Na	0.902	0.635	1							
K	0.600	0.546	0.480	1						
HCO3	0.574	0.687	0.559	0.343	1					
SO4	0.901	0.844	0.858	0.606	0.635	1				
Cl	0.868	0.638	0.970	0.444	0.533	0.783	1			
Con	0.921	0.787	0.949	0.507	0.582	0.916	0.938	1		
pH	0.188	0.260	0.204	0.222	0.102	0.183	0.246	0.257	1	
NO3	0.346	0.453	0.514	0.315	0.246	0.452	0.477	0.528	0.183	1

1.2. Classification ascendante hiérarchique (C.A.H):

L'objectif est de faire ressortir les tendances chimiques dans ces eaux. Ces tendances sont en réalité une approche sur les origines dans le cas des variables. Alors que pour les observations, ces tendances traduisent notamment des classes de la minéralisation. On a choisi de traiter nos résultats par la méthode de classification ascendante hiérarchique **CAH**.

1.2.1. Principe de la méthode

Le traitement des données est effectué à l'aide du logiciel XLSTAT 2007.1 - Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (version Démo).

La méthode dans la classification ascendante hiérarchique (CAH) choisie pour notre cas est celle de Ward ; une méthode reposant sur un critère d'optimisation assez naturel. Selon Gilbert Saporta, (1990), elle constitue la meilleure méthode de classification hiérarchique sur données euclidiennes. Elle consiste à classer ("**n**" variables, "**p**" observations); telle que chaque observation comporte **n** variables mesurables. Les éléments à classer sont des vecteurs, et l'ensemble qu'ils constituent est muni d'une distance euclidienne : on peut alors construire une matrice des distances entre les variables et les observations. On définit ensuite un critère d'affectation ou d'"inertie" de regroupement de ces vecteurs, c'est à dire une règle de calcul des distances entre les groupements disjoints de variables ou observations. Les deux groupements dont la distance est la plus faible (selon ce critère) se

réunissent alors, et on itère le processus jusqu'à regroupement complet des classes. On peut représenter la classification ascendante hiérarchique par un arbre, appelé dendrogramme ou arbre de classification. Nous avons utilisés cette classification à la fois pour les variables et pour les observations:

1.2.2. Classification des variables:

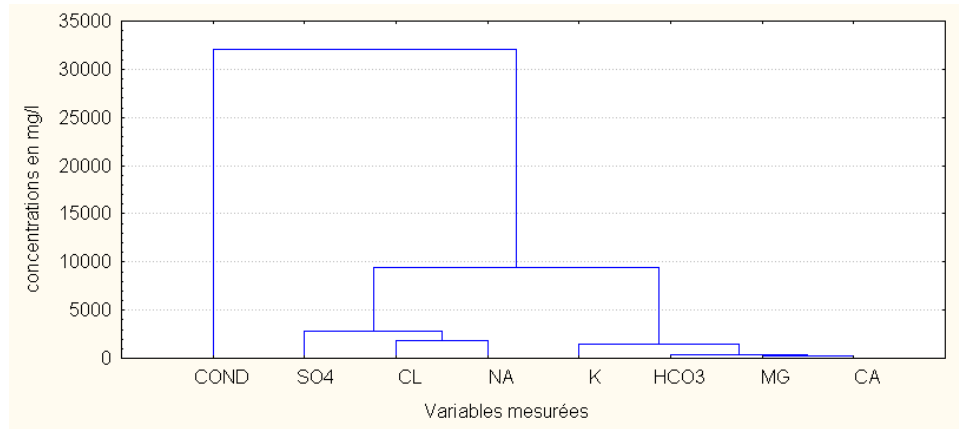


Figure N° 68 : Classification ascendante hiérarchique des variables (C.A.H)

Le graphique de la classification des variables (figure N° 68) montre tout d'abord la participation de tous les paramètres mesurés dans la conductivité mais à des degrés variables. On a évité l'utilisation du pH et des nitrates dans cette classification pour ne pas perturber le caractère naturel des autres variables mesurées (le logiciel suppose que les unités de toutes les variables sont identiques). On remarque, par ailleurs, le regroupement des paramètres mesurés en deux tendances:

- ✓ Un premier groupe représentant une étroite liaison entre le sodium et les chlorures qui sont liés à leur tour par les sulfates.
- ✓ Un deuxième groupe est constitué des paramètres restants, la liaison se fait comme suit:
 - Une dépendance entre calcium et magnésium qui sont tous deux en relation étroite avec les bicarbonates.
 - Le Tout en relation avec le potassium.

1.2.3. Classification des observations:

Une classification par la même méthode (CAH) a été appliquée aux observations. Le choix des classes est basé sur la matrice de proximité (Distance euclidienne) en regroupant des différentes classes selon la variabilité des observations (dissimilarité). Ce qui correspond dans notre cas à l'importance de la minéralisation.

Le principe est basé sur la classification des observations autour d'un centre de gravité (Barycentre) pour chaque variable dans chaque classe (tableau N° 36).

Tableau 36: Barycentres (Centre de gravité) des variables par classes

Classe	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	Con
1	199.500	199.900	429.600	3.700	147.150	970.700	743.850	3593.000
2	307.833	232.500	870.500	5.333	193.167	1535.833	1254.000	5641.667
3	123.000	107.375	143.125	2.625	122.875	498.875	284.000	1553.750

Puis un centre de gravité pour l'ensemble de la classe (tableau N° 37).

Tableau N° 37 : Barycentres (Centre de gravité) des classes

Classe	Distance min au barycentre	Distance moy au barycentre	Distance max au barycentre	Points d'eau																		
				1	2	3	4	5	6	7	9	11	12	13	14	15	16	18	19	20	22	28
1	144.153	554.927	1321.308																			
2	120.117	299.349	528.479	8	10	17	27	29	30													
3	145.907	392.05	713.094	21	23	24	25	26	32	33	34											

Enfin, le logiciel calcule la distance (Ecart) entre les centres de gravités (Barycentres) de ces classes (tableau N° 38)

Tableau N°38 : Distances entre les barycentres des classes

Classe	1	2	3
1	0	2232.930	2165.570
2	2232.930	0	4394.438
3	2165.570	4394.438	0

Le plus important dans cette analyse c'est que le centre de gravité adopté pour chaque étape de l'analyse (le barycentre) n'est pas seulement une moyenne calculée sur l'ensemble des résultats, mais une observation parmi celles qui ont été introduites pour le traitement.

1.2.3.1. Interprétation des résultats des observations:

Le traitement statistique des observations par la méthode ci-citée fait ressortir trois classes de minéralisation (figure N° 69):

- Une classe (3) de faible minéralisation, la valeur repère de la conductivité n'atteint pas 1600 μ .simens. cm^{-1} . Il s'agit ici des eaux faiblement chargées par rapport à l'ensemble des échantillons analysés.
- Une classe (1) de minéralisation moyenne avec une conductivité de l'ordre de 3593 μ .simens. cm^{-1} . Cette classe est caractérisée par des concentrations assez élevées en sodium, sulfates et chlorures.
- Une classe (2) de minéralisation élevée avec une conductivité correspondante aux valeurs extrêmes. Les eaux de cette classe sont très chargées.

L'observation du tableau N° 38 "la distance entre les centres de gravité (barycentres) des classes", montre que la classe (1) est proche à la fois de la classe (2) et la classe (3). Alors que l'écart entre la classe (2) et (3) est important. Cet écart confirme la variabilité importante entre les valeurs maximales et minimale de la minéralisation des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya.

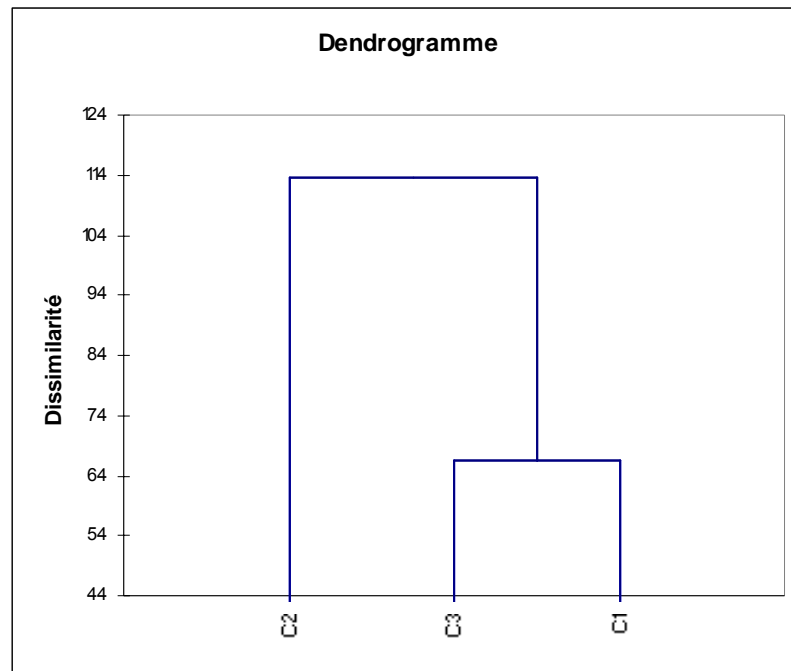


Figure N° 69 : Classification ascendante hiérarchique des observations (C.A.H)

2. Origine des éléments chimiques:

2.1. Origine des sulfates et des chlorures:

2.1.1. La relation SO₄-Cl:

La relation montre que les eaux de la région sont riches en sulfates et en chlorures. La façon avec laquelle évolue le nuage de points, montre que les deux éléments semblent évoluer ensemble mais de manières différentes. Les points s'alignent autour de trois droites de différentes pentes, ce qui permet de les classer en trois groupes (figure N° 70):

- Un premier groupe (1) présente une pente relativement faible. Les eaux s'enrichissent plus rapidement en sulfates atteignant une teneur de 25 meq/l pour une teneur maximale en chlorures de 15 meq/l. Il s'agit sans doute des eaux sulfatées présentant des teneurs relativement faibles en chlorures (500 mg/l).
- Le deuxième groupe (2) évolue selon une pente plus forte. Elle traduit une évolution rapide des deux paramètres. Ce groupe démarre à 20 meq/l pour les SO₄ et les Cl pour atteindre une valeur extrême de 35 meq/l pour les deux paramètres. Ce groupe indique une augmentation de la solubilité des sulfates dans une solution dissolvante riche en NaCl. Figure N° 67. Ces eaux sont mixtes et les deux faciès sont présents ensemble.
- Le troisième groupe (3) est caractéristique des eaux chlorurées. La pente est plus forte et les chlorures (valeur max = 27 meq/l) évoluent plus rapidement que les sulfates (15 meq/l).

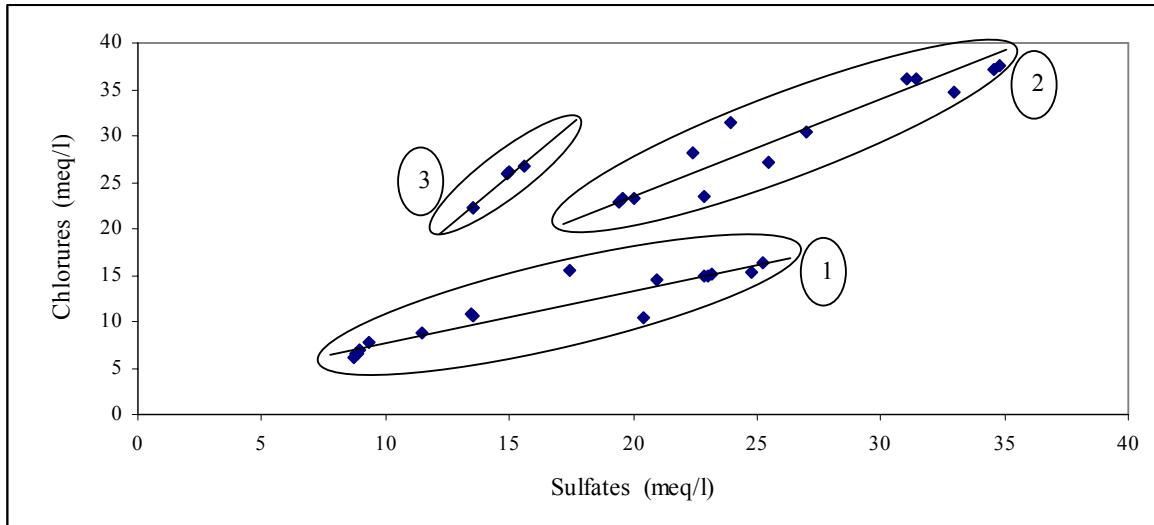


Figure N° 70: La relation (SO4-Cl)

2.1.2. La relation Conductivité- SO4/Cl:

On constate que le nuage de points se regroupe selon trois tendances (Figure N° 71). Cette relation confirme les résultats de la classification ascendante hiérarchique des observations. Ces tendances sont:

- Pour des valeurs comprises entre 1000 et 2500 μ Siemens.cm⁻¹, la conductivité est beaucoup plus influencée par les sulfates. Ce qui correspond, sur terrain, à la zone Est de la plaine (Chicha) où les eaux sont moins chargées et proche de l'air d'alimentation. Dans cette zone on ne remarque pas l'influence du diapir. Ces eaux sont le résultat de la dissolution des formations du Néogène.
- Pour les valeurs comprises entre 3200 et 3750 μ Siemens.cm⁻¹, la conductivité est influencée par l'effet combiné des sulfates et des chlorures. Ce qui correspond d'après les faciès chimiques à la zone de mélange dans la zone centre et ouest de la plaine.
- Pour les valeurs supérieures à 3750 μ Siemens.cm⁻¹, les eaux sont chlorurées. Elles sont très chargées et influencées par la dissolution de la halite au nord de la plaine.

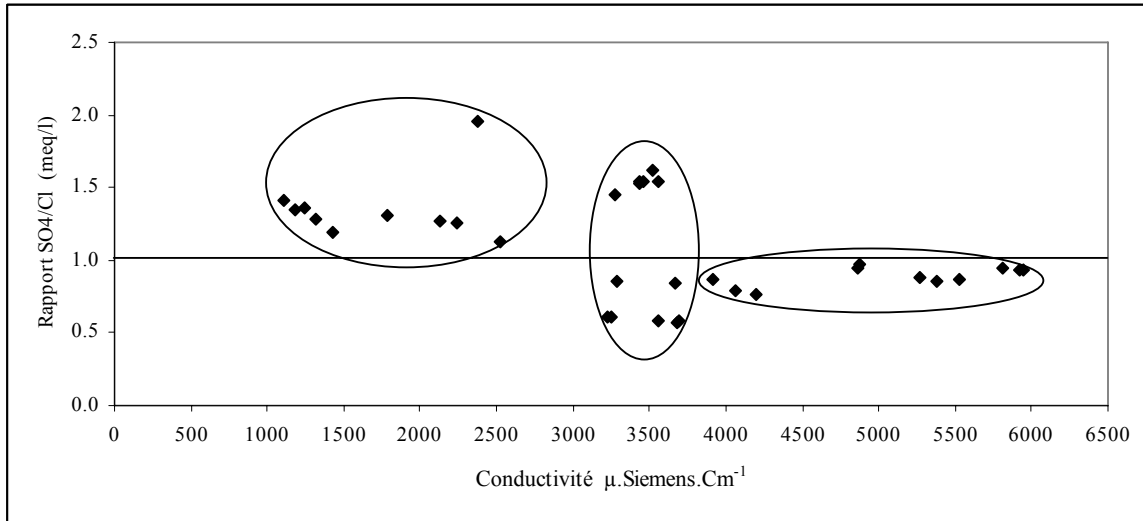


Figure N° 71: La relation (SO4/Cl - Conductivité)

Par ailleurs, On sait qu'une conductibilité élevée traduit, soit des pH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée, celle-ci pouvant être naturelle ou due à des rejets salins. Pour chercher une influence probable du pH sur la conductivité des eaux, nous avons testé la relation qui peut exister entre la conductivité et le potentiel d'hydrogène (pH). Figure N° 72. Avec un coefficient de détermination (R^2) de l'ordre de 0.0659. Il est tout à fait clair que cette relation n'est pas significative et les sels dissouts sont la cause principale des fortes valeurs de la conductivité.

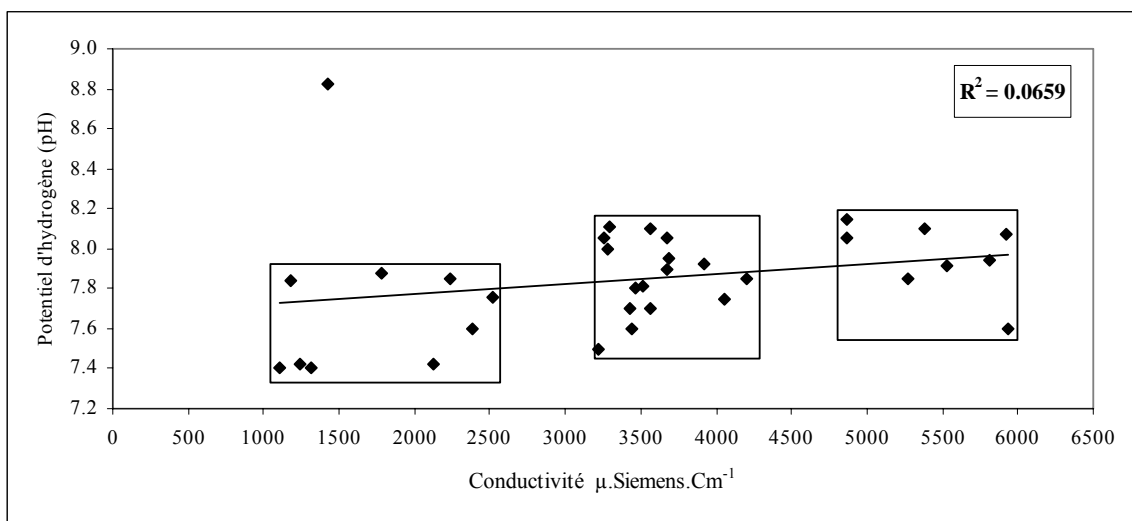


Figure N° 72: La relation pH-Conductivité électrique.

2.2. Origine du sodium

2.2.1. La relation Na-Cl:

Le graphe de la figure N° 73 montre un alignement des points. Le sodium et les chlorures doivent avoir la même origine en l'occurrence la dissolution de la halite. Mais on remarque que vers la fin du nuage des points (pour des valeurs supérieures à 35 meq/l pour les deux éléments), le sodium présente un excès. Cet excès peut être expliqué par une origine autre que le NaCl. L'échange de base par exemple. Bien que la halite reste le sel principal qui génère le sodium et les chlorures dans les eaux étudiées.

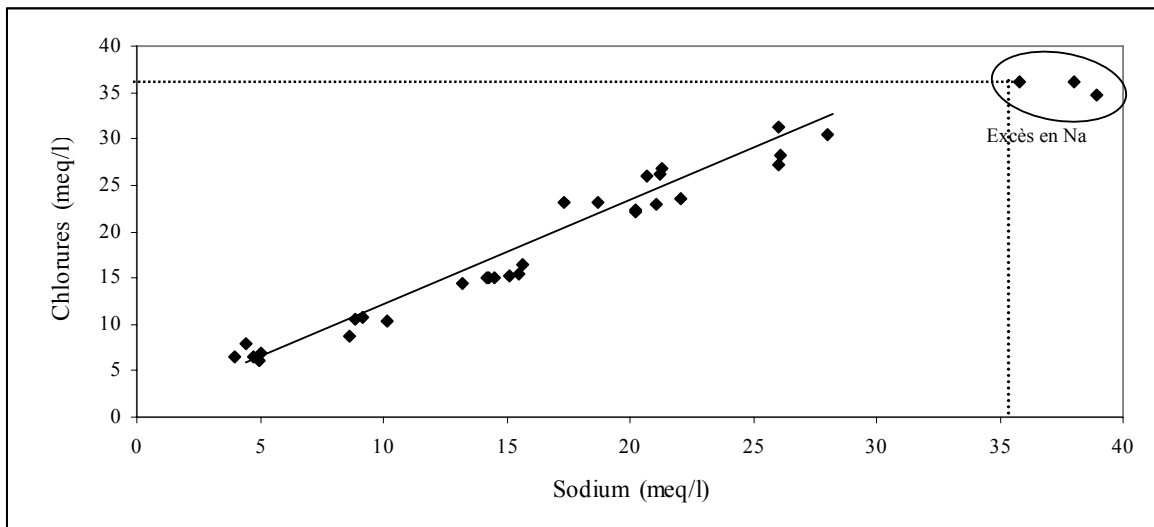


Figure N° 73 : La relation (Na-Cl)

2.3. Origine du calcium:

L'origine de l'ion calcium est obtenue en majorité de l'attaque par CO₂ dissous (acide carbonique) des roches calcaires ou par simple dissolution des roches gypseuses. Dans l'eau, il peut être échangé, sous certaines conditions, contre le sodium des roches traversées (argile). Une substitution entre magnésium et calcium dans les eaux est aussi possible. (Schoeller, 1962). Il participe aux phases de précipitations avec les bicarbonates dans l'aragonite et la calcite.

2.3.1. La relation $\text{Ca}^+ / (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$:

L'ion calcium n'est pas important dans les eaux étudiées. Le diagramme de la figure N° 74 montre que les bicarbonates et les sulfates sont en excès par rapport au calcium et évoluent avec d'autres cations.

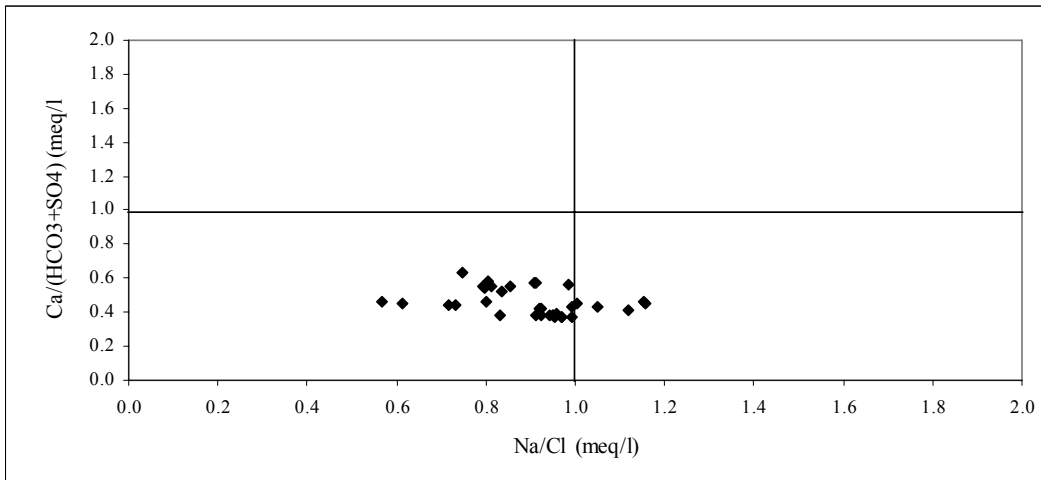


Figure N° 74: La relation $(\text{Ca}^+ / (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-)$

La participation du calcium en phase de précipitation (calcite, aragonite) reste la seule explication acceptable pour justifier les faibles quantités enregistrées de cet élément. On doit donc séparer les HCO_3 des SO_4 pour mieux affiner l'origine du calcium. Nous allons, alors, nous intéresser aux relations suivantes.

2.3.2. La relation $\text{Ca}^+ / (\text{HCO}_3) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

Le diagramme $\text{Ca}^+ / (\text{HCO}_3) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ (figure N° 75) montre que la totalité des points sont en excès par rapport aux bicarbonates. Le calcium dissout dans l'eau doit évoluer donc avec un autre élément supposé être le sulfate.

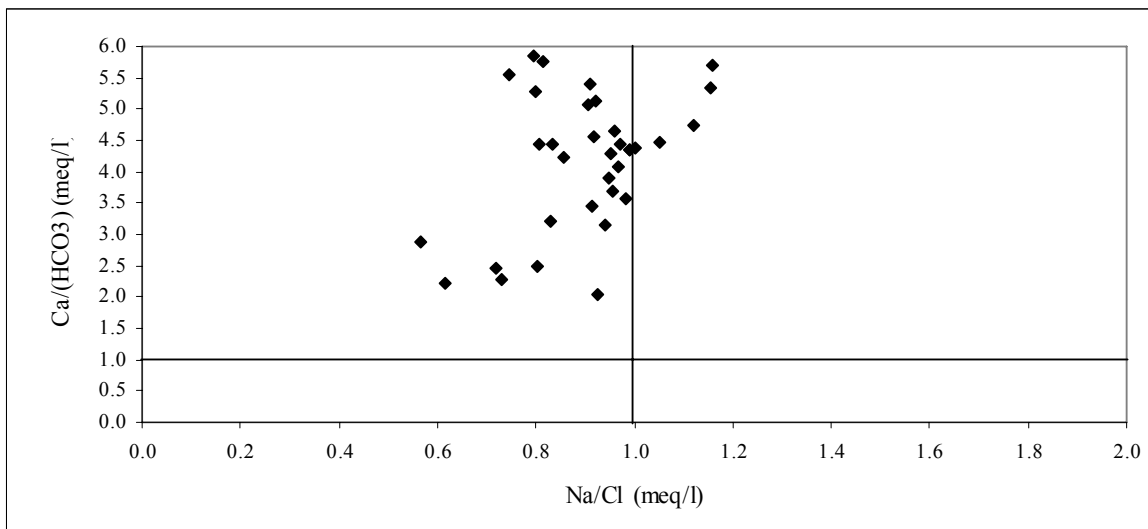


Figure N° 75: La relation $(Ca^{+}/(HCO3^{-})-Na^{+}/ Cl^{-})$

2.3.3. La relation $Ca^{+}/(SO4^{-})-Na^{+}/ Cl^{-}$:

Dans cette relation (figure N° 76) contrairement à la précédente, il semble que tous les ions calcium présents dans les eaux évoluent avec les sulfates. D'ailleurs, le comportement du nuage de points dans ce diagramme est identique à celui de la relation $Ca/(HCO3+SO4)-Na/Cl$. Une ressemblance qui montre que les bicarbonates n'influence pas le chimisme des eaux étudiées. Les sources génératrices de $HCO3$ sont très faibles ou que les sels des bicarbonates sont sursaturés et se trouvent en phase solide.

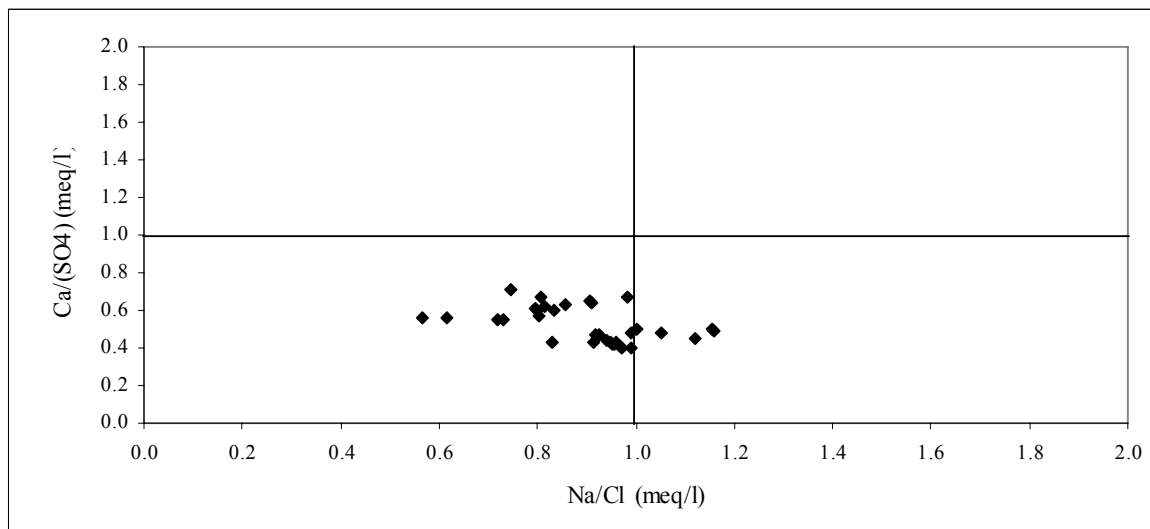


Figure N° 76 : La relation ($\text{Ca}^+ / (\text{SO}_4) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$)

Le calcium dans l'eau de la région provient en majorité de la dissolution des roches évaporitiques.

2.4. Origine du magnésium:

Les faciès chimiques des eaux montrent l'influence du diapir et de la lithologie de l'aquifère Néogène sur les eaux de la région. Les relations qui suivent permettent de déterminer l'origine du magnésium. Ce dernier étant généralement le produit de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonate, de bicarbonate et de magnésite.

2.4.1. La relation $\text{Mg}^{2+} / (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$:

Le diagramme $\text{Mg} / (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4) - \text{Na} / \text{Cl}$ (figure N° 77) montre que l'origine principale du magnésium est la dissolution des sels de sulfates et probablement des bicarbonates soit 85% des échantillons. L'excès qui représente une autre origine est très négligeable (2.9%). Cette autre origine est sûrement liée à la dissolution des roches évaporitiques.

Par ailleurs, la projection des points sur ce diagramme met en évidence l'existence d'une tendance à un échange de base entre le sodium et le magnésium. Il est relativement faible et ne représente que 12 %. Nous pensons que ce faible pourcentage est dû au

nombre d'échantillons prélevés dans les secteurs de ces eaux. Cet échange de base explique l'excès remarqué dans la relation Na-Cl (figure N° 73). La conséquence de ce phénomène est l'apparition des eaux sulfatées sodiques.

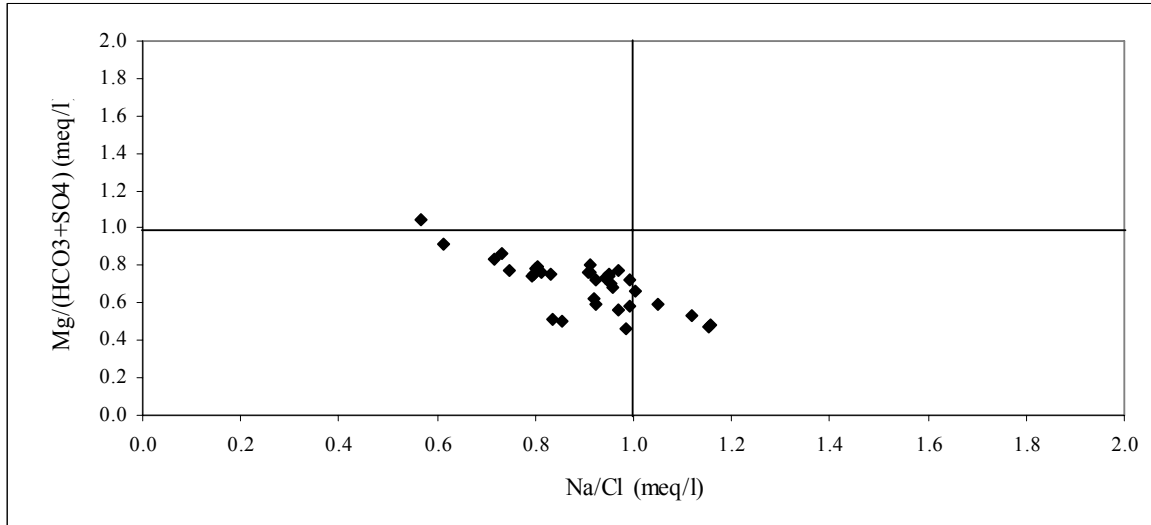


Figure N° 77: La relation ($Mg^{2+}/(HCO_3+SO_4^{2-})-Na^+/Cl^-$)

2.4.2. La relation Mg/(HCO3)-Na/Cl:

Comme pour le calcium, les quantités en réaction de l'ion magnésium dépassent de loin celle des bicarbonates (figure N° 78). Ceci exclu la liaison du magnésium avec les bicarbonates et confirme son origine évaporitique.

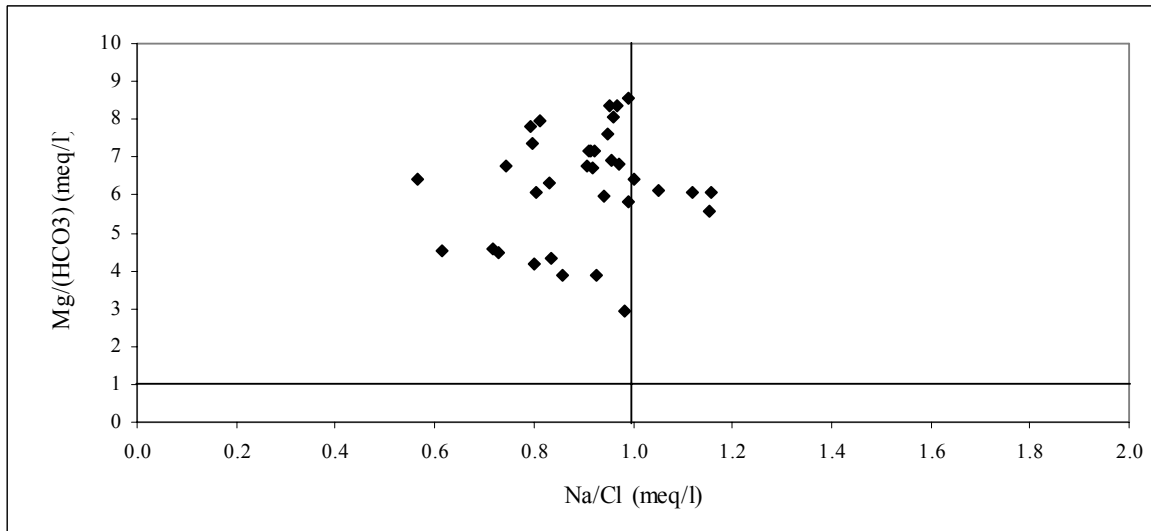


Figure 78: La relation ($Mg/(HCO_3)-Na/Cl$)

2.4.3. La relation (Mg/SO4)-Na/Cl:

Même remarque pour le calcium. Bien qu'il existe quelques échantillons ayant des teneurs en magnésium en excès par rapport aux sulfates, le magnésium évolue mieux avec les sulfates plutôt qu'avec les bicarbonates (figure N° 79). Son origine est à relier aux formations évaporitiques.

"Le magnésium et le calcium accompagnent les sulfates. L'augmentation des sulfates entraîne non seulement l'augmentation du calcium mais aussi celle du magnésium. Le gypse renferme toujours une proportion plus ou moins élevée en magnésium. La présence des sulfates et du magnésium en fortes concentrations caractérise ainsi les eaux du Sahara " (Schoeller 1962).

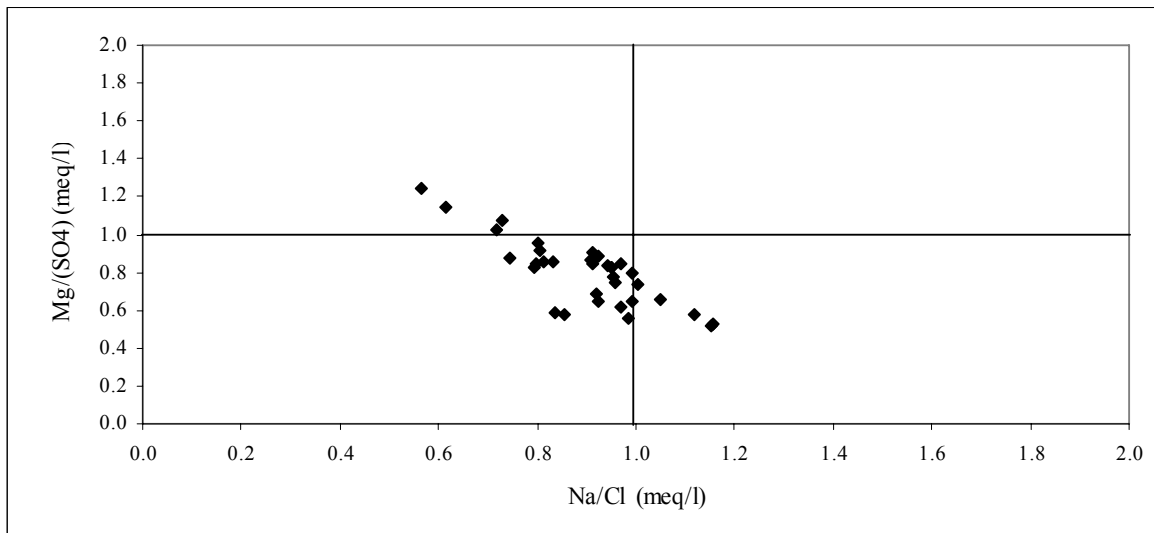


Figure 79: La relation (Mg/SO4)-Na/Cl)

2.4.4. La relation SO4-Mg:

Le diagramme de la figure N° 80 montre que le nuage de points se regroupe en deux pôles. Cette séparation donne l'impression de l'existence de deux types d'eau. En faite, il s'agit de la même eau et nous pensons que cette séparation est provoquée par la variabilité des valeurs du magnésium. Les sulfates étant en évolution uniforme. Le magnésium évolue entre 80 et 160 mg/l pour des valeurs de sulfates entre 400 - 800 mg/l et reprend à une valeur de 210 mg/l jusqu'à 250 mg/l pour des valeurs de sulfates entre 800 – 1600 mg/l. Cette séparation des points portés sur le diagramme peut probablement être due à l'opposition des eaux de fortes et de faibles teneurs en sels de sulfates de magnésium. Par

ailleurs, l'existence de ces deux pôles laisse à supposer l'intervention d'autres phénomènes géochimiques qui restent à vérifier.

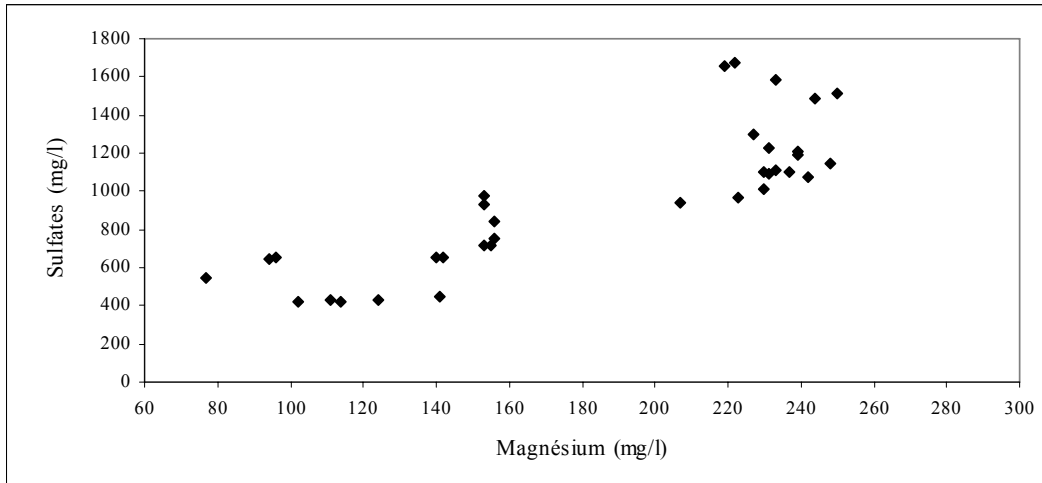


Figure N° 80: La relation (SO₄-Mg)

2.5. L'origine du potassium (K):

Les valeurs de potassium dans les eaux souterraines de la nappe sont au dessous des limites exigées par la norme en vigueur. Son origine est soit liée aux argiles potassiques soit à l'utilisation les engrais du type (NPK).

2.6. La relation entre les paramètres de la minéralisation (SO₄²⁻/ Cl⁻ - Mg²⁺/ Na⁺):

La combinaison des éléments dominants des eaux dans le même diagramme (figure N° 81) sous forme de rapports caractéristiques (SO₄/Cl et Mg/Na) résume les types des faciès (déjà décrits) caractérisant les eaux de la région.

Avec un rapport SO₄/Cl variant entre 1.5 et 2, le faciès sulfaté magnésien n'est pas influencé par le diapir triasique. Au contact de ces eaux (sulfatées magnésiennes) avec les eaux chlorurée, les eaux deviennent chlorurées sodiques à sulfatées. Enfin et dans les zones à forte influence du diapir les eaux sont chlorurées sodiques.

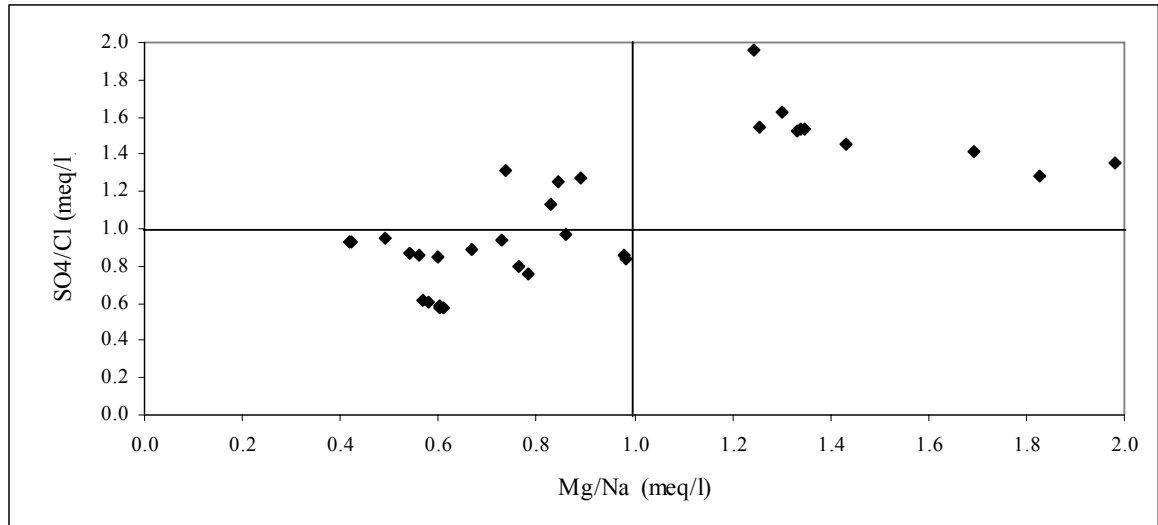


Figure N° 81: La relation (SO4/Cl – Mg/Na)

2.7. Evolution spatiale des éléments chimiques:

Nous avons choisi de suivre l'évolution de cations et anions dans la plaine suivant les axes d'écoulement des eaux souterraines, (carte piézométrique figure N°38). Il s'agit des directions déjà utilisé en haut (figure N° 54).

2.7.1. Evolution des anions:

Cette évolution est illustrée par la figure N° 82. Nous remarquons tout d'abord que les bicarbonates n'influent pas le chimisme des eaux de la région. Ils sont presque stables et caractérisés par de faibles teneurs par rapport aux sulfates et aux chlorures. Concernant ces deux derniers, ils sont toujours en concurrence et la dominance de l'un sur l'autre n'est visible que dans l'axe Nord-Sud au centre et à l'Est. L'augmentation progressive des concentrations est visible surtout sur l'axe Est-Ouest. En effet les eaux se chargent davantage en sels durant leurs parcours souterrain avec la dissolution des roches traversées. En plus, l'augmentation des chlorures de sodium dans l'eau entraine aussi l'augmentation des sulfates. Dans la partie Ouest, on a un mélange des faciès ce qui explique l'instabilité des concentrations relatives de ces éléments.

2.7.2. Evolution des cations:

La présence du magnésium et du sodium dans les eaux souterraines est plus importante que le calcium selon les directions choisies (figure N° 82)

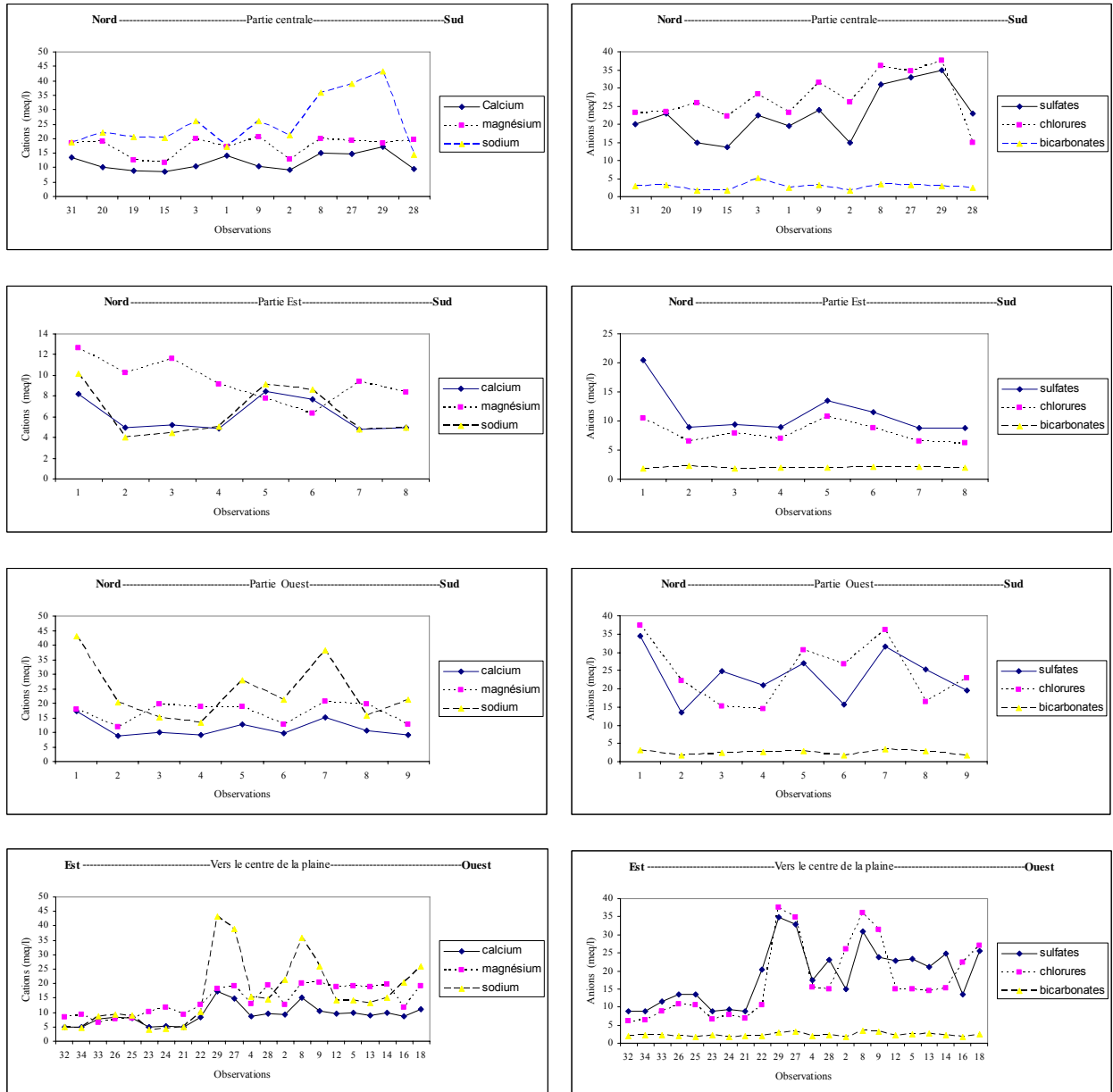


Figure N° 82: Evolution spatiale des anions et des cations selon les axes d'écoulement préférentiels

3. Processus géochimiques de l'acquisition de la salinité des eaux souterraines:

Une eau de composition chimique donnée se concentre par évaporation. Si aucune précipitation ou dissolution n'intervient au cours de cet événement, la molalité totale de chacun des éléments en solution augmente proportionnellement au facteur de concentration.

L'augmentation des concentrations des espèces aqueuses n'est pas proportionnelle au facteur de concentration. Certains peuvent augmenter fortement ou faiblement, d'autres peuvent même diminuer lorsque la concentration totale augmente. (A.DROUBI & AL. 1976)

L'identification des processus géochimiques passe d'abord par la détermination d'un indicateur de facteur de concentration (traceur) et de voir si l'augmentation par concentration est seul responsable des variations chimiques observées. Valles (1987), Barbiero (1992))

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. Il doit répondre à deux critères :

- l'élément pris en compte ne doit pas précipiter au cours de la concentration,
- il ne doit pas s'échanger sur les argiles du milieu.

Un tel traceur aide à prévoir les changements affectant la composition chimique des solutions naturelles (A.DROUBI & AL. 1976).

On peut en effet penser que l'ion chlorure est généralement considéré comme traceur car il ne précipite qu'à de fortes valeurs de salinité. Il est considéré comme un traceur stable et l'élément chimique le plus conservatif des évaporites. Très soluble, Il entre rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et il est peu influencé par l'intervention des bactéries. 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.

3.1. Détermination du facteur de concentration (Fc):

Le facteur de concentration (Fc) est estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorure d'une eau et la plus petite teneur en chlorure observée dans l'ensemble des échantillons.

On procède par la suite à un classement de nos analyses selon leur teneur en ion chlorure, et suivre l'évolution de la molalité (méq/l) de chaque élément majeur (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) depuis les échantillons d'eau les plus dilués, aux échantillons les plus concentrés, en fonction de la molalité croissante de Cl^- . Le nuage de points représentant les données de terrain ne s'oriente jamais suivant une pente supérieure à l'unité cela indique que la détermination du facteur de concentration des solutions à partir de leur molalité en ions chlorures est acceptable. (*L. BARBIERO & al 1992*).

3.2. Evolution des paramètres physico-chimiques:

3.2.1. La conductivité:

On sait que la conductivité des eaux étudiées provient de la forte salinité. L'évolution de la conductivité représente donc l'évolution de cette salinité. Le diagramme (figure N° 83) montre que la droite de l'évolution de la conductivité est parallèle à celle du facteur de concentration et se fait selon la même pente. Ce qui confirme la possibilité de l'utilisation des chlorures pour l'estimation du facteur de concentration.

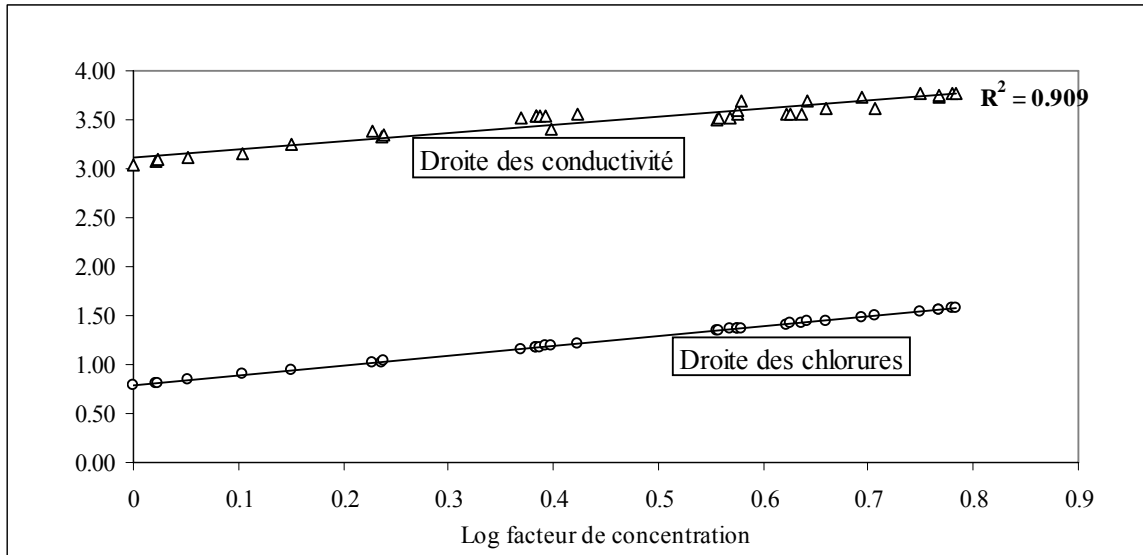


Figure N° 83: Relation entre facteur de concentration (Fc) et conductivité

3.2.2. L'alcalinité carbonatée:

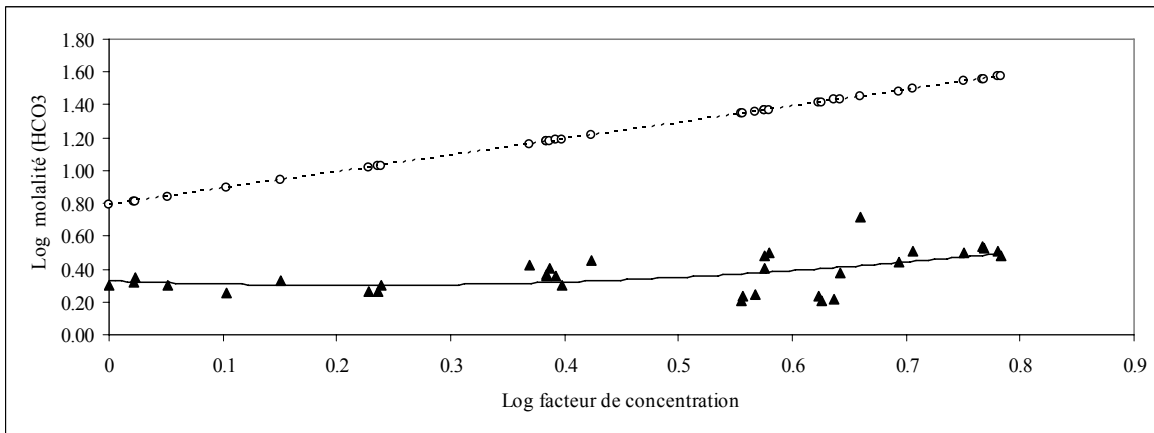


Figure N° 84: Diagramme de concentration de l'alcalinité carbonatée

Le diagramme (figure N° 84) montre que la molalité de l'alcalinité carbonatée n'évolue pas avec la concentration globale et semble être prélevée de la solution pour participer à des précipitations dès le départ jusqu'à une valeur de log (Fc) de l'ordre de 0.4 où on note un léger apport de l'ion bicarbonate. Cet apport provoque une faible augmentation de la concentration de ce dernier.

3.2.3. Le calcium:

Le diagramme (figure N° 85) montre que la concentration du calcium est moins importante que les chlorures mais il suit une certaine évolution avec le facteur de concentration. On remarque cependant une légère diminution qui se fait sentir puis une reprise de l'évolution (participation à des précipitations puis un apport de cet élément qui fait augmenter la concentration).

L'importance de l'ion calcium par rapport aux bicarbonates indique son excès dans les eaux de la région dû aux formations évaporitiques.

3.2.4. Le sodium:

Le diagramme (figure N° 86) montre que le sodium suit parfaitement le facteur de concentration sauf pour quelques échantillons au début de l'évolution de la concentration. Ceci indique une origine commune des deux éléments: la halite. Cette parfaite évolution de la molalité du sodium avec (Fc) laisse à supposer qu'il n'y a pas départ de cet ion des eaux vers une éventuelle phase solide. En fin de l'évolution, on remarque que le sodium présente un excès de concentration dû sans doute à un apport supplémentaire de cet ion par échange de base.

3.2.5. Le magnésium et les sulfates:

Les diagrammes (figure N° 87 & N° 88) montrent pratiquement le même comportement des molalités des sulfates et du magnésium par rapport au facteur de concentration (Fc). La concentration de ces éléments est supérieure à la droite des chlorures jusqu'à une valeur de log (Fc) de 0.5 pour les sulfates et 0.3 pour le magnésium où la molalité de ces derniers diminue lorsque la concentration totale augmente avec une diminution plus importante du magnésium. On peut déduire tout d'abord que ces deux éléments évoluent ensemble sachant que les eaux sulfatées magnésiennes sont très présentes dans la région. Cette diminution peut être expliquée par la participation du magnésium et les sulfates à des précipitations (dolomite et d'un degré moindre l'anhydrite

et le gypse). Un deuxième facteur vient accentuer la diminution du magnésium, il s'agit de l'échange de base qui peut s'effectuer entre le sodium et le magnésium.

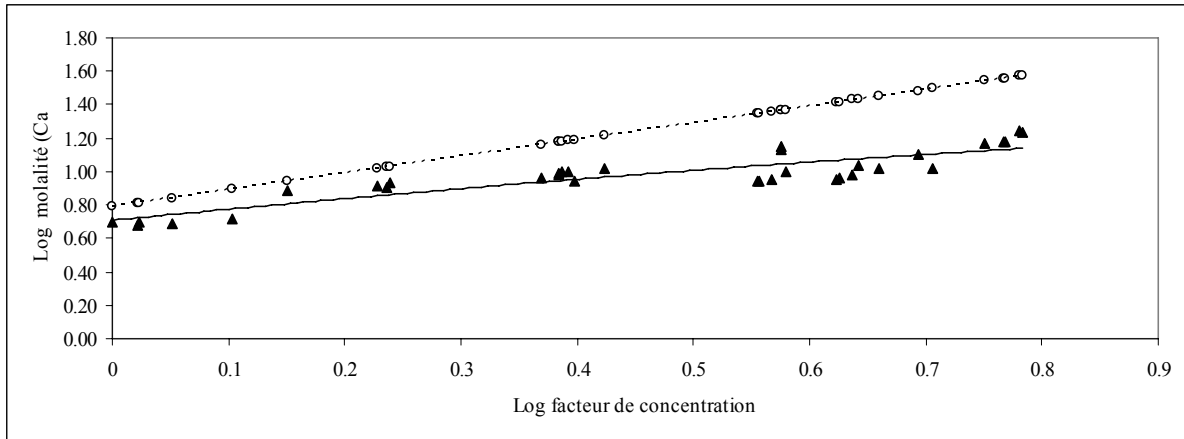


Figure N° 85: Diagramme de concentration du calcium

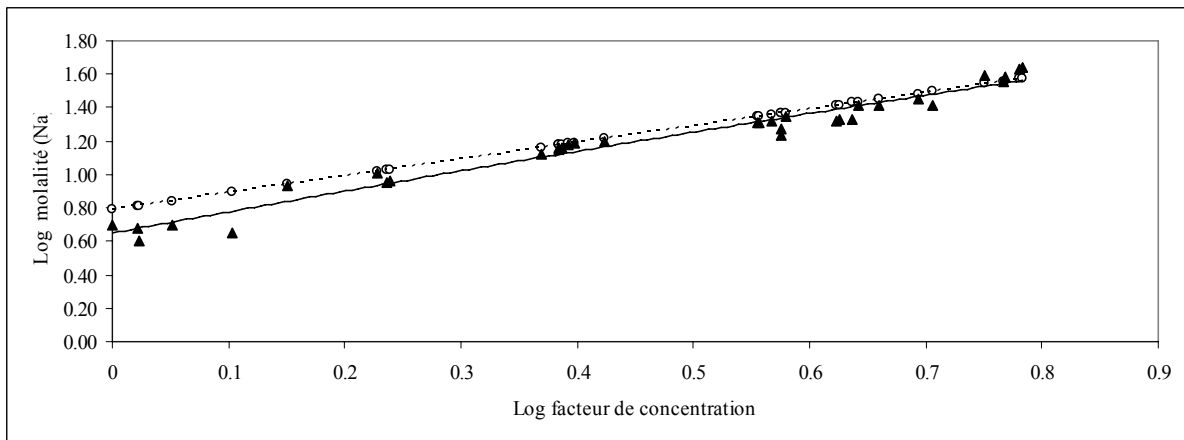


Figure N° 86: Diagramme de concentration du sodium

3.3. Conclusion:

L'utilisation du facteur de concentration (Fc) indique que les éléments issus de la dissolution des minéraux évaporitiques dans les eaux suivent à des degrés variables l'évolution du facteur de concentration. Par contre, le nuage de points des bicarbonates semble évoluer indépendamment du facteur de concentration. L'alcalinité carbonatée de ces eaux est moins importante que les chlorures.

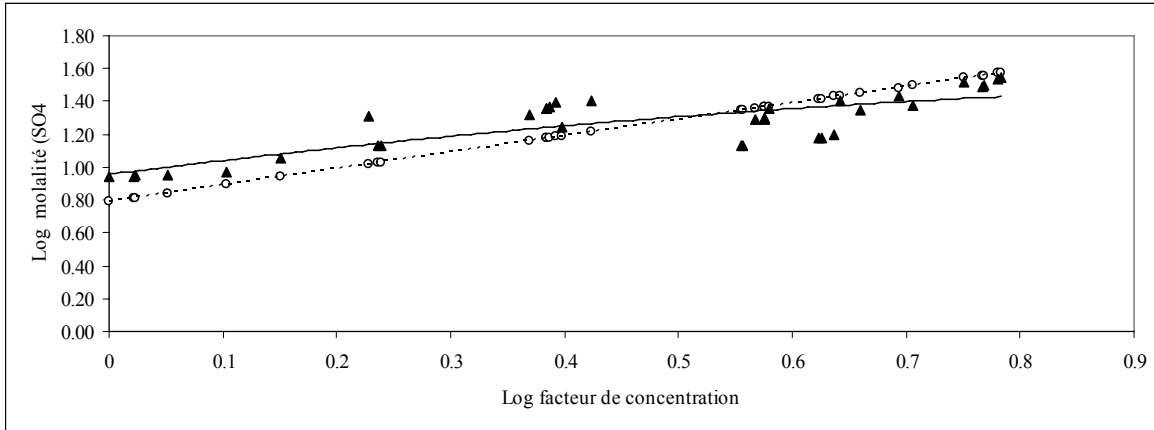


Figure N° 87: Diagramme de concentration des sulfates

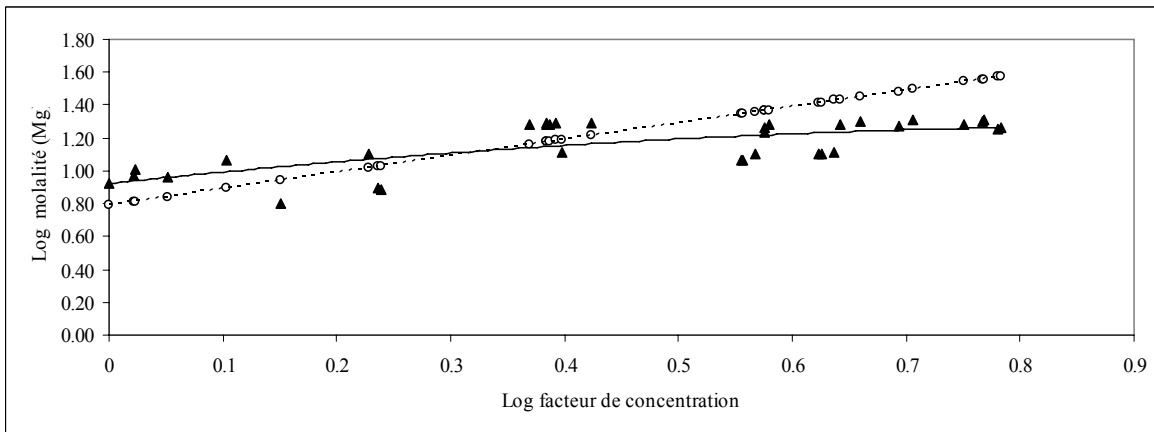


Figure N° 88 : Diagramme de concentration du magnésium

4. Autres arguments hydrochimique-thermodynamiques en faveur de l'origine évaporitique de la salinité:

Après la détermination de l'origine de la salinité des eaux de l'aquifère Néogène-Quaternaire à partir de l'étude des éléments chimiques et leurs comportements dans l'eau. Nous utiliserons dans ce qui suit d'autres arguments pour la détermination de l'origine de cette salinité. Il s'agit de:

- l'étude du strontium et du rapport Sr/Ca.
- L'utilisation de la thermodynamique par la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) sous l'effet de l'évaporation isotherme (25 °C) par le logiciel « **Phreeqci 2.8** » (*version free*), en termes d'équilibres sels/solution. Cette simulation permettra d'avoir une idée sur l'état des

minéraux responsables de la minéralisation dans les eaux et les équilibres entre les minéraux et la solution.

4.1. Etude du strontium:

Tableau N° 39 : Résultats de l'analyse du strontium

Le strontium (Sr^{+2}) est un élément lié aux évaporites. Il est très faiblement intégré dans le réseau des carbonates et est peu adsorbé par les argiles. Les fortes teneurs en Sr^{2+} dans les eaux ne s'expliquent que par la dissolution de la Célestite ($SrSO_4$), minéral associé au gypse. Il forme ainsi un bon marqueur de la présence des évaporites (Carre, 1975). Le strontium permet ainsi de distinguer les sulfates provenant de l'oxydation de sulfures (teneurs faibles) de ceux issus de la dissolution des évaporites (teneurs élevées). (Aigoun 2000 et Abdesselem et al. 2000).

N°	Sr (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr/Ca (meq/l) ‰
1	4.50	253.00	8.14
2	7.70	348.00	10.12
3	5.40	323.00	7.65
4	4.80	238.00	9.23
5	17.00	414.00	18.78
6	8.20	327.00	11.47
7	6.00	338.00	8.12
8	7.20	215.50	15.28
9	5.50	313.00	8.04
10	12.00	512.00	10.72
11	10.30	457.00	10.31
12	5.40	309.00	7.99
13	5.70	310.00	8.41
14	1.94	147.00	6.04
15	1.96	144.50	6.20
16	4.00	299.00	6.12
17	3.60	224.50	7.34
18	13.20	445.00	13.57
19	6.40	341.00	8.59
20	3.80	254.50	6.83
21	1.79	138.50	5.91

Le dosage d'une vingtaine d'échantillons pris dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya montre que la totalité des eaux de l'aquifère Néogène possèdent de fortes teneurs avec des concentrations allant de 0.05 à 0.4 meq.l⁻¹.

Le rapport ionique (en concentration molaire) Sr^{2+} / Ca^{2+} est caractéristique d'une origine évaporitique s'il est égal ou supérieur à 1 ‰ (Bakalowicz, 1988). Il est supérieur à 5 ‰ dans les évaporites du Trias alpin (MEYBECK, 1984) dans le Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (Abdeselem et al, 2000).

Le tableau N° 39 montre des rapports très élevées (> 5 ‰). Toutes les eaux souterraines de la plaine ont un chimisme d'origine évaporitique. Ce rapport atteint un maximum de 18 ‰ au centre et en allant vers l'ouest de la plaine (zone de convergence des eaux). Puis il diminue progressivement vers le nord avec un max de 10 ‰ et vers l'Est ou

se concentre les valeurs minimales (entre 6 et 8‰). Figure N° 89. La majorité des valeurs élevées se trouvent dans les eaux chlorurées sodiques. Donc ces rapports élevés accompagnent les grandes concentrations en sulfates et surtout en chlorures et en sodium.

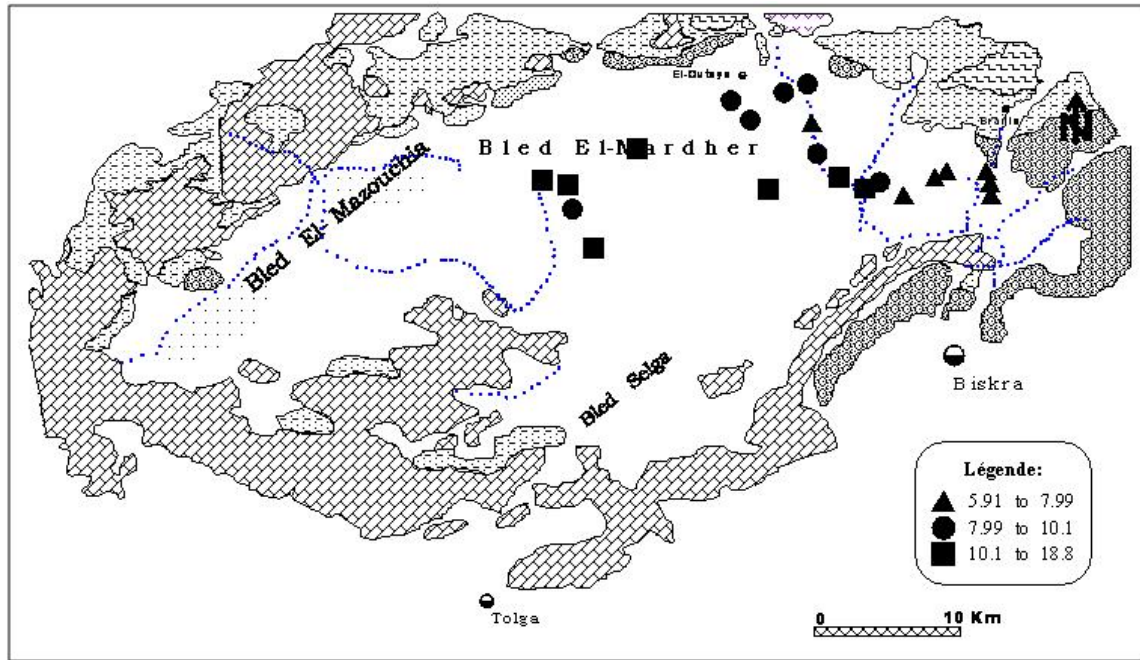


Figure N° 89: Répartition spatiale du rapport Sr/Ca dans les eaux de la plaine d'El-Outaya

4.2. Etat des minéraux dissouts dans l'eau (étude de l'indice de saturation (SI)):

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe de l'aquifère Néogène-Quaternaire a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « Phreeqci 2.3 » (version free), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que dès le début de concentration (log Fc de l'ordre de 10^{-4}), les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3) (figure N° 90). A noter que quelques points de calcite et plus d'aragonite se trouvent saturés (en équilibre) même parfois légèrement sous-saturés. L'indice de saturation étant pour l'ensemble des minéraux carbonatés entre -0.24 (proche de l'équilibre) et +2.81. (tableau N° 40).

Par contre les minéraux évaporitiques se trouvent sous-saturés, ainsi on constate (figure N° 91) que le **Gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'**Anhydrite** (CaSO_4) sont proche de la saturation (état d'équilibre) notamment pour une valeur du log (Fc) voisine de 0.6 à 0.8. Alors que la **Halite** (Na Cl) se trouve largement sous-saturé (SI entre -6.3 & -4.59) (tableau N° 40), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant ainsi à une augmentation de la minéralisation.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de la halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Tableau N° 40 : Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans l'eau

N°	Anhydrite	Gypsum	Halite	Aragonite	Calcite	Dolomite
1	-0.82	-0.60	-5.13	0.73	0.87	2.00
2	-1.07	-0.85	-5.85	0.42	0.57	1.17
3	-0.92	-0.70	-5.73	0.03	0.18	0.66
4	-0.89	-0.67	-5.06	0.82	0.97	2.34
5	-1.35	-1.13	-6.30	-0.16	-0.02	0.40
6	-1.33	-1.11	-6.23	-0.22	-0.08	0.19
7	-1.34	-1.12	-6.18	-0.24	-0.10	0.20
8	-1.34	-1.12	-6.18	1.02	1.17	2.81
9	-1.02	-0.80	-5.76	-0.10	0.04	0.20
10	-0.87	-0.66	-5.44	0.16	0.30	1.02
11	-1.00	-0.78	-5.01	0.38	0.53	1.31
12	-0.66	-0.44	-4.67	0.73	0.87	1.97
13	-0.97	-0.75	-5.38	0.25	0.40	1.09
14	-0.93	-0.71	-5.48	0.59	0.74	1.91
15	-0.90	-0.68	-4.92	0.67	0.81	2.02
16	-0.94	-0.72	-5.08	0.52	0.66	1.60
17	-0.84	-0.62	-5.40	0.37	0.51	1.44
18	-1.07	-0.85	-5.11	-0.08	0.06	0.38
19	-0.86	-0.64	-5.43	0.31	0.45	1.32
20	-2.97	-2.76	-5.76	-0.15	-0.01	0.50
21	-0.76	-0.54	-4.86	0.56	0.70	1.70
22	-1.03	-0.81	-5.03	0.14	0.28	0.84
23	-0.83	-0.61	-4.93	0.63	0.77	1.90
24	-0.80	-0.58	-5.17	0.65	0.80	1.81
25	-0.67	-0.45	-4.66	0.74	0.88	2.02
26	-0.59	-0.37	-4.60	0.92	1.06	2.26
27	-1.03	-0.81	-5.02	0.46	0.60	1.47
28	-0.59	-0.37	-4.59	0.43	0.58	1.30

29	-0.68	-0.46	-4.69	0.92	1.07	2.39
30	-1.00	-0.78	-5.74	0.38	0.52	1.13
31	-0.82	-0.60	-5.36	0.75	0.90	2.19
32	-0.88	-0.66	-4.87	0.55	0.69	1.81
33	-1.07	-0.85	-5.10	0.48	0.62	1.50
34	-0.88	-0.66	-5.43	0.36	0.50	1.43

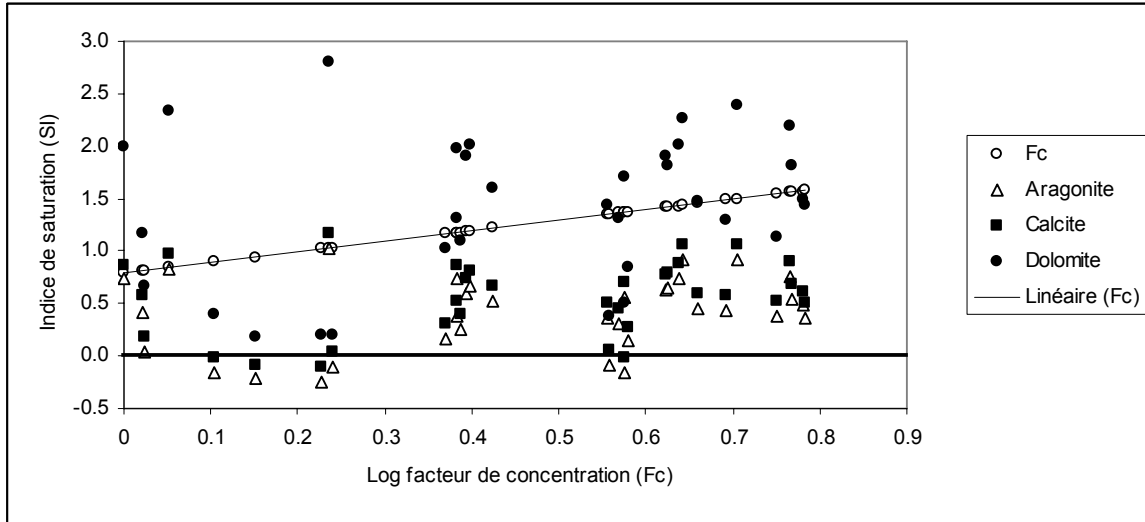


Figure N° 90: Etat des minéraux carbonatés dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya

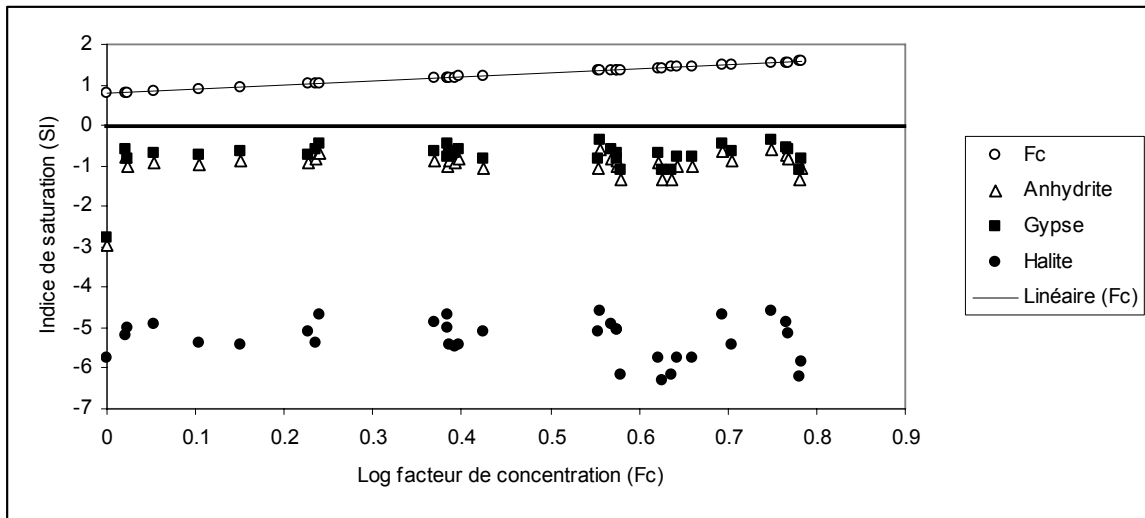


Figure N° 91: Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya

IV : Aptitude des eaux a l'irrigation:

L'introduction et le développement des systèmes d'exploitation des nappes et d'irrigation ont permis la mise en valeur des terres arables des zones arides. C'est ainsi que depuis une centaine d'années, de grands périmètres ont été construits afin de développer la filière agricole des pays concernés. Cependant, ces pratiques d'irrigation à grande échelle ont modifié la structure des sols conduisant parfois à la baisse de leur fertilité par le processus de salinisation, en même temps que la dégradation des eaux souterraines par contamination. Plus de 20 % des terres cultivées sur le globe seraient aujourd'hui affectées à des degrés de dégradation variables par la salinisation (Tyagi, 1996). Pour pouvoir apprécier ce processus, nous allons utiliser deux méthodes afin de mettre en évidence ce phénomène.

Tableau N° 41 : Résultats du SAR

N°	SAR	Con	%Na
1	4.395	3670	35.70%
2	6.399	3680	49.02%
3	6.686	4060	46.08%
4	4.713	2520	41.63%
5	3.753	3430	32.93%
6	6.420	3290	49.34%
7	4.028	3560	34.02%
8	8.558	5380	50.44%
9	6.637	4200	45.76%
10	9.011	5530	51.52%
11	6.363	3690	48.64%
12	3.759	3440	33.10%
13	3.532	3280	31.98%
14	3.930	3520	33.75%
15	6.361	3220	49.92%
16	6.327	3250	49.66%
17	10.212	5920	54.76%
18	6.714	4860	46.37%
19	6.288	3560	48.82%
20	5.801	4870	43.18%
21	1.888	1320	26.17%
22	3.139	2380	32.59%
23	1.451	1240	20.78%
24	1.530	1430	20.79%
25	3.137	2130	35.61%
26	3.221	2240	36.05%
27	9.431	5810	53.22%
28	3.800	3460	33.19%
29	10.298	5940	54.93%
30	7.066	5270	47.03%
31	4.701	3920	37.02%
32	1.916	1110	26.91%
33	3.251	1780	37.95%
34	1.780	1180	24.96%

1. Risque de sodicité et de salinité:

(Méthode de Richard)

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

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

Lorsque la concentration en ion Na à

l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent dans le complexe adsorbant, les cations (Ca le plus fréquemment). Une eau chargée en sel peut provoquer cette action.

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

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

$$\text{S.A.R} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}}$$

Où Na, Ca, Mg sont exprimés en meq/l.

Le diagramme montre que les eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya appartiennent à trois classes figure N° 92 et tableaux N° 41 et N° 42. Il s'agit de C3-S1 de qualité admissible, C4-S1 – C4-S2 de qualité médiocre et C4-S3 de mauvaise qualité. La qualité des eaux pour l'irrigation est donc du type admissible à mauvais. On note que 35.29 % des eaux analysées sont de mauvaise qualité, 41.17% sont de qualité médiocre et seulement 23.52 sont de qualité admissible. Les points d'eau de mauvaise qualité se trouvent au centre et à l'Ouest de la plaine et sont très chargés en sels. Il convient donc, de bien vérifier les conditions d'utilisation des puits concernés. On note également que les valeurs du S.A.R augmentent d'Est en Ouest avec le degré de salinité.

Tableau N° 42 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (In M.Louvrier 1976 -B.R.G.M-)

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

Concernant la répartition de ce paramètre dans la plaine (figure N° 93). Selon les valeurs du S.A.R, on peut classer les eaux de la région en trois groupes:

- ▶ Le premier groupe représente les eaux classées dans la catégorie "Admissible" avec des valeurs du S.A.R allant du 1.5 au 3.8. Les eaux se concentrent à l'Est. Ces eaux peuvent être utilisées sans risque pour le sol.

- ▶ Le deuxième groupe avec des valeurs du S.A.R qui oscillent entre 3.8 et 6.4. Il s'agit des eaux de qualité médiocre et qui se localisent surtout dans la partie nord ainsi qu'entre la partie Est et Centrale. Il est recommandé de bien sélectionner les types de cultures à développer.

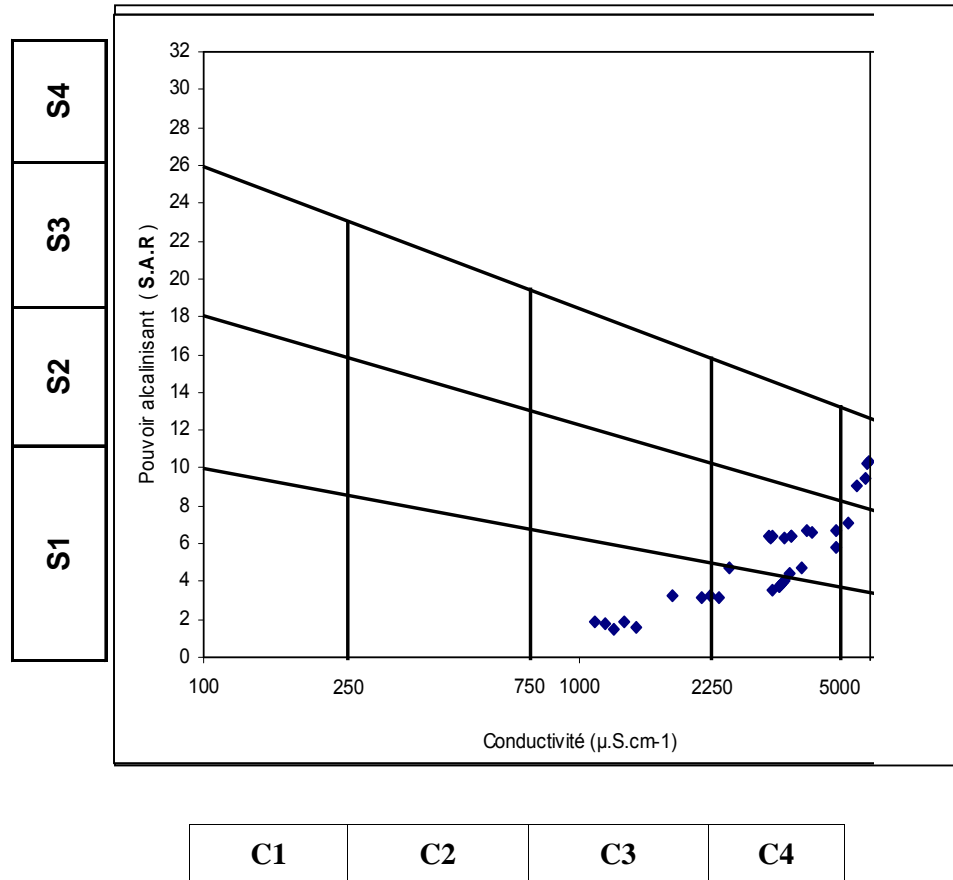


Figure N° 92: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR

- Le troisième groupe concerne les eaux de mauvaise qualité avec un S.A.R qui varie entre 6.4 et 10. Ces eaux se trouvent surtout dans la partie centrale et à l'Ouest de la plaine. L'utilisation de ces eaux à l'état brut est très dangereuse pour le sol. Nous pensons qu'une dilution de ces eaux par celles du barrage est plus que nécessaire avant qu'elles soient utilisées pour l'irrigation. Ceci permettra d'avoir un mélange de qualité meilleure qui peut être utilisé sans risque.

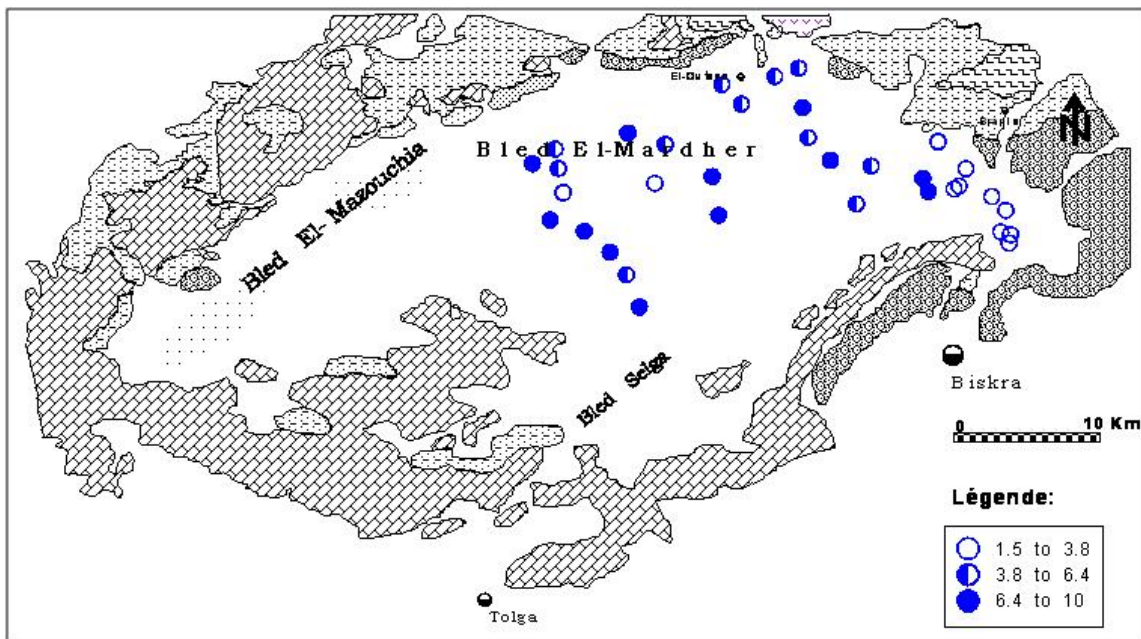


Figure N° 93: Synthèse de la répartition spatiale du S.A.R dans la plaine d'El-Outaya

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

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

En effet, dans un sol salé imprégné de NaCl, la perméabilité reste bonne tant que la solution saline percolante présente une charge élevée en électrolyte, charge qui maintient les argiles flocculées (Servant 1978).

Si l'eau d'irrigation est chargée en sodium, le nombre d'ions Na combiné avec le sol, augmente, cependant une quantité équivalente en cations et essentiellement en Ca sera déplacée. On assiste à une dégradation de la structure, avec un gonflement des argiles ce qui entraîne une imperméabilisation du milieu. Le processus de dessalement et de drainage risque alors d'être complètement stoppé. Dans le cas où le calcium est le cation dominant, l'échange se fait dans le sens inverse, créant ainsi un sol plus floclé et plus perméable. L'apport de CaSO₄ au sol peut par l'échange de base, améliorer la texture du sol ainsi que son drainage.

Il est connu en général que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium. C'est pourquoi nous avons jugé utile d'utiliser la méthode de WILCOX fondée justement sur la conductivité électrique et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau (LOUVRIER 1976). Le pourcentage de sodium peut être défini comme suit:

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

Où tous les éléments sont exprimés en meq/l.

On s'aperçoit alors que 17.64 % des eaux sont de qualité bonne à admissible, 11.76 % de qualité médiocre et le reste soit 70.58 % sont de mauvaise qualité. Figure N° 94. Les eaux de bonne et de qualité médiocre se concentrent à l'Est, alors que celles de mauvaise qualité se trouvent au centre, à l'ouest et au nord. On remarque la dégradation progressive de la qualité des eaux en se déplaçant de l'Est vers l'Ouest par augmentation du % du sodium.

La carte de la répartition des valeurs des pourcentages du sodium montre que les valeurs critiques se situent au centre et à l'Ouest de la plaine. Dans cette zone, le risque sur la perméabilité du sol est grand, ajoutant à cela l'effet cumulatif des sels dans le sol au cours du temps après plusieurs années d'irrigation avec ces eaux. Figure N° 95.

3. Synthèse de l'utilisation des eaux pour l'irrigation:

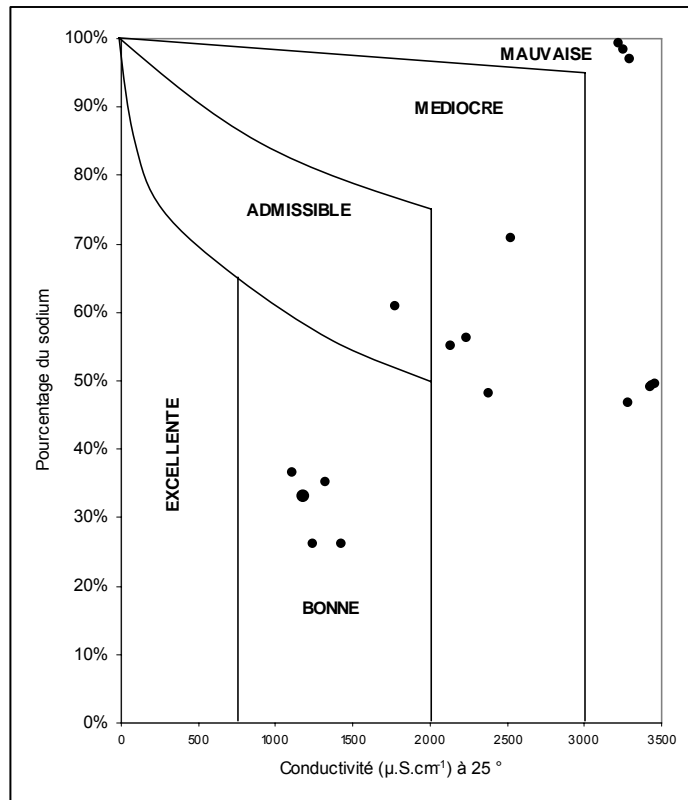
Les différentes méthodes utilisées (SAR, méthode de Wilcox) pour la détermination de l'aptitude à l'irrigation des eaux de l'aquifère Néogène-Quaternaire, mettent en évidence quelques résultats à caractères sommaire et préliminaire. Ces résultats nécessitent une étude poussée pour définir avec exactitude les relations qui existent entre différents paramètres du sol ainsi que son degré de dégradation après plusieurs années d'irrigation avec ces eaux. Nous avons résumé les résultats dans le tableau N° 43 suivant:

Tableau 43 : Tableau récapitulatif de la qualité des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation

Paramètre	Méthode	Résultats			Qualité de l'eau pour l'irrigation			
					Bonne et Admissible	Médiocre		Mauvaise
		min	moy	max	C3- S1*	C4-S1*	C4-S2*	C4-S3*
S.A.R	Richard	1.45	5.19	10.30	23.52 %	11.76 %	29.41 %	35.29 %
% de sodium	Wilcox	21 %	40 %	55 %	17.64 %	11.76 %		70.58 %

* Voir tableau N° 42: Pour la définition des classes

- Le SAR représente un risque moyen sur les plantes. Il est recommandé aux exploitants de sélectionner les types des cultures adaptés et tolérants aux sels.
- Le pourcentage de sodium représente un risque fort sur les plantes. A l'état actuel des choses, cette salinité représente un danger sur la perméabilité des sols.



**Figure N° 94: Classification des eaux pour l'irrigation
Selon la méthode de Wilcox.**

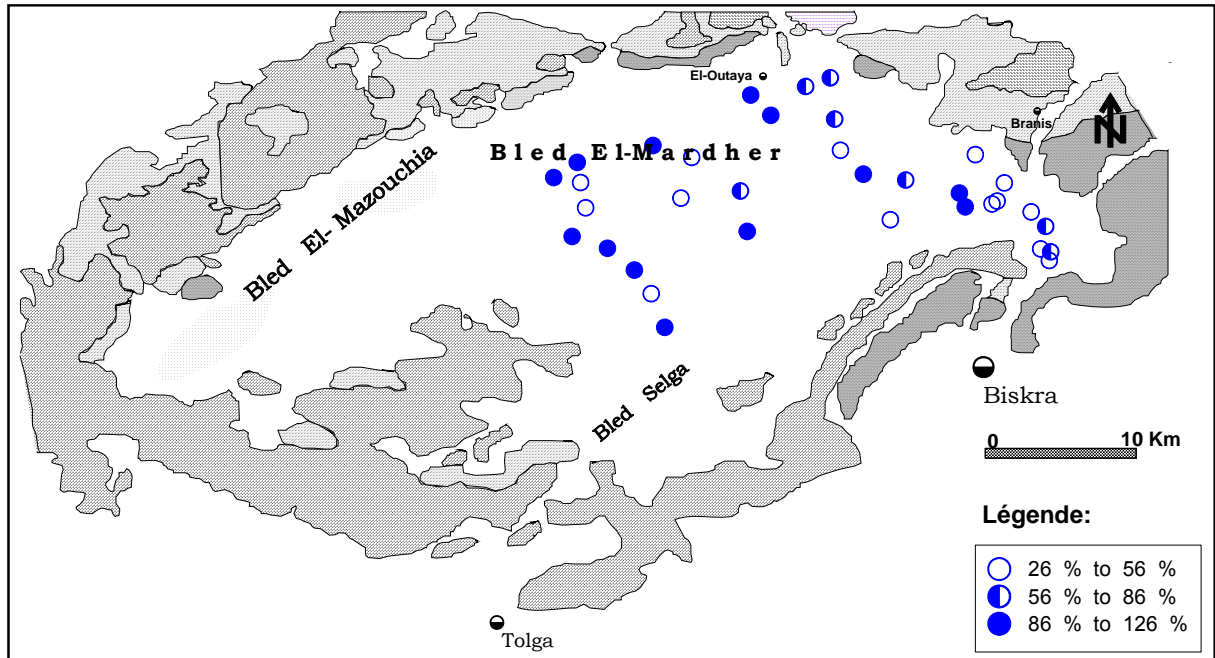


Figure N° 95: Répartition spatiale du % de sodium dans la plaine d'El-Outaya

4. Recommandations pour l'utilisation des eaux pour l'irrigation:

Les eaux souterraines de l'aquifère Néogène-Quaternaire sont en partie de mauvaise qualité pour l'irrigation. Leur utilisation à l'état brut risque de causer des dégâts irréversibles aux sols de la plaine. Par ailleurs, la rareté de la ressource hydrique oblige les exploitants à l'utiliser malgré les risques encourus. Par ce faite, Il est souhaitable voire nécessaire de procéder à une dilution des eaux très chargées par celle du barrage avant de les utiliser pour l'irrigation. Nous cherchons par cette dilution à corriger la minéralisation des eaux pour les rendre de qualité admissible selon les paramètres du S.A.R. Les eaux concernées par cette correction sont celles classées par le S.A.R dans la catégorie mauvaise.

Tableau N° 44 : Tableau récapitulatif des paramètres de traitement des eaux par dilution

	Sodium (mg/l)	Chlorures (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Rapport
Référence	143.125	284	498.875	-----
Eau du barrage	114	292	490	-----
Eau avant traitement	440	725.7	959.4	-----
Eau après dilution	143.64	331.42	532.67	1/10

Dans le tableau N° 44, nous proposons les rapports (Eau souterraine/ Eau du barrage) pour ces mélanges. Nous présenterons les sulfates, les chlorures et le sodium. Le reste des éléments étant jugé sans risque.

Nous adoptons pour l'estimation de ces rapports de dilution comme valeur de référence; la moyenne des teneurs des points classés par le SAR dans la catégorie admissible.

Par la suite, l'estimation du degré de correction (dilution) se fait par rapport aux moyennes des eaux classées mauvaises (pour chaque élément).

Concernant la conductivité, on utilisera la valeur moyenne des eaux classées admissible ($1554 \mu.S.cm^{-1}$).

Après dilution, tous les points corrigés se mettent dans la catégorie admissible (C3-S1 et C3-S2).

Ce rapport peut être réajusté à la hausse ou à la baisse selon la minéralisation des eaux à traiter.

V : Etude des saumures:

Le complexe ENASEL est installé sur une superficie de 12.200 Ha. Il occupe une place importante sur le plan socio-économique. Il offre un nombre important de poste de travail pour la population locale et les riverains (Effectif 300 permanents). Il est entré en activité en 1983 et est conçu pour fonctionner à zéro rejet industriel. Toutes les machines de lavage sont raccordées à une centrale dotée d'équipements permettant de minimiser les volumes de rejets. Depuis 1990, et après que les machines de recyclages aient tombées en panne, l'administration du complexe a mis en place un système d'évacuation des effluents. Un système qui ne cesse de soulever des polémiques auprès des services de l'inspection de l'environnement de la wilaya de Biskra.

1. Système d'évacuation des saumures:

Ce système est réalisé de la manière suivante: (figure N° 96):

- Une fosse de 6 m X 50 m qui reçoit le premier rejet évacué par l'usine. Ces rejets proviennent de la purge de la chaudière. Une partie de ces saumures sera pompée pour être recyclée et réutilisée dans l'usine. (photo annexe)
- L'effluent s'écoulera par gravité à l'air libre dans une rigole creusée dans le sol jusqu'à l'ancienne route, puis elle passe dans une conduite sous cette dernière jusqu'aux bassins de décantation. (photo annexe)
- Enfin, le rejet déverse dans des grands bassins d'une superficie de 5 Hectars.

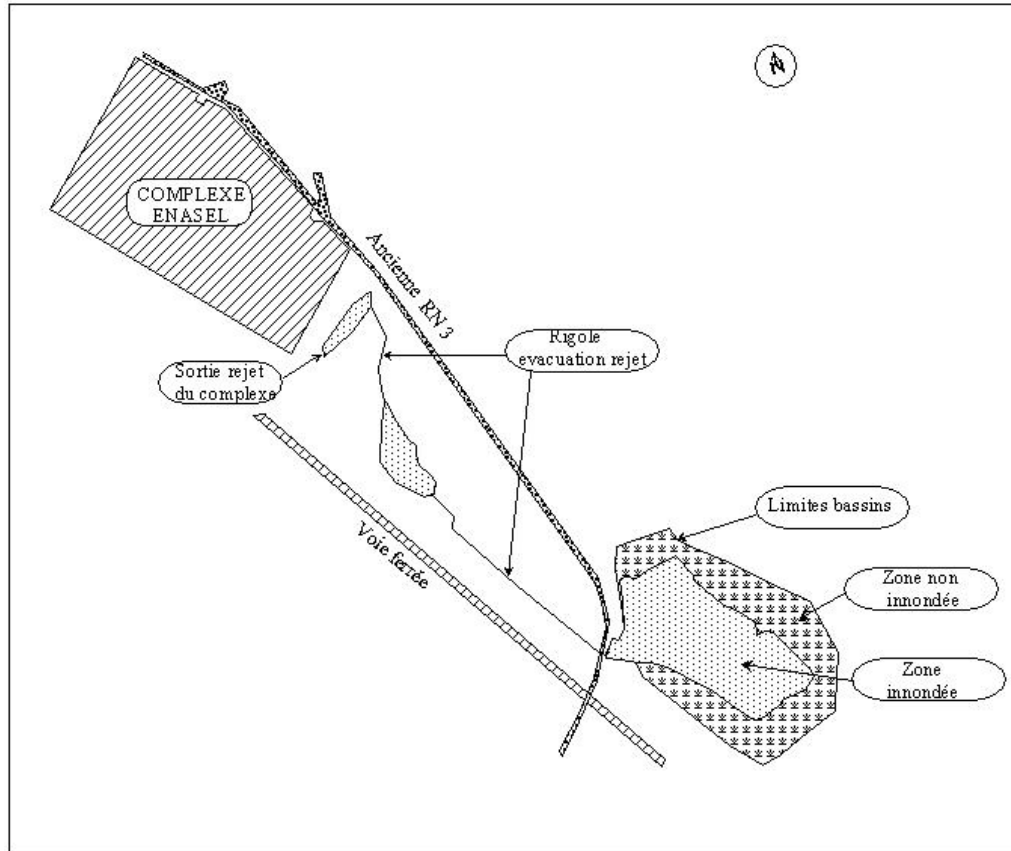


Figure N° 96: Schéma du système d'évacuation des saumures

2. Etude physico-chimique des effluents:

2.1. A la sortie de la chaudière dans le complexe:

Le diagramme (figure N° 97) montre que les concentrations en sodium et en chlorures dans les rejets à la sortie de la chaudière sont très élevées. L'évolution des concentrations délimite deux parties: de 1990 à 1995 puis de 2003 à 2005.

- La première période (1990 à 1995) présente une variation plus ou moins uniforme où les concentrations en sodium et en chlorures oscillent autour de 1 g/l. (entre 0.29 et 2.35 g/l pour le sodium et 0.44 et 3.62 g/l pour les chlorures).
- La deuxième période de 2003 à 2005 est caractérisée par l'augmentation des concentrations de ces deux éléments dans les rejets d'une façon exceptionnelle pour atteindre 36 g pour les chlorures et 23 g pour le sodium.

C'est une augmentation qui peut être expliquée par une activité importante du complexe durant cette période. L'augmentation de la production de sel conduit automatiquement à des rejets de plus en plus importants en volume et en sels dissouts.

L'examen de la fluctuation du pH pendant cette période (1990-2005) montre que l'évolution de ce paramètre ne présente pas d'importantes fluctuations. Néanmoins, on remarque que les valeurs restent basiques et dépassent de loin la moyenne enregistrée dans les eaux souterraines de la plaine. Figure N° 98.

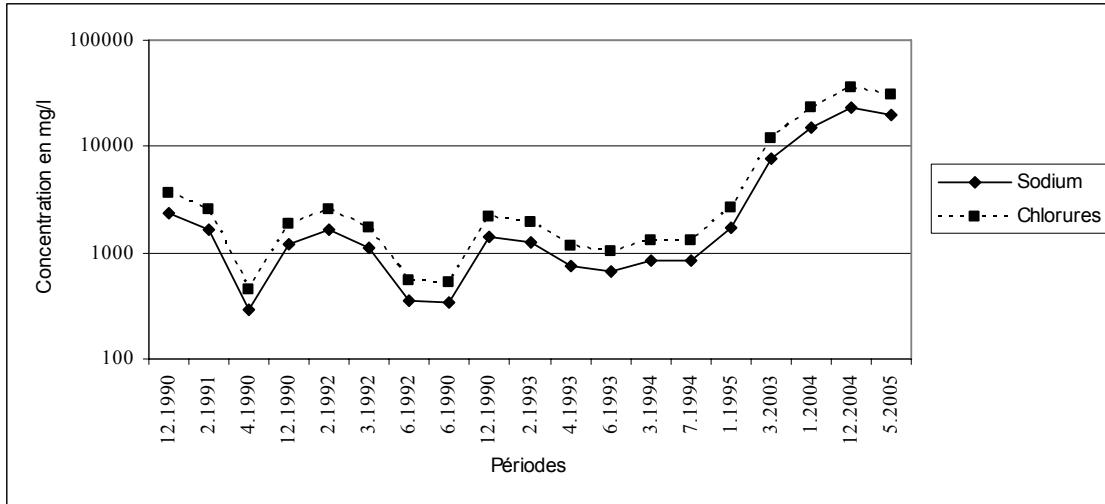


Figure N° 97: Variation dans le temps, des chlorures et du sodium dans les saumures à la sortie du complexe.

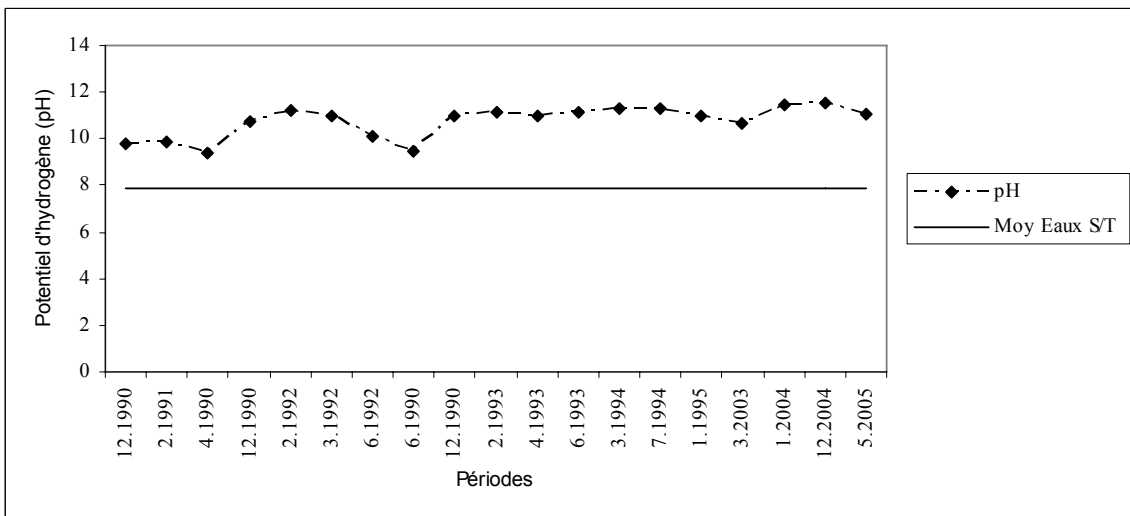


Figure N° 98 : Variation dans le temps, du potentiel d'hydrogène (pH) dans les saumures à la sortie du complexe.

2.2. Dans les bassins de décantation:

Les figures N° 99 & 100 représentent l'évolution des anions et des cations. Ils montrent:

- Pour les cations, on remarque que le sodium se trouve à des concentrations très élevées dans ces effluents. Si le calcium et le magnésium présentent des teneurs relativement normales par rapport aux eaux de la région, le sodium par contre, atteint 100 g/l. Ces teneurs dépassent même les valeurs enregistrées à la sortie de la chaudière dans le complexe. (figure N° 99)
- Pour les anions, les bicarbonates et les sulfates ne présentent pas de grandes teneurs par rapport aux eaux de la région, alors que les chlorures dépassent les 100 g/l. (figure N° 100)

Les saumures comportent donc des teneurs très élevées en sodium et chlorures. Ces éléments se concentrent davantage après séjour dans les bassins sous l'effet de l'évaporation. Ces teneurs constituent un risque sur le sol et les eaux souterraines.

Une solution à moyen terme pour ces rejets a été proposée (Areau, 2005). Cette alternative sera mise en place en attendant la solution définitive et la mise en marche du système de recyclage des saumures par le complexe.

La solution proposée consiste à rendre étanche tout le dispositif de rejet, du complexe aux bassins de décantation ; en réalisant les tâches suivantes:

- En construisant à la sortie du complexe une bâche de reprise en béton pour collecter les rejets du complexe. Cette bâche doit permettre l'accès d'un engin pour le nettoyage;
- En procédant au revêtement de la rigole d'évacuation en béton afin de l'imperméabiliser et empêcher ainsi l'infiltration;
- En procédant au revêtement des bassins de décantation avec une couche d'argile de 30 cm d'épaisseur bien compactée et protégée par une couche d'alluvions.

La boue salée récupérée après nettoyage du bassin collecteur ou des rigoles doit être stockée au niveau du Dj. El-Melah en attendant une solution adéquate pour la neutralisation de ces sédiments.

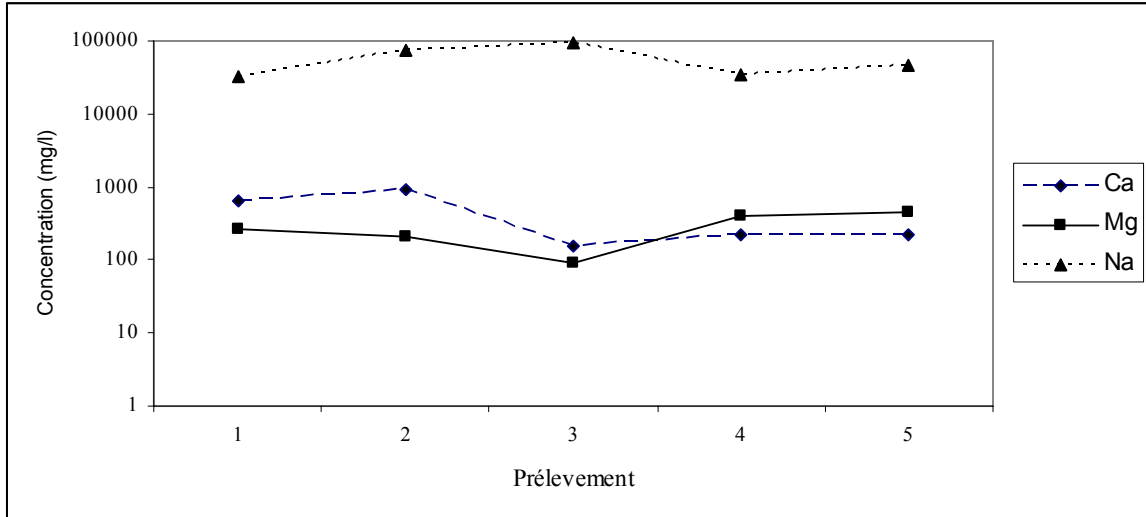


Figure N° 99: Variation des cations dans les saumures
(dans les bassins de décantation)

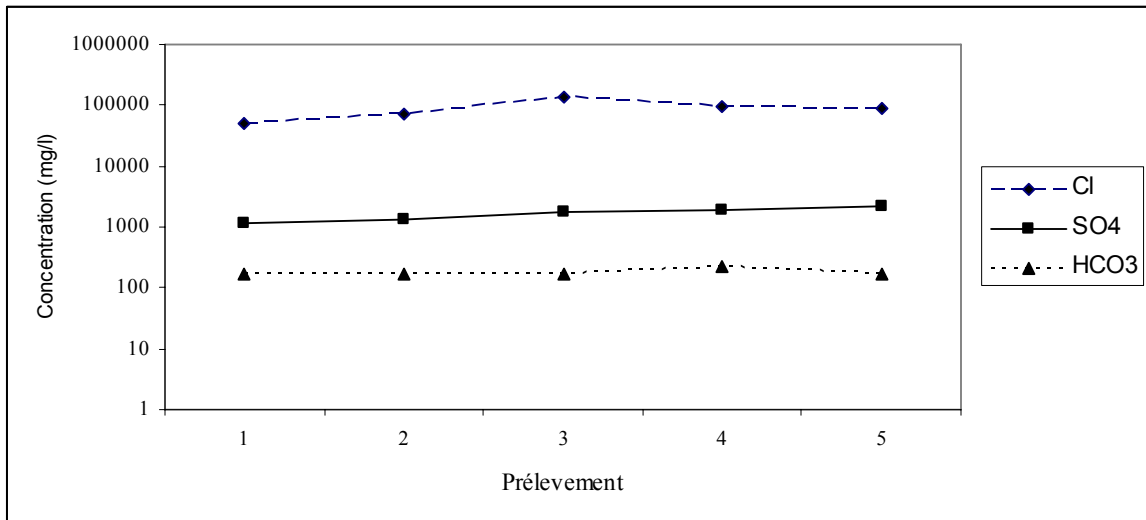


Figure N° 100: Variation des anions dans les saumures
(dans les bassins de décantation)

Conclusion de la deuxième partie:

Le chimisme des eaux de l'aquifère Néogène - Quaternaire de la plaine d'El-Outaya est caractérisé par une grande variabilité dans l'espace. La minéralisation augmente progressivement de l'Est vers le centre de la plaine et du nord vers le sud. Les eaux sont moins chargées en sels à l'Est, alors qu'elles présentent au centre et au nord, une salinité assez élevée.

La conductivité électrique présente des variations importantes d'une zone à l'autre et oscille entre 1110 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 5940 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne de 3475 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La salinité est surtout contrôlée par les chlorures, les sulfates et le sodium. La combinaison entre la conductivité, d'une part, et les chlorures et les sulfates, d'autre part, dans le même diagramme montre que ces deux variables influencent fortement la conductivité:

- ▶ Les sulfates sont dominants quand les valeurs de conductivité varient entre 1000 et 2000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

- ▶ Par contre, les chlorures sont dominants pour les valeurs extrêmes de la conductivité (supérieures à 3750 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

- ▶ Pour des valeurs de la conductivité comprises entre 3200 et 3750 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, nous remarquons une influence combinée de ces deux éléments.

La manière selon laquelle évolue la dissolution des minéraux dans l'eau et leur répartition spatiale nous permet de dégager 3 familles d'eau :

- ▶ La famille des eaux chlorurées sodiques qui se localise sur l'axe Nord-Sud dans la partie centrale. Elle est le résultat de la dissolution des formations triasiques du diapir de sel. Ces eaux sont très chargées en sels et ont des valeurs extrêmes de la conductivité;

- ▶ La famille des eaux sulfatées magnésiennes qui occupe la partie Est de la zone étudiée. Elle est le résultat de la dissolution des roches évaporitiques de l'Aquifère Néogène. Ces eaux sont moins chargées que les précédentes et sont caractérisées par les valeurs minimales de conductivité;
- ▶ La famille des eaux sulfatées sodiques se trouvant en transition entre les deux premières familles, ce phénomène peut être expliqué par un échange de base entre le magnésium et le sodium. Cette catégorie d'eau se localise à la limite de la zone Est en allant vers l'Ouest.

L'étude de l'évolution des rapports (SO₄/Cl) et (Mg/Na) dans les eaux souterraines selon trois axes Nord-Sud et un axe Est-Ouest, donne une synthèse sur la répartition spatiale des faciès chimiques dans la plaine.

La comparaison des paramètres physico-chimiques aux normes algériennes spécifiques aux eaux de boisson préemballées; montre que la majorité des points d'eau dépassent le seuil fixé par cette norme et ne s'y prêtent pas à la consommation humaine exception faite aux points de la zone d'extrême Est de la plaine.

La détermination de l'origine de la salinité a pris la majorité de cette partie. Cette salinité est sans doute liée à l'origine des éléments chimiques dans les eaux. Par conséquent, la détermination de la provenance de ces éléments a fait l'objet d'utilisation de plusieurs méthodes :

- ▶ L'évolution des éléments chimiques les uns par rapport aux autres dans des diagrammes couplant les paramètres dominants des eaux. Ces diagrammes sont établis sur la base des faciès chimiques et des corrélations entre les éléments chimiques.
- ▶ L'utilisation du facteur de concentration (Fc) pour l'identification des processus géochimiques de l'acquisition de la salinité des eaux. Nous avons

utilisé les chlorures comme indicateur de l'évolution de la concentration globale. Il s'agit du suivi de l'évolution de la concentration des éléments chimiques par rapport au facteur de concentration.

- ▶ L'exploitation des résultats des analyses du strontium pour la détermination de l'origine de cette salinité, a mis en évidence l'origine de la minéralisation.

- ▶ La simulation à l'évaporation des eaux de la région par le calcul de l'indice de saturation a permis de confirmer les résultats des méthodes précédentes.

L'exploitation des différents résultats de ces méthodes a permis de dire que l'origine de la salinité des eaux de la région étudiées est influencée par:

- ▶ Les formations du Trias salifère affleurant au nord de la région. Cette influence touche à des degrés variables les eaux de la plaine et se remarque surtout dans les eaux sur l'axe Nord-Sud ainsi que dans le centre en allant vers l'Ouest. La dissolution de la halite se manifeste par des valeurs élevées en chlorures et en sodium avec dominance du faciès chloruré sodique. Ces eaux sont caractérisées par des valeurs extrêmes de la conductivité et du rapport Sr/Ca. La corrélation entre le sodium et les chlorures est parfaite. Les valeurs du coefficient de corrélation atteignent 0,97. On note, par ailleurs, que le diagramme Na-Cl montre un très léger excès en sodium. On ne remarque pas de forte valeurs en sodium et en chlorures au niveau de la zone Est de la plaine. Les eaux sont peu ou pas influencées par la dissolution de la halite (Trias salifère).

- ▶ La dissolution des formations évaporitiques du Néogène. Les traces de cette dissolution se remarquent dans toutes les eaux de la plaine. Les eaux sont riches en sulfates et en magnésium et se manifestent par la présence du faciès sulfaté magnésien. Dans les zones d'influence des formations du

Néogène, le rapport SO₄/Cl avoisine deux (2). Ces eaux comportent des valeurs moins élevées de la conductivité. Concernant les valeurs du rapport Sr/Ca, ils sont relativement faibles par rapport à la totalité des résultats mais ils dépassent dans tous les cas les 5 %. Le coefficient de corrélation "r" entre magnésium et sulfates atteint la valeur de 0,85. Cette relation est moins importante que celle des chlorures-sodium à cause de la participation du magnésium dans d'autres sels tels que les carbonates.

La simulation à l'évaporation des eaux de la région confirme l'influence des roches évaporitiques du Néogène sur la salinité des eaux analysées ainsi que le Trias salifère. Les minéraux carbonatés se trouvent saturés à sursaturés. Les minéraux précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite avec un indice de saturation qui oscille entre -0.24 (proche de l'équilibre) et +2.81. Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous-saturés avec un indice de saturation compris entre -6.30 et -0.37 et peuvent se dissoudre davantage dans les eaux contribuant ainsi à un enrichissement de ces dernières en sels.

Concernant l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, nous constatons que:

- ▶ Les eaux de la zone Est de la plaine peuvent être utilisées sans risque sur le sol. Ces eaux sont classées de qualité bonne à médiocre selon la méthode utilisée. Ces eaux ne représentent pas un risque sur la perméabilité du sol de la plaine;

- ▶ L'utilisation des eaux de la partie nord, centrale et Ouest pour l'irrigation est relativement dangereuse. Les eaux sont de qualité médiocre à mauvaise. Elles présentent un risque sur la perméabilité du sol.

L'utilisation de ces eaux directement pour l'irrigation n'est donc pas recommandée. Il convient donc, de procéder à une dilution de ces eaux par les eaux du barrage avec un rapport (Eau souterraine/Eau barrage) de l'ordre de 1/10. Cette solution est assez pratique et accessible pour résoudre ce problème. Notons que ce rapport peut être réajusté selon la qualité des eaux à traiter.

Les rejets (saumures) du complexe sont déversés en pleine nature dans des bassins sans aucune protection. L'étude du chimisme de ces saumures a révélé des teneurs très élevées en éléments chimiques. Le sodium atteint le seuil de 95 g/l et les chlorures 140 g/l. Ces rejets peuvent être néfastes à la fois pour les eaux souterraines et pour le sol. Il est nécessaire pour la préservation à la fois de la ressource hydrique et du sol de:

- ▶ Procéder à l'imperméabilisation du système de rejets des saumures;

- ▶ Réaliser des piézomètres non loin, à l'aval de la zone des rejets pour un suivi périodique de l'évolution du chimisme des eaux souterraines. Cette évolution nous permettra d'établir avec certitude un constat concernant d'éventuelles contaminations.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

Le bassin d'El-Outaya se trouve dans la wilaya de BISKRA au sud algérien. Il constitue une ressource importante pour l'eau d'irrigation mais aussi, et de moindre importance, pour l'eau potable. La population de la plaine dépasse 11 000 habitants, leur activité principale est l'agriculture. Cette étude visait à améliorer les connaissances sur l'aquifère néogène-quadernaire du bassin d'El-Outaya notamment sur l'aspect qualité en essayant d'étudier la salinité des eaux, son origine et les mécanismes d'acquisition. Nous cherchons à identifier d'éventuelles relations entre la répartition spatiale du chimisme et la géologie. Nous présentons successivement les résultats essentiels acquis lors de ce travail et des éléments de réflexions sur la gestion de cette ressource.

Géologie:

Des études détaillées ont traité la genèse et la lithologie du bassin d'El-Outaya et aux phases tectoniques auxquelles il était soumis.

Le bassin d'El Outaya fait partie de la région de M'Doukal - Biskra qui forme une zone charnière raccordant les deux grands ensembles atlasiens. Il est particulier par ses dimensions réduites (30 X 70 Km), sa forme losangique limitée par des failles (E-W, NW-SE et NE-SW) ainsi que par sa position dans le domaine atlasique. C'est un bassin subsident orienté sensiblement E.NE – W.SW et situé entre deux anticlinaux. Il se trouve au nord de l'anticlinal du Dj.Bou Rhezel (Biskra) et au sud du dôme de Dj. El Melah (El-Outaya). Il a fonctionné comme un bassin de sédimentation pendant tout le Néogène. Il est constitué à la base par un miocène laguno-marin, recouvert par du messinien (pontien) gréseux fluviatile, puis par des poudingues pliocènes. Les termes supérieurs, plus particulièrement pliocènes, sont fortement inclinés vers le centre du bassin où ils disparaissent sous une épaisseur considérable du Quadernaire ; Leur relèvement à la périphérie du bassin indique que celui ci a été affecté par les mouvements les plus récents (Quadernaire basal). Le Néogène repose en discordance sur tous les terrains antérieurs mésozoïques et paléogènes. Un diapir de sel (Trias) affleure au Nord-Est de la plaine d'El-Outaya. Il est représenté par Djebel El-Melah qui a une autre configuration par rapport aux autres reliefs ; il se dresse jusqu'à 627 m sans s'intégrer dans les autres alignements ; au contraire, il constitue un dôme escarpé et raboteux.

Hydroclimatologie:

La plaine d'El-Outaya est caractérisée par un climat hyperaride à steppique avec des tendances sahariennes caractérisée par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année. Tous les facteurs par lesquels se manifeste l'aridité à savoir; les faibles moyennes annuelles de précipitation et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps ainsi que les fortes évaporations sont réunis dans le climat de la plaine d'El-Outaya. Ce caractère est confirmé par différentes méthodes.

La pluviométrie est caractérisée par une irrégularité et oscille entre 107 mm et 144 mm. Les mois de l'hiver sont les plus arrosés mais la différence entre les saisons est parfois négligeable. Concernant les températures, elles varient entre 20 et 21 C°. On constate une stabilité des valeurs dans le temps. Mais elles présentent une variation entre le max et le min très importante.

L'évapotranspiration potentielle varie entre 1095 mm et 1275 mm par an et consomme la totalité des précipitations donnant un déficit sur toute l'année qui dépasse 1200mm imposant alors l'irrigation des cultures.

Les termes ruissèlements (R) et infiltrations (I) estimés par des méthodes empiriques sont nuls et le bilan hydrologique est largement déficitaire. Par contre, les mesures effectuées à la station hydrométrique d'El-Kantara donnent une lame ruisselée moyenne sur 7 ans de l'ordre de 8,04 mm.

Hydrogéologie:

L'aquifère Néogène représente la plus importante ressource de la plaine d'El-Outaya utilisée pour l'irrigation. Cet aquifère peut être décrit selon les études géologiques comme un réservoir multicouche à cause de nombreuses passées argileuses ou bien grésifiées. C'est un aquifère complexe par sa composition lithologique hétérogène, et sa structure tectonique. Le problème posé par les exploitants lié à cette ressource est plutôt qualitatif que quantitatif. La combinaison entre les outils; géologique, géophysique et des sondages mécaniques nous permettent l'identification de trois niveaux productifs:

- Un niveau libre dans les terrasses de l'oued en relation directe avec ce dernier et d'une épaisseur qui dépasse 30 mètre.
- Un deuxième niveau constitué de conglomérats pliocènes se trouvant à l'est de la plaine et d'une puissance de 200 m avec des résistivités élevées. Il diminue en épaisseur et en résistivité en allant vers le centre.
- Un dernier niveau d'âge Miocène composé de plusieurs niveaux perméables séparés par des argiles contenant des gypses. Il est important dans la partie centrale de la plaine. Il est hétérogène et sa structure est affectée par la tectonique.

L'aquifère Néogène est moins important en épaisseurs vers les bordures Ouest de la plaine. Nous pensons qu'il existe une relation entre les calcaires Eocènes du substratum et notre aquifère surtout dans les endroits où la base de ce dernier est constituée de niveaux conglomératiques importants.

L'établissement de la carte piézométrique a mis en évidence deux directions privilégiées des eaux souterraines:

- Un écoulement de l'Est vers l'Ouest dans la partie est de la plaine qui se fait à partir des conglomérats Pliocènes.
- Un écoulement du N NE-S SW et N NW-S SE au centre de la plaine.

Hydrochimie:

Le chimisme des eaux de l'aquifère Néogène - Quaternaire de la plaine d'El-Outaya est caractérisé par une grande variabilité de la salinité dans l'espace. La minéralisation augmente progressivement d'Est vers le centre de la plaine et du nord vers le sud. Les eaux sont moins chargées en sels à l'Est, alors qu'elles présentent au centre et au nord; une salinité assez élevée. Cette salinité est surtout contrôlée par les éléments Chlorures, Sulfates et Sodium.

Les eaux de la plaine se regroupent en trois familles chimiques:

- Familles des eaux chlorurées sodiques se localisant sur l'axe Nord-Sud dans la partie centrale. Elles sont le résultat de la dissolution des formations triasiques (diapir de

sel). Ces eaux sont très chargées en sels et comportent les valeurs extrêmes de la conductivité.

- Familles des eaux sulfatées magnésiennes occupant la partie Est de la zone étudiée. Elles sont le résultat de la dissolution des roches évaporitiques de l'Aquifère Néogène. Ces eaux sont moins chargées que les précédentes et englobent les valeurs minimales de conductivité.
- Famille des eaux sulfatées sodiques se trouvant en transition entre les deux dernières familles et peut être expliqué par un échange de base entre le magnésium et le sodium. Elles se localisent à la limite de la zone Est en allant vers l'Ouest.
- L'étude de l'origine de cette salinité par différentes méthodes nous a permis de dire que l'origine évaporitique est sans équivoque. Elle est le résultat de l'effet combiné du lessivage du Trias salifère affleurant au Nord et la dissolution des formations néogènes riches en gypses.

Concernant l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, Nous constatons que les eaux contenues dans les conglomérats du Pliocène se trouvant à l'Est de la plaine sont admissibles et peuvent être utilisées. Par contre, les eaux de la partie centrale et Ouest ne peuvent être exploitées pour l'irrigation qu'après une dilution par les eaux du barrage moins chargées.

Par ailleurs, l'étude des rejets du complexe Enasel déversés dans la plaine révèle des teneurs très élevées en éléments chimiques. Le sodium atteint le seuil de 95 g/l et les chlorures 140 g/l. Ces rejets peuvent être néfastes à la fois sur les eaux souterraines et le sol.

Recommandations:

- Les échanges entre nappe profonde (Crétacé) et nappe superficielle (Néogène-Quaternaire) sont conditionnés par la répartition des charges dans l'aquifère profond. Les exploitants des calcaires de la nappe profonde ne se peignent pas actuellement de la salinité. Cependant, les pompages dans cette aquifère (profond) conduisent à réduire la différence de pression entre nappe superficielle et nappe profonde et provoquer la dégradation de celle-ci. Une modélisation des écoulements est dès lors nécessaire pour évaluer l'impact de l'exploitation des forages dans la dégradation de la ressource. Ce

modèle sera bâti à partir du schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère et des sections descriptives des circulations de l'eau souterraine. Il tiendra en compte l'hydrodynamisme des deux nappes pour établir avec certitude les mécanismes d'échanges entre ces dernières.

- Les rejets des saumures sont à ce jour déversés dans la plaine, il faut penser tout d'abord à établir un constat de l'évolution de ces derniers dans le sous sols ainsi que la réalisation d'un système étanche d'évacuation. La boue récupérée dans les bassins de décantation doit être bien étudiée pour une identification des différentes composantes afin de proposer une solution adéquate pour son stockage ou son traitement.

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques:

Abdeselem. M, Mania. J, Mudry J., Gelard J-P., Chauve P., Lami. H., Aigoun C. (2000): *Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). Rev. Sci. Eau. 13/2. 155-166.*

Agoussine. M, (2003): *Hydrologie en région aride et semi-aride: Cas du sud-est marocain. Journal terre et vie N° 69.*

Aissaoui. D, (1984) : *Les structures liées à l'accident sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Mannara, Algérie. Evolution géométrique et cinématique. Thèse 3ème cycle, Strasbourg. 105p*

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes et M. Smith (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. I. a. drainage, FAO: 56.

Appelo, C. A. J. et D. Postma (1996): *Geochemistry, groundwater and pollution.* A. A. Balkelma. Rotterdam. 536 p.

Areau, (2005): *Expertise technique sur l'impact des effluents et des bassins de décantation du complexe Enasel El-Outaya sur les eaux souterraines, le sol et le milieu environnemental 35p.*

Atteia, O. (2005): *Chimie et pollution des eaux souterraines.* Lavoisier. Paris. 398 p.

Bakalowicz. M, (1988): *La formation des travertins : aspects géochimiques. Essai de synthèse et de discussion n° XVII, U.A. 903 CNRS et ATP PIREN Aix en Provence.*

Barbiero. L, (1992): *Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la Vallée du Dallol Bosso (République du Niger). Cah. ORSTOM, Sér. Pédol; Vol. XX VII, n°2, pp 143-152.*

Barbiero L.,(1992): *Les sols alcalinisés du socle dans la Vallée du Fleuve Niger-Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse Doctorat, ENASA Rennes, 210p.*

Bellion J.C, (1973): *Etude géologique et hydrogéologique de la partie occidentale des monts de Bellezma. Thèse 3eme cycle; Paris VI.*

Boudoukha. A, Djaffer. R, Retima. A, Djabri. L et Souag. M, (1999): *Proposition de normes de potabilité des eaux domestiques pour l'Algérie du Nord. Eudil Info-EAU. Edit. Engineering Environment Consult. n° 24. 4-7.*

Brémond R. et Vuichard R. (1973): *Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris, 179 p.*

Brinis. N, (2003): *Essai d'explication de la salinité des eaux de la nappe du mio-pliocène, cas de la zone est de la plaine d'El-Outaya Biskra ALGERIE. Mémoire de magister, Univ.Badji mokhtar Annaba, 150p.*

Brinis.N et al, (2009): *La salinité des eaux souterraines de la zone Est de la plaine d'El-Outaya (Région de Biskra, Algérie). Publication au Bulletin du Service Géologique National. /Vol.20, N°1, pp.49-61.*

Brinis.N et al, (2010): *Evolution des Facies Chimiques des Eaux Souterraines dans da Plaine D'el-Outaya, Biskra, Algérie. Publication au Journal International Environmental Conflict Management, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 98-105.*

Brinis.N et al, (2011): *Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (W) de Biskra. Algérie. Publication au courrier du savoir- N°11, pp.41-46.*

BRL Ingénierie (2004): *Aménagement Hydro-agricole d'El-Outaya (950 Ha) contrôle technique et suivi des travaux, Monographie. 67p + plans et cartes.*

Carre. J, (1975): *Géochimie du strontium dans les eaux de la nappe et de surface de la région parisienne. Thèse 3^{ème} cycle Univ. Paris VI.*

Carte d'Algérie au 50 000 (1952): *Carte topographique d'El-Outaya (N° 290)*

Castany.G, (1982): *Principes et méthodes en hydrogéologie .Dunod édit.Paris. pp.173 - 187.*

Castany. G, Margat. J, (1977): *Dictionnaire français d'hydrogéologie. B.R.G.M, Serv. géol, nat. Orléans, 249 p.*

Castany, G. (1998): *Hydrogéologie: principes et méthodes. Dunod. Paris. 238 p.*

C.G.G (Campagne générale de Géophysique) (1971): *Etude géophysique de la plaine d'El-Outaya.*

Chabour. N, (2008): *Hydrogéologie du domaine de transition entre l'Atlas saharien et la plate forme saharienne à l'Esr de l'Algérie. Thèse de doctorat d'état de l'Université mentouri. 176p.*

Chebbah. M, (2007): *Caractérisation sédimentologique et géochimique du Néogène, de part et d'autre de l'accident sud-atlasique, région de Biskra. Thèse de doctorat d'état de l'Université mentouri. 417p.*

Chebbah. M, Marmi. R, et Lamouroux. C, (2008): *Sédimentologie des faciès et paléogéographie du bassin d'El-Outaya au Néogène (Atlas saharien, Algérie). Bulletin du Service Géologique National. Vol. 19, n°3, pp. 235 - 244.*

Cote. M, (2001): *Quelques idées simples sur le fait semi-aride au maghreb. 1-2. pages.*

Debieche,T.H,(2002): *Evolution 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 Sybouse Nord-Est Algérien. pp.125-132.*

Delartigue (1904): *Monographie de l'Aurès. 285p.*

D E M R H, (1980): *Notice explicative de la carte hydrogéologique de Biskra. Rapp. Int, D.E.M.R.H / Minis. Hydrau. Algerie, 51p + 1 carte.*

DHW(Biskra): *Rapport de fin de sondage, plaine d'El-Outaya*

Djabri, L et al, (2001): *Mise en évidence du processus de salinité des eaux souterraines. Tribune de l'eau, No2, Vol.54 . No610 , Revue du centre d'étude et de documentation de l'eau , Edition Cebedoc, Liège, Belgique, pp29-43.*

Donnen. L.D, (1962): *The influence of crop and soil on percolating waters, Proc.1961 Biennial Conf. On Groundwater Recharge.pages, 10.*

DPAT (W Biskra), (2009): *Monographie de la wilaya de Biskra.*

Drever, J. I. (1997): *The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments. London. 436 p*

Droubi, A. (1976): *Géochimie des sels des solutions concentrées par évaporation. Modèles thermodynamique de simulation, application aux sols salés du Tchad. Mémoire Docteur-Ingénieur (Sciences géologiques, 46), ULP, Strasbourg, 177p.*

Droubi, A. (1976): *Equilibres entre minéraux et solutions. Programme de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des dises optimales d'irrigation. Cah. ORSTOM,sér. Pédol.,vol. XIV, n°1, pp 13-38.*

Edmunds, W. M., A. H. Bath et D. L. Miles (1982): *Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England. Geochimica et Cosmochimica Acta 46 pp. 2069-2081.*

El Achheb A., Mania J., Mudry J. et Chauve P. (2000): *Contribution des rapports molaires Sr/Cl et Sr/Ca dans la détermination de l'origine de la salinité et la caractérisation de l'aquifère des Doukkala (Maroc). Proc. TraM'2000, Liège Belgique, pp 10-20.*

ENAGEO, (2002): *Etude géophysique par sondages électriques verticaux. Site Chetma Droh (W Biskra). 11 pages.*

Energoprojekt, (1987): *Compte rendu des forages d'explorations Barrage Fontaine des Gazelles. pp. 12- 26.*

Fetter, C. W. (1994): *Applied hydrogeology.* M. C. P. Company. New York. 691 p.

Fisher R. S. and Mullican W. F. (1997): *Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan desert, Trans-ecos, Texas, USA. Hydrogeology journal, V.5, n°2.*

F.A.O, (1985): *Water quality for irrigation, Irrigation and drainage paper N°29, pages 78, ONU.*

Garrels, R. M. et F. T. Mackenzie (1971): *Evolution of sedimentary rocks.* N. Company. New York. 397 p.

Guiraud. R (1970): *Sur la présence de décrochements dextres dans l'Atlas Saharien. Interprétation mégamétrique. C.Som. S.G.F., 8, p. 316-318.*

Guiraud. R. (1973): *Evolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sci. Univ. Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.*

Guiraud. R. (1974): *A la recherche du rhéglatisme de l'Algérie du Nord et des régions voisines. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon. 3^{ème} série, Fasc. 22.*

Guiraud. R. (1986): *Corrélations entre les principaux évènements géodynamiques enregistrés du Trias à nos jours sur les marges alpine et atlantique de la plaque africaine. Mém. de la Fac. des Sci. de Marrakech.*

- Guiraud. R. (1978) :** *Le « continental terminal » en Algérie. Ann.Fac.SC.Dakar, t31, pp.85-87.*
- Guiraud. R. (1990) :** *Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Pub.ONG, Alger ; 259p.*
- Gousskov. N, (1947):** *Reconstitution du barrage avec les sondages de reconnaissances (Branis). Carte + coupes.*
- Gousskov, (1947):** *Alimentation en eau potable de l'Oasis de Branis. Rapport géologique des sondages de reconnaissance.*
- Gousskov. N, (1955):** *Etude hydrogéologique générale de la plaine d'El-Outaya – Demande de forages de reconnaissance dans la fraction des Amours et fraction des Ghamra. Serv. Colon. Et Hydraul., Et. Scient, dactylographié.*
- Gousskov. N, (1962):** *Carte géologique de l'Algérie au 1/200 000. Feuille de Biskra.*
- Haouchine. A, (2010):** *Hydrogéologie en zone semi-aride et aride: Région de Biskra. Thèse de doctorat d'état en Hydrogéologie de l'USTHB. 155 pages.*
- Hassani. M D, (1987):** *Etude hydrogéologique d'un bassin endoréique en zone semi-aride: Cas du bassin versant de la grande sebkha d'ORAN. Thèse de doctorat pp. 63-72.*
- Hsissou .Y et al, (1996):** *Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport Des concentrations molaires Sr/Ca. Journal of hydrogeology 183, 448, 450 pages.*
- Hubbert, M. K. (1940):** *The Theory of Ground-Water Motion. Journal of Geology 48 (8) pp.795-944.*
- Hydroconsult Bratislava, (1983):** *Rapport géologique du Barrage Fontaine des Gazelles. pp. 5-11.*

Jeannolin, F. (1985): *Sédimentologie et hydrogéologie du Néogène de l'Est Valentinois et du bassin de Crest (Drôme-France). Thèse de doctorat Grenoble (université scientifique et médicale) 253 p.*

Journal officiel, N° (51/2000): *Arrêté du 26 juillet relatif aux spécifications des eaux de boisson préemballées et aux modalités de leur présentation émanant du ministère du commerce.*

Kardache. R. (1988): *Ressources en eau des Karsts du Sud Est Algérien. Thèse de docteur ingénieur de l'Un. des sciences et techniques du Languedoc. 236 p.*

Kazi Tani. N. (1986): *Evolution géodynamique de la bordure Nord-africaine: le domaine intraplaque nord-algerien. Approche megaséquentielle. Thèse ès Sci. Univ. de Pau. 2 tomes , 871 p.*

Khechaj. S (2001): *Contribution à l'étude du comportement hydrophysique des sols du périmètre irrigué de l'ITDAS, dans la plaine d'El-Outaya (W-Biskra). Mem. De Magister. Université de Batna. 178p.*

Lafitte. R. (1939): *Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2^{ème} sér., Stratigr. Descript. Région. N°15, 451p.*

Mangin A. (1974): *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Concepts méthodologiques adoptés. Systèmes karstiques étudiés. Ann. Spéol. 29, 4, 495.601.*

Meyrbek. M. (1984): *Les fleuves et le cycle géochimiques des éléments. Thèse Paris VI, E N Sup.*

Moulin. M. (1969): *Eude hydrochimique de l'anticlinal du Bou Rhezal (Biskra, Algérie). Mem. B.R.G.M, n° 76, Journ. H. Schoeller. Congr. nat. hydrog. Bordeaux, pp 543-559.*

Plummer.L.N., Jones. B.F. and Trudell. A.H., (1976) (revised 1978, 1984): *WATEQF, a FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of naturel Investigations paper 76- 13.*

Rémi De La Vaissière. R, (2006): *Etude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-Est de la France). Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.333 p.*

Richards, L A., (1954): *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agric. Handbook 60; USDA, Washington D.C., pages 160;*

Rodier J, (1996): *L'analyse de l'eau Ed. Dunod. Paris.*

Rhoades, J.D (1972): *Quality of water for irrigation, Soil Sciences, Vol.113, N°4, pp 277-284.*

Sass, E et Starinsky, L. (1978): *Behaviour of strontium in subsurface calcium chloride brines, Southern Israel and Dead Sea rift valley .Geochimica et Cosmocimica Acta ; 43 : 885-895 .*

Schoeller, H. (1962): *Les eaux souterraines: Géochimie, eaux du gypse et des terrains salifères Masson et Cie édition Paris IV, 362 pages.*

Scofield, C.S (1936): *The salinity of irrigation water. Smithsonian Institute Annuel Report, Vol. 35. pp 275-287.*

SONAREM, (1971): *Mise en valeur du gisement de sel d'El-Outaya. Rapport géologique et hydrogéologique.*

SONATRACH, (1999), *Géologie de l'Algérie, 93 pages*

Tractionel, (1974): *Mise en valeur du gisement de sel d'El-Outaya. Etude géologique et hydrogéologique. pp.15-27.*

Vila J.M. (1980): *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Th. Doc. Es. Sc. Nat. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI. 665. p*

Wildi. W. (1983): *La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure stratigraphique et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. dyn. Et Géogr. Phys., n° sp., n°24, n° 3, p. 201-298.*

Wilcox.L.V, (1955): *Classification and use for irrigation waters. USDA, Circ. 969, Washington, D.C., 119 p.*

ANNEXES

Annexe I: Classification ascendante hiérarchique (CAH)

XLSTAT 2007.1 - Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) - le 04/02/2010 à 15:37:05

Tableau observations/variables : Classeur = statistica.xls / Feuille = Feuil1 / Plage = Feuil1\$B\$1:\$I\$35 / 34 lignes et 8 colonnes

Dissimilarité : Distance euclidienne

Méthode d'agrégation : Méthode de Ward

Troncature : Automatique

Statistiques simples :

Variable	Observations	rec données manq	ans données manq	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca	34	0	34	96.000	348.000	200.618	66.767
Mg	34	0	34	77.000	250.000	183.882	55.863
Na	34	0	34	92.000	997.000	440.000	254.106
K	34	0	34	2.000	6.000	3.735	1.310
HCO3	34	0	34	98.000	314.000	149.559	45.411
SO4	34	0	34	420.000	1672.000	959.412	371.117
Cl	34	0	34	219.000	1328.000	725.676	353.823
Con	34	0	34	1110.000	5940.000	3474.706	1423.234

Matrice de proximité (Distance euclidienne) :

	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5	Obs6	Obs7	Obs8	Obs9	Obs10
Obs1	0	3.196	4.496	2.397	2.822	3.112	1.622	3.190	3.097	3.356
Obs2	3.196	0	5.142	2.194	2.506	0.746	3.665	5.032	3.095	5.132
Obs3	4.496	5.142	0	5.197	3.944	4.947	4.160	3.971	2.607	4.139
Obs4	2.397	2.194	5.197	0	2.412	1.902	2.440	5.012	3.683	5.160
Obs5	2.822	2.506	3.944	2.412	0	2.104	2.367	4.504	2.256	4.631
Obs6	3.112	0.746	4.947	1.902	2.104	0	3.358	4.922	2.945	5.030
Obs7	1.622	3.665	4.160	2.440	2.367	3.358	0	3.441	2.983	3.601
Obs8	3.190	5.032	3.971	5.012	4.504	4.922	3.441	0	3.127	0.281
Obs9	3.097	3.095	2.607	3.683	2.256	2.945	2.983	3.127	0	3.241
Obs10	3.356	5.132	4.139	5.160	4.631	5.030	3.601	0.281	3.241	0
Obs11	3.122	0.158	5.071	2.223	2.470	0.734	3.620	4.919	3.001	5.020
Obs12	1.873	2.764	4.536	1.697	1.570	2.442	1.201	4.120	2.885	4.252
Obs13	2.386	2.622	3.969	1.905	0.879	2.269	1.749	4.408	2.498	4.555
Obs14	3.510	2.616	4.266	3.022	0.861	2.223	3.152	4.918	2.453	5.019
Obs15	3.392	0.633	5.346	1.958	2.606	0.832	3.788	5.451	3.485	5.562
Obs16	3.318	0.617	5.192	1.927	2.515	0.799	3.705	5.358	3.362	5.472
Obs17	4.242	5.169	4.337	5.738	4.850	5.057	4.650	1.975	3.362	1.893
Obs18	2.888	2.424	3.815	3.297	1.957	2.276	2.930	3.332	1.387	3.393
Obs19	3.188	0.186	5.049	2.111	2.448	0.686	3.619	5.047	3.057	5.155
Obs20	2.953	2.860	2.781	3.317	1.735	2.674	2.697	3.474	1.052	3.595
Obs21	4.962	3.433	6.415	2.803	3.804	3.254	4.840	7.512	5.376	7.672
Obs22	2.862	2.706	5.626	0.839	2.544	2.314	2.630	5.499	4.168	5.648
Obs23	5.292	3.618	6.222	3.296	3.753	3.425	5.121	7.697	5.306	7.859
Obs24	4.424	3.298	6.395	2.265	3.568	3.143	4.268	7.133	5.203	7.289
Obs25	4.609	2.602	6.052	2.724	3.259	2.381	4.729	6.941	4.764	7.087
Obs26	4.514	2.594	5.853	2.710	3.186	2.370	4.650	6.813	4.645	6.964
Obs27	3.381	5.032	4.398	5.087	4.631	4.915	3.631	0.670	3.358	0.532
Obs28	2.332	2.529	4.252	1.973	0.819	2.162	1.744	4.288	2.498	4.413
Obs29	4.006	5.238	4.716	5.632	4.991	5.138	4.445	1.542	3.618	1.401
Obs30	2.155	3.442	3.749	3.605	3.007	3.340	2.411	1.731	2.022	1.832
Obs31	1.711	2.797	3.231	2.765	1.816	2.656	2.070	3.184	1.757	3.350
Obs32	5.089	3.586	6.548	2.924	3.977	3.400	4.985	7.652	5.545	7.814
Obs33	4.914	3.097	6.096	3.016	3.660	2.886	5.011	7.244	5.083	7.402
Obs34	5.005	3.545	6.378	2.866	3.831	3.356	4.853	7.549	5.399	7.712

	Obs11	Obs12	Obs13	Obs14	Obs15	Obs16	Obs17	Obs18	Obs19	Obs20
3.122	1.873	2.386	3.510	3.392	3.318	4.242	2.888	3.188	2.953	
0.158	2.764	2.622	2.616	0.633	0.617	5.169	2.424	0.186	2.860	
5.071	4.536	3.969	4.266	5.346	5.192	4.337	3.815	5.049	2.781	
2.223	1.697	1.905	3.022	1.958	1.927	5.738	3.297	2.111	3.317	
2.470	1.570	0.879	0.861	2.606	2.515	4.850	1.957	2.448	1.735	
0.734	2.442	2.269	2.223	0.832	0.799	5.057	2.276	0.686	2.674	
3.620	1.201	1.749	3.152	3.788	3.705	4.650	2.930	3.619	2.697	
4.919	4.120	4.408	4.918	5.451	5.358	1.975	3.332	5.047	3.474	
3.001	2.885	2.498	2.453	3.485	3.362	3.362	1.387	3.057	1.052	
5.020	4.252	4.555	5.019	5.562	5.472	1.893	3.393	5.155	3.595	
0	2.742	2.606	2.577	0.749	0.723	5.037	2.324	0.265	2.789	
2.742	0	0.977	2.314	2.844	2.781	4.977	2.496	2.726	2.471	
2.606	0.977	0	1.717	2.654	2.558	5.085	2.357	2.544	1.987	
2.577	2.314	1.717	0	2.751	2.680	4.965	1.993	2.582	2.013	
0.749	2.844	2.654	2.751	0	0.161	5.633	2.894	0.557	3.179	
0.723	2.781	2.558	2.680	0.161	0	5.549	2.811	0.508	3.051	
5.037	4.977	5.085	4.965	5.633	5.549	0	3.323	5.211	3.724	
2.324	2.496	2.357	1.993	2.894	2.811	3.323	0	2.453	1.295	
0.265	2.726	2.544	2.582	0.557	0.508	5.211	2.453	0	2.817	
2.789	2.471	1.987	2.013	3.179	3.051	3.724	1.295	2.817	0	
3.537	3.982	3.589	4.053	2.863	2.867	7.973	5.160	3.304	4.903	
2.742	1.841	2.077	3.105	2.421	2.415	6.211	3.707	2.629	3.711	
3.712	4.249	3.682	3.879	3.090	3.074	8.036	5.177	3.483	4.837	
3.400	3.416	3.194	3.943	2.781	2.791	7.779	4.946	3.184	4.751	
2.676	3.783	3.358	3.299	2.072	2.086	7.052	4.347	2.498	4.281	
2.660	3.744	3.285	3.248	2.082	2.077	6.915	4.269	2.484	4.148	
4.921	4.225	4.575	4.997	5.462	5.381	1.793	3.328	5.064	3.628	
2.504	0.781	0.554	1.553	2.629	2.554	4.901	2.104	2.485	2.027	
5.111	4.859	5.117	5.195	5.701	5.627	0.829	3.488	5.288	3.961	
3.336	2.694	2.959	3.419	3.879	3.790	2.524	1.792	3.464	2.109	
2.704	1.998	1.791	2.370	3.063	2.942	3.711	1.851	2.763	1.545	
3.688	4.145	3.763	4.223	3.005	3.012	8.103	5.334	3.458	5.080	
3.171	4.161	3.685	3.763	2.546	2.539	7.391	4.804	2.975	4.597	
3.647	4.019	3.604	4.090	2.981	2.979	8.027	5.224	3.412	4.932	

Obs21	Obs22	Obs23	Obs24	Obs25	Obs26	Obs27	Obs28	Obs29	Obs30	Obs31	Obs32	Obs33	Obs34
4.962	2.862	5.292	4.424	4.609	4.514	3.381	2.332	4.006	2.155	1.711	5.089	4.914	5.005
3.433	2.706	3.618	3.298	2.602	2.594	5.032	2.529	5.238	3.442	2.797	3.586	3.097	3.545
6.415	5.626	6.222	6.395	6.052	5.853	4.398	4.252	4.716	3.749	3.231	6.548	6.096	6.378
2.803	0.839	3.296	2.265	2.724	2.710	5.087	1.973	5.632	3.605	2.765	2.924	3.016	2.866
3.804	2.544	3.753	3.568	3.259	3.186	4.631	0.819	4.991	3.007	1.816	3.977	3.660	3.831
3.254	2.314	3.425	3.143	2.381	2.370	4.915	2.162	5.138	3.340	2.656	3.400	2.886	3.356
4.840	2.630	5.121	4.268	4.729	4.650	3.631	1.744	4.445	2.411	2.070	4.985	5.011	4.853
7.512	5.499	7.697	7.133	6.941	6.813	0.670	4.288	1.542	1.731	3.184	7.652	7.244	7.549
5.376	4.188	5.306	5.203	4.764	4.645	3.358	2.498	3.618	2.022	1.757	5.545	5.083	5.399
7.672	5.648	7.859	7.289	7.087	6.964	0.532	4.413	1.401	1.832	3.350	7.814	7.402	7.712
3.537	2.742	3.712	3.400	2.676	2.660	4.921	2.504	5.111	3.336	2.704	3.688	3.171	3.647
3.982	1.841	4.249	3.416	3.783	3.744	4.225	0.781	4.859	2.694	1.998	4.145	4.161	4.019
3.589	2.077	3.682	3.194	3.358	3.285	4.575	0.554	5.117	2.959	1.791	3.763	3.685	3.604
4.053	3.105	3.879	3.943	3.299	3.248	4.997	1.553	5.195	3.419	2.370	4.223	3.763	4.090
2.863	2.421	3.090	2.781	2.072	2.082	5.462	2.629	5.701	3.879	3.063	3.005	2.546	2.981
2.867	2.415	3.074	2.791	2.086	2.077	5.381	2.554	5.627	3.790	2.942	3.012	2.539	2.979
7.973	6.211	8.036	7.779	7.052	6.915	1.793	4.901	0.829	2.524	3.711	8.103	7.391	8.027
5.160	3.707	5.177	4.946	4.347	4.269	3.328	2.104	3.488	1.792	1.851	5.334	4.804	5.224
3.304	2.629	3.483	3.184	2.498	2.484	5.064	2.485	5.288	3.464	2.763	3.458	2.975	3.412
4.903	3.711	4.837	4.751	4.281	4.148	3.628	2.027	3.961	2.109	1.545	5.080	4.597	4.932
0	2.652	0.872	0.984	1.602	1.696	7.626	3.839	8.052	6.029	4.757	0.236	1.429	0.185
2.652	0	3.173	2.074	2.669	2.691	5.550	2.110	6.104	4.082	3.233	2.762	2.975	2.715
0.872	3.173	0	1.680	1.599	1.653	7.837	3.958	8.198	6.211	4.814	0.930	1.363	0.815
0.984	2.074	1.680	0	2.124	2.227	7.252	3.412	7.771	5.660	4.468	1.109	2.169	1.021
1.602	2.669	1.599	2.124	0	0.285	6.995	3.489	7.215	5.408	4.164	1.655	0.703	1.715
1.696	2.691	1.653	2.227	0.285	0	6.876	3.443	7.093	5.302	4.022	1.747	0.633	1.794
7.626	5.550	7.837	7.252	6.995	6.878	0	4.398	1.194	1.772	3.437	7.765	7.326	7.676
3.839	2.110	3.958	3.412	3.489	3.443	4.398	0	4.905	2.780	1.836	4.014	3.898	3.873
8.052	6.104	8.198	7.771	7.215	7.093	1.194	4.905	0	2.353	3.808	8.183	7.569	8.110
6.029	4.082	6.211	5.660	5.408	5.302	1.772	2.780	2.353	0	1.916	6.186	5.778	6.084
4.757	3.233	4.814	4.468	4.164	4.022	3.437	1.836	3.808	1.916	0	4.906	4.466	4.784
0.236	2.762	0.930	1.109	1.655	1.747	7.765	4.014	8.183	6.186	4.906	0	1.413	0.266
1.429	2.975	1.363	2.169	0.703	0.633	7.326	3.898	7.569	5.778	4.466	1.413	0	1.501
0.185	2.715	0.815	1.021	1.715	1.794	7.676	3.873	8.110	6.084	4.784	0.266	1.501	0

Statistiques des noeuds :

Noeud	Niveau	Poids	Objets	Fils gauche	Fils droit
	67	113.491	34	59	66
	66	66.542	28	65	60
	65	23.238	20	50	64
	64	18.148	14	62	63
	63	7.225	5	3	56
	62	6.684	9	61	58
	61	5.869	4	55	46
	60	4.784	8	44	54
	59	3.641	6	45	57
	58	2.452	5	47	49
	57	2.306	4	43	30
	56	1.833	4	53	31
	55	1.316	2	1	7
	54	1.090	5	24	52
	53	1.016	3	18	51
	52	0.559	4	23	39
	51	0.553	2	9	20
	50	0.477	6	36	48
	49	0.470	3	12	42
	48	0.380	4	6	38
	47	0.371	2	5	14
	46	0.352	2	4	22
	45	0.344	2	17	29
	44	0.285	3	41	33
	43	0.231	3	40	27
	42	0.154	2	13	28
	41	0.041	2	25	26
	40	0.040	2	8	10
	39	0.036	3	32	37
	38	0.031	3	35	19
	37	0.017	2	21	34
	36	0.013	2	15	16
	35	0.012	2	2	11

Barycentres des classes :

Classe	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	Con
1	199.500	199.900	429.600	3.700	147.150	970.700	743.850	3593.000
2	307.833	232.500	870.500	5.333	193.167	1535.833	1254.000	5641.667
3	123.000	107.375	143.125	2.625	122.875	498.875	284.000	1553.750

Distances entre les barycentres des classes :

	1	2	3
1	0	2232.930	2165.570
2	2232.930	0	4394.438
3	2165.570	4394.438	0

Objets centraux :

Classe	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	Con
1 (Obs1)	280.000	207.000	398.000	6.000	154.000	939.000	823.000	3670.000
2 (Obs10)	302.000	250.000	875.000	6.000	205.000	1511.000	1283.000	5530.000
3 (Obs24)	104.000	141.000	102.000	4.000	110.000	448.000	278.000	1430.000

Distances entre les objets centraux :

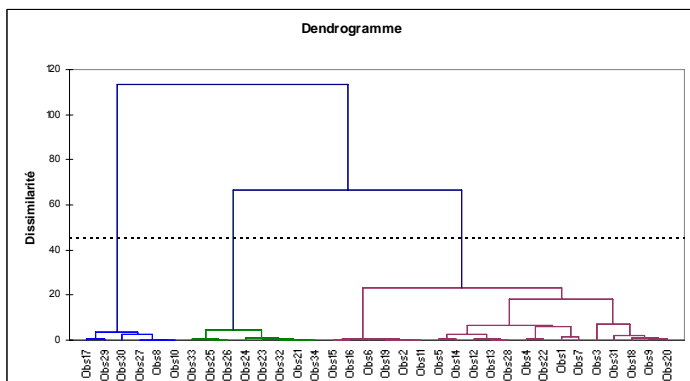
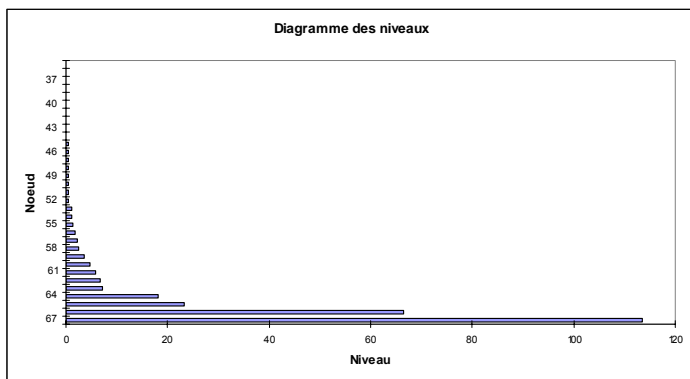
	1 (Obs1)	2 (Obs10)	3 (Obs24)
1 (Obs1)	0	2056.902	2383.400
2 (Obs10)	2056.902	0	4428.051
3 (Obs24)	2383.400	4428.051	0

Résultats par classe :

Classe	1	2	3
Objets	20	6	8
Somme des poids	20	6	8
Variance intra-classe	468832.584	128567.633	212842.554
Distance minimale au barycentre	144.153	120.117	145.907
Distance moyenne au barycentre	554.927	299.349	392.050
Distance maximale au barycentre	1321.308	528.479	713.094
	Obs1	Obs8	Obs21
	Obs2	Obs10	Obs23
	Obs3	Obs17	Obs24
	Obs4	Obs27	Obs25
	Obs5	Obs29	Obs26
	Obs6	Obs30	Obs32
	Obs7		Obs33
	Obs9		Obs34
	Obs11		
	Obs12		
	Obs13		
	Obs14		
	Obs15		
	Obs16		
	Obs18		
	Obs19		
	Obs20		
	Obs22		
	Obs28		
	Obs31		

Résultats par objet :

Observation	Classe
Obs1	1
Obs2	1
Obs3	1
Obs4	1
Obs5	1
Obs6	1
Obs7	1
Obs8	2
Obs9	1
Obs10	2
Obs11	1
Obs12	1
Obs13	1
Obs14	1
Obs15	1
Obs16	1
Obs17	2
Obs18	1
Obs19	1
Obs20	1
Obs21	3
Obs22	1
Obs23	3
Obs24	3
Obs25	3
Obs26	3
Obs27	2
Obs28	1
Obs29	2
Obs30	2
Obs31	1
Obs32	3
Obs33	3
Obs34	3



XLSTAT 2007.1 - Tests de corrélation - le 26/01/2010 à 18:02:12
 Tableau observations/variables : Classeur = donnees reelles...xls / Feuille = Feuil1 / Plage = Feuil1\$A\$1:\$K\$35 / 34 lignes et 11 colonnes
 Type de corrélation : Pearson

Statistiques simples :

Variable	Observations	c données	mas données	ma	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca	34	0	34	96.000	348.000	200.618	66.767	
Mg	34	0	34	77.000	250.000	183.882	55.863	
Na	34	0	34	92.000	997.000	440.000	254.106	
K	34	0	34	2.000	6.000	3.735	1.310	
HCO3	34	0	34	98.000	314.000	149.559	45.411	
SO4	34	0	34	420.000	1672.000	959.412	371.117	
Cl	34	0	34	219.000	1328.000	725.676	353.823	
TDS	34	0	34	1080.000	4980.000	2999.412	1198.439	
Con	34	0	34	1.110	5.940	3.475	1.423	
pH	34	0	34	7.400	8.820	7.849	0.280	
NO3	34	0	34	0.000	30.000	10.088	5.786	

Matrice de corrélation (Pearson) :

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	TDS	Con	pH	NO3
Ca	1	0.699	0.902	0.600	0.574	0.901	0.868	0.928	0.921	0.188	0.346
Mg	0.699	1	0.635	0.546	0.687	0.844	0.638	0.803	0.787	0.260	0.453
Na	0.902	0.635	1	0.480	0.559	0.858	0.970	0.942	0.949	0.204	0.514
K	0.600	0.546	0.480	1	0.343	0.606	0.444	0.547	0.507	0.222	0.315
HCO3	0.574	0.687	0.559	0.343	1	0.635	0.533	0.599	0.582	0.102	0.246
SO4	0.901	0.844	0.858	0.606	0.635	1	0.783	0.924	0.916	0.183	0.452
Cl	0.868	0.638	0.970	0.444	0.533	0.783	1	0.934	0.938	0.246	0.477
TDS	0.928	0.803	0.942	0.547	0.599	0.924	0.934	1	0.995	0.260	0.532
Con	0.921	0.787	0.949	0.507	0.582	0.916	0.938	0.995	1	0.257	0.528
pH	0.188	0.260	0.204	0.222	0.102	0.183	0.246	0.260	0.257	1	0.183
NO3	0.346	0.453	0.514	0.315	0.246	0.452	0.477	0.532	0.528	0.183	1

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

p-values :

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	TDS	Con	pH	NO3
Ca	0	< 0,0001	< 0,0001	0,000	0,000	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.286	0.045
Mg	< 0,0001	0	< 0,0001	0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.137	0.007
Na	< 0,0001	< 0,0001	0	0,004	0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.247	0.002
K	0,000	0,001	0,004	0	0,047	0,000	0,008	0,001	0,002	0.208	0.070
HCO3	0,000	< 0,0001	0,001	0,047	0	< 0,0001	0,001	0,000	0,000	0.566	0.160
SO4	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,000	< 0,0001	0	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.301	0.007
Cl	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,008	0,001	< 0,0001	0	< 0,0001	< 0,0001	0.162	0.004
TDS	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,001	0,000	< 0,0001	< 0,0001	0	< 0,0001	0.138	0.001
Con	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,002	0,000	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0	0.143	0.001
pH	0.286	0.137	0.247	0.208	0.566	0.301	0.162	0.138	0.143	0	0.301
NO3	0.045	0.007	0.002	0.070	0.160	0.007	0.004	0.001	0.001	0.301	0

Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

Coefficients de détermination (R²) :

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	TDS	Con	pH	NO3
Ca	1	0.488	0.814	0.360	0.330	0.811	0.754	0.861	0.848	0.035	0.120
Mg	0.488	1	0.404	0.298	0.471	0.712	0.407	0.645	0.619	0.068	0.205
Na	0.814	0.404	1	0.231	0.312	0.736	0.942	0.888	0.900	0.042	0.264
K	0.360	0.298	0.231	1	0.118	0.367	0.197	0.300	0.257	0.049	0.099
HCO3	0.330	0.471	0.312	0.118	1	0.404	0.284	0.358	0.339	0.010	0.061
SO4	0.811	0.712	0.736	0.367	0.404	1	0.614	0.853	0.839	0.033	0.205
Cl	0.754	0.407	0.942	0.197	0.284	0.614	1	0.872	0.880	0.060	0.227
TDS	0.861	0.645	0.888	0.300	0.358	0.853	0.872	1	0.990	0.067	0.283
Con	0.848	0.619	0.900	0.257	0.339	0.839	0.880	0.990	1	0.066	0.278
pH	0.035	0.068	0.042	0.049	0.010	0.033	0.060	0.067	0.066	1	0.033
NO3	0.120	0.205	0.264	0.099	0.061	0.205	0.227	0.283	0.278	0.033	1

Annexe II: Paramètres physico-chimiques

Ca++	Mg++	Nat	K+	Cl-	SO4--	HCO3-	NO3-	TDS	Miné	Con	pH	TH	Bal	S.A	S.C	Faibles
13.97	17.04	17.30	0.15	23.22	19.55	2.52	0.11	3296	2789	3670	7.9	155	3%	45.40	48.47	Chloruré sodique
9.23	12.76	21.22	0.08	26.09	14.99	1.61	0.18	3074	2794	3680	8.05	110	0%	42.87	43.28	Chloruré sodique
10.53	19.92	26.09	0.08	28.21	22.42	5.15	0.18	3484	3084	4080	7.75	152	1%	55.96	56.61	Chloruré sodique
8.98	12.59	21.09	0.08	22.85	19.43	1.75	0.08	2352	1914	2520	7.76	108	-2%	44.11	42.74	Chloruré sodique
14.97	20.08	35.83	0.15	36.11	31.02	3.44	0.29	2942	2600	3430	7.7	145	0%	70.86	71.03	Chloruré sodique
10.38	20.41	26.04	0.08	31.37	23.90	3.23	0.13	2840	2500	3290	8.11	108	-1%	58.63	56.91	Chloruré sodique
15.07	20.58	38.04	0.15	36.19	31.46	3.36	0.19	3162	2700	3560	8.1	151	2%	71.20	73.84	Chloruré sodique
9.58	12.84	21.30	0.08	26.80	15.62	1.64	0.11	4952	4080	5380	8.1	175	0%	44.17	43.80	Chloruré sodique
8.68	11.52	20.22	0.08	22.17	13.55	1.61	0.19	3516	3187	4200	7.85	154	4%	37.53	40.50	Chloruré sodique
8.73	11.69	20.22	0.08	22.28	13.53	1.72	0.34	4956	4197	5590	7.91	178	4%	37.88	40.71	Chloruré sodique
17.37	18.02	42.96	0.10	37.24	34.56	3.25	0.19	3158	2801	3690	7.95	112	2%	75.24	78.45	Chloruré sodique
10.98	19.01	26.00	0.08	27.11	25.46	2.36	0.48	2940	2614	3440	7.6	143	1%	55.42	56.07	Chloruré sodique
8.98	12.59	20.65	0.08	25.90	14.95	1.70	0.10	2846	2487	3280	8	140	0%	42.65	42.30	Chloruré sodique
9.98	19.01	22.09	0.08	23.47	22.84	3.18	0.23	3036	2674	3520	7.81	148	1%	49.72	51.16	Chloruré sodique
14.87	19.18	38.91	0.15	34.75	32.98	3.15	0.27	2614	2442	3220	7.5	101	1%	71.15	73.11	Chloruré sodique
17.17	18.27	43.35	0.13	37.46	34.81	3.02	0.24	2618	2487	3280	8.05	102	2%	75.53	78.91	Chloruré sodique
12.72	18.68	28.00	0.13	30.49	27.02	2.79	0.19	4912	4490	5920	8.07	177	-1%	60.50	59.54	Chloruré sodique
13.42	18.35	18.74	0.10	23.24	20.05	3.02	0.05	4290	3688	4860	8.05	150	4%	46.36	50.62	Chloruré sodique
9.88	19.18	14.30	0.08	15.06	23.19	2.52	0.11	3042	2704	3560	7.7	108	3%	40.89	43.44	Sulfaté magnésien
10.53	19.67	15.65	0.15	16.39	25.26	2.85	0.18	4056	3700	4870	8.15	145	1%	44.67	46.01	Sulfaté magnésien
9.68	18.93	14.22	0.13	14.95	22.86	2.26	0.19	1218	1003	1320	7.4	76	3%	40.27	42.96	Sulfaté magnésien
9.08	18.93	13.22	0.10	14.47	20.99	2.64	0.18	2166	1807	2380	7.6	104	4%	38.27	41.33	Sulfaté magnésien
9.98	19.67	15.13	0.05	15.26	24.76	2.29	0.13	1160	941	1240	7.42	76	3%	42.44	44.83	Sulfaté magnésien
4.89	9.14	5.00	0.08	6.97	8.95	2.00	0.16	1272	1087	1430	8.82	84	3%	18.08	19.10	Sulfaté magnésien
8.23	12.59	10.13	0.13	10.44	20.40	1.85	0.10	1818	1620	2130	7.42	80	-3%	32.79	31.08	Sulfaté magnésien
4.99	10.21	4.00	0.05	6.52	8.89	2.25	0.11	1886	1700	2240	7.85	81	4%	17.76	19.25	Sulfaté magnésien
5.19	11.60	4.43	0.10	7.84	9.33	1.80	0.08	4778	4409	5810	7.94	170	6%	19.05	21.33	Sulfaté magnésien
9.53	19.51	14.48	0.10	14.95	22.99	2.33	0.18	2942	2626	3460	7.8	145	4%	40.44	43.62	Sulfaté magnésien
4.99	8.40	4.96	0.08	6.18	8.74	2.00	0.11	4980	4507	5940	7.6	177	4%	17.03	18.42	Sulfaté magnésien
4.79	9.38	4.74	0.08	6.49	8.77	2.10	0.16	4478	4003	5270	7.85	157	4%	17.51	18.99	Sulfaté magnésien
8.73	12.84	15.48	0.13	15.43	17.47	2.00	0.19	3500	2973	3920	7.92	159	3%	35.09	37.18	Sulfaté sodique
8.08	7.90	8.87	0.05	10.63	13.53	1.82	0.02	1080	842	1110	7.4	67	-2%	26.00	24.91	Sulfaté sodique
8.48	7.74	9.17	0.05	10.72	13.43	2.00	0.00	1506	1348	1780	7.88	70	-1%	26.15	25.44	Sulfaté sodique
7.68	6.34	8.61	0.05	8.74	11.45	2.15	0.06	1108	898	1180	7.84	71	1%	22.41	22.68	Sulfaté sodique

Mg/HCO3	Mg/SO4	SO4/Cl	Mg/Ni	Mg/Ca	Ni/Ca	Mg/(HCO3+SO4)	Ni/Cl	Mg/SO4	Ca/(HCO3+SO4)	Ca/HCO3	Ca/SO4	HCO3+SO4
6.75	0.87	0.94	0.98	1.22	1.24	0.77	0.75	0.87	0.63	5.54	0.71	22.07
7.94	0.85	0.57	0.60	1.38	2.30	0.77	0.81	0.85	0.56	5.75	0.62	16.60
3.87	0.89	0.79	0.76	1.89	2.48	0.72	0.92	0.89	0.38	2.05	0.47	27.57
6.42	0.74	1.13	0.83	1.47	1.77	0.66	1.00	0.74	0.45	4.37	0.50	19.47
7.60	0.83	1.54	1.34	1.94	1.46	0.75	0.95	0.83	0.38	3.91	0.43	25.72
7.18	0.65	0.85	0.60	1.40	2.35	0.69	0.92	0.65	0.42	5.12	0.46	21.18
6.90	0.78	1.54	1.26	1.87	1.49	0.70	0.96	0.78	0.37	3.69	0.42	28.11
5.83	0.65	0.86	0.56	1.34	2.39	0.68	0.99	0.65	0.43	4.35	0.48	34.46
6.32	0.85	0.76	0.78	1.97	2.51	0.75	0.83	0.85	0.38	3.21	0.43	27.13
6.12	0.65	0.87	0.54	1.37	2.62	0.69	1.05	0.65	0.43	4.48	0.48	34.82
7.83	0.82	0.58	0.60	1.34	2.22	0.74	0.79	0.82	0.56	5.85	0.61	17.25
8.37	0.83	1.53	1.33	1.96	1.47	0.75	0.95	0.83	0.39	4.28	0.42	25.12
7.17	0.90	1.45	1.43	2.08	1.46	0.80	0.91	0.90	0.38	3.44	0.43	23.63
8.57	0.79	1.62	1.30	1.97	1.52	0.73	0.99	0.79	0.37	4.35	0.40	27.05
7.17	0.85	0.61	0.57	1.33	2.33	0.76	0.91	0.85	0.57	5.41	0.64	15.16
6.79	0.86	0.61	0.58	1.34	2.32	0.77	0.91	0.86	0.57	5.07	0.65	15.25
5.55	0.52	0.93	0.42	1.04	2.47	0.48	1.15	0.52	0.46	5.35	0.50	37.81
8.06	0.75	0.94	0.73	1.73	2.37	0.68	0.96	0.75	0.39	4.65	0.43	27.82
7.39	0.84	0.58	0.61	1.40	2.30	0.76	0.80	0.84	0.54	5.27	0.60	16.65
5.98	0.83	0.97	0.86	1.91	2.21	0.73	0.94	0.83	0.38	3.14	0.44	26.02
4.57	1.02	1.28	1.83	1.87	1.02	0.83	0.72	1.02	0.45	2.45	0.55	10.95
6.80	0.62	1.95	1.24	1.53	1.23	0.57	0.97	0.62	0.37	4.45	0.40	22.26
4.54	1.15	1.36	2.55	2.05	0.80	0.92	0.61	1.15	0.45	2.22	0.56	11.14
6.44	1.24	1.19	2.62	2.24	0.85	1.04	0.57	1.24	0.47	2.88	0.56	11.13
4.34	0.58	1.27	0.89	0.96	1.10	0.51	0.83	0.58	0.53	4.44	0.60	15.35
3.87	0.58	1.25	0.84	0.91	1.08	0.50	0.86	0.58	0.55	4.24	0.63	15.43
6.09	0.58	0.95	0.49	1.29	2.62	0.53	1.12	0.58	0.41	4.73	0.45	36.13
8.38	0.85	1.54	1.35	2.05	1.52	0.77	0.97	0.85	0.38	4.09	0.41	25.31
6.06	0.52	0.93	0.42	1.06	2.53	0.48	1.16	0.52	0.45	5.69	0.49	37.83
6.71	0.69	0.89	0.67	1.47	2.20	0.63	0.92	0.69	0.43	4.57	0.47	29.81
6.09	0.92	0.86	0.98	1.37	1.40	0.80	0.81	0.92	0.58	4.45	0.67	23.07
4.20	0.96	1.42	1.69	1.66	0.99	0.78	0.80	0.96	0.46	2.50	0.57	10.74
2.95	0.55	1.31	0.74	0.82	1.12	0.47	0.98	0.55	0.57	3.58	0.67	13.60
4.47	1.07	1.35	1.98	1.96	0.99	0.66	0.73	1.07	0.44	2.28	0.55	10.86

DONNEES CLASSEES EN LOG

N°	Log Fe	Log Cl	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO4--	HCO3-	NO3-	Con
32	0	0.790828	0.70	0.92	0.70	-1.12	0.79	0.94	0.30	-0.95	3.05
34	0.02128	0.812112	0.68	0.97	0.68	-1.12	0.81	0.94	0.32	-0.79	3.07
23	0.02317	0.819996	0.70	1.01	0.60	-1.29	0.81	0.95	0.35	-0.95	3.09
21	0.05225	0.843081	0.69	0.96	0.70	-1.12	0.84	0.95	0.30	-0.79	3.12
24	0.1036	0.894429	0.72	1.06	0.65	-0.99	0.89	0.97	0.28	-1.09	3.16
33	0.15092	0.941745	0.89	0.80	0.83	-1.29	0.94	1.06	0.33	-1.19	3.25
22	0.22776	1.018585	0.92	1.10	1.01	-0.89	1.02	1.31	0.27	-1.01	3.38
25	0.2359	1.026725	0.91	0.90	0.95	-1.29	1.03	1.13	0.26	-1.79	3.33
26	0.23934	1.030167	0.93	0.89	0.96	-1.29	1.03	1.13	0.30	-2.00	3.35
13	0.36967	1.160501	0.96	1.28	1.12	-0.99	1.16	1.32	0.42	-0.75	3.52
12	0.38383	1.17466	0.99	1.28	1.15	-0.89	1.17	1.36	0.35	-0.71	3.54
28	0.38383	1.17466	0.98	1.29	1.16	-0.99	1.17	1.36	0.37	-0.75	3.54
5	0.3871	1.177925	0.99	1.28	1.16	-1.12	1.18	1.37	0.40	-0.95	3.54
14	0.39275	1.183581	1.00	1.29	1.18	-1.29	1.18	1.39	0.36	-0.89	3.55
4	0.39754	1.188371	0.94	1.11	1.19	-0.89	1.19	1.24	0.30	-0.71	3.40
7	0.42373	1.21456	1.02	1.29	1.19	-0.81	1.21	1.40	0.46	-0.75	3.55
15	0.55498	1.345806	0.94	1.06	1.31	-1.12	1.35	1.13	0.21	-0.71	3.51
16	0.55718	1.348011	0.94	1.07	1.31	-1.12	1.35	1.13	0.24	-0.47	3.51
6	0.56804	1.358869	0.95	1.10	1.32	-1.12	1.36	1.29	0.24	-1.09	3.52
1	0.57496	1.365784	1.15	1.23	1.24	-0.81	1.37	1.29	0.40	-0.95	3.56
31	0.57548	1.366311	1.13	1.28	1.27	-0.99	1.37	1.30	0.48	-1.32	3.59
20	0.57968	1.370507	1.00	1.28	1.34	-1.12	1.37	1.36	0.50	-0.65	3.69
19	0.6224	1.413226	0.95	1.10	1.31	-1.12	1.41	1.17	0.23	-1.01	3.55
2	0.6257	1.416525	0.97	1.11	1.33	-1.12	1.42	1.18	0.21	-0.75	3.57
11	0.63728	1.428107	0.98	1.11	1.33	-1.12	1.43	1.19	0.21	-0.95	3.57
18	0.64228	1.433107	1.04	1.28	1.41	-1.12	1.43	1.41	0.37	-0.32	3.69
3	0.65956	1.450384	1.02	1.30	1.42	-1.12	1.45	1.35	0.71	-0.75	3.61
30	0.69338	1.484209	1.10	1.27	1.45	-0.89	1.48	1.43	0.45	-0.71	3.72
9	0.70566	1.496489	1.02	1.31	1.42	-1.12	1.50	1.38	0.51	-0.89	3.62
27	0.75017	1.540994	1.17	1.28	1.59	-0.81	1.54	1.52	0.50	-0.56	3.76
8	0.76677	1.557594	1.18	1.30	1.55	-0.81	1.56	1.49	0.54	-0.54	3.73
10	0.76778	1.55861	1.18	1.31	1.58	-0.81	1.56	1.50	0.53	-0.71	3.74
17	0.78013	1.570958	1.24	1.26	1.63	-0.99	1.57	1.54	0.51	-0.71	3.77
29	0.78275	1.573582	1.23	1.26	1.64	-0.89	1.57	1.54	0.48	-0.62	3.77

DONNEES CLASSEES SELON Cl (meq/l)

Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO4--	HCO3-	NO3-	Con
4.99	8.40	4.96	0.08	6.18	8.74	2.00	0.11	1110
4.79	9.38	4.74	0.08	6.49	8.77	2.10	0.16	1180
4.99	10.21	4.00	0.05	6.52	8.89	2.25	0.11	1240
4.89	9.14	5.00	0.08	6.97	8.95	2.00	0.16	1320
5.19	11.60	4.43	0.10	7.84	9.33	1.80	0.08	1430
7.68	6.34	8.61	0.05	8.74	11.45	2.15	0.06	1780
8.23	12.59	10.13	0.13	10.44	20.40	1.85	0.10	2380
8.08	7.90	8.87	0.05	10.63	13.53	1.82	0.02	2130
8.48	7.74	9.17	0.05	10.72	13.43	2.00	0.01	2240
9.08	18.93	13.22	0.10	14.47	20.99	2.64	0.18	3280
9.68	18.93	14.22	0.13	14.95	22.86	2.26	0.19	3440
9.53	19.51	14.48	0.10	14.95	22.99	2.33	0.18	3460
9.88	19.18	14.30	0.08	15.06	23.19	2.52	0.11	3430
9.98	19.67	15.13	0.05	15.26	24.76	2.29	0.13	3520
8.73	12.84	15.48	0.13	15.43	17.47	2.00	0.19	2520
10.53	19.67	15.65	0.15	16.39	25.26	2.85	0.18	3860
8.68	11.52	20.22	0.08	22.17	13.55	1.61	0.19	3220
8.73	11.69	20.22	0.08	22.28	13.53	1.72	0.34	3250
8.98	12.59	21.09	0.08	22.85	19.43	1.75	0.08	3290
13.97	17.04	17.30	0.15	23.22	19.55	2.62	0.11	3670
13.42	18.35	18.74	0.10	23.24	20.05	3.02	0.05	3820
9.98	19.01	22.09	0.08	23.47	22.84	3.18	0.23	4870
8.98	12.59	20.65	0.08	25.90	14.95	1.70	0.10	3660
9.23	12.76	21.22	0.08	26.09	14.99	1.61	0.18	3680
9.58	12.84	21.30	0.08	26.80	15.62	1.64	0.11	3690
10.98	19.01	26.00	0.08	27.11	25.46	2.36	0.48	4860
10.53	19.92	26.09	0.08	28.21	22.42	5.15	0.18	4060
12.72	18.66	28.00	0.13	30.49	27.02	2.79	0.19	5270
10.38	20.41	26.04	0.08	31.37	23.90	3.23	0.13	4200
14.87	19.18	38.91	0.15	34.75	32.98	3.15	0.27	5810
14.97	20.08	35.83	0.15	36.11	31.02	3.44	0.29	5580
15.07	20.58	38.04	0.15	36.19	31.46	3.36	0.19	5530
17.37	18.02	42.96	0.10	37.24	34.56	3.25	0.19	5820
17.17	18.27	43.35	0.13	37.46	34.81	3.02	0.24	5940

Annexe III: Indice de saturation (SI)

N°	Anhydrite	Gypsum	Halite	Aragonite	Calcite	Dolomite
1	-2.97	-2.76	-5.76	-0.15	-0.01	0.5
2	-0.8	-0.58	-5.17	0.65	0.8	1.81
3	-1.03	-0.81	-5.02	0.46	0.6	1.47
4	-0.9	-0.68	-4.92	0.67	0.81	2.02
5	-0.97	-0.75	-5.38	0.25	0.4	1.09
6	-0.86	-0.64	-5.43	0.31	0.45	1.32
7	-0.94	-0.72	-5.08	0.52	0.66	1.6
8	-0.82	-0.6	-5.36	0.75	0.9	2.19
9	-0.68	-0.46	-4.69	0.92	1.07	2.39
10	-0.88	-0.66	-4.87	0.55	0.69	1.81
11	-0.67	-0.45	-4.66	0.74	0.88	2.02
12	-1	-0.78	-5.01	0.38	0.53	1.31
13	-0.87	-0.66	-5.44	0.16	0.3	1.02
14	-0.93	-0.71	-5.48	0.59	0.74	1.91
15	-0.84	-0.62	-5.4	0.37	0.51	1.44
16	-1.07	-0.85	-5.11	-0.08	0.06	0.38
17	-1.07	-0.85	-5.1	0.48	0.62	1.5
18	-0.59	-0.37	-4.6	0.92	1.06	2.26
19	-0.83	-0.61	-4.93	0.63	0.77	1.9
20	-1.03	-0.81	-5.03	0.14	0.28	0.84
21	-0.89	-0.67	-5.06	0.82	0.97	2.34
22	-1.34	-1.12	-6.18	-0.24	-0.1	0.2
23	-0.92	-0.7	-5.73	0.03	0.18	0.66
24	-1.35	-1.13	-6.3	-0.16	-0.02	0.4
25	-1.34	-1.12	-6.18	1.02	1.17	2.81
26	-1.02	-0.8	-5.76	-0.1	0.04	0.2
27	-1	-0.78	-5.74	0.38	0.52	1.13
28	-0.66	-0.44	-4.67	0.73	0.87	1.97
29	-0.88	-0.66	-5.43	0.36	0.5	1.43
30	-0.59	-0.37	-4.59	0.43	0.58	1.3
31	-0.76	-0.54	-4.86	0.56	0.7	1.7
32	-0.82	-0.6	-5.13	0.73	0.87	2
33	-1.33	-1.11	-6.23	-0.22	-0.08	0.19
34	-1.07	-0.85	-5.85	0.42	0.57	1.17

Annexe IV: Résultats strontium (Sr)

Sr	Ca	Sr/Ca(mg/l)	Sr/Ca(meq/l)	Sr/Ca(meq/l) oo/0
13.2	445	0.029662921	0.013568704	13.56870449
12	512	0.0234375	0.010721011	10.72101118
10.3	457	0.022538293	0.010309687	10.3096872
5.4	309	0.017475728	0.007993919	7.993919019
5.5	313	0.017571885	0.008037904	8.037904019
6	338	0.017751479	0.008120056	8.120055809
8.2	327	0.025076453	0.011470717	11.47071696
17	414	0.041062802	0.01878335	18.78334971
7.2	215.5	0.033410673	0.015283038	15.28303775
5.4	323	0.016718266	0.007647433	7.647433365
7.7	348	0.022126437	0.010121292	10.12129179
4.8	238	0.020168067	0.009225475	9.225475171
5.7	310	0.018387097	0.008410806	8.410806194
6.4	341	0.018768328	0.008585193	8.585192925
4.5	253	0.017786561	0.008136103	8.13610335
3.6	224.5	0.016035635	0.007335177	7.335177363
3.8	254.5	0.014931238	0.006829993	6.829993242
4	299	0.013377926	0.006119462	6.119462348
1.79	138.5	0.012924188	0.005911909	5.911908743
1.94	147	0.013197279	0.006036829	6.036828792
1.96	144.5	0.013564014	0.006204584	6.204584281

Annexe V: Différentes normes consultées concernant la qualité de l'eau (Potabilité, eau de boisson et irrigation)

Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation

Les normes s'appuient en général sur les travaux d'établissement des doses maximales admissibles (DMA), c'est-à-dire la quantité de telle ou telle substance qu'un individu peut absorber sans danger quotidiennement tout au long de sa vie. Sur cette base, on calcule quelle quantité maximale peut être apportée par l'eau, en prenant un coefficient de sécurité. Tout dépassement des normes ne comporte pas nécessairement un risque pour la consommation. Elles ont été fixées avec beaucoup de prudence, de telle sorte qu'un individu de 70 kg peut consommer sans danger 2 l/j d'eau contaminée à ces teneurs pendant 70 ans (Maurel 2006). L'idéal serait que la concentration des éléments essentiels se situe au niveau de l'effet minimum et que celle des substances toxiques soit au-dessus du niveau de non effet ou nulle. Figure 1. Il est important que les normes soient revues et mises à jour périodiquement afin qu'elles puissent refléter les connaissances les plus récentes.

Les concentrations des différents éléments chimiques dans l'eau interviennent directement dans la qualité et la potabilité des eaux. Différents pays ont établi des normes de potabilité en fonction de la teneur de ces éléments. Il était entendu qu'une eau réservée à la consommation devrait satisfaire à un certain nombre de qualités physiques, chimiques et biologiques et ne devrait pas contenir de substances de substances chimiques nocives, ni de germes pathogènes pour l'homme.

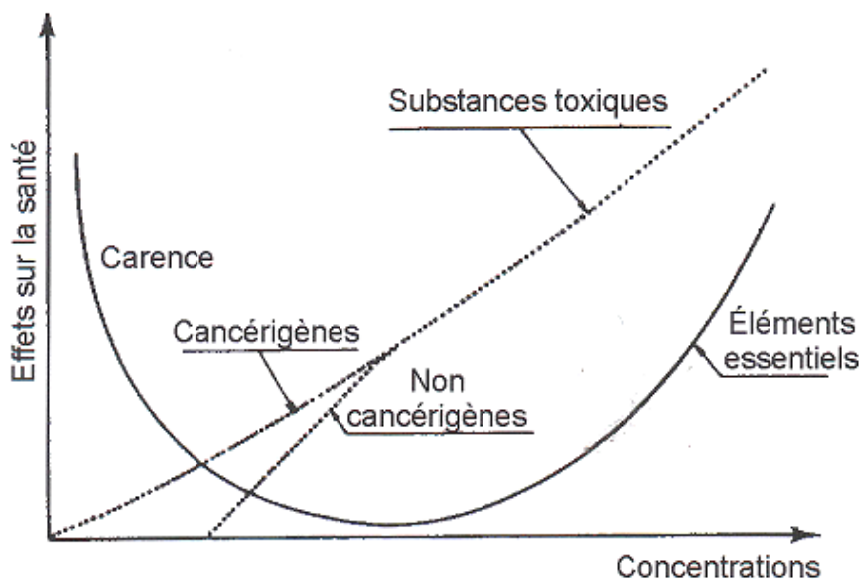


Figure 1. Effet de la carence et de l'excès des éléments majeurs et traces sur la santé humaine. (In Vettorazzi, 1980).

quotidienne de l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) considère tolérable est de 3.65 mg/l du poids du corps (essais pratiqués sur des animaux). De ce fait, toute personne n'atteignant pas un poids « normal » (les enfants et les personnes âgées) devrait être particulièrement prudente.

Tableau 1.1. Produits chimiques pour lesquels il n'a pas été établi de valeur guide.
(OMS 2006).

Produit chimique	Motif de l'absence de valeur guide définie
Aluminium	En raison des possibilités limitées d'utiliser les données obtenues en expérimentation animale comme modèle pour l'homme et de l'incertitude entachant les données humaines, il est impossible de déterminer une valeur guide reposant sur des arguments sanitaires. Néanmoins, l'optimisation des procédés de coagulation utilisant des agents coagulants à base d'aluminium dans les installations de traitement de l'eau de boisson a conduit à la définition de valeurs limites pratiques : 0,1 mg/l ou moins dans les grandes installations de traitement de l'eau et 0,2 mg/l ou moins dans les petites installations de traitement
Ammoniac	Présent dans l'eau de boisson à des concentrations bien inférieures à celles susceptibles de provoquer des effets toxiques
Amiante	On ne dispose pas de preuves cohérentes de la toxicité de l'amiante par ingestion
Chlorure	Non préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson ^a
Dureté	Non préoccupante pour la santé aux niveaux relevés dans l'eau de boisson ^a
Sulfure d'hydrogène	Non préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson ^a
Iode	Les données disponibles ne permettent pas la détermination d'une valeur guide reposant sur des arguments sanitaires et une exposition à l'iode sur la durée d'une vie par le biais de la désinfection de l'eau par cette substance est improbable
Fer	Non préoccupant pour la santé aux concentrations normalement relevées dans l'eau de boisson, le goût et l'aspect de l'eau étant modifiés par des concentrations inférieures à la valeur limite définie sur la base d'arguments sanitaires
Produits pétroliers	Dans la plupart des situations, le goût et l'odeur permettront de détecter la présence de ces produits à des concentrations inférieures à celles préoccupantes pour la santé, notamment en cas d'exposition à court terme
pH	Non préoccupant pour la santé aux niveaux relevés dans l'eau de boisson ^b
Argent	Les données disponibles ne permettent pas la détermination d'une valeur guide reposant sur des arguments sanitaires
Sodium	Non préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson ^a
Sulfate	Non préoccupant pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson ^a
Matières solides totales Dissoutes (TDS)	Non préoccupantes pour la santé aux concentrations relevées dans l'eau de boisson ^a
Zinc	Non préoccupant pour la santé aux concentrations normalement relevées dans l'eau de boisson ^a

^a Susceptible de nuire à l'acceptabilité de l'eau de boisson.

^b Paramètre opératoire important pour la qualité de l'eau.

Tableau 1.2. Valeurs guides affectées à des produits chimiques dont la présence dans l'eau de boisson est importante sur le plan sanitaire.
(OMS 2006).

Produit chimique	Valeur guide ^a (mg/litre)	Observations
Antimoine	0,02	
Arsenic	0,01 (P)	
Baryum	0,7	
Benzène	0,01b	
Bore	0,5 (T)	
Cadmium	0,003	
Chlore	5 (C)	Pour que la désinfection soit efficace, il doit rester dans l'eau une concentration résiduelle de chlore libre $\geq 0,5$ mg/l après un temps de contact de 30 min au moins à pH $< 8,0$
Chrome	0,05 (P)	Applicable au chrome total
Cuivre	2	Une coloration du linge et des sanitaires peut apparaître au-dessous de cette valeur guide
Cyanure	0,07	
Fluorure	1,5	Il convient de prendre en compte le volume d'eau consommé et l'absorption à partir d'autres sources dans la définition des normes nationales
Plomb	0,01	
Manganèse	0,4 (C)	
Mercure	0,006	Applicable au mercure inorganique
Nickel	0,01	
Nitrates (sous forme NO ₃ -)	50	Exposition à court terme
Nitrite (sous forme NO ₂ -)	3	Exposition à court terme
	0,2 (P)	Exposition à long terme
Sélénium	0,01	
Uranium		Seuls les effets chimiques de l'uranium sont considérés dans ce document

^a P = valeur guide provisoire dans la mesure où l'on dispose d'éléments indiquant un danger, mais où les données disponibles sur les effets sanitaires sont limitées ; T = valeur guide provisoire parce que la valeur guide calculée est inférieure aux valeurs pouvant être obtenues dans la pratique par les méthodes de traitement, par la protection des sources, etc. A = valeur guide provisoire parce que la valeur guide calculée est inférieure au seuil de quantification pouvant être atteint ; D = valeur guide provisoire parce que la désinfection est susceptible d'entraîner un dépassement de la valeur guide ; C = à des concentrations inférieures ou égales à la valeur guide définie sur la base d'arguments sanitaires, la substance peut influencer sur l'aspect, l'odeur ou le goût de l'eau, ce qui suscite des plaintes de la part des consommateurs.

^b Dans le cas des substances considérées comme cancérigènes, la valeur guide correspond à la concentration dans l'eau de boisson associée à une valeur limite supérieure plausible de l'excès de risque de cancer de 10^{-5} (un cas supplémentaire de cancer pour 100 000 habitants consommant l'eau de boisson contenant la substance à la concentration définie comme valeur guide pendant 70 ans). On peut calculer les concentrations associées aux valeurs limites supérieures plausibles de l'excès de cancer sur la durée de vie de 10^{-4} et 10^{-6} en multipliant ou en divisant respectivement la valeur guide par 10.

Législation algérienne

• Eau de boisson

Le terme *eau potable*, en usage jusqu'à présent, est de moins en moins utilisé, pour désigner la qualité de l'eau. Actuellement, certaines réglementations Européennes n'utilisent plus les termes *eau potable* ou *potabilité des eaux*, car il est admis, qu'une eau dans laquelle tous les critères de qualité ne sont pas requis, pourrait cependant être potable. Etant donné la marge de sécurité intégrée dans les normes de qualité de l'eau, un dépassement temporaire et modéré, d'un polluant est la plupart du temps sans conséquences, il doit tout de même déclencher la mise en œuvre d'un programme d'action et de surveillance. En revanche, la qualité bactériologique doit être assurée en toutes circonstances et faire l'objet d'une surveillance de tous les instants. Le code de l'eau en Algérie, du 16 juillet 1983 (JO n° 30/83) qui a été repris par la loi 05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau (JO n°5/05), stipule :

- Art. 52. *L'eau potable, lorsqu'elle n'est pas susceptible de porter atteinte à la santé de ceux qui la consomment. Elle ne doit contenir, en quantité nuisible, ni substances chimiques, ni germes nocifs à la santé.*

La loi 85-05 du 16 février 1985 (JO n° 8/85) relative à la protection et à la promotion de la santé fait référence, dans son chapitre II, à des normes de qualité dans les articles 32 et 33.

- Art. 32 : *l'eau destinée à la boisson, à l'usage ménager et à l'usage corporel, doit satisfaire aux normes de qualité définies par voie réglementaire, tant en qualité, qu'en quantité.*

- Art. 33 : *Pour l'adduction de l'eau destinée à la boisson et à usage ménager, il est établi des règles et des normes de protection pour assurer une quantité appropriée de l'eau.*

La loi 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, (JO n° 43/03) dans son chapitre II, aux normes environnementales par le biais de l'article 10.

- Art. 10 : *L'état assure une surveillance des différentes composantes de l'environnement.*

L'état doit définir les valeurs limites, les seuils d'alerte, et les objectifs de qualité, notamment pour l'air, l'eau, le sol et le sous-sol, ainsi que les objectifs de surveillance de ces milieux récepteurs et les mesures qui doivent être précisées par voie réglementaire.

Sur cette base, l'Algérie a établi des normes de potabilité pour l'eau de boisson définies par l'arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00) relatif aux spécifications des eaux de boisson préemballées et aux modalités de leur présentation émanant du ministère du commerce. Tableau 2. Ces normes ont été adoptées par des différentes directions de l'hydraulique des wilaya du Nord et qui concernent 41 paramètres de qualité classés en 4 catégories :

- les paramètres organoleptiques ;
- les paramètres physico-chimiques ;
- les substances indésirables ;
- les substances toxiques.

Tableau 2. Caractéristiques de qualité d'une eau minérale naturelle et d'une eau de source (Norme algérienne).

Paramètres	Teneur	Unité
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES		
Couleur	25	Mg/l
Odeur	Doit être accessible	Taux de dilution
Turbidité	1 – 2	NTU
Saveur	Doit être accessible	Taux de dilution
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES		
Température	25	°C
pH	6.5 – 8.5	-
Conductivité électrique	2 800	$\mu\text{S.cm}^{-1}$
Résidu sec (110 °C)	2 000	mg/l
Calcium	75 – 200	mg/l
Magnésium	150	mg/l
Sodium	200	mg/l
Potassium	20	mg/l
Chlorures	200 – 500	mg/l
Sulfates	200 – 400	mg/l
Carbonates – bicarbonates	-	-
SUBSTANCES INDESIRABLES		
Aluminium	0.2	mg/l
Nitrates	50	mg/l
Nitrites	0.1	mg/l
Ammonium	0.05 – 0.5	mg/l
Phosphates	0.5	mg/l
MO (permanganate)	3.5	mg/l
Bore	0.3	mg/l
Fer	0.3	mg/l
Cuivre	0.05 – 1.5	mg/l
Zinc	1 – 5	mg/l
Manganèse	0.5	mg/l
Baryum	0.7	mg/l
Phénols	-	-
Fluorures	0.8 – 2	mg/l
Argent	-	-
COT	-	-
Azote Kjeldahl	2	mg/l
SUBSTANCES TOXIQUES		
Arsenic	0.05	mg/l
Cadmium	0.01	mg/l
Cyanure	0.05	mg/l
Mercuré	0.001	mg/l
Plomb	0.05	mg/l
Chrome	0.05	mg/l
Nickel	0.02	mg/l
Antimoine	0.005	mg/l
Sélénium	0.01	mg/l

Normes de l'eau d'irrigation

Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau, ont des effets sur le sol et les plantes. Ces sels peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption de l'eau qui agit sur le processus osmotique, ou chimiquement par les réactions métaboliques tel que celles causées par les constituants toxiques.

Si l'on arrose la plante avec de l'eau faiblement minéralisée, l'eau pénètre dans la plante par un phénomène d'osmose, par contre si l'on arrose par de l'eau trop minéralisée, on inverse le phénomène d'osmose et la plante se dessèche. Figure 3. On aura le même phénomène avec un excès d'engrais. Pour éviter ces phénomènes, certaines règles d'utilisation font intervenir la salinité totale, la composition ionique ainsi que la présence des éléments traces.

Salinité totale.

Plusieurs normes ont été proposées mais on se limitera aux normes américaines qui classent l'eau d'irrigation selon quatre catégories. Tableau 6.

Teneur en sodium.

L'ion sodium (Na^+) peut être considéré comme un des ions les plus importants pour l'évaluation des critères de qualité d'une eau à usage agricole. Il est d'usage d'évaluer la teneur en sodium par le rapport à l'aide de la formule du Sodium Adsorption Ratio.

Des teneurs élevées en sodium peuvent avoir des effets néfastes à la fois sur la plantes et sur le sol. Figure 4. Ce critère a permis de classer les eaux en quatre catégories. Tableau 7.

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

Tous les éléments sont exprimés en méq/l.

En milieu salé, la conduite de l'irrigation est fortement influencée par la perméabilité du sol souvent très faible pour les solutions percolantes. En effet, dans un sol très salé imprégné de NaCl, la perméabilité reste bonne tant que la solution saline percolante présente une charge élevée en électrolyte, charge qui maintient les argiles floculées. Servant 1978. Si l'eau d'irrigation est chargée en sodium, le nombre d'ions Na^+ combiné avec le sol, augmente, cependant une quantité équivalente en cations et essentiellement en Ca^{++} est déplacée. On assiste à une dégradation de la structure, avec un gonflement des argiles ce qui entraîne une imperméabilisation du milieu. Le processus de dessalement et de drainage risque alors d'être complètement stoppé. Dans le cas où le calcium est le cation dominant, l'échange se fait dans le sens inverse, créant ainsi un sol plus floculé et plus perméable. L'apport de CaSO_4 au sol peut, par l'échange de base, améliorer la texture du sol ainsi que son drainage. Wilcox s'est penché également sur ce problème et il a établi un diagramme où le pourcentage du sodium est représenté avec la conductivité électrique. Figure 4.

$$\text{Na} (\%) = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} * 100$$

où tous les éléments sont exprimés en méq/l et cette classification définit cinq classes d'eau :

Excellente ,
Bonne,
Admissible,
Médiocre
Mauvaise.

. Normes américaines pour l'irrigation.

Catégorie	Salinité (g/l)	Classe
C1	< 0.2	Eau de faible salinité, peut être utilisée pour l'irrigation quelles que soient les conditions (nature du sol, récolte, climat).
C2	0.2 – 0.5	Eau de salinité moyenne, peut être utilisée pour l'irrigation de la plupart des plantes à condition d'assurer un certain lessivage.
C3	0.5 – 1.5	Eau de salinité élevée, ne peut être utilisée que pour certaines conditions d'irrigation (drainage suffisent).
C4	1.5 - 3	Eau de salinité très élevée, ne pouvant être utilisée pour l'irrigation dans les conditions normales (dans certains cas spéciaux, cette eau peut toutefois être utilisée : sol très perméable, plantes sélectionnées, certaines variétés d'orges et de luzernes, eau fournie en excès).

Effet du sodium de l'eau d'irrigation sur le sol.

Catégorie	SAR	Effet sur le sol
S1	≤ 10	Aucun effet Eau utilisable quelle que soit la nature du sol
S2	10 – 18	Risque d'accumulation des sels sur les sols argileux Utilisation possible sur des sols sableux
S3	18 – 26	Risques avec la plupart des sols Utilisation possible avec certaines précautions (lessivage du sol)
S4	>26	Eau non utilisable en irrigation

Annexe VI: Détail des résultats de la simulation avec PhreeqC

Reading data base.

 SOLUTION_MASTER_SPECIES
 SOLUTION_SPECIES
 PHASES
 EXCHANGE_MASTER_SPECIES
 EXCHANGE_SPECIES
 SURFACE_MASTER_SPECIES
 SURFACE_SPECIES
 RATES
 END

 Reading input data for simulation 1.

DATABASE C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat

SOLUTION_SPREAD
 units mg/l

Ca	Mg	Na	K	Cl	S(6)	Alkalinity	N(5)	pH
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
280	207	398	6	823	939	154	7	7.9
185	155	488	3	925	720	98	11	8.05
211	242	600	3	1000	1077	314	11	7.75
175	156	356	5	547	839	122	12	7.76
198	233	329	3	534	1114	154	7	7.7
180	153	485	3	810	933	107	5	8.11
211	239	360	6	581	1213	174	11	8.1
300	244	824	6	1280	1490	210	18	8.1
208	248	599	3	1112	1148	197	8	7.85
302	250	875	6	1283	1511	205	12	7.91
192	156	490	3	950	750	100	7	7.95
194	230	327	5	530	1098	138	12	7.6
182	230	304	4	513	1008	161	11	8
200	239	348	2	541	1189	140	8	7.81
174	140	465	3	786	651	98	12	7.5
175	142	465	3	790	650	105	21	8.05
348	219	988	4	1320	1660	198	12	8.07
220	231	598	3	961	1223	144	30	8.05
180	153	475	3	918	718	104	6	7.7
200	231	508	3	832	1097	194	14	8.15
98	111	115	3	247	430	122	10	7.4
165	153	233	5	370	980	113	6	7.6
100	124	92	2	231	427	137	7	7.42
104	141	102	4	278	448	110	5	8.82
162	96	204	2	377	650	111	1	7.42
170	94	211	2	380	645	122	0	7.85
298	233	895	6	1232	1584	192	17	7.94
191	237	333	4	530	1104	142	11	7.8
344	222	997	5	1328	1672	184	15	7.6
255	227	644	5	1081	1298	170	12	7.85
269	223	431	4	824	963	184	3	7.92
100	102	114	3	219	420	122	7	7.4
154	77	198	2	310	550	131	4	7.88
96	114	109	3	230	421	128	10	7.84

 Beginning of initial solution calculations.

Initial solution 1.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.086e-003	3.086e-003
Ca	7.006e-003	7.006e-003
Cl	2.328e-002	2.328e-002
K	1.539e-004	1.539e-004
Mg	8.538e-003	8.538e-003
N(5)	5.012e-004	5.012e-004
Na	1.736e-002	1.736e-002
S(6)	9.802e-003	9.802e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.900
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.868e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 3.067e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 3.067e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 2.132e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.64
 Iterations = 8
 Total H = 1.110154e+002
 Total O = 5.555607e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT
Anhydrite	-0.80	-5.16	-4.36
Aragonite	0.65	-7.68	-8.34
Calcite	0.80	-7.68	-8.48
CO2(g)	-2.73	-20.88	-18.15

Dolomite	1.81	-15.28	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.58	-5.16	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.80	-23.80	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.17	-3.58	1.58	NaCl
O2(g)	-35.52	47.60	83.12	O2

Initial solution 2.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	1.963e-003	1.963e-003
Ca	4.628e-003	4.628e-003
Cl	2.616e-002	2.616e-002
K	7.692e-005	7.692e-005
Mg	6.392e-003	6.392e-003
N(5)	7.874e-004	7.874e-004
Na	2.128e-002	2.128e-002
S(6)	7.514e-003	7.514e-003

-----Description of solution-----

pH = 8.050
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.296e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 1.931e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 1.931e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -5.399e-004
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -0.69
 Iterations = 7
 Total H = 1.110143e+002
 Total O = 5.554440e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT
Anhydrite	-1.03	-5.39	-4.36
Aragonite	0.46	-7.88	-8.34
Calcite	0.60	-7.88	-8.48
CO2(g)	-3.07	-21.22	-18.15
Dolomite	1.47	-15.62	-17.09
Gypsum	-0.81	-5.39	-4.58
H2(g)	-24.10	-24.10	0.00
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51
Halite	-5.02	-3.44	1.58
O2(g)	-34.92	48.20	83.12

Initial solution 3.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	6.296e-003	6.296e-003
Ca	5.283e-003	5.283e-003
Cl	2.830e-002	2.830e-002
K	7.699e-005	7.699e-005
Mg	9.988e-003	9.988e-003
N(5)	7.881e-004	7.881e-004
Na	2.619e-002	2.619e-002
S(6)	1.125e-002	1.125e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.750
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 6.831e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 6.369e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 6.369e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -1.080e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.09
 Iterations = 7
 Total H = 1.110185e+002
 Total O = 5.557251e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT
Anhydrite	-0.90	-5.26	-4.36
Aragonite	0.67	-7.67	-8.34
Calcite	0.81	-7.67	-8.48
CO2(g)	-2.27	-20.41	-18.15
Dolomite	2.02	-15.07	-17.09
Gypsum	-0.68	-5.26	-4.58
H2(g)	-23.50	-23.50	0.00
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51
Halite	-4.92	-3.33	1.58
O2(g)	-36.12	47.00	83.12

Initial solution 4.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.443e-003	2.443e-003
Ca	4.376e-003	4.376e-003
Cl	1.546e-002	1.546e-002
K	1.282e-004	1.282e-004
Mg	6.431e-003	6.431e-003
N(5)	8.586e-004	8.586e-004
Na	1.552e-002	1.552e-002
S(6)	8.753e-003	8.753e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.760
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 4.558e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.477e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.477e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 9.900e-004
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.58
 Iterations = 8
 Total H = 1.110148e+002
 Total O = 5.555117e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.97	-5.33	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.25	-8.08	-8.34	CaCO3
Calcite	0.40	-8.08	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.67	-20.82	-18.15	CO2
Dolomite	1.09	-16.00	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.75	-5.33	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.52	-23.52	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.38	-3.79	1.58	NaCl
O2(g)	-36.08	47.04	83.12	O2

Initial solution 5.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.085e-003	3.085e-003
Ca	4.953e-003	4.953e-003
Cl	1.510e-002	1.510e-002
K	7.692e-005	7.692e-005
Mg	9.608e-003	9.608e-003
N(5)	5.010e-004	5.010e-004
Na	1.435e-002	1.435e-002
S(6)	1.163e-002	1.163e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.700
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.281e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 3.141e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 3.141e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.607e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.32
 Iterations = 7
 Total H = 1.110154e+002
 Total O = 5.556355e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.86	-5.22	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.31	-8.03	-8.34	CaCO3
Calcite	0.45	-8.03	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.51	-20.66	-18.15	CO2
Dolomite	1.32	-15.77	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.64	-5.23	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.40	-23.40	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.43	-3.85	1.58	NaCl
O2(g)	-36.32	46.80	83.12	O2

Initial solution 6.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.144e-003	2.144e-003
Ca	4.503e-003	4.503e-003
Cl	2.291e-002	2.291e-002
K	7.693e-005	7.693e-005
Mg	6.310e-003	6.310e-003
N(5)	3.579e-004	3.579e-004

Na 2.115e-002 2.115e-002
S(6) 9.738e-003 9.738e-003

-----Description of solution-----

pH = 8.110
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 5.314e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.099e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.099e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -2.031e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -2.66
Iterations = 7
Total H = 1.110144e+002
Total O = 5.55252e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.94	-5.30	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.52	-7.82	-8.34	CaCO3
Calcite	0.66	-7.82	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-3.09	-21.24	-18.15	CO2
Dolomite	1.60	-15.49	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.72	-5.30	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.22	-24.22	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.08	-3.50	1.58	NaCl
O2(g)	-34.68	48.44	83.12	O2

Initial solution 7.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.487e-003	3.487e-003
Ca	5.279e-003	5.279e-003
Cl	1.643e-002	1.643e-002
K	1.539e-004	1.539e-004
Mg	9.858e-003	9.858e-003
N(5)	7.875e-004	7.875e-004
Na	1.570e-002	1.570e-002
S(6)	1.266e-002	1.266e-002

-----Description of solution-----

pH = 8.100
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 5.635e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.402e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.402e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 9.879e-005
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 0.13
Iterations = 8
Total H = 1.110157e+002
Total O = 5.556940e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.82	-5.18	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.75	-7.58	-8.34	CaCO3
Calcite	0.90	-7.58	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.88	-21.03	-18.15	CO2
Dolomite	2.19	-14.90	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.60	-5.18	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.20	-24.20	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.36	-3.78	1.58	NaCl
O2(g)	-34.72	48.40	83.12	O2

Initial solution 8.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	4.215e-003	4.215e-003
Ca	7.518e-003	7.518e-003
Cl	3.626e-002	3.626e-002
K	1.541e-004	1.541e-004
Mg	1.008e-002	1.008e-002
N(5)	1.291e-003	1.291e-003
Na	3.600e-002	3.600e-002
S(6)	1.558e-002	1.558e-002

-----Description of solution-----

pH = 8.100
pe = 4.000
Activity of water = 0.998
Ionic strength = 8.465e-002

Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 4.097e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 4.097e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -1.575e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.28
 Iterations = 8
 Total H = 1.110163e+002
 Total O = 5.558465e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.68	-5.04	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.92	-7.41	-8.34	CaCO3
Calcite	1.07	-7.41	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.82	-20.97	-18.15	CO2
Dolomite	2.39	-14.70	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.46	-5.04	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.20	-24.20	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.69	-3.10	1.58	NaCl
O2(g)	-34.72	48.40	83.12	O2

Initial solution 9.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.950e-003	3.950e-003
Ca	5.208e-003	5.208e-003
Cl	3.148e-002	3.148e-002
K	7.699e-005	7.699e-005
Mg	1.024e-002	1.024e-002
N(5)	5.732e-004	5.732e-004
Na	2.615e-002	2.615e-002
S(6)	1.199e-002	1.199e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.850
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 6.982e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 3.954e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 3.954e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -2.871e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -2.85
 Iterations = 7
 Total H = 1.110162e+002
 Total O = 5.556768e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.88	-5.24	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.55	-7.79	-8.34	CaCO3
Calcite	0.69	-7.79	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.57	-20.72	-18.15	CO2
Dolomite	1.81	-15.28	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.66	-5.25	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.70	-23.70	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.87	-3.29	1.58	NaCl
O2(g)	-35.72	47.40	83.12	O2

Initial solution 10.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	4.115e-003	4.115e-003
Ca	7.569e-003	7.569e-003
Cl	3.635e-002	3.635e-002
K	1.541e-004	1.541e-004
Mg	1.033e-002	1.033e-002
N(5)	8.606e-004	8.606e-004
Na	3.823e-002	3.823e-002
S(6)	1.580e-002	1.580e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.910
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.998
 Ionic strength = 8.625e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 4.083e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 4.083e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.255e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.00
 Iterations = 7
 Total H = 1.110163e+002
 Total O = 5.558417e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.67	-5.03	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.74	-7.60	-8.34	CaCO3
Calcite	0.88	-7.60	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.63	-20.78	-18.15	CO2
Dolomite	2.02	-15.07	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.45	-5.03	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.82	-23.82	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.66	-3.08	1.58	NaCl
O2(g)	-35.48	47.64	83.12	O2

Initial solution 11.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.003e-003	2.003e-003
Ca	4.803e-003	4.803e-003
Cl	2.687e-002	2.687e-002
K	7.693e-005	7.693e-005
Mg	6.434e-003	6.434e-003
N(5)	5.011e-004	5.011e-004
Na	2.137e-002	2.137e-002
S(6)	7.828e-003	7.828e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.950
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.392e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 1.990e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 1.990e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -1.107e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.40
 Iterations = 8
 Total H = 1.110143e+002
 Total O = 5.554497e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.00	-5.36	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.38	-7.95	-8.34	CaCO3
Calcite	0.53	-7.95	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.96	-21.11	-18.15	CO2
Dolomite	1.31	-15.78	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.78	-5.36	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.90	-23.90	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.01	-3.43	1.58	NaCl
O2(g)	-35.32	47.80	83.12	O2

Initial solution 12.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.764e-003	2.764e-003
Ca	4.853e-003	4.853e-003
Cl	1.499e-002	1.499e-002
K	1.282e-004	1.282e-004
Mg	9.484e-003	9.484e-003
N(5)	8.589e-004	8.589e-004
Na	1.426e-002	1.426e-002
S(6)	1.146e-002	1.146e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.600
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.232e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.848e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.848e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.533e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.23
 Iterations = 7
 Total H = 1.110151e+002
 Total O = 5.556306e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.87	-5.24	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.16	-8.18	-8.34	CaCO3

Calcite	0.30	-8.18	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.46	-20.61	-18.15	CO2
Dolomite	1.02	-16.07	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.66	-5.24	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.20	-23.20	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.44	-3.86	1.58	NaCl
O2(g)	-36.72	46.40	83.12	O2

Initial solution 13.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.225e-003	3.225e-003
Ca	4.552e-003	4.552e-003
Cl	1.450e-002	1.450e-002
K	1.025e-004	1.025e-004
Mg	9.483e-003	9.483e-003
N(5)	7.872e-004	7.872e-004
Na	1.326e-002	1.326e-002
S(6)	1.052e-002	1.052e-002

-----Description of solution-----

pH = 8.000
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.025e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 3.184e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 3.184e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.874e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.84
 Iterations = 8
 Total H = 1.110155e+002
 Total O = 5.556015e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.93	-5.29	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.59	-7.74	-8.34	CaCO3
Calcite	0.74	-7.74	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.81	-20.95	-18.15	CO2
Dolomite	1.91	-15.18	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.71	-5.29	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.00	-24.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.48	-3.90	1.58	NaCl
O2(g)	-35.12	48.00	83.12	O2

Initial solution 14.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.805e-003	2.805e-003
Ca	5.003e-003	5.003e-003
Cl	1.530e-002	1.530e-002
K	5.129e-005	5.129e-005
Mg	9.857e-003	9.857e-003
N(5)	5.727e-004	5.727e-004
Na	1.518e-002	1.518e-002
S(6)	1.241e-002	1.241e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.810
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 5.442e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.822e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.822e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.451e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.03
 Iterations = 8
 Total H = 1.110151e+002
 Total O = 5.556597e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.84	-5.20	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.37	-7.97	-8.34	CaCO3
Calcite	0.51	-7.97	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.67	-20.82	-18.15	CO2
Dolomite	1.44	-15.65	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.62	-5.20	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.62	-23.62	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.40	-3.82	1.58	NaCl
O2(g)	-35.88	47.24	83.12	O2

Initial solution 15.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	1.963e-003	1.963e-003
Ca	4.351e-003	4.351e-003
Cl	2.222e-002	2.222e-002
K	7.690e-005	7.690e-005
Mg	5.772e-003	5.772e-003
N(5)	8.587e-004	8.587e-004
Na	2.027e-002	2.027e-002
S(6)	6.793e-003	6.793e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.500
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 4.837e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.052e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.052e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.969e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.77
 Iterations = 7
 Total H = 1.110144e+002
 Total O = 5.554201e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.07	-5.43	-4.36	CaSO4
Aragonite	-0.08	-8.42	-8.34	CaCO3
Calcite	0.06	-8.42	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.50	-20.65	-18.15	CO2
Dolomite	0.38	-16.71	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.85	-5.43	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.00	-23.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.11	-3.52	1.58	NaCl
O2(g)	-37.12	46.00	83.12	O2

Initial solution 16.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.103e-003	2.103e-003
Ca	4.377e-003	4.377e-003
Cl	2.234e-002	2.234e-002
K	7.690e-005	7.690e-005
Mg	5.855e-003	5.855e-003
N(5)	1.503e-003	1.503e-003
Na	2.027e-002	2.027e-002
S(6)	6.782e-003	6.782e-003

-----Description of solution-----

pH = 8.050
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 4.892e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.070e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.070e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.307e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.82
 Iterations = 8
 Total H = 1.110144e+002
 Total O = 5.554404e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.07	-5.43	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.48	-7.86	-8.34	CaCO3
Calcite	0.62	-7.86	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-3.04	-21.19	-18.15	CO2
Dolomite	1.50	-15.59	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.85	-5.43	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.10	-24.10	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.10	-3.52	1.58	NaCl
O2(g)	-34.92	48.20	83.12	O2

Initial solution 17.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.975e-003	3.975e-003
Ca	8.724e-003	8.724e-003
Cl	3.741e-002	3.741e-002

K 1.028e-004 1.028e-004
Mg 9.051e-003 9.051e-003
N(5) 8.608e-004 8.608e-004
Na 4.318e-002 4.318e-002
S(6) 1.736e-002 1.736e-002

-----Description of solution-----

pH = 8.070
pe = 4.000
Activity of water = 0.998
Ionic strength = 9.090e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.875e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.875e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 1.862e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.40
Iterations = 8
Total H = 1.110161e+002
Total O = 5.558983e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.59	-4.95	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.92	-7.42	-8.34	CaCO3
Calcite	1.06	-7.42	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.82	-20.97	-18.15	CO2
Dolomite	2.26	-14.83	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.37	-4.95	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.14	-24.14	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.60	-3.02	1.58	NaCl
O2(g)	-34.84	48.28	83.12	O2

Initial solution 18.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.887e-003	2.887e-003
Ca	5.508e-003	5.508e-003
Cl	2.720e-002	2.720e-002
K	7.698e-005	7.698e-005
Mg	9.534e-003	9.534e-003
N(5)	2.149e-003	2.149e-003
Na	2.610e-002	2.610e-002
S(6)	1.277e-002	1.277e-002

-----Description of solution-----

pH = 8.050
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 6.815e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.831e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.831e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -1.524e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.57
Iterations = 8
Total H = 1.110151e+002
Total O = 5.557222e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.83	-5.19	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.63	-7.71	-8.34	CaCO3
Calcite	0.77	-7.71	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.92	-21.07	-18.15	CO2
Dolomite	1.90	-15.19	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.61	-5.19	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.10	-24.10	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.93	-3.35	1.58	NaCl
O2(g)	-34.92	48.20	83.12	O2

Initial solution 19.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.083e-003	2.083e-003
Ca	4.503e-003	4.503e-003
Cl	2.596e-002	2.596e-002
K	7.692e-005	7.692e-005
Mg	6.309e-003	6.309e-003
N(5)	4.295e-004	4.295e-004
Na	2.071e-002	2.071e-002
S(6)	7.493e-003	7.493e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.700

```

pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 5.214e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.124e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.124e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -1.044e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.36
Iterations = 8
Total H = 1.110145e+002
Total O = 5.554378e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.03	-5.39	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.14	-8.20	-8.34	CaCO3
Calcite	0.28	-8.20	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.68	-20.83	-18.15	CO2
Dolomite	0.84	-16.25	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.81	-5.40	-4.58	CaSO4·2H2O
H2(g)	-23.40	-23.40	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.03	-3.45	1.58	NaCl
O2(g)	-36.32	46.80	83.12	O2

Initial solution 20.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.888e-003	3.888e-003
Ca	5.005e-003	5.005e-003
Cl	2.354e-002	2.354e-002
K	7.696e-005	7.696e-005
Mg	9.531e-003	9.531e-003
N(5)	1.003e-003	1.003e-003
Na	2.217e-002	2.217e-002
S(6)	1.145e-002	1.145e-002

-----Description of solution-----

```

pH = 8.150
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 6.181e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.774e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.774e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -2.622e-005
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -0.03
Iterations = 8
Total H = 1.110160e+002
Total O = 5.556633e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.89	-5.25	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.82	-7.51	-8.34	CaCO3
Calcite	0.97	-7.51	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.89	-21.04	-18.15	CO2
Dolomite	2.34	-14.75	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.67	-5.26	-4.58	CaSO4·2H2O
H2(g)	-24.30	-24.30	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.06	-3.48	1.58	NaCl
O2(g)	-34.52	48.60	83.12	O2

Initial solution 21.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.441e-003	2.441e-003
Ca	2.448e-003	2.448e-003
Cl	6.975e-003	6.975e-003
K	7.681e-005	7.681e-005
Mg	4.571e-003	4.571e-003
N(5)	7.148e-004	7.148e-004
Na	5.008e-003	5.008e-003
S(6)	4.481e-003	4.481e-003

-----Description of solution-----

```

pH = 7.400
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 2.533e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.605e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.605e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 2.943e-005
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 0.09
Iterations = 7

```


Total H = 1.110148e+002
Total O = 5.553392e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.34	-5.70	-4.36	CaSO4
Aragonite	-0.24	-8.58	-8.34	CaCO3
Calcite	-0.10	-8.58	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.28	-20.43	-18.15	CO2
Dolomite	0.20	-16.89	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.12	-5.70	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.80	-22.80	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.18	-4.59	1.58	NaCl
O2(g)	-37.52	45.60	83.12	O2

Initial solution 22.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.263e-003	2.263e-003
Ca	4.125e-003	4.125e-003
Cl	1.046e-002	1.046e-002
K	1.281e-004	1.281e-004
Mg	6.306e-003	6.306e-003
N(5)	4.292e-004	4.292e-004
Na	1.016e-002	1.016e-002
S(6)	1.022e-002	1.022e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.600
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 4.093e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.338e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.338e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -2.448e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -4.65
Iterations = 7
Total H = 1.110147e+002
Total O = 5.55531e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.92	-5.28	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.03	-8.30	-8.34	CaCO3
Calcite	0.18	-8.30	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.53	-20.68	-18.15	CO2
Dolomite	0.66	-16.43	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.70	-5.28	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.20	-23.20	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.73	-4.14	1.58	NaCl
O2(g)	-36.72	46.40	83.12	O2

Initial solution 23.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.741e-003	2.741e-003
Ca	2.498e-003	2.498e-003
Cl	6.523e-003	6.523e-003
K	5.121e-005	5.121e-005
Mg	5.106e-003	5.106e-003
N(5)	5.003e-004	5.003e-004
Na	4.006e-003	4.006e-003
S(6)	4.450e-003	4.450e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.420
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 2.543e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.914e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.914e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 6.015e-004
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.86
Iterations = 7
Total H = 1.110151e+002
Total O = 5.553407e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.35	-5.71	-4.36	CaSO4

Aragonite	-0.16	-8.50	-8.34	CaCO3
Calcite	-0.02	-8.50	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.25	-20.40	-18.15	CO2
Dolomite	0.40	-16.69	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.13	-5.71	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.84	-22.84	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.30	-4.72	1.58	NaCl
O2(g)	-37.44	45.68	83.12	O2

Initial solution 24.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.201e-003	2.201e-003
Ca	2.598e-003	2.598e-003
Cl	7.851e-003	7.851e-003
K	1.024e-004	1.024e-004
Mg	5.807e-003	5.807e-003
N(5)	3.574e-004	3.574e-004
Na	4.442e-003	4.442e-003
S(6)	4.669e-003	4.669e-003

-----Description of solution-----

pH = 8.820
 pe = 4.000
 Activity of water = 1.000
 Ionic strength = 2.716e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 1.926e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 1.926e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 1.606e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 4.67
 Iterations = 6
 Total H = 1.110141e+002
 Total O = 5.553175e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.34	-5.70	-4.36	CaSO4
Aragonite	1.02	-7.31	-8.34	CaCO3
Calcite	1.17	-7.31	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-3.87	-22.01	-18.15	CO2
Dolomite	2.81	-14.28	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.12	-5.70	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-25.64	-25.64	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.18	-4.60	1.58	NaCl
O2(g)	-31.84	51.28	83.12	O2

Initial solution 25.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.222e-003	2.222e-003
Ca	4.048e-003	4.048e-003
Cl	1.065e-002	1.065e-002
K	5.123e-005	5.123e-005
Mg	3.955e-003	3.955e-003
N(5)	7.151e-005	7.151e-005
Na	8.888e-003	8.888e-003
S(6)	6.777e-003	6.777e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.420
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 3.300e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.359e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.359e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -1.552e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -3.53
 Iterations = 7
 Total H = 1.110146e+002
 Total O = 5.554047e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.02	-5.38	-4.36	CaSO4
Aragonite	-0.10	-8.44	-8.34	CaCO3
Calcite	0.04	-8.44	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.35	-20.50	-18.15	CO2
Dolomite	0.20	-16.89	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.80	-5.38	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.84	-22.84	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.76	-4.18	1.58	NaCl
O2(g)	-37.44	45.68	83.12	O2

Initial solution 26.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.442e-003	2.442e-003
Ca	4.248e-003	4.248e-003
Cl	1.074e-002	1.074e-002
K	5.123e-005	5.123e-005
Mg	3.873e-003	3.873e-003
Na	9.193e-003	9.193e-003
S(6)	6.725e-003	6.725e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.850
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 3.335e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.460e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.460e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -1.142e-003
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -2.56
 Iterations = 8
 Total H = 1.110148e+002
 Total O = 5.554044e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.00	-5.36	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.38	-7.96	-8.34	CaCO3
Calcite	0.52	-7.96	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.75	-20.90	-18.15	CO2
Dolomite	1.13	-15.96	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.78	-5.36	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.70	-23.70	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.74	-4.16	1.58	NaCl
O2(g)	-35.72	47.40	83.12	O2

Initial solution 27.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.854e-003	3.854e-003
Ca	7.468e-003	7.468e-003
Cl	3.491e-002	3.491e-002
K	1.541e-004	1.541e-004
Mg	9.627e-003	9.627e-003
N(5)	1.219e-003	1.219e-003
Na	3.910e-002	3.910e-002
S(6)	1.656e-002	1.656e-002

-----Description of solution-----

pH = 7.940
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.998
 Ionic strength = 8.583e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 3.815e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 3.815e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 3.446e-004
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 0.28
 Iterations = 8
 Total H = 1.110161e+002
 Total O = 5.558750e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.66	-5.02	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.73	-7.61	-8.34	CaCO3
Calcite	0.87	-7.61	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.69	-20.84	-18.15	CO2
Dolomite	1.97	-15.12	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.44	-5.02	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.88	-23.88	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.67	-3.09	1.58	NaCl
O2(g)	-35.36	47.76	83.12	O2

Initial solution 28.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.845e-003	2.845e-003
Ca	4.778e-003	4.778e-003
Cl	1.499e-002	1.499e-002

```

K          1.026e-004  1.026e-004
Mg         9.773e-003  9.773e-003
N(5)      7.873e-004  7.873e-004
Na         1.452e-002  1.452e-002
S(6)      1.152e-002  1.152e-002

```

-----Description of solution-----

```

pH = 7.800
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 5.275e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.865e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.865e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 2.063e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 2.98
Iterations = 8
Total H = 1.110152e+002
Total O = 5.556319e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.88	-5.24	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.36	-7.98	-8.34	CaCO3
Calcite	0.50	-7.98	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.65	-20.80	-18.15	CO2
Dolomite	1.43	-15.66	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.66	-5.24	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.60	-23.60	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.43	-3.85	1.58	NaCl
O2(g)	-35.92	47.20	83.12	O2

Initial solution 29.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.694e-003	3.694e-003
Ca	8.624e-003	8.624e-003
Cl	3.764e-002	3.764e-002
K	1.285e-004	1.285e-004
Mg	9.175e-003	9.175e-003
N(5)	1.076e-003	1.076e-003
Na	4.357e-002	4.357e-002
S(6)	1.749e-002	1.749e-002

-----Description of solution-----

```

pH = 7.600
pe = 4.000
Activity of water = 0.998
Ionic strength = 9.150e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.791e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.791e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 1.917e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.43
Iterations = 7
Total H = 1.110160e+002
Total O = 5.559063e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.59	-4.95	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.43	-7.90	-8.34	CaCO3
Calcite	0.58	-7.90	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.36	-20.51	-18.15	CO2
Dolomite	1.30	-15.79	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.37	-4.95	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.20	-23.20	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.59	-3.01	1.58	NaCl
O2(g)	-36.72	46.40	83.12	O2

Initial solution 30.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.409e-003	3.409e-003
Ca	6.386e-003	6.386e-003
Cl	3.060e-002	3.060e-002
K	1.283e-004	1.283e-004
Mg	9.372e-003	9.372e-003
N(5)	8.599e-004	8.599e-004
Na	2.812e-002	2.812e-002
S(6)	1.356e-002	1.356e-002

-----Description of solution-----

```

pH = 7.850

```

```

pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 7.246e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.411e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.411e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = -2.238e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -2.15
Iterations = 7
Total H = 1.110157e+002
Total O = 5.557320e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.76	-5.12	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.56	-7.78	-8.34	CaCO3
Calcite	0.70	-7.78	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.64	-20.79	-18.15	CO2
Dolomite	1.70	-15.39	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.54	-5.12	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.70	-23.70	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.86	-3.27	1.58	NaCl
O2(g)	-35.72	47.40	83.12	O2

Initial solution 31.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.687e-003	3.687e-003
Ca	6.731e-003	6.731e-003
Cl	2.331e-002	2.331e-002
K	1.026e-004	1.026e-004
Mg	9.199e-003	9.199e-003
N(5)	2.148e-004	2.148e-004
Na	1.880e-002	1.880e-002
S(6)	1.005e-002	1.005e-002

-----Description of solution-----

```

pH = 7.920
pe = 4.000
Activity of water = 0.999
Ionic strength = 6.026e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 3.657e-003
Total CO2 (mol/kg) = 3.657e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 3.446e-003
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 4.14
Iterations = 7
Total H = 1.110159e+002
Total O = 5.555798e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-0.82	-5.18	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.73	-7.61	-8.34	CaCO3
Calcite	0.87	-7.61	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.68	-20.82	-18.15	CO2
Dolomite	2.00	-15.09	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.60	-5.18	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.84	-23.84	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.13	-3.55	1.58	NaCl
O2(g)	-35.44	47.68	83.12	O2

Initial solution 32.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.440e-003	2.440e-003
Ca	2.498e-003	2.498e-003
Cl	6.184e-003	6.184e-003
K	7.681e-005	7.681e-005
Mg	4.200e-003	4.200e-003
N(5)	5.003e-004	5.003e-004
Na	4.964e-003	4.964e-003
S(6)	4.377e-003	4.377e-003

-----Description of solution-----

```

pH = 7.400
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 2.419e-002
Mass of water (kg) = 1.000e+000
Total carbon (mol/kg) = 2.606e-003
Total CO2 (mol/kg) = 2.606e-003
Temperature (deg C) = 25.000
Electrical balance (eq) = 5.581e-004
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.79

```

Iterations = 7
 Total H = 1.110148e+002
 Total O = 5.553286e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.33	-5.69	-4.36	CaSO4
Aragonite	-0.22	-8.56	-8.34	CaCO3
Calcite	-0.08	-8.56	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.28	-20.42	-18.15	CO2
Dolomite	0.19	-16.90	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.11	-5.69	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.80	-22.80	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.23	-4.65	1.58	NaCl
O2(g)	-37.52	45.60	83.12	O2

Initial solution 33.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.621e-003	2.621e-003
Ca	3.848e-003	3.848e-003
Cl	8.756e-003	8.756e-003
K	5.122e-005	5.122e-005
Mg	3.172e-003	3.172e-003
N(5)	2.860e-004	2.860e-004
Na	8.625e-003	8.625e-003
S(6)	5.734e-003	5.734e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.880
 pe = 4.000
 Activity of water = 0.999
 Ionic strength = 2.952e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.637e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.637e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = -4.158e-004
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -1.05
 Iterations = 8
 Total H = 1.110150e+002
 Total O = 5.553786e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.07	-5.43	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.42	-7.91	-8.34	CaCO3
Calcite	0.57	-7.91	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.74	-20.89	-18.15	CO2
Dolomite	1.17	-15.92	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.85	-5.43	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.76	-23.76	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-5.85	-4.27	1.58	NaCl
O2(g)	-35.60	47.52	83.12	O2

Initial solution 34.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	2.561e-003	2.561e-003
Ca	2.398e-003	2.398e-003
Cl	6.495e-003	6.495e-003
K	7.681e-005	7.681e-005
Mg	4.694e-003	4.694e-003
N(5)	7.147e-004	7.147e-004
Na	4.747e-003	4.747e-003
S(6)	4.387e-003	4.387e-003

-----Description of solution-----

pH = 7.840
 pe = 4.000
 Activity of water = 1.000
 Ionic strength = 2.497e-002
 Mass of water (kg) = 1.000e+000
 Total carbon (mol/kg) = 2.587e-003
 Total CO2 (mol/kg) = 2.587e-003
 Temperature (deg C) = 25.000
 Electrical balance (eq) = 4.629e-004
 Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.44
 Iterations = 8
 Total H = 1.110149e+002
 Total O = 5.553361e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT
-------	----	---------	--------

Anhydrite	-1.36	-5.72	-4.36	CaSO4
Aragonite	0.21	-8.13	-8.34	CaCO3
Calcite	0.35	-8.13	-8.48	CaCO3
CO2(g)	-2.71	-20.85	-18.15	CO2
Dolomite	1.11	-15.98	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.14	-5.72	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.68	-23.68	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-6.23	-4.65	1.58	NaCl
O2(g)	-35.76	47.36	83.12	O2

End of simulation.

Reading input data for simulation 2.

End of run.

PHOTOS



Photo 2: Bassin à la sortie du complexe avec systèmes de récupération pour recyclage



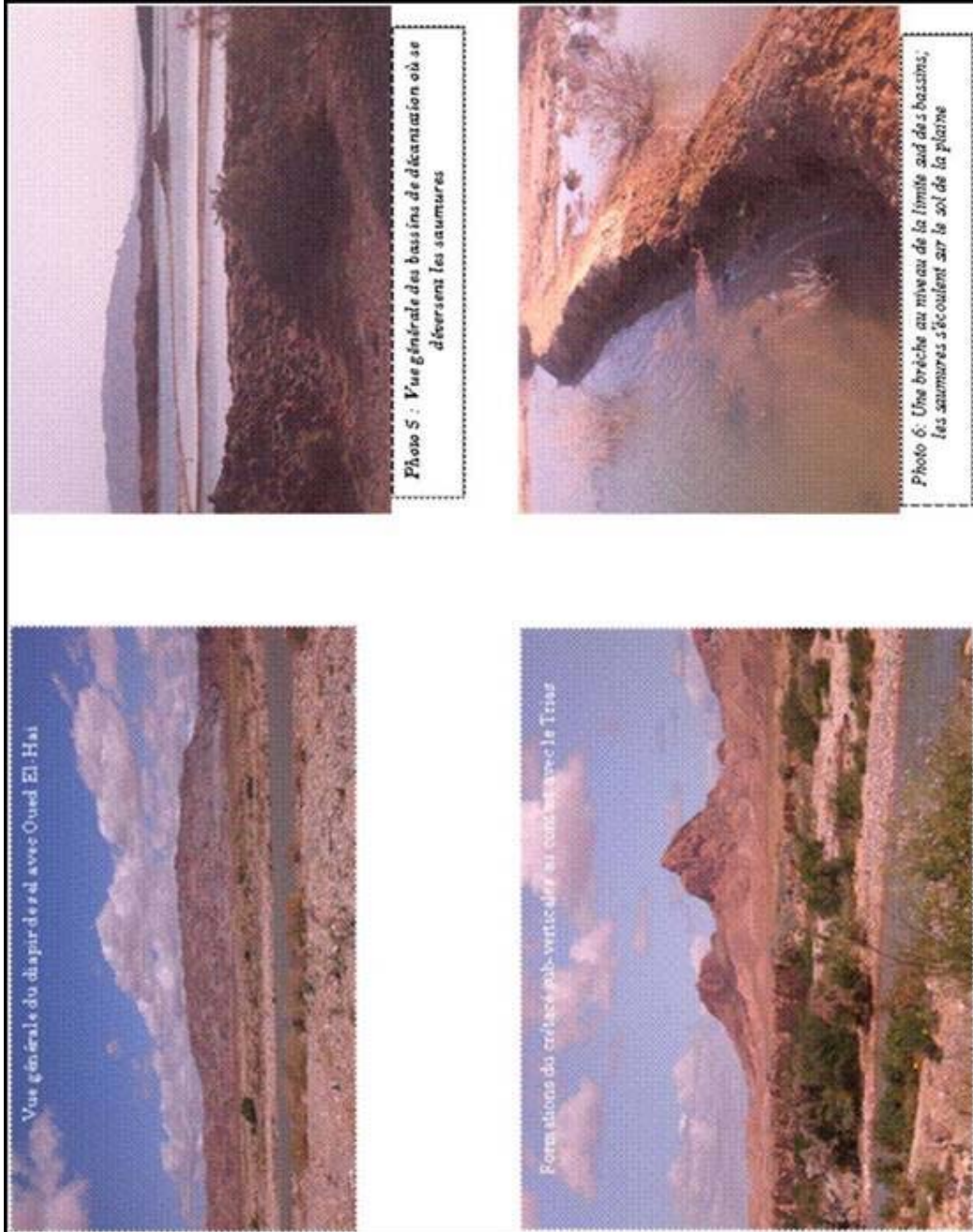
Photo 1: Vue Générale du complexe Ennasel El-Outaya

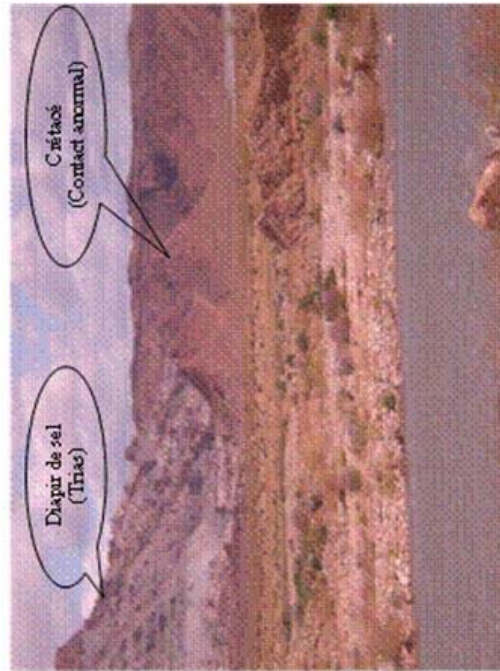
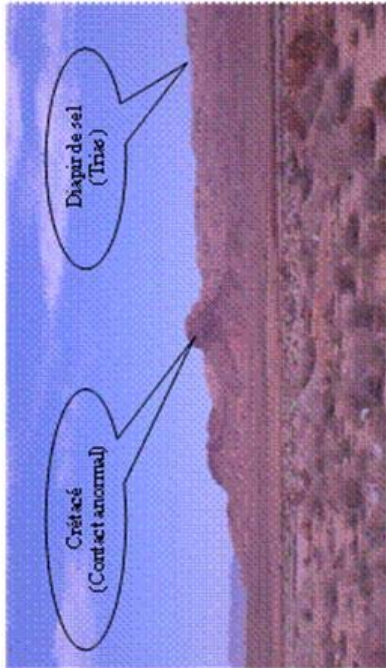


Photo 3: Rigole du cheminement des saumures de la sortie du complexe aux bassins de décanation

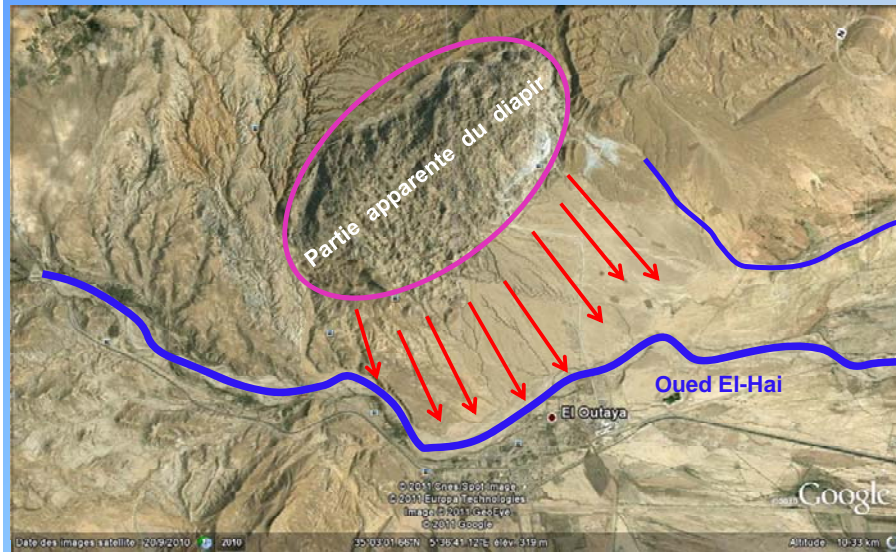


Photo 4 : passage des saumures sous l'ancienne RN 3





Position de oued El-Hai par rapport au diapir de sel



Position des bassins des saumures par rapport à oued El-Hai

