République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'eau : LRS-EAU

Thèse de Doctorat en Sciences

En Hydraulique

Présentée par :

Fatah BOUTELDJAOUI

Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources hydriques en zone semi-aride (Cas de la région de Djelfa)

Soutenue le 22 Novembre 2020 devant le jury composée de :

Mme. BENMAMAR Saadia	**: Professeur/ ENP-Alger**	**:** Présidente
M. BESSENASSE Mohamed	: **Professeur/ USD-Blida**	: Directeur de thèse
M. KETTAB Ahmed	**: Professeur/ ENP-Alger**	: Directeur de thèse
M. BERMAD Abdelmalek	: **Professeur/ ENP-Alger**	: Examinateur
M. MIHOUBI Mustapha Kamel	**: Professeur / ENSH-Blida**	**:** Examinateur
M. GUENDOUZ Abdelhamid	**: Professeur/ USD-Blida**	: Examinateur

ENP 2020

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'eau : LRS-EAU

Thèse de Doctorat en Sciences

En Hydraulique

Présentée par :

Fatah BOUTELDJAOUI

Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources hydriques en zone semi-aride (Cas de la région de Djelfa)

Soutenue le 22 Novembre 2020 devant le jury composée de :

Mme. BENMAMAR Saadia	**: Professeur/ ENP-Alger**	**:** Présidente
M. BESSENASSE Mohamed	: **Professeur/ USD-Blida**	: Directeur de thèse
M. KETTAB Ahmed	**: Professeur/ ENP-Alger**	: Directeur de thèse
M. BERMAD Abdelmalek	: **Professeur/ ENP-Alger**	: Examinateur
M. MIHOUBI Mustapha Kamel	**: Professeur / ENSH-Blida**	**:** Examinateur
M. GUENDOUZ Abdelhamid	**: Professeur/ USD-Blida**	: Examinateur

ENP 2020

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord adresser ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse **M. BESSENASSE** et **A. KETTAB** d'avoir encadré ce travail et pour la confiance et l'autonomie que vous m'avez accordés. Je vous exprime toute ma gratitude de m'avoir guidée et largement conseillée et m'orienté toujours sur le bon chemin tout au long de cette thèse.

Je remercie sincèrement le professeur **Mme S. BENMAMAR** de l'École Nationale Polytechnique, d'avoir acceptée de présider le jury de cette thèse.

Je remercie vivement les Professeurs **A. BERMAD A. GUENDOUZ** et **M K.MIHOUBI** pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir acceptés la tâche d'examinateurs et juger ce travail. Je vous remercie pour vos conseils, suggestions et vos critiques.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes remerciements à Monsieur **Traugott Scheytt,** professeur à l'université de Technische Universität Bergakademie Freiberg, Allemagne, pour leurs critiques et suggestions constructives ayant permis d'améliorer notablement la qualité scientifique de notre article.

Je tiens à remercier le personnel de **l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)** de Djelfa pour leur soutien et leur contribution. Je remercie également le personnel de la **Direction de l'Hydraulique de Djelfa** pour leur soutien et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

DÉDICACES

Je dédie cette thèse à

A la mémoire de mon très cher père

A ma très chère mère

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui me sont chers.

ملخص

يقع حوض الزاقز (ولاية الجلفة) في منطقة السهوب بين الأ طلس التلي في الشمال والأطلس الصحراوي في الجنوب. المنطقة المدروسة تعد من المناطق الشبه الجافة بنسبة تساقط اقل من 300 مم. وتبلغ مساحة حوض المياه الجوفية حوالي 500كم ^{2}. تعتبر المياه الجوفية المصدر الرئيسي لتلبية الحاجة المتزايدة لمياه الشرب، الأنشطة الصناعية والزراعية، والتي تؤثر بشكل كبير في التنمية الاجتماعية والاقتصادية. تعتبر الدراسات الجيولوجية، الهيدروجيولوجية، الهيدروكيميائي وتأثير المناخ ذات أهمية بالغة لتحسين استخدام وإدارة المياه الجوفية. الهدف من هذا العمل هو الدراسة الكمية و النوعية (الهيدروكيميائية) للمياه الجوفية.

الدراسة المناخية بينت تميز المنطقة بمناخ قاري شبه جاف مع عجز في الموازنة المائية.

الكلمات الدا لة : الزاقز، التقلبات المناخية ، المياه الجوفية ، هيدروديناميك ،هيدروكيمياء ، الجيو- إحصاء

ABSTRACT

Zahrez basin is located in the High Plateaus of the north Algeria, characterized by a semi-arid climate where annual rainfall is highly irregular. Because of the scarcity of surface water, most of this region is greatly dependent on groundwater resources. The study of the aquifer system aims to improve the knowledge about this system for sustainable groundwater resource management. Hydroclimatological studies shows that the study area is characterized by a semi-arid climate with a deficit water balance.

Coupling of the different geological, hydrodynamic, chemical and statistical tools in the study of the groundwater in the study area, enabled to understand the hydrogeochemical behavior of the aquifer system. Multivariate analysis (principal component analysis and cluster analysis) was performed to identify a common source for groundwater chemistry and identification of hydrogeochemical processes affecting groundwater chemistry of a semi-arid aquifer.

KEY WORDS : Zahrez, climatic variability, groundwater, hydrodynamic, hydrochemistry, geostatistics

RÉSUMÉ

Le bassin du Zahrez se situe en domaine steppique, entre deux grandes structures orientées nord-est / sud-ouest : l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud. Il est constitué de deux cuvettes, le ZahrezRharbi à l'ouest et le Zahrez Chergui à l'est. La superficie du bassin hydrogéologique est d'environ 500 km^2.

Dans le bassin des Zahrez, caractérisé par son climat semi-aride, les eaux souterraines, constituent la principale source d'approvisionnement pour satisfaire le besoin croissant en eau potable et les activités industrielles et agricoles, ce qui conditionne fortement le développement socio-économique. Une bonne connaissance des données géologiques, hydrogéologiques, hydrochimiques et climatiques est indispensable pour une meilleure exploitation et gestion des eaux souterraines.

Afin de mieux comprendre les le comportement hydrodynamique et hydrochimique de ce système aquifère, une approche pluridisciplinaire a été choisie. La caractérisation des eaux souterraines a été réalisée en combinant les informations hydrogéologiques et hydrochmiques (méthodes graphiques conventionnelles), les méthodes statistiques multivariées (ACP et CHA) et la géostatistique.

MOTS CLÉS : Zahrez, Variabilité climatique, eau souterraine, hydrodynamique, hydrochimie, géostatistique

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABRÉVIATIONS 16

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PREMIERE PARTIE: LE MILIEU RECEPTEUR

CHAPITRE 1. Présentation de la zone d'étude

1.1 Situation géographique 21
1.2 Caractéristiques physiographiques 21
1.2.1 Surface 21
1.2.2 Périmètre 23
1.2.3 Coefficient de compacité de Gravelius (1914) 23
1.2.4 Le Rectangle équivalent 23
1.2.5 Densité de drainage 24
1.3 Hydrographie 24
1.3.1 Réseau Hydrographique 24
1.3.2 Les principaux oueds 25
1.4 Géomorphologie 27
1.5 Pédologie : 28
1.5.1 Les Sols 28
1.6 La végétation 29
1.7 Aperçu socio-économique 32
1.7.1. Population 32
1.7.2. Agriculture 32
1.8 Ressources en eau du bassin des Zahrez 36
1.8.1. Introduction 36
1.8.2. État quantitatif et utilisation de la ressource en eau 37
1.8.2.1 Potentialité en eau de l'Algérie 37
1.8.2.2 Mobilisation des ressources en eau 37
1.8.2.3 Utilisation des ressources en eau 38
1.8.3. Potentialité en eau du Bassin des Zahrez 39
1.8.4. Mobilisation des Ressources en Eaux 40
1.8.4.1 Mobilisation des Ressources en Eaux Superficielles 40
1.8.4.2 Mobilisation des Ressources en Eaux Souterraines 40
1.8.5. Exploitation des ressources en eau souterraines 45
1.8.6. Utilisation des ressources en eaux souterraines 46
1.8.6. 1 Alimentation en Eau Potable 46
1.8.6.2 Irrigation 47
1.8.6. 3 Approvisionnement en Eau industrielle 48
1.9 Conclusion 50

CHAPITRE 2. Hydroclimatologie

2.1 Introduction 52
2.2 Collecte des données 52
2.3 Contexte climatique de la zone d'étude 52
2.3.1 Aperçu du cadre climatique de la zone d'étude 52
2.3.1.1 Températures 52
2.3.1.2 Humidité relative 53
2.3.1.3 La durée d'insolation 53
2.3.1.4 Vitesses et directions des vents 53
2.3.1.5 Évaporation 53
2.4 Indices climatiques et classification de bioclimat 54
2.4.1 Diagramme ombrothermique 54
1.2.4.2 Indice de Demartone : 54
2.4.3 Indice mensuel d'aridité (De Martonne) 54
2.4.4 Climagramme de Louis Emberger 56
2.5 L'évapotranspiration 57
2.5.1 2.5.1 Méthodes d'estimation de l'ETP 57
2.5.1.1 Méthode de Thornthwaite (1948) 57
2.5.1.2 Formule de Turc (1961) 58
2.5.1.3 Formule de Blaney-Griddle 58
2.5.1.4 Formule de Penman-Monteith-FAO 59
2.5.1.5 Méthode de Hargreaves- Samani 60
2.5.2 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration 60
2.5.2.1 Echelle mensuelle 60
2.5.2.2 Echelle annuelle 61
2.5.3. Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée 61
2.5.4 Évapotranspiration réelle (ETR) et déficit d'écoulement : 63
2.5.4.1 Formule de Turc 63
2.5.4.2 Formule de Coutagne 63
2.5.5 Méthode du bilan de Thornthwaite 63
2.5.5.1 Les termes du bilan hydrologique 63
2.5.5.2. Ruissellement superficiel 64
2.5.5.3 Analyse des résultats du bilan hydrologique de Thornthwaite 64
2.5.5.4 Variabilité interannuelle des composantes du bilan hydrologique 67
2.5.5.4.1 Évapotranspiration potentielle (ETP) 67
2.5.5.4.2 Évapotranspiration réelle (ETR) 67
2.5.5.4.3 Ruissellement (R) 68
2.6 Conclusion 68

CHAPITRE 3. Contexte géologique et hydrogéologique

3.1 Contexte géologique 70
3.1.1 Introduction 70
3.1.2 Lithostratigraphie 70
3. 1.2.1 Le Trias 70
3.1.2.2 Le passage du Jurassique au Crétacé 70

3. 1.2.3 Crétacé Inférieur 71
3. 1.2.4 Le Crétacé Supérieur 72
3. 1.2.5 Le Tertiaire Continental 73
3. 1.2.6 Le Quaternaire 75
3.1.3 Contexte structural 75
3.2 Contexte hydrogéologique : 80
3.2.1 Introduction 80
3.2.2 Les principaux aquifères 81
3.2.2.1 Crétacé Inférieur 81
3.2.2.2 Crétacé Supérieur 81
3.2.2.3 Le Tertiaire Continental Terminal 84
3.2.2.4 Le Plio-Quaternaire 84
3.3 Conclusion 85

DEUXIEME PARTIE: HYDROGEOLOGIE

CHAPITRE 1. Caractérisation de la variabilité de la variabilité climatique

1.1 Introduction 88
1.2 Approches statistiques et analyses des séries pluviométriques 88
1.2.1 Indices pluviométriques annuels : 88
1.2.2 Tests statistiques de détection de ruptures 89
1.2.2.1 Introduction 89
1.2.2.2 Méthodes statistiques utilisées 89
1.2.2.3 Test de Pettitt 89
1.2.2.4 Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977) 90
1.2.2.5 Statistique de Buishand 90
1.2.2.6 Ellipse de contrôle 92
1.2.2.7 Procédure de segmentation de Hubert 92
1.2.3 Les conditions d'application des méthodes statistiques 93
1.3 Calcul des variations moyennes 93
1.4 Caractérisation de la variabilité des pluies annuelles 93
1.4.1 Caractéristiques des stations pluviométriques 93
1.4.2 Analyse statistique des données pluviométriques 93
1.4.2.1 Analyse en composante principale 96
1.4.2.1.1 Application de l'ACP 97
1.4.2.2 Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité 97
1.4.2.1.1 Paramètres des lois d'ajustement 98
1.4.2.2.2 Tests d'adéquation de χ^2 et Kolmogorov-Smirnov 98
1.4.3 Indices pluviométriques annuels 100
1.4.4 Test de Pettitt : 101
1.4.5 Procédure de segmentation d'Hubert 107
1.4.6 Ellipse de contrôle : 110

1.5 Analyse statistique des données hydrométrique 113
1.5.1 Débits moyens mensuels interannuels 114
1.5.2 Débits moyens annuels et interannuels 114
1.5.3 Ajustement statistique 114

CHAPITRE 2. Caractérisation hydrodynamique du système aquifère

2.1 Introduction 119
2.2 Détermination des caractéristiques hydrodynamiques 119
2.2.1 Les essais par paliers 119
2.2.2 Pompage de longue durée 120
2.2.3 Transmissivité 121
2.3 Relation débit spécifique et transmissivité 122
2.4 Étude piézométrique 124
2.4.1 - Variation temporelle de la piézométrie 125
2.4.1.1 Évolution de la piézométrie (1994-2001). 126
2.4.2 Variation spatiale de la piézométrie 129
2.4.2.1 Interprétation des cartes piézométriques 129
2.4.2.2 Cartes des écarts piézométriques 130

CHAPITRE 3. Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines

3.1 Introduction 139
3.2 Échantillonnage et analyse hydrochimique 139
3.3 Représentation graphique des faciès hydrochimiques 140
3.3.1 Diagramme de Piper : 140
3.3.2 Diagramme de SCHOELLER–BERKALOFF: 141
3.3.3 Diagramme de Stiff : 141
3.4 Mécanismes d'acquisition de la charge saline 141
3.5 Étude de l'origine des éléments chimiques et les rapports caractéristiques 142
3.5.1 Étude de l'origine des éléments chimiques : 142
3.5.1.1 Les éléments Na^+ - Cl^- 142
3.5.1.2 Les éléments Ca^{2+} - SO_4^{2-} : 142
3.5.1.3 Les éléments Ca^{2+}+Mg^{2+} - HCO_3^- +SO_4^{2-} 143
3.5.2 Étude des rapports caractéristiques 147
3.5.2.1 Le rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} 147
3.5.2.2 Le rapport Na^+/Cl^- 147
3.5.2.3 La relation $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ – conductivité électrique 149
3.5.2.4 Le rapport Cl^-/SO_4^{2-} et la conductivité électrique 150
3.5.3 Carte des Rapports Caractéristiques 150
3.5.3.1 Carte du rapport Na^+/Cl^- 150
3.5.3.2 Carte du rapport Ca^{2+} /Mg^{2+} 150
3.5.4 Mise en évidence des échanges de base 153
3.6 Mise en évidence de la minéralisation 154
3.6.1 Indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux 154
3.6.1.1 Les minéraux évaporitiques 155
3.6.1.2 Les minéraux carbonatés 155

3.7 Diagramme de Gibbs 160
3.8 Aptitude des eaux a l'irrigation : 160
3.8.1 Classification des eaux par la méthode de Richards : 160
3.8.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox : 161
3.9 Analyse statistique multivariée des données hydrochimiques 163
3.9.1 Analyse en composantes principales (ACP) 163
3.9.1.1 Analyse de l'espace des variables (ACP) 165
3.9.1.2 Analyse de l'espace des individus 166
3.9.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH) 169
3.10 Conclusio 173

CHAPITRE 4. Cartographie hydrochimique par approche géostatistique

4.1. Présentation de la géostatistique 175
4.1.1 Définition et principes de base de la géostatistique 175
4.1.2 Analyse variographique 175
4.1.2.1 Le semi-variogramme 175
4.1.2.2 Propriétés du semi-variogramme 176
4.1.2.3 Modélisation du semi-variogramme 176
4.1.3 Le krigeage 177
4.1.3.1 Les types de krigeage 178
4.1.3.1.1 krigeage simple 178
4.1.3.1.2 krigeage ordinaire 178
4.1.3.1.2 krigeage d'indicatrices 179
4.2. Résultats et discussions 181
4.2.1 Cartographie des paramètres physico-chimiques 181
4.2.1.1 Analyse statistique descriptive 181
4.2.1.2 Analyse variographique 182
4.2.1.3 Cartographie des paramètres physico-chimiques par Krigeage 187
4.2.2 Cartographie des indices de la qualité des eaux d'irrigation 190
4.2.2.1 Analyse statistique descriptive 190
4.2.2.2 Analyse variographique 190
4.2.2.3 Cartographie des paramètres SAR et %Na par Krigeage 198
4.3 Conclusion 198

CONCLUSION GÉNÉRALE 200

BIBLIOGRAPHIE 203

ANNEXES 214

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants étudiés 26
Tableau 2 : Évolution de la population à l'horizon 2020 33
Tableau 3 : Répartition des cultures irriguées sur les communes du bassin des Zahrez (RGA - 2001) 35
Tableau 4 : Estimation des surfaces de cultures irriguées sur le bassin des Zahrez 35
Tableau 5 : La ressource en eau dans les cinq régions hydrographiques 39
Tableau 6 : Potentialités en eaux souterraines 39
Tableau 7 : Ressources en eau superficielles 40
Tableau 8 : États des retenues collinaires 40
Tableau 9 : Mobilisation des ressources en eau souterraines par les forages. 41
Tableau 10 : Volume prélevé par type d'ouvrage en 2005 45
Tableau 11 : Volume prélevé par type d'usage 46
Tableau 12 : État de l'alimentation en eau potable des agglomérations supérieures à 1000 habitants et inferieures à 50000 habitants. 47
Tableau 13 : État de l'alimentation en eau potable des agglomérations de plus de 50000 habitants en 2005 47
Tableau 14 : Petite et moyenne hydraulique par type d'ouvrage de mobilisation 48
Tableau 15 : Approvisionnement en eau industrielle en 2005 49
Tableau 16 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Djelfa. 56
Tableau 17 : Ecart relatif des différentes méthodes d'estimation de l'ETP comparées à celle de ETP (Piche) (échelle mensuelle) 62
Tableau 18 : Bilan hydrologique (1974-2007) à la station de Djelfa, d'après la méthode de Thornthwaite. 65
Tableau 19 : Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations 83
Tableau 20 : Liste des différentes stations pluviométriques avec leurs principales caractéristiques 94
Tableau 21 : Moyenne, écart - type et coefficient de variation des séries pluviométriques de la zone d'étude (1974-2007). 94
Tableau 22 : Valeurs propres 98
Tableau 23 : Corrélations entre les variables et les axes principaux 98
Tableau 24 : Valeurs des paramètres estimés de la distribution normale 100
Tableau 25 : Résultats des tests d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov, de χ^2 100
Tableau 26 : Résultats de la procédure Segmentation de Hubert. 110
Tableau 27 : Paramètres statistiques des débits moyens interannuels 114
Tableau 28 : Estimation des quantiles pour des périodes de retour données. 115
Tableau 29 : Caractéristiques statistiques des transmissivités et des débits spécifiques 124
Tableau 30 : Matrice de corrélation des variables. 164
Tableau 31 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour les trois principaux groupes. 172
Tableau 32 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. 184
Tableau 33 : Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux des paramètres physico-chimiques 184

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant des Zahrez 22
Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant des Zahrez 31
Figure 3 : S.A.U et parcours sur le bassin des Zahrez (DSA de Djelfa-2005/2006) 34
Figure 4 : Répartition des surfaces cultivées (DSA de Djelfa-2005/2006) 34
Figure 5. Superficies irriguées sur le bassin des Zahrez (DSA de Djelfa-2005/2006 35
Figure 6 : Volume prélevé par type d'ouvrage 45
Figure 7 : Volume prélevé par type d'usage 46
Figure 8 : Superficies irriguées par type d'ouvrage de mobilisation en % 48
Figure 9 : Volumes utilisés par branche d'activité 49
Figure 10 : Évolution des variables climatiques durant la période (1974-2007) 55
Figure 11 : Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls Station de Djelfa 55
Figure 12 : Climagramme d'Emberger de la station de Djelfa 59
Figure 13 : Évolution mensuelle de l'ETP calculée par les différentes formules (1974-2007). 61
Figure 14 : Évolution annuelle de l'ETP calculée par les différentes formules (1974-2007). 62
Figure 15 : Courbes des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport à Bac. 66
Figure 16 : Variations mensuelles des éléments du bilan hydrologique : Station de Djelfa (1974-2007) 66
Figure 17 : Variations interannuelle des éléments du bilan hydrique : Station de Djelfa (1974-2007) 67
Chapitre 03 : Contexte géologique et hydrogéologique 15
Figure 18 : Log stratigraphique de la région de Zaâfrane 71
Figure 19 : Carte géologique des Zahrez et localisation des logs de sondages 74
Figure 20 : Coupe I 76
Figure 21 : Coupe III 77
Figure 22 : Coupe IV 78
Figure 23 : Coupe VI 79
Figure 24 : Carte structurale des Zahrez 82
Figure 25 : Coupe géologique interprétative de la région de Zaâfrane 84
Figure 26 : Coupe schématique du synclinal de Djelfa 85
Figure 27 : Situation géographique des stations pluviométriques du bassin des Zahrez 95
Figure 28 : Variations interannuelles des précipitations aux différentes stations de la zone d'étude 96
Figure 29 : Cercle de corrélation de l'axe 1-2, de l'analyse en composante principale 99
Figure 30 : Projection des observations sur la première composante principale [C1]. 99
Figure 31 : Ajustement des précipitations annuelles des stations du bassin versant des Zahrez à la loi normale 103
Figure 32 : Evolution des Indices pluviométriques interannuelles dans le bassin des Zahrez Période (1974-2007) 106
Figure 33 : Évolution de la variable U du test de Pettitt des stations pluviométriques du bassin des Zahrez 110
Figure 34 : Ellipse de contrôle a 99,95 et 90 % pour les stations pluviométriques du bassin des Zahrez 113
Figure 35 : Variations des débits moyens mensuels interannuelles de l'oued Medjedel 115
Figure 36 : Variations des débits moyens annuels de l'oued Medjedel 115
Figure 37. Ajustement des débits moyens mensuels à la loi Log-normal 116
Figure 38 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi Log-normal 116

Figure 39 : Transmissivité estimées par les pompages d'essai des différents forages. 123
Figure 40 : Distribution des valeurs de transmissivité du système aquifère de bassin versant des Zahrez. 123
Figure 41 : Valeurs du débit spécifique des différents forages 124
Figure 42 : Corrélation LogT-LOgQs (bassin versant des Zahrez) 124
Figure 43 : Carte du réseau de suivi piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez 125
Figure 44 : Évolution piézométrique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du bassin versant des Zahrez, de Janvier 1994 à Avril 2010. 128
Figure 45 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez, saison humide, 2002 et 2010 132
Figure 46 : Carte piézométrique de la nappe mioplioquaternaire du bassin des Zahrez, saison sèche, 1994 et 2010 134
Figure 47 : Cartes des écarts piézométriques entre basses et hautes eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez. 136
Figure 48 Carte de localisation des points d'eaux prélevés. 139
Figure 49 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du bassin des Zahrez 140
Figure 50 : Diagramme de Schoeller et Berkallof. 144
Figure 51 : Diagrammes de Stiff. 145
Figure 52 : Relation entre les éléments chimiques majeurs et la minéralisation totale 147
Figure 53 : Relation ionique entre Na^+ et Cl^- 148
Figure 54 : Relation ionique entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} 148
Figure 55 : Relation ionique entre $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ et $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ 149
Figure 56 : Rapports caractéristiques Ca/Mg 149
Figure 57 : Le rapport Na/Cl 151
Figure 58 : Évolution du rapport $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ en fonction de la conductivité électrique 151
Figure 59 : Évolution des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité électrique 152
Figure 60 : Carte du rapport r Na /r Cl. Octobre 2006 152
Figure 61 : Carte du rapport r Ca /r Mg. Octobre 2006 153
Figure 62 : L'indice d'échange de base (i e b) pour les points d'eau de la zone d'étude 154
Figure 63 : Relation Résidu sec (TDS) et les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux évaporitiques 156
Figure 64 : Relation Résidu sec (TDS) et les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux carbonatés 156
Figure 65 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la halite en fonction de $Na^+ + Cl^-$ 157
Figure 66 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux évaporitiques en fonction de $Ca^{2+}+SO_4^{2-}$: (a) gypse, (b) anhydrite. 158
Figure 67 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés en fonction de $Ca^{2+}+HCO3^-$: (a) aragonite, (b) calcite. 159
Figure 68 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la dolomite en fonction de $Ca^{2+}+Mg^{2+}+HCO_3^-$ 159
Figure 69 : Représentation graphique des points d'eaux sur le diagramme de Gibbs 162
Figure 70 : Diagramme de Richards. Octobre 2006 162
Figure 71 : Diagrammes de Wilcox. Octobre 2006 163
Figure 72 : Les valeurs propres de l'analyse (variances des composantes principales). 165
Figure 73 : ACP des données hydrochimiques des eaux souterraines dans le bassin des Zahrez 166
Figure 74 : Projection des individus sur le plan factoriel (1x2) 167
Figure 75 : Projection des individus sur le plan factoriel (1x3) 168
Figure 76 : Carte isofacteur de la de la première composante principale 168

Figure 77 : Carte isofacteur de la deuxième composante principale 169
Figure 78 : Carte isofacteur de la troisième composante principale 169
Figure 79 : Dendrogramme de classification ascendante hiérarchisée des eaux souterraine dans le bassin des Zahrez 171
Figure 80 : Répartition spatiale des groupes (G1, G2 et G3). 172
Figure 81 : Paramètres du variogramme 180
Figure 82 : Principaux modèles de variogrammes utilisés (d'après Delhomme, 1978). 181
Figure 83 : Ajustement des Variogrammes expérimentaux des paramètres physico-chimiques : (a) pH, (b) EC, (c) TDS, (d) Ca^{2+}, (e) Mg^{2+}, (f) Na^{+}, (g) K^{+}, (h) HCO_3^{-}, (i) Cl^{-}, (j) SO_4^{2-}, (k) NO_3^{-} 186
Figure 84 : Cartes de répartition spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la nappe nappe Mioplioquaternaire du bassin des Zahrez : (a) pH, (b) EC, (c) Cl^{-}, (d) SO_4^{2-}, (e) NO_3^{-}, (f) Ca^{2+}, (g) Mg^{2+}, (h) Na^{+}, (i) K^{+}, (j) HCO_3^{-} (k) TDS 196
Figure 85 Ajustement des Variogrammes expérimentaux des indices de qualité des eaux d'irrigation : (a) SAR et (b) %Na 196
Figure 86 Cartes de répartition spatiale des indices de qualité des eaux d'irrigation : (a) SAR et (b) %Na 197

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AEP : Alimentation en Eau Potable

ANAT : Agence nationale d'aménagement du territoire

ANBT : Agence Nationale des Barrages et des Transferts

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

BNEDER : Bureau National d'Études pour le Développement Rural

DSA : Direction des Services Agricole

ETP : Évapotranspiration potentielle

ETR : Évapotranspiration réelle

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONM : Organisme National de Météorologie

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SAR : Sodium Absorption Ratio

S.A.U : Surface Agricole Utile

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

1. Problématique

A l'instar d'autres pays, l'Algérie est confrontée à la problématique de l'eau selon le seuil de rareté fixé par le programme des Nations-Unies pour le développement (PNUD) ou celui de la banque mondiale à 1000 m^3/habitant/an (KETTAB, 2001). Le déficit en eau est devenu très inquiétant à l'heure actuelle et risque de l'être encore plus, selon les diverses expertises, tout en sachant que les potentialités du pays ne sont que de 18 milliards de m3/an et que la mobilisation actuelle n'est que de 5 à 6 milliards de m^3/an (KETTAB, 2001; C.N.E.S, 2002). Ce volume d'eau mobilisable est en diminution à cause de plusieurs facteurs naturels ou anthropiques. Il s'agit de l'envasement des barrages : 52 grands barrages reçoivent 32 millions de m^3 de sédiment annuellement. Aussi, la pollution des nappes et des oueds, l'eutrophisation des eaux des barrages et l'instruction des eaux marines dans les aquifères côtiers, sont des problèmes qui ont pris parfois des dimensions importantes ces dernières années. Une gestion quantitative et qualitative rationnelle des ressources en eaux est la clé d'un développement durable, compte tenu d'une part de l'accroissement continu des besoins, et d'autre part de la dégradation constatée durant ces dernières décades de la qualité de l'eau dans ce pays. Une rationalisation de cette gestion passe par un équilibre entre l'exploitation et la protection.

Au cours des dix dernières années, notre pays a envisagé une nouvelle politique en matière de gestion des ressources hydriques. Cette politique vise à protéger et à sauvegarder les ressources en eaux dans leurs gisements, avant qu'elles ne soient contaminées, à travers des outils législatifs qui répondent à des contraintes socio-économiques et démographiques (C.N.E.S, 2002., KADI , 1997). Sachant que l'accès à une eau de bonne qualité tant pour la consommation que pour l'agriculture est une condition essentielle au développement d'un pays. Et donc, une meilleure connaissance de l'origine et des mécanismes de dégradation qualitative et quantitative des eaux, contribuerait à une gestion durable de l'eau. Une gestion qualitative et quantitative efficace des ressources en eaux souterraines nécessite une bonne compréhension du fonctionnement du réservoir sollicité, notamment pour le cas des zones arides où la baisse pluviométrique pèse sur la recharge de la nappe. Dans la région de Djelfa, caractérisée par son climat semi-aride, les eaux souterraines jouent un rôle fondamental pour satisfaire les différents besoins croissants des populations et les activités socio-économiques, ce qui conditionne fortement le développement socio-économique. La surexploitation des eaux souterraines, liée à ces pressions anthropiques toujours croissantes, a accentué la tendance à la baisse des niveaux des nappes souterraines.

Une bonne connaissance du fonctionnement des aquifères régionaux nécessite au préalable, une identification géologique et hydrogéologique poussée (réalisation de forages, reconnaissances géophysiques, essais par pompage, jaugeage des cours d'eau, analyses physico-chimiques et bactériologiques…).

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente thèse qui vise à valoriser l'ensemble des résultats obtenus dans la zone d'étude afin d'acquérir des connaissances détaillées sur le ressources hydriques, ce qui est indispensable pour assurer une gestion durable, dans une région où les données de base sur l'hydrologie, l'hydrogéologie, l'hydrogéochimie et les isotopes des systèmes aquifères sont très peu ou pas du tout disponibles.

2. Objectifs

Le présent travail vise à améliorer les connaissances sur l'impact des facteurs naturels (climatiques, lithologiques) et anthropiques sur le fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique du système aquifère. En d'autres termes, ce travail cherche des éléments de réponse aux questions auxquelles est confrontée cette nappe en déterminant les conséquences de la variabilité climatique et l'ensemble des mécanismes régissant le chimisme des eaux de cette ressource souterraine tant sur la qualité que sur la réserve en eau (baisses piézométriques), en utilisant des moyens plus adéquats. En résumé, ce travail vise l'élaboration d'un outil d'aide à la décision en vue d'une gestion durable et prudente de la ressource en eau.

3. Approche méthodologique

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie couplant des approches hydrogéologique, hydrogéochimique, les méthodes statistiques multivariées (ACP et CHA) et l'analyse géostatistique, a été développée pour :

Définir le comportement hydrogéologique de l'aquifère, déterminer les paramètres hydrodynamiques spécifiques du système aquifère, comprendre les mécanismes gouvernant l'écoulement souterrain en relation avec la nature des formations géologiques ;

Caractériser les faciès chimiques des eaux souterraines du système aquifère, comprendre les processus de minéralisation des eaux, établir les interactions eau-roche.

L'application de la géostatistique afin d'établir des cartes numérisées de la qualité des eaux souterraines.

4. Structure de la thèse

Le manuscrit de thèse s'articule autour de 7 chapitres précédés par une introduction qui décrit la problématique du sujet, les objectifs visés dans cette étude et les approches méthodologiques utilisées pour mener à bon port cette étude.

Le premier chapitre est consacré au rassemblement des données concernant les caractéristiques physiques de la zone d'étude en s'appuyant principalement sur la synthèse des études antérieures. Il s'agit en l'occurrence de la situation géographique, réseau hydrographique, géomorphologie, pédologie et les ressources en eau du secteur étudié.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'analyse des paramètres hydroclimatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique.

Le troisième chapitre traite deux volets importants : d'une part l'aspect géologique (contexte géologique régional, lithostratigraphie et étude structurale), et d'autre part la synthèse des différentes études hydrogéologiques effectuées dans la zone en s'appuyant principalement sur une documentation riche fournie par l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH)

Le quatrième chapitre est consacré à la caractérisation de la variabilité climatique. Afin de dégager ses conséquences sur les ressources en eau. Cette fluctuation a été étudiée en s'appuyant sur l'application des tests statistiques de détection de ruptures pour l'analyse des séries chronologiques pluviométriques et hydrométriques.

Le cinquième chapitre portera sur la caractérisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère, en utilisant les données des campagnes piézométriques et campagnes des essais de pompages effectuées pour estimer les caractéristiques hydrodynamiques.

Le sixième chapitre concerne l'étude du contexte et hydrogéochimique afin d'identifier les différents processus géochimiques gouvernant la minéralisation des différents faciès d'eau rencontrés et d'évaluer la qualité des eaux souterraines. Ce chapitre a été réalisé en combinant les méthodes statistiques multivariées (ACP, HCA) et l'approche hydrochimique classique. Le septième chapitre est consacré à la cartographie des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, en s'appuyant sur l'approche géostatistique. Cette méthode est fondée sur la modélisation géostatistique de la structure spatiale de ces paramètres physico-chimiques, par l'analyse variographique et l'interpolation par la méthode de krigeage des paramètres à cartographier.

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

.

PREMIERE PARTIE : LE MILIEU RECEPTEUR

Chapitre 01 :

Présentation de la zone d’étude

1.1 Situation géographique

Le bassin des Zahrez se situe dans la partie centrale de l'Algérie du Nord (Figure 1), s'étend sur les Wilaya de Djelfa et M'Sila sur une superficie de 9119,9 km^2. Ce bassin fait partie du système des grands chotts des hautes plaines steppiques, situé entre les latitudes 34^0 35` et $35^0$ 30`N et les longitudes 2^0 15` et $4^0$ 08`E (POUGET, 1980).

Le bassin du Zahrez Gharbi forme, avec le Zahrez Chergui à l'Est une vaste dépression endoréique située entre deux ensembles analogues mais incomparablement plus important : le Chott chergui, à l'Ouest et le Chott Hodna à l'Est (POUGET, 1980; POUGET, 1971).

Les limites de la zone étudiée correspondent :

- Au nord : des chaînons montagneux de Sebaa Rouss et de Guelt Es Stehl – Taguine (Oukat Rharbi et Oukat Chergui), qui marquent la limite entre les Zahrez et la plaine d'Aïn Oussera,
- Au sud : des Monts des Ouled Naïl et du chaînon montagneux de Chebeibita-Menaa,
- A l'est : des massif montagneux de Djebel Zemra et Djebel Zmira,
- A l'ouest : d'un alignement de collines à 900 m qui constitue la limite hydrologique et hydrogéologique entre les eaux s'écoulant vers les Zahrez (à l'est) et celles s'écoulant vers l'oued Touil (à l'ouest).

La région du Zahrez se caractérise par un grand synclinal irrégulier, plus large à l'Ouest avec 50 kilomètres, qu'à l'Est avec 30 kilomètres, et long d'environ 140 kilomètres avec une orientation Nord-Est-Sud-Ouest (POUGET, 1971).

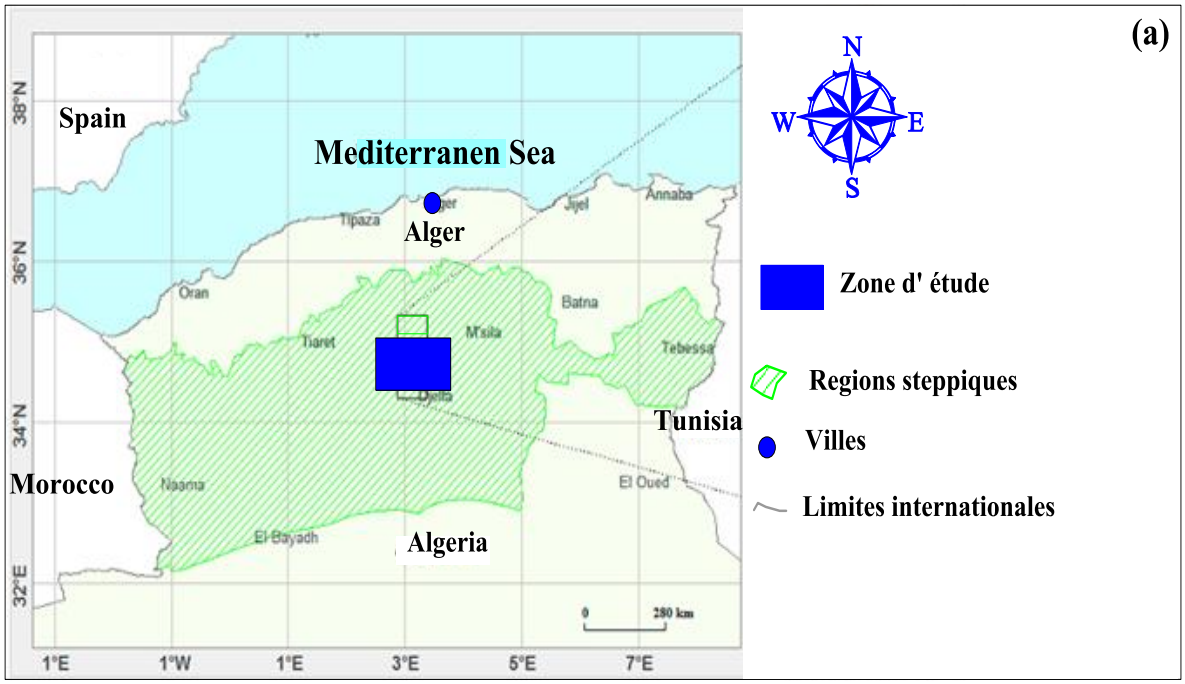
La topographie du bassin est marquée avec des altitudes qui s'étalent de 830 m à 1500 m. Les altitudes sont de l'ordre de 1200 m sur les massifs formant la bordure nord des Zahrez et les massifs formant la bordure sud culmine à 1500 m. Le Zahrez Rharbi s'étend entre 830 m et 1000 m d'altitude (A.N.R.H, 1994).

1.2 Caractéristiques physiographiques

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant ont une importance majeure car elles influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage. Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

1.2.1 Surface

La surface du bassin versant correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux.



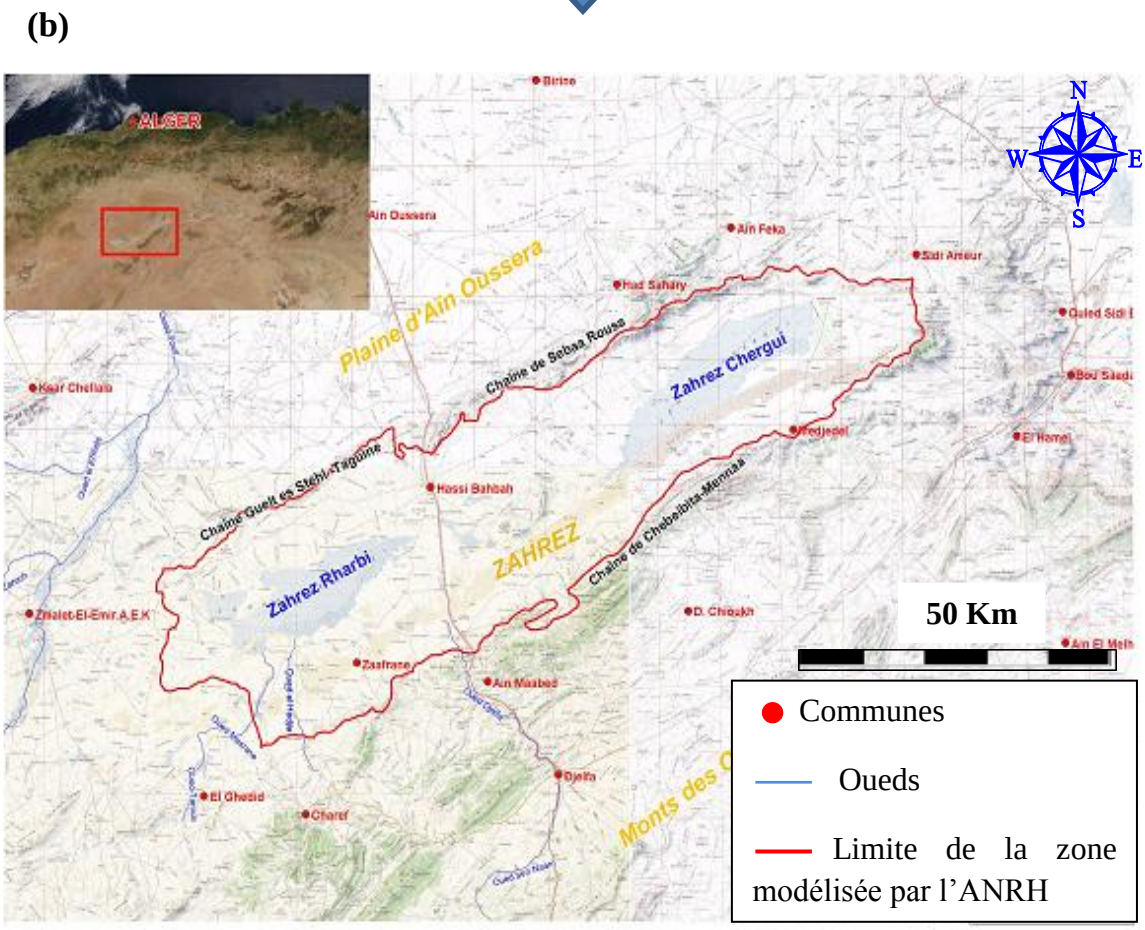


Figure 1: Situation géographique du bassin versant des Zahrez

1.2.2 Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en Km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés.

1.2.3 Coefficient de compacité de Gravelius (1914)

Il existe différents indices morphologique permettant de caractériser le milieu et de comparer les bassins versants entre eux. Nous citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) (Kc) (ROCHE, 1963; LABORDE, 2009). Cet indice est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre ayant la même surface :

$$\mathbf{Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}}}$$

A : surface du B.V (km^2), P : périmètre du B.V (km)

Selon la valeur de Kc, on peut caractériser la forme du bassin versant comme suit :

Kc ≤ 1 **:** bassin en forme circulaire

Kc = 1,12 **:** bassin de forme carrée.

Kc > 1,12 **:** bassin versant de forme allongée.

Les valeurs de l'indice de compacité (Tableau 1) montrent que le sous bassin de l'oued Diait Mifiteg est le plus compact (Kc = 1,136), alors que le bassin les plus allongés correspond à celui de l'oued Zahrez gharbi (Kc=1,8). Les autres valeurs sont très rapprochées, ce qui traduit l'homogénéité de forme des différents sous-bassins.

1.2.4 Le Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau (MUSY et HIGY, 2004). Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. La longueur L et la largeur l du rectangle équivalent ont été déterminées à partir des formules suivantes :

La longueur L

$$L = \frac{Kc * \sqrt{A}}{1.12} * (1 + \sqrt{1 - (\frac{1.12}{kc})^2})$$

La largeur l

$$l = \frac{Kc * \sqrt{A}}{1.12} * (1 - \sqrt{1 - (\frac{1.12}{kc})^2})$$

Kc : L'indice de compacité

A : Superficie du bassin versant en Km^2

L : longueur du rectangle équivalent en Km

l : largeur du rectangle équivalent en Km

1.2.5 Densité de drainage

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques (MUSY et HIGY, 2004). La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

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

Dd : Densité de drainage (Km/Km^2)

ΣL : Longueur totale cumulée des talwegs

A: Surface du bassin (Km^2)

1.3 Hydrographie

1.3.1 Réseau Hydrographique

Le bassin versant est endoreïque, il est décomposé de 6 sous bassins drainés par d'importants oueds qui se jettent tous dans les deux Zahrez (Figure 2). Le réseau hydrographique dans cette région est très dense avec des ramifications à travers l'ensemble des reliefs (POUGET, 1980). La plupart des oueds dans cette région, aride à sub-aride, ne coulent que lorsqu'il pleut. Exception faite de quelques écoulements pérennes liés à des sources importantes. Notons aussi que l'endoréisme constitue, dans cette région, la caractéristique essentielle de l'ensemble du réseau hydrographique, car les oueds coulant vers le nord débouchent dans les bas-fonds des hautes plaines (chotts ou dayas) et ceux du sud se perdent loin sur la plate-forme saharienne, soit dans des dépressions fermées (chotts ou Dayas), très nombreuses sur la hamada, soit sur la surface de la hamada ou dans des champs de sable (POUGET, 1971). Les seuls oueds qui coulent durant de long mois et parfois gardent leur pérennité durant toute l'année quand les pluies sont importantes sont l'oued Djelfa-Melah et à un degré moindre l'oued Hadjia dans sa

partie amont (sud). C'est pour cela que le bassin s'est attribué le nom de ces deux cours d'eaux qui se versent dans le chott de Zahrez el gharbi qui est considéré comme l'exutoire naturel de ce bassin- versant. Le chevelu hydrographique du sous bassin-vesant de l'oued Djelfa-Hadjia a une longueur totale de 1157,25 Km, ce qui atteste que le réseau est moyennement dense (SIDI MOUSSA, 1996).

1.3.2 Les principaux oueds

Les oueds principaux sont situés au sud de la zone d'étude et drainent les eaux de ruissellement des sous-bassins versants. Il s'agit de l'oued Mesrane, de l'oued Hadjia, de l'oued Mellah, et de l'oued Medjedel. Ces oueds sont indiqués sur la Figure 2. Il existe par ailleurs de nombreux oueds secondaires qui drainent les eaux de pluies des reliefs vers les chotts. Les deux chotts (Zahrez Rharbi et Chergui) constituent le niveau de base des écoulements (SIDI MOUSSA, 1996).

Oued Mellah

Il s'agit de l'oued le plus important de la zone du Zahrez Gharbi. Son bassin versant de 1338 km^2 se situe en partie dans le synclinal de Djelfa (812 km^2) et en partie dans la dépression des Zahrez (576 km^2). L'oued Mellah vient buter sur le Rocher de Sel qu'il contourne pour déboucher dans le bassin des Zahrez (Figure 1.1, annexe 1). En amont du Rocher de Sel, un écoulement pérenne est localement assuré par l'évacuation des eaux usées de la ville de Djelfa et par un certain nombre de petites sources localisées sur une série de failles transverses. En aval, l'oued reste à sec la majeure partie de l'année. Des écoulements y sont observés uniquement à la suite d'épisode pluvieux (POUGET, 1971; SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993).

Oued Hadjia

Il prend naissance sur le versant nord des Monts Ouled-Naïls. Son écoulement est temporaire. Sur l'oued Hadjia (Figure 1.2 et Figure 1.3, annexe 1), à proximité de la commune de Charef, une source thermale assure une alimentation permanente de l'oued par la nappe albienne. Ces eaux sont rapidement infiltrées à l'aval. Le deuxième oued du point de vue longueur est l'oued Hadjia qui parcourt 34 km de distance. Ses principaux affluents sont les oueds : Chkemia, Mrifia et Hasrane. La longueur totale de ses affluents est de 161.50 km. Ces oueds ont leur source dans les Djebels Senalba, Kef el Guettaya et Kef er rekma (SIDI MOUSSA, 1996).

Oued Mesrane

L'oued prend naissance sur le versant nord des Monts Ouled-Naïls. Son écoulement est temporaire. Il draine des affleurements plus ou moins salés du Miopliocène. Les eaux de crue

finissent dans la plaine par des épandages. Une grande partie du flot se répand entre le piedmont de l'Atlas saharien et le cordon dunaire. Le reste du flot franchit difficilement le cordon dunaire pour atteindre le chott (SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993).

Tableau 1 : Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants étudiés

Caractéristiques	1701	1702	1703	1704	1705	1706	1700
Oued	Mesrane	Djelfa-Hadjia	Zahrez Gharbi	Diait Mifiteg	Medjedel	Chergui	Zahrez
A (Km^2)	1735	2416,9	1448	822,7	733,1	1963,8	9119,9
P (Km)	217,6	255,5	244,7	154,4	138,06	226,7	574,9
Kc	1,462	1,455	1,8	1,136	1,427	1,432	1,685
L re (Km)	89,32	104,63	109,03	33,96	55,87	91,97	251,02
l re (Km)	19,42	23,1	13,28	24,23	13,12	21,35	36,33
Dd ($Km/Km^{2)}$	0.617	0.545	0.324	0.395	0.572	0.292	0.459

1.3.3 Les Chotts

Ce sont de vastes systèmes endoréiques du quaternaire moyen, couvrant plusieurs dizaines de Km^2, où s'accumulent les eaux de ruissellement salées dans la zone centrale, dépourvu de végétation (salinité hautement élevée), au tour de cette auréole centrale, pousse une végétation halophile. Dans la zone d'étude, on distingue deux Zahrez :

Zahrez Gharbi à une altitude de 827 m,

Zahrez Ghergui à une altitude de 750 m.

Les Zahrez (Rharbi et Chergui), situés dans le même bassin versant, font partie du système des grands Chotts des Hauts Plateaux, ils sont compris entre deux ensembles analogues mais plus grands (Chott Chergui à l'Ouest et Chott Hodna à l'Est) (POUGET, 1971).

Chott Zahrez Chergui

Le Chott Zehrez Chergui est situé dans la frange méridionale des hautes plaines steppiques algériennes à 50 km au Nord-Est du chef-lieu de la Wilaya de Djelfa, à 11 km au sud de la Commune de Hassi El Euch et à 25 km au sud de la Commune de Had Sahary. Le chott est séparé de Zehrez Gharbi par la route nationale une (RN1) à une distance de 50 km.

Chott Zahrez Rharbi

Le chott se situe dans la wilaya de Djelfa, au centre de l'Algérie, dans une zone steppique, à 45 kilomètres du chef-lieu de la ville de Djelfa, à 10 kilomètres au Sud-Ouest de la commune de Hassi Bahbah et à 5 kilomètres de la commune de Zâafrane.

1.4 Géomorphologie

La géomorphologie du bassin est marquée par les deux cuvettes des Zahrez Rharbi et Chergui. Les altitudes sont de l'ordre de 1200 m sur les massifs formant la bordure nord des Zahrez et 1500 m sur les massifs formant la bordure sud. Le Zahrez Rharbi est le plus déprimé : il ne dépasse pas 1000 m d'altitude et s'abaisse jusqu'à 830 m. Entre les deux Zahrez, les crêtes du Djebel Kondjaïa forment un très large seuil à 850 m. Ce seuil n'est situé que 20 m au-dessus du Zahrez Rharbi (POUGET, 1980).

Les reliefs

Les Djebels Djellal Gharbi et Djellal Chergui

Ils forment le flanc sud du synclinal de Djelfa. La falaise des calcaires du Turonien domine la dépression d'Aïn el Ibel: Cette falaise est interrompue au niveau d'Oued Seddeur (passage de la RN l) par une faille qui a décalé et individualisé le djebel Djellal Gharbi à l'Ouest et le djebel Djellal Chergui à l'Est (POUGET, 1977). Vers le Nord, à l'intérieur du synclinal, on note des affleurements de la série marno-calcaire (Sénonien). Les crêtes turoniennes se situent entre 1400 et 1450 m d'altitude.

Djebel Senalba avec 1489 mètres d'altitude.

Djebel Shari prolongé à l'Est situé à 1484 mètres d'altitude.

Les surfaces plus ou moins planes

Les glacis :

Ils sont définis comme des surfaces plus ou moins planes, parmi lesquelles on distingue :**Les glacis du Quaternaire ancien :**

Ils ont une disposition élevée par rapport aux autres formations planes, la pente est de 1 à 3% et la croûte calcaire est fortement présente.

Les glacis du Quaternaire moyen :

Ils sont marqués par un ensablement important et une présence plus ou moins importante de croûtes calcaires que les glacis précédents.

Les glacis du Quaternaire récent ou actuel :

Les formations du Quaternaire récent se rapportent pour l'essentiel à des dépôts colluviaux et alluviaux relativement fins. Occupant des surfaces nettement plus réduites que les formations précédentes, ils se localisent le plus souvent dans les dépressions alluviales qui aboutissaient aux zones basses marécageuses ou lacustres.

Les dépressions

Dayas

Ce sont des dépressions circulaires de faibles dimensions. Elles se forment sur une surface encroûtée du quaternaire ancien. Elles constituent des zones de drainage permettant l'accumulation des eaux de ruissellements. Elles sont localisées essentiellement au Sud du cordon dunaire, sur des surfaces encroûtées avec une profondeur faible. Ce sont des petites dépressions fermées et peuvent être utilisées pour la céréaliculture, comme Daït El Etchana, Daït Azziz et Daït Bessissa.

Chotts et Sebkhas

Dépression salée des zones arides et semi-arides de grande dimension dont les termes vernaculaires sont représentés par Chotts et Sebkhas ; la différence entre ces deux noms réside dans le mode d'alimentation. Les sebkhas sont sous la dépendance d'apport des eaux de crue et les Chotts sont alimentés respectivement par les apports de ruissellement et aussi par les nappes artésiennes profondes arrivant jusqu'en surface par des sources et/ou des suintements (POUGET, 1977). En période pluvieuse, il se forme de véritables lacs ; l'eau s'évapore peu à peu, la saturation en sels devient excessive (300 à 400 g/l) avec des dépôts de chlorures de sodium très importants, parfois exploitables (salines du Zahrez Gharbi).

Les formations éoliennes

Le cordon dunaire du bassin des Zahrez

Le cordon dunaire du Bassin des Zahrez constitue incontestablement, par son étendue et par la masse de sable qu'il représente, la formation la plus typique de l'ensemble des Hautes Plaines. Il s'étend dans le sens Sud- Ouest -Nord-Est sur environ 150 km de longueur, depuis l'oued Touil jusqu'aux djebels à l'Est du Zahrez Chergui, et sur 2 à 3 km de largeur en moyenne (POUGET, 1980).

I.5 Pédologie :

I.5.1 Les Sols

L'étude de base est intitulée «Etude agro-pédologique du bassin du Zahrez Gharbi (Feuille Rocher de Sel) à échelle 1/100.000». Les cartes réalisées portent sur la pédologie, l'aptitude du milieu pour la mise en valeur, les groupements végétaux et la nappe phréatique.

Les sols minéraux bruts d'apport éolien :

Ce sont les dunes et les microdunes vives du cordon dunaire. La granulométrie se caractérise par l'absence de toute la fraction inférieure à 50 microns (argile, limon fin et limon grossier)

avec une teneur en calcaire faible (0 à 3%) celle du gypse négligeable (sable essentiellement siliceux) et un taux de matière organique insignifiant (inférieur à 0,2%).

Les sols peu évolués :

Ce sont des sols d'alluvions calcaires, de texture variable suivants les Oueds et leur situation d'épandage (aval ou amont). Sols peu évolués d'apport alluvial modaux : ils se situent le long du piedmont de l'Atlas Saharien dans la zone d'épandage d'oued. La roche mère est de type alluvion calcaire ; sols peu évolués d'apport alluvial halomorphes : ils sont localisés à oued Mesrane avec sols anciens hydromorphes noircis et salés en profondeur avec encroûtements calcaro gypseux de nappe. Ils sont localisés au niveau de l'oued Korirech, l'oued Melah et la vaste plaine au sud des Terres Blanches. Ces sols sont activement cultivés en céréales.

Les Vertisols :

Dans la sous classe des vertisols à drainage externe nul ou réduit, on ne trouve que le groupe des sols à texture anguleuse sur au moins les 15 cm supérieurs. Il s'agit de vertisols halomorphes. La superficie est peu importante et localisée sur les roches mères de type argile limoneuse de décantation de calcaire généralement salé. Ils se localisent dans une petite dépression dans la zone d'épandage de l'Oued Kroireche. Du point de vue occupation, les zones sont cultivées en céréales (POUGET, 1971).

Les sols calcimagnésiques

Les sols bruns calcaires xériques à croûte calcaire : ce sont des sols à texture grossière localisés sur les glacis encroûtés du Zahrez El Gharbi et sur l'Atlas Saharien. Ce sont des sols qui conviennent au parcours. Les sols gypseux à encroûtement de surface, situés sur les dunes et les nebkas de sables gypseux en bordure du Zahrez, ne conviennent pas aux cultures et ne constituent que de maigres terrains de parcours (POUGET, 1971; B.N.E.D.E.R, 1995).

Les sols isohumiques :

Dans cette classe, le groupe de sierozems occupe une grande superficie dans le bassin du Zahrez où ces sols sont associés à un matériau sablo- éolien ancien siliceux très peu calcaire. Ils sont localisés dans les vallées à fond plat, en bordure nord et sud est du Zahrez Gharbi et le long au piedmont de l'Atlas Saharien. En relation avec la texture finement sableuse, la structure reste peu individualisée. Ils constituent d'excellents parcours mais ne conviennent guère aux cultures céréalières (texture trop sableuse) (MAOUI, 2007).

Les sols hydromorphe :

Sols a gley salés, texture sableuse, ils se localisent dans les dépressions interdunaires avec présence de nappe peu salée, il est possible d'utiliser ces sols pour des cultures maraîchères, cependant l'intensité et la force de l'érosion ne favorisent pas l'utilisation de ces sols. Les sols à encroûtement gypseux avec une texture sablo-limoneuse et amas sont localisés en dépression en bordure des dunes, ils sont utilisés actuellement sous formes de petits jardins.

Les sols halomorphes (sols salsodiques) :

Bien représentés dans le Bassin des Zahrez, les sols halomorphes s'observent fréquemment dans les Hautes-Plaines et même, localement, dans l'Atlas Saharien : terrasses, zones d'épandage, dépressions à nappe phréatique salée, etc.

On recense les sols suivants :

Sols salins modaux : ils occupent la bordure sud des Zahrez Gharbi, formés dans les alluvions à texture grossière et recouverts de dépôts sableux éoliens. La nappe peu profonde (1 à 3m) est responsable de la salure très élevée. Sols salins à encroûtement gypseux de nappe : ils forment une frange étroite et continue en bordure du Zahrez Gharbi. La salure est excessive dans les horizons de surface au-dessus de l'encroûtement gypseux. Sols salés à alcalis : Ils sont localisés dans les zones d'épandage des principaux oueds. La structure est dégradée en surface (pseudo sable) mais également en profondeur. On relève la présence d'un encroûtement gypseux de nappe, et une salure très élevée dans les horizons de surface à texture fine (influence de la nappe) (B.N.E.D.E.R, 1995; MAOUI, 2007).

I.6 La végétation

Au point de vue physionomie et structure nous distinguerons schématiquement et d'une façon très classique les types de végétation suivant :

Groupe forestier à Pinus halepensis et Juniperus oxycedrus

Sur les djebels et affleurements rocheux des Djellal Gharbi et Chergui (Synclinal de Djelfa) avec localement les glacis encroûtés du Quaternaire moyen.

En fonction du substrat, on distingue deux sous-groupements :

Sous-groupe à Cistus libanotis sur calcaire dur et croûte calcaire

Sous-groupe à Catananche coespitosa sur marno-calcaires et marnes parfois encroûtées (Sénonien).

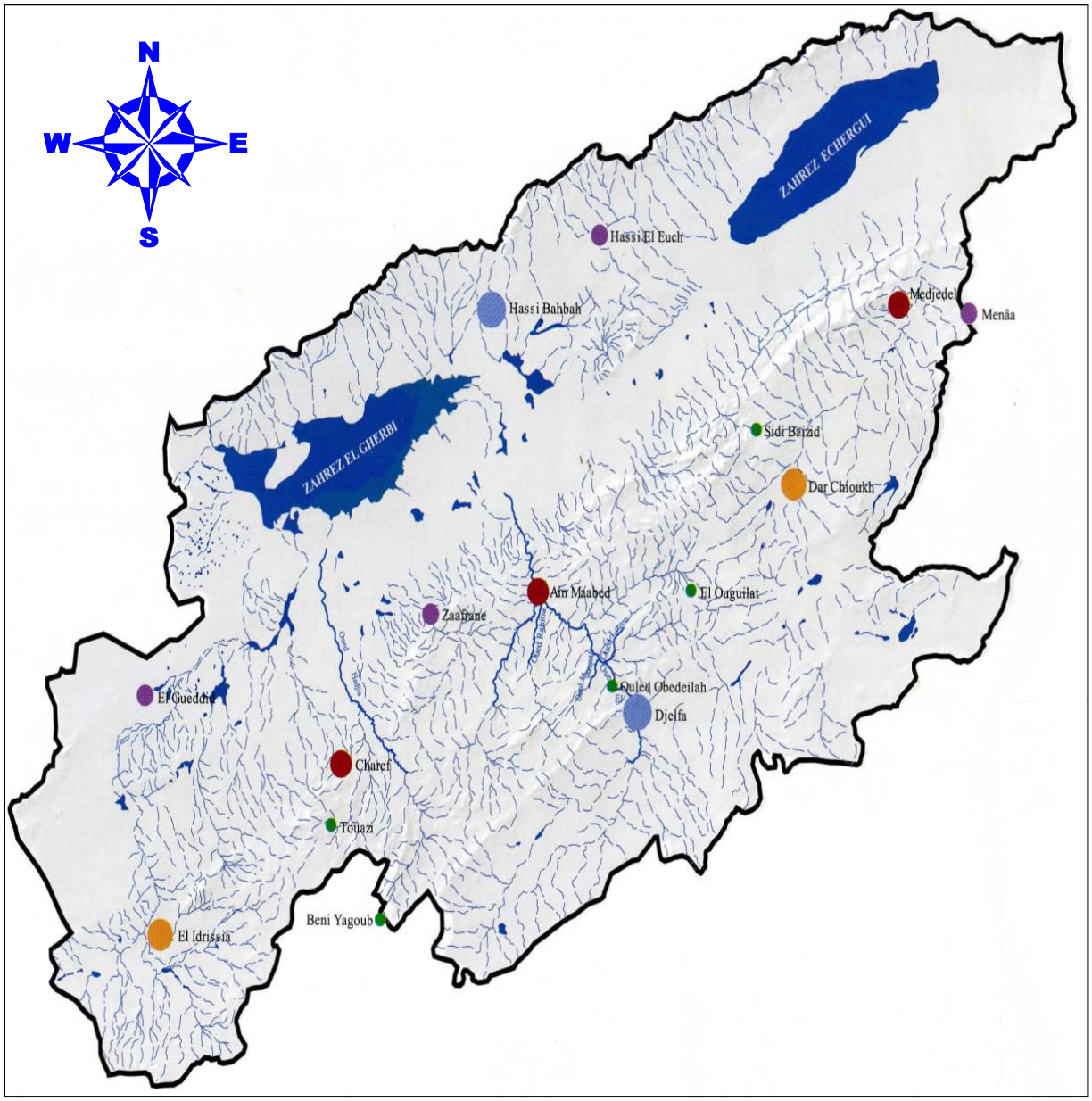


Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant des Zahrez

Les steppes à Sparte (Lygeum spartum)

Les steppes à Lygeum spartum (Sennag) occupent plus les zones d'oued au Nord de Hassi Bahbah. Ceci est très visible près des oueds à Betoum (Pistacia atlantica) entre Ain Oussera et Guelt-stel (POUGET, 1980).

Les steppes à halophytes

Elles occupent les bords des Zahez Chergui et Rharbi et au nord de Ain Oussera.La végétation caractéristique est la même que celle des Chotts chergui et Rharbi de la Wilaya de Naâma.

Les steppes à Armoise blanche (Artemisia herba-alba) "Chih"

Il comprend deux sous-groupements principaux :

Stipa tenacissima

On le trouve au Nord du Djebel Oukat Chergui sur des sols bruns calcaires xériques (steppiques) à croûte-calcaire (0-30 cm). La texture est sablo-limoneuse à limono-sableuse. Cette steppe d'Alfa assez dense est exploitée et ne constitue qu'un maigre pâturage. Le cortège floristique est réduit, avec très peu d'armoise blanche (POUGET, 1971).

Noaea mucronata

Il se localise dans deux zones:

au Nord du Zahrez Gharbi, sur le glacis polygénique du quaternaire ancien et moyen à l'Est de l'Oued El Menntel.

à l'Est de la zone d'épandage de l'Oued Korirech sur le piédmont encroûté en bordure de l'Atlas Saharien (MAOUI, 2007).

Les steppes à Alfa (Stipa tenacissima)

La physionomie, relativement homogène, est marquée par la dominance de cette espèce aussi bien sur les versants des djebels que sur les glacis encroûtés. Les steppes à alfa présentent un intérêt de tout premier plan pour l'étude de la dynamique de la végétation et des relations végétation-milieu (POUGET, 1971).

1.7 Aperçu socio-économique

1.7.1. Population

La région d'étude regroupe une population d'environ 380310 habitants en 2000 (Tableau 2). Le taux d'accroissement annuel estimé à 4,4 % (RGPH 1998). Avec ce rythme de croissance, les études de prospective à long terme prévoient une population de 403800 aux alentours de 2020, soit un accroissement global de 6% par rapport à l'an 2000 (D.P.A.T., 2001).

1.7.2. Agriculture

Le bassin des Zahrez est une région à vocation agropastorale, ou existe une céréaliculture vivrière assez répondu.

Actuellement l'agriculture connaît un grand essor dans la région, les cultures maraîchères cultivés en été inondent non seulement les marchés de la région mais aussi les wilayas limitrophes. L'implantation des vergers d'arbres fruitiers tels que : les pommiers, les grenadiers, les abricotiers, les prunes et même les pistachiers fait tache d'huile dans les hauts plateaux et l'Atlas Saharien.

Tableau 2 : Évolution de la population à l'horizon 2020

Agglomérations	Commune	Wilaya	Estimation de la population à l'horizon 2020		
			2000	**2010**	**2020**
Djelfa	Djelfa	Djelfa	164126	169117	174259
Hassi Bahbah	Hassi Bahbah	Djelfa	61790	63669	65605
Dar chioukh	Dar chioukh	Djelfa	24870	25626	26406
El Idrissia	El Idrissia	Djelfa	21279	21926	22593
Charef	Charef	Djelfa	19373	19962	20569
Ain Maabed	Ain Maabed	Djelfa	13183	13584	13997
El Guedid	El Guedid	Djelfa	11050	11395	11742
Hassi El Euch	Hassi El Euch	Djelfa	10834	11163	11503
Sidi Baizid	Sidi Baizid	Djelfa	11360	11705	12061
Zaafrane	Zaafrane	Djelfa	12865	13256	13659
Ben Yacob	Ben Yacob	Djelfa	6456	6652	6855
Medjedel	Medjedel	M'sila	16624	17130	17650
Menaa	Menaa	M'sila	6500	6698	6901
	Total		**380310**	**391883**	**403800**

Superficie agricole utile (SAU)

La Figure 3 indique, pour les principales communes de la wilaya de Djelfa appartenant au bassin des Zahrez, les superficies de surfaces agricoles utiles (SAU) et de parcours. La répartition de la superficie agricole utile (SAU) montre, que sur l'ensemble de ces communes, la surface exploitée pour l'agriculture est utilisée à 78% pour l'élevage (parcours) et à 22% seulement (soit environ 65 500 Ha) pour la culture (S.A.U.) (D.S.A, 2006). La répartition de la surface cultivée sur le bassin des Zahrez est précisée sur le graphique (Figure 4). Sur les communes de la wilaya de Djelfa, les cultures regroupant les cultures maraîchères, les cultures fourragères, l'arboriculture et les oliviers représentent 13 % seulement des surfaces cultivées. Le reste est occupé par les cultures céréalières (B.N.E.D.E.R, 1995).

Les surfaces irriguées

Un recensement général agricole (RGA) a été réalisé en 2001 sur l'ensemble des communes d'Algérie. Ce recensement donne accès à une estimation des superficies irriguées par commune et par type de culture. Les données relatives aux communes du bassin des Zahrez sont reportées dans le Tableau 3. Le bassin des Zahrez ne couvre pas les communes dans leur totalité. Seule la proportion de culture effectivement située dans les limites du bassin doit être considérée pour estimer les volumes d'eau prélevés. Le Tableau 4 présente l'estimation des surfaces irriguées effectivement situées sur le bassin des Zahrez. Les résultats sont données par type de culture pour l'année 2001 (données RGA) et 2006 (B.N.E.D.E.R, 1995).

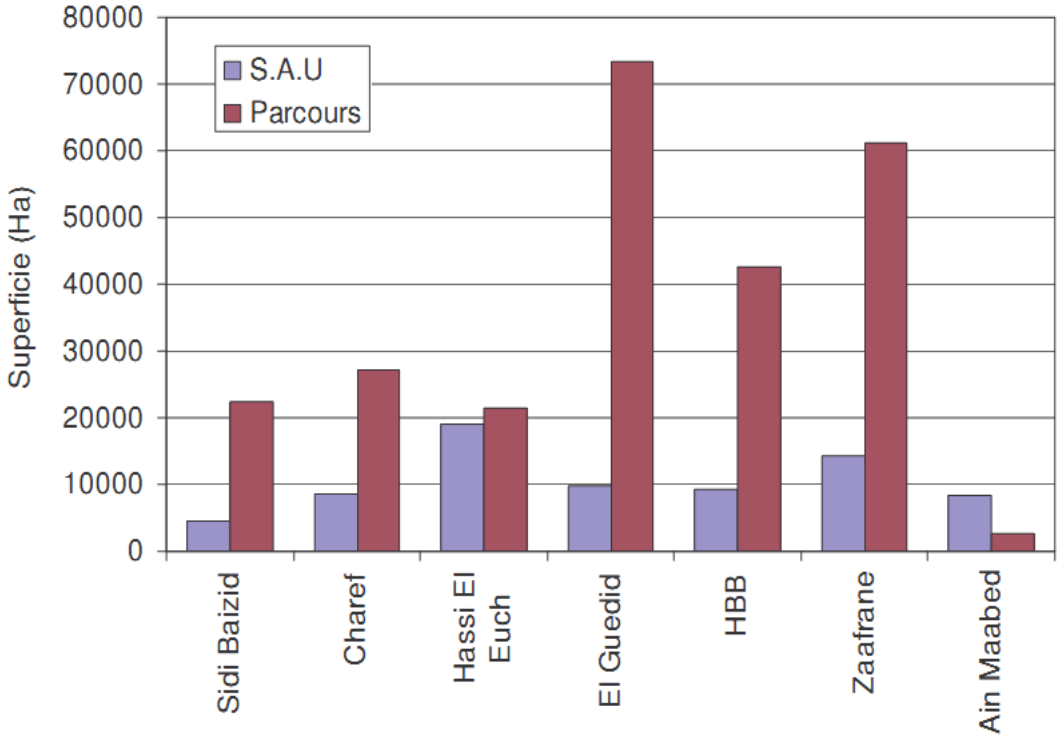


Figure 3 : S.A.U et parcours sur le bassin des Zahrez (DSA de Djelfa-2005/2006)

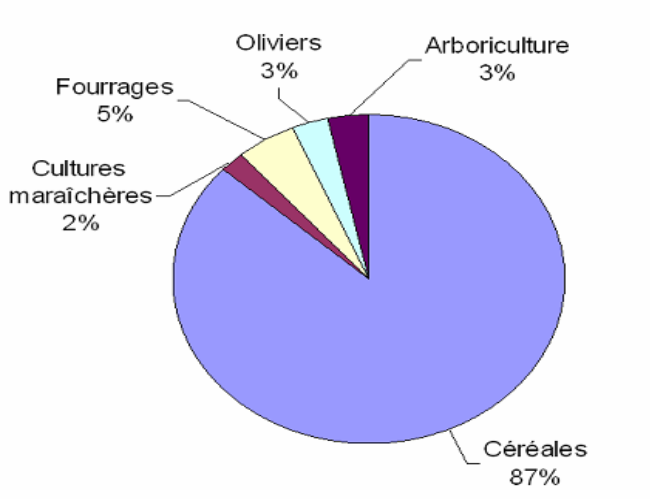


Figure 4 : Répartition des surfaces cultivées (DSA de Djelfa-2005/2006)

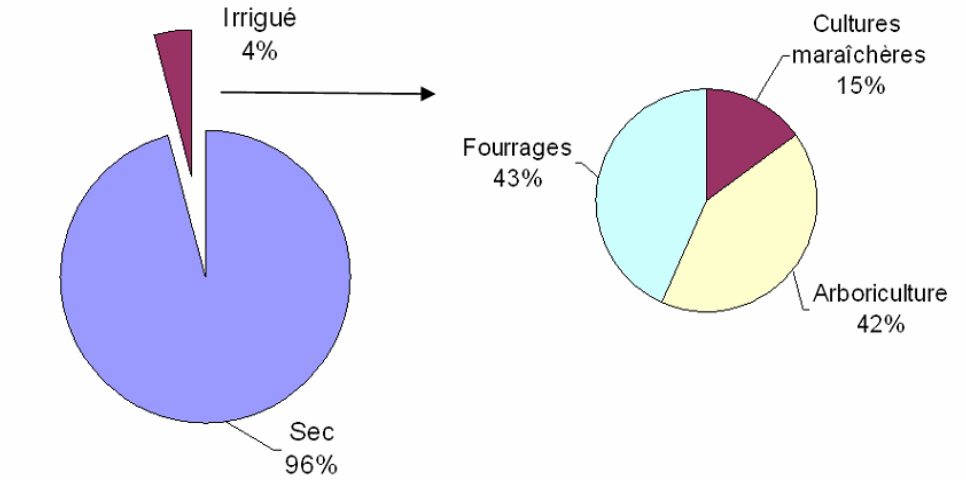


Figure 5 : Superficies irriguées sur le bassin des Zahrez (DSA de Djelfa-2005/2006

Tableau 3 : Répartition des cultures irriguées sur les communes du bassin des Zahrez (RGA - 2001)

Wilaya	Commune	surfaces cultivées irriguées / type de culture					
		céréales	cultures fourragères	cultures maraîchères	pépins noyaux	figuiers	oliviers
DJELFA	HAD SAHARY	16	3	13	42	0	9
DJELFA	BOUIR LAHDEB	0	0	14	44	9	1
DJELFA	AIN FEKKA	0	0	20	0	0	0
DJELFA	HASSI BAHBAH	52	0	59	79	0	4
DJELFA	EL GUEDID	4	0	19	2	0	0
DJELFA	AIN MAABED	112	10	47	15	2	0
DJELFA	SIDI BAIZID	2	25	180	6	0	0
DJELFA	HASSI EL EUCH	3	0	17	41	2	0
DJELFA	CHAREF	16	16	670	258	117	2
DJELFA	ZAAFRANE	97	17	93	118	2	2
MSILA	TAMSA	25	5	35	143	0	0
MSILA	OULED ATIA	63	9	369	22	1	0
MSILA	MEDJEDEL	88	39	317	88	23	0
MSILA	SIDI AMEUR	118	12	331	292	5	1
	Total	596	136	2184	1150	161	19

Tableau 4 : Estimation des surfaces de cultures irriguées sur le bassin des Zahrez

type de culture	céréales	cultures fourragères	cultures maraîchères	pépins noyaux
Surfaces irriguées (ha) en 2001 - RGA	189	31	536	283
Surfaces irriguées (ha) en 2006 - DSA	423	708	252	740

1.8 Ressources en eau du bassin des Zahrez

1.8.1. Introduction

Les ressources en eau en Algérie sont caractérisées par une très forte sensibilité aux aléas climatiques (80% des ressources en eau mobilisables sont constituées des par des eaux superficielles, directement liées à l'importance des précipitations), par une irrégularité dans l'espace et dans le temps (inter-annuelle et saisonnière) et par une vulnérabilité a la sècheresse et à la pollution (KETTAB, 2001). L'Algérie se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m^3 par habitant et par an (KETTAB, 2001). Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m^3, elle n'était plus que de 720 m^3 en 1990, 680 m^3 en 1995, 630 m^3 en 1998, 500 m^3 en 2003, elle ne sera que de 430 m^3 en 2020. La disponibilité en eau potable en Algérie en m^3/habitant/an dépassera légèrement le seuil des 400 m^3/ha (DROUICHE, et al., 2012).

Consciente des défis à relever dans la gestion des ressources en eau, l'Algérie a entrepris des efforts considérables visant à l'élaboration d'une politique efficiente de gestion des ressources en eau. Dans le domaine de la mobilisation et de la distribution de l'eau potable, d'épuration des eaux, du dessalement des eaux de mer, de la protection des ressources, les efforts entrepris, par l'Algérie, durant la décennie en cours, et notamment les cinq dernières années, ont permis d'enregistrer des améliorations remarquables. Tous les efforts engagés, tant sur le plan des investissements, que sur le plan institutionnel et organisationnel, s'articulaient autour du développement de secteur de l'eau (KETTAB, 2001; BOUDJAJA et MESSAHEL, 2003).

Dès 1996, l'Algérie a engagé une nouvelle politique de l'eau, à savoir la « Gestion intégrée des ressources en eau » pour garantir leur valorisation et durabilité. Cette nouvelle politique est fondée sur un ensemble de réformes institutionnelles et de nouveaux instruments qui sont les Agences de bassin et les Comités de Bassin (KADI, 1997).

Le territoire algérien est subdivisé en 5 grands bassins hydrographiques (Tableau 5) :

1- Oranie - Chott Chergui

2 - Chellif - Zahrez

3 - Algérois - Soummam - Hodna

4 - Constantinois - Seybouse – Mellegue

5- Sahara

Le Constantinois - Seybouse – Mellègue, bien arrosé et ou les précipitations sont les moins aléatoires, constitue la région la plus riche en eau, elle reçoit près de 37% des écoulements annuels en eau de surface du pays

1.8.2. État quantitatif et utilisation de la ressource en eau

1.8.2.1 Potentialité en eau de l'Algérie

Les ressources potentiellement mobilisables en Algérie sont estimées à environ 19,2 milliards m^3, dont 80% seulement sont renouvelables (70 % pour les eaux de surface et 10% pour les eaux souterraines) et sont localisées dans la frange nord du pays. Les ressources non renouvelables concernent les nappes du Sahara septentrional (DROUICHE, et al., 2012).

Les ressources en eau superficielles décroissent du Nord au Sud, au fur et à mesure que croissent les ressources en eau souterraines. La répartition des ressources en eau en Algérie se présente comme suit (DROUICHE, et al., 2012) :

12,4 milliards de m^3 d'eau superficielle

2 milliards d'eau souterraine dans la région Nord,

6.92 milliards de m^3 d'eau (superficielles et souterraines) dans la région du Sahara septentrional.

1.8.2.2 Mobilisation des ressources en eau

Les barrages

Alors qu'en 1962, il n'existait que treize barrages permettant de stocker 450 millions de m^3 d'eau destinée essentiellement à l'irrigation des plaines agricoles de l'Ouest du pays, on en dénombre actuellement 72 pour une capacité globale de 7,4 milliards de m^3 d'eau.

Les retenues collinaires

En 1979, il y avait 44 barrages collinaires totalisant une capacité de 21 hm^3/an. Considéré comme la petite hydraulique, ce type d'ouvrage ne retient l'attention qu'à partir de 1985 durant le plan quinquennal 1985-1989 (ANBT, 2008). L'inventaire effectué en 2001 totalise 919 retenues collinaires avec une capacité d'emmagasinement globale de 142 hm^3. La gestion et l'exploitation des retenues relève que 80% de ces ouvrages sont opérationnels et que les eaux mobilisées sont utilisés à :

75 % pour l'agriculture (maraîchage, arboriculture et céréaliculture).
4 % pour l'élevage
1 % pour l'alimentation en eau potable

Les eaux souterraines

Dans le Nord du pays, les eaux souterraines sont estimées à 2 milliard de m^3. Ces ressources qui sont plus faciles à mobiliser, sont aujourd'hui exploitées à plus de 90%; beaucoup de nappes sont même dans un état de surexploitation critique (nappe de Mitidja). Les régions situées au Nord de l'Atlas saharien ont des potentialités en eau souterraine correspondent à un volume annuel renouvelable avoisinant 1,5 milliard de m^3, localisées dans 126 nappes dont 31

ont fait l'objet d'études hydrogéologiques complètes avec pour certaines nappes, une étude avec modèle numérique (C.N.E.S, 2002; KADI, 1997).

1.8.2.3 Utilisation des ressources en eau

L'alimentation en eau potable, l'approvisionnement en eau industrielle et l'irrigation sont les principales utilisations de l'eau en Algérie. En 2002 la distribution globale d'eau aurait atteint 3,3 milliards de m^3, répartis comme suit (BOUDJAJA et MESSAHEL, 2003):

- ✓ Usage domestique : 1300 millions de m^3
- ✓ Usage agricole : 1800 millions de m^3
- ✓ Usage industriel : 200 millions de m^3

L'Eau domestique

Les volumes distribués à la consommation humaine (eau domestique) sont de l'ordre de 1,3 milliards m^3 provenant de 30 % des barrages et 70 % des nappes souterraines. En considérons ces volumes, la dotation domestiques par personne n'est qu'a 53 m^3/an soit 145 l/j (C.N.E.S, 2002). D'après l'Algérienne des eaux, le réseau d'AEP totalise un linéaire de 60 000 km dont 20 000 km en adduction. Cette agence de l'eau exploite 1 300 forages d'une capacité de 442 million m^3/an, 472 stations de pompage et 33 stations de traitement. L'ADE produit 407 millions de m^3 dont 347 millions m^3 (47 %) sont distribués et seulement 195 millions m^3sont facturés.

Irrigation

Les grands périmètres d'irrigation

Les ressources utilisées pour l'irrigation des grands périmètres d'irrigation, n'ont jamais permis d'irriguer plus de 60000 ha (compagne 1980-1981). L'irrigation a été en moyenne de 40000 ha/an depuis une vingtaine d'année. Durant toute la période 1987-2002, les volumes d'eau affectés à l'irrigation n'ont jamais couvert en totalité la demande en eau. Dans les années 2000, seulement 40 % des besoins en eau agricole étaient satisfaits : le volume disponible en eau était inférieur à 200 millions de m^3 pour des besoins avoisinants les 500 millions de m^3 à raison de 5 000 m3/ha (C.N.E.S, 2002; MORGAN et ALEXIS, 2013).

La petite et moyenne hydraulique

Elle est constituée par : Des périmètres d'irrigation généralement desservis à partir de petits barrages et retenues collinaires, et de champs de captage. Les superficies unitaires sont généralement supérieures à 10 ha. L'irrigation de type individuel ou familial à partir de puits, sources, pompages dans les oueds, épandage de crues. Les superficies des parcelles sont inférieures à 10 ha. Les ressources mobilisées par les puits et forages irriguent cependant 75 à 80 % de la superficie totale irriguée en petite et moyenne hydraulique.

Tableau 5 : La ressource en eau dans les cinq régions hydrographiques

Régions hydrographiques	Eaux superficielles	Eaux Souterraines	Total de la ressource
Oranie - Chott Chergui	1 milliard de m^3	0,6 milliard de m^3	1,6 milliard de m^3
Cheliff - Zahrez	1,5 milliard de m^3	0,33 milliard de m^3	1,83 milliard de m^3
Algérois - Hodna -Soummam	3,4 milliard de m^3	0,74 milliard de m^3	4,14 milliard de m^3
Constantinois - Seybouse - Mellegue	3,7 milliard de m^3	0,43 milliard de m^3	4,43 milliard de m^3
Sahara	0,2 milliard de m^3	5 milliard de m^3	(il s'agit de la nappe albienne)

(BOUCHEDJA, 2012)

1.8.3. Potentialité en eau du Bassin des Zahrez:

Les eaux souterraines dans les régions steppiques assurent la totalité des besoins agricoles, agropastoraux et industriels et le développement de ces zones ne peut être accompli sans cette ressource. Nous essaierons de présenter le potentiel des ressources en eau et son utilisation dans le Bassin des Zahrez.

Ressources en eau souterraine

Les potentialités en ressources en eaux souterraine dans le bassin du Zahrez sont estimées à 114,87 hm^3/an. Elles sont concentrées selon la lithologie de la zone d'étude, dans les formations géologiques citées dans le tableau suivant (BOUCHEDJA, 2012; MORGAN et ALEXIS, 2013) :

Tableau 6 : Potentialités en eaux souterraines

Unité hydrogéologique	Potentialites Hm^3/an (ANRH)	Exploitation Hm^3/an (DHW)
Plaine de Zahrez	46,47	6,35
Djebel Djahfa	2,81	0
Pliocene du Nador	41,54	1,68
Synclinal de Djelfa	24,05	17,38
Total	114,87	25,41

(A.N.R.H, 2004)

Ressources en eau superficielle

L'apport annuel moyen dans les dépressions du bassin Zahrez est extrêmement difficile à estimer car il n'existe aucune station hydrométrique pour laquelle on dispose de données. L'apport moyen annuel du bassin Zahrez est estimé à environ 20 hm^3 selon les sources ANRH.

Tableau 7 : Ressources en eau superficielles

Sous bassin	Superficie du sous bassin (Km^2)	Code station	Dénomination	Pluies moyennes annuelles (1968-2001) (mm)	Apports Interannuels	
					Station (Hm^3)	Sous Bassin (Hm^3)
1701	1330	-	-	175,4	-	-
1702	2223	170201 170214	Rocher de sel Rocher de sel DF	194,0		
1703	1936	-	-	221,7	-	-
1704	437,6	-	-	215,2	-	-
1705	1434	-	-	235,8	-	-
1706	1628	-	-	250,3	-	-
Total	8989			215,4	-	-

(-) non observées

(A.N.R.H, 2004)

Ressources en eau non conventionnelles

Aucune ressource eau non conventionnelle n'est actuellement produite dans la région du Zahrez, qui ne dispose pas encore de stations d'épuration en exploitation. Cependant deux (02) projets de stations sont en étude : L'un est la réhabilitation de la station de Djelfa et l'autre une nouvelle station à Hassi Bahbah.

1.8.4. Mobilisation des Ressources en Eaux

1.8.4.1 Mobilisation des Ressources en Eaux Superficielles

Barrages

Dans le bassin du Zahrez, il n'existe aucun barrage

Retenues collinaires

Les retenues collinaires ont, certes, un impact très réduit mais elles présentent l'avantage de demander des investissements et d'être maitrisable à l'échelle d'un petit bassin ou d'une commune. Dans le bassin du Zahrez, il y a une seule retenue collinaire en exploitation, qui appartient à la commune de Charef (wilaya de Djelfa), présentée comme suit :

Tableau 8 : États des retenues collinaires

Sous bassin	Wilaya	Commune	Dénomination	Capacité (10^3 m^3)	Taux d'envasement (%)	Affectation
1701	Djelfa	Charef	El Hadjia	1870	40	Irrigation

(SIDI MOUSSA, 1996)

I.8.4.2 Mobilisation des Ressources en Eaux Souterraines

Sur la base de l'inventaire de l'ANRH et des recensements effectués par les services agricoles et les directions de l'hydraulique de wilayas, et après recoupement des données.

Cette zone compte 375 forages. Nous pressentons ci-après, l'état des 86 forages publics (en service) recensés par les directions de l'hydraulique de wilayas :

Tableau 9 : Mobilisation des ressources en eau souterraines par les forages.

Sous bassin	Commune	Nom du forage	X (m)	Y (m)	Prof. (m)	Debit exp. (l/s)	Mise en service	Nappe sollicité	Affectation
	El Gueddid	Gueddid F1	491750	148100	200	14	1984	Turonien	AEP
		Gueddid F4	487400	157000	200	49	1994	Turonien	AEP
		Oum Cheggag F1	473200	156950	130	49,7	1985	Albien	IRR
		Oum Cheggag F2	471900	157600	200	30,8	1988	Albien	IRR
		Oum Cheggag F3	474100	157800	200	1,75	1992	Albien	IRR
		Oum Cheggag IRR1	472550	157250	200	28	1994	Albien	IRR
		Oum Cheggag IRR2	471550	157400	200	26,6	1995	Albien	IRR
		Belaagueigue HCDS	473500	147100	200	31,5	1989	Quaternaire	IRR
		Dayet El Raadjalla	488300	157050	250	4,9	1987	Turonien	IRR
	Sidi Baizid	Sidi Baizid F1	567250	194700	171	2	1983	Quaternaire	AEP
		Sidi Bizid F2	568900	194600	250	20	1990	Quaternaire	AEP
		Sed Oum Droua F1	554850	181200	180	20	1987	Quaternaire	AEP

		Hammam Charef F2	514200	151200	200	33	1992	Turonien	IRR
		Charef F3	510150	146450	170	34	1993	Turonien	AEP
		Charef F2	509450	146550	150	44	1991	Turonien	AEP
		Hammam Charef F1	514200	151900	200	28	1984	Turonien	AEP
	Charef	Charef F1	507800	149100	250	18,9	1981	Turonien	IRR
		Benyagoub F2	508800	127150	338	1,4	1985	Quaternaire	AEP
	Benyagoub	Benyagoub F3	510500	132000	200	4,2	1988	Quaternaire	AEP
		Djelfa F1	548400	156500	200	26,6	1980	Albien	AEP
		Djelfa F10	564550	162700	230	7	1991	Turonien	AEP
		Djelfa F11	564100	162100	200	24,5	1992	Turonien	AEP
		Djelfa F12	563500	161600	200	24,5	1992	Turonien	AEP
		Djelfa F13	552500	156000	250	25,2	1984	Turonien	AEP
		Djelfa F2	547350	156500	170	8,4	1980	Albien	AEP
1702		Djelfa F3	547800	156900	265	10,5	1980	Albien	AEP
		Djelfa F4bis	549706	157600	245	26,6	1993	Albien	AEP
	Djelfa	Djelfa F5	551100	157750	250	15,4	1980	Albien	AEP
		Djelfa F5bis	552050	158050	240	15,4	1994	Albien	AEP
		Djelfa F6	552250	156350	160	21	1989	Barrémien	AEP
		Djelfa F7	548600	159400	200	5,6	1989	Barrémien	AEP
		Djelfa F8	548500	153800	200	2,8	1990	Barrémien	AEP
		Djelfa F9	548900	154200	200	17,5	1990	Barrémien	AEP
		Djelfa ZI1	547000	155000	200	7	1995	Turonien	AEP
		Djelfa ZI2bis	549155	154450	300	21	1990	Turonien	AEP
		Djelfa ZI4bis	546800	153100	250	9,8	1990	Turonien	AEP
		Djelfa Turonien	551450	155725	270	31,5	1970	Turonien	AEP
		Djelfa ZI3bis	547320	153450	250	10,5	1990	Turonien	AEP

		Boucif F1	483950	122100	200	17,5	1987	Quaternaire	IRR
		El Idrissia 350	484510	127000	152	13,3	1981	Albien	AEP
		El Idrissia F1	485375	129030	134	5,95	1982	Albien	AEP
		El Idrissia F3	487000	130420	250	30,8	1985	Albien	AEP
		El Idrissia IRR1	483950	127850	210	7	1994	Albien	AEP
		El Idrissia ZC1 bis	482427	127427	250	7	1992	Albien	IRR
		El Idrissia ZC10	487865	126891	250	6,3	1988	Albien	IRR
		El Idrissia ZC2 bis	483103	127192	250	14	1992	Albien	IRR
		El Idrissia ZC3 bis	483217	126550	230	7,7	1993	Albien	IRR
1702		El Idrissia ZC4 bis	483689	126358	250	10,5	1993	Albien	IRR
	El Idrissia	El Idrissia ZC5	484141	126171	250	25,2	1988	Albien	IRR
		El Idrissia ZC6	484799	125913	250	22,4	1988	Albien	IRR
		El Idrissia ZC7	484750	126381	250	21	1988	Albien	IRR
		El Idrissia ZC8	486793	126495	250	12,6	1988	Albien	IRR
		El Idrissia ZC9	487344	126592	250	15,4	1988	Albien	IRR
		Ain Djellala F1	541800	161600	120	1,5	1993	Quaternaire	AEP
		Ain Maabed F1	539600	168100	200	10	1983	Albien	AEP
1703	Ain Maabed	Ain Maabed F2	540300	168350	210	20	1993	Albien	AEP
		Hassi Mora F1	504650	190450	200	6	1990	Quaternaire	AEP

		El Mesran F2	532500	188700	1400	7	1985	Albien	AEP
		Hassi Bahbah F65	529960	198280	394,5	18	1971	Turonien	AEP
		Hassi Bahbah HB1	529800	201200	200	19	1983	Turonien	IRR
1703	Hassi Bahbah	Hassi Bahbah HB3 bis	529900	201416	230	22	1996	Turonien	AEP
		Hassi Bahbah HB4	529800	200650	200	22	1992	Turonien	AEP
		Hassi Bahbah HB2	531700	196250	400	25	1983	Turonien	AEP
1703	Hassi El Euch	Hassi El Euch F2	549550	212100	250	10	1984	Quaternaire	AEP
		Maalba F1	563850	152200	150	15,4	1987	Albien	AEP
1704	Djelfa	Maalba F3	564000	153800	150	12,6	1988	Albien	AEP
		Maalba F5	566425	156600	303	15,4	1976	Albien	AEP
1705	Dar Chiouk	Dar Chiouk F1	568550	174120	183,5	15,4	1975	Quaternaire	AEP
1705	Dar Chiouk	Dar Chiouk F2	566650	172500	201	3,5	1982	Quaternaire	AEP
1705	Dar Chiouk	Dar Chiouk F3	569450	175250	200	6,3	1990	Quaternaire	AEP
1705	Medjedel	201/284	595500	193300	180	20	1993		AEP
		202/284	581200	178450	150	9	2001		IRR
		202/314	587500	178700	100	10	1992		AEP
		203/284	584500	184200	150	7	2001		IRR
		219/253	574300	203800	190	10	2002		IRR
		201/253	591400	206500	200	4	1987		AEP
		203/253	593850	208400	95	30	1993		AEP
		Bassatine	205800	590000	160	8	2003		IRR

	Manaa	El gara	599100	194900	300	5	2003	AEP
1706		Maadher 1	589500	209700	110	12	2001	IRR
		Maadher 2	589500	208200	110	15	2001	IRR
		Oued guerffel	601000	210000	120	10	-	AEP
		200/253	598000	207000	70	14	1980	AEP
	Medjedel	202/253	594650	209300	110	40	1987	AEP
		220/253	588400	206600	130	8	illisible	AEP

1.8.5. Exploitation des ressources en eau souterraines

Les ressources en eau souterraines dans le bassin du Zahrez sont exploitées à travers 1361 points d'eau (forages, sources et puits) pour assurer les besoins des trois usages (AEP, Industrie et Irrigation). Ces points d'eau fournissent annuellement un volume de 40,49 hm^3, dont 80% proviennent des forages comme le montrent le tableau et le graphe suivants :

Tableau 10 : Volume prélevé par type d'ouvrage en 2005

Ouvrages de mobilisation	Nombre	Volume prélevé (hm^3/an)
Forages	375	32,60
Sources	27	1,56
Puits	959	6,33
Total	1361	40,49

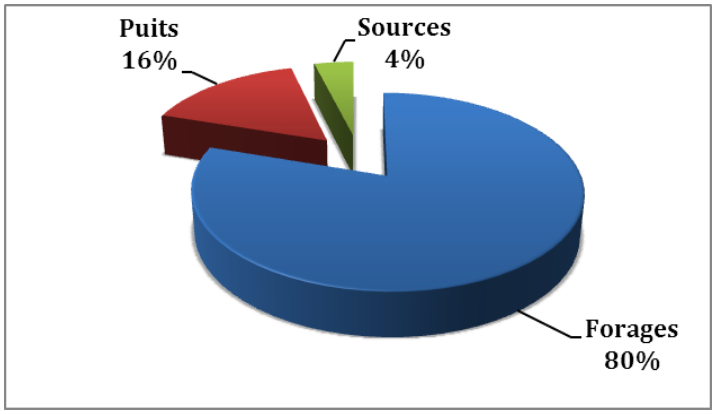


Figure 6 : Volume prélevé par type d'ouvrage

1.8.6. Utilisation des ressources en eaux souterraines

Le volume prélevé est estimé à 40,49 hm^3 /an, dans le bassin du Zahrez. On constate que l'usage agricole est le plus important avec une valeur de plus de 54% du total des usages, suivi par l'usage domestique avec 45%, comme le montrent le tableau et le graphe suivants (ANRH, 2004) :

Tableau 11 : Volume prélevé par type d'usage

Usage	Volume prélevé (hm^3/an)
Domestique	18,32
Agricole	22,15
Industriel	0,02
Total	40,49

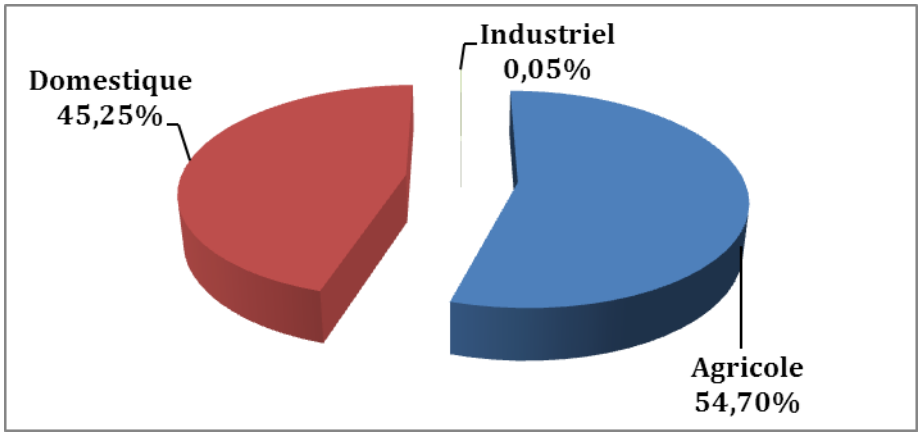


Figure 7 : Volume prélevé par type d'usage

1.8.6. 1 Alimentation en Eau Potable

Agglomérations dont la population est comprise entre 1000 et 50000 habitants

Le bassin de Zahrez comporte (14) agglomérations en 2005 dont la population est comprise entre mille(1000) et cinquante mille (50000) habitants, soit une population de 146975 habitants. Parmi ces (14) agglomérations, deux (02) agglomérations ne sont pas de réseau d'alimentation en eau potable.

Agglomérations dont la population est supérieure à 50000 habitants

Le bassin du Zahrez compte deux (02) agglomérations de plus de cinquante mille (50000) habitants en 2005 : Djelfa et Hassi Bahbah, avec une population totale de 292691 habitants. Ces deux agglomérations sont dotées d'un réseau de distribution de 299055 ml et d'un potentiel de stockage de 34100 m^3, comme l'indique le Tableau 13:

Tableau 12 : État de l'alimentation en eau potable des agglomérations supérieures à 1000 habitants et inferieures à 50000 habitants.

Sous bassin	Agglomérations	wilaya	Population (Habitants)		Volume Distribué (m3/j)	Réservoirs Capacité (m3)		Réseau de distribution Long (m.l)
			RGPH 1998	Estimé 2005		Nombre	Capacité (m^3)	
1701	**Charef**		14436	19436	3920	4	2250	12250
	El Guedid	**Djelfa**	6252	8417	2520	4	1300	10607
	El idrissia		16923	22784	5788	3	1900	31520
1702	**Ain Maabed**		10930	14716	1000	2	1000	43870
	Ben yacoub	**Djelfa**	1985	2672	288	2	700	5651
	Touazi		1293	1741	2952	1	500	5957
	El Ouguilat		2237	3012	Approvisionner avec le chef-lieu de commune			
	Ouled Obeddeillah		2270	3056				
	Zaafrane		6205	8354	750	2	750	4674
1705	**Dar Chioukh**	**Djelfa**	22197	29885	1470	3	1150	29254
	Medjedel	**Msila**	12458	14890	-	3	1200	22000
	Menaa (Ouled Attia)		6004	7176	-	2	750	8000
1706	**Hassi El Euch**	**Djelfa**	6389	8602	100	2	1000	10413
	Sidi Bayzid		1659	2234	626	1	150	9673
Total			111238	146975	19414	29	12650	193869

Tableau 13 : État de l'alimentation en eau potable des agglomérations de plus de 50000 habitants en 2005

Sous bassin	Agglomérations	wilaya	Population (Habitants)		Besoins (m^3/j)	Volume Distribué (m3/j)	Réservoirs Capacité (m3)		Réseau de distribution Long (m.l)
			RGPH 1998	Estimé 2005			Nombre	Capacité (m3)	
1702	**Djelfa**	**Djelfa**	158679	213636	62301	22000	18	28600	216470
1703	**Hassi Bahbah**		58718	79055	23041	5502	6	5500	82585
	Total		217397	292691	85342	27502	24	34100	299055

1.8.6.2 Irrigation

Petite et moyenne hydraulique (PMH)

Dans le bassin du Zahrez, l'inventaire des superficies irriguées par type d'ouvrage réalisé d'après les données collectées auprès des services agricoles des wilayas, a donné les résultats suivants (A.N.A.T, 2003).

Tableau 14 : Petite et moyenne hydraulique par type d'ouvrage de mobilisation

Ouvrage de mobilisation	Nombre	Volume mobilisé (hm^3)	Superficies irriguées (ha)
Forages	274	8,85	1767
Puits	959	6,33	1265
Prises au fil de l'eau	36	0,45	90
Sources	27	1,56	312
Epandage de crues	3	1,62	323
Total	1299	18,81	3757

(D.S.A, 2006)

La Figure 8 montre l'importance de la superficie irriguée à partir des forages qui représente 47% de la superficie totale irriguée en PMH et du volume total mobilisé pour l'an 2005.

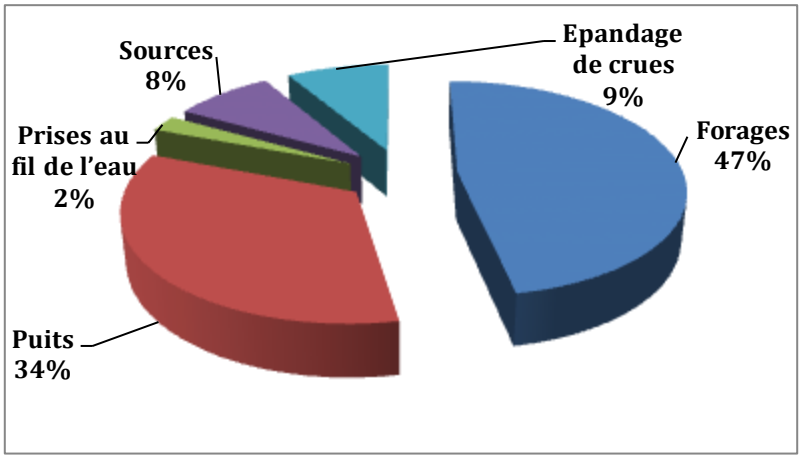


Figure 8 : Superficies irriguées par type d'ouvrage de mobilisation en %

1.8.6.3 Approvisionnement en Eau industrielle

L'approvisionnement en Eau Industriel

L'approvisionnement en eau industriel de la Zone d'étude (Tableau 15) est assure par trois (03) forages et par les citernes qui fournissent ensemble et annuellement un volume de 280845 m^3 à l'industrie. Aucune unité industrielle ne recycle qu'elle rejette.

Volume total prélevé à partir des installations propres aux unités industrielles : 92 m^3/j

Volume total prélevé à partir des réseaux de distribution (AEP) : Néant

Volume total utilisé : 1170,19 m^3/j, soit 280845 m^3/an

Volume recyclé : Néant

Tableau 15 : Approvisionnement en eau industrielle en 2005

Sous Bassin	Commune	Wilaya	Nom de L'unité	Activités industrielles	Branche d'activité	Volume utilisé (m^3/an)
			MOULINS BOUAAMARA	Semoulerie et minoterie	Minoterie	1750
			SABRID	Briqueterie	Matériaux de construction	21100
			MOULINS DE Djelfa	Semoulerie et minoterie	Minoterie	255500
1702	**Djelfa**	**Djelfa**	ONAB Djelfa	Production des aliments de bétail	Alimentation de bétail	450
			ENIPEC	Traitement de cuir	Manufacturière	965
	Hassi		SARL CHP	Production de	Matériaux de	680
1703	**Bahbah**	**Djelfa**		céramique	construction	
			MESSINA	Menuiserie	Manufacturière	400

La Figure 9 présente l'importance du volume utilisé par branche d'activité

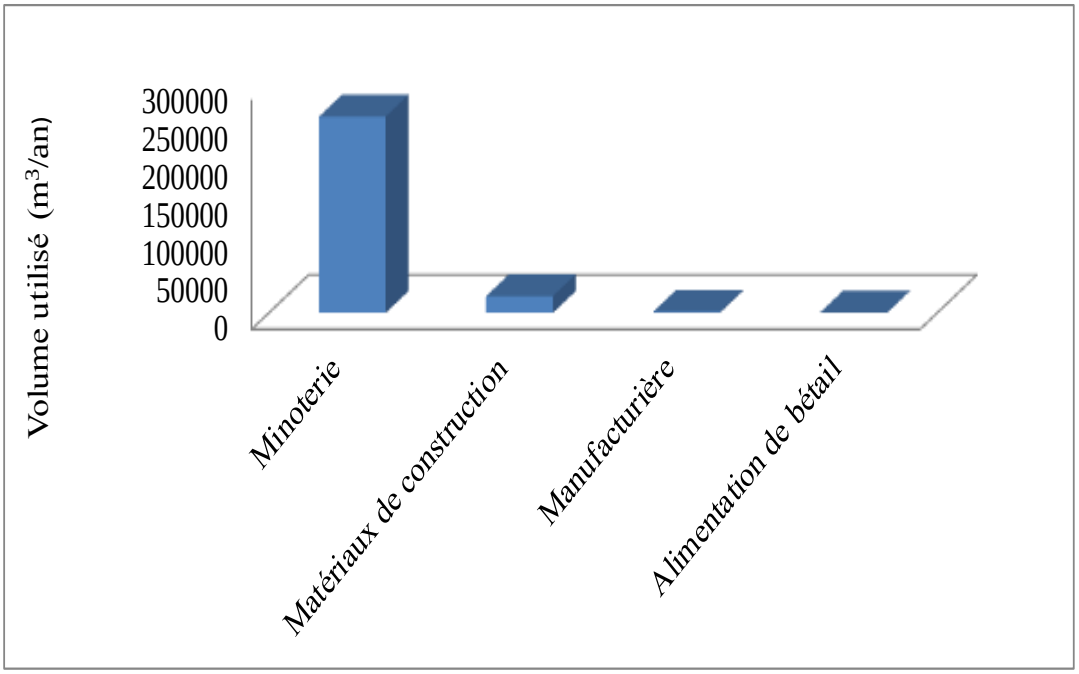


Figure 9 : Volumes utilisés par branche d'activité

1.9 Conclusion

Les potentialités en ressources en eaux souterraine dans le bassin du Zahrez sont estimées à 114,87 hm^3/an. Le volume prélevé est estimé à 40.49 hm^3/an. Il est a signalé que l'usage agricole est le plus important avec une valeur de plus de 54% du total des usages, suivi par l'usage domestique avec 45%.

Les problèmes de la pénurie d'eau se posent de façon plus aiguë dans la Zone d'étude où domine l'activité pastorale, associée à la pratique d'une céréaliculture (orge et blé) et d'une agriculture maraîchère et arboricole de plus en plus intensive et dont l'eau d'irrigation provient essentiellement des nappes souterraines. Comme solution, l'utilisation de ressources non conventionnelles telles l'utilisation des eaux usées traitées est la solution proposée pour réajuster l'équilibre entre l'offre et la demande.

Chapitre 02 :

Hydroclimatologie

2.1 Introduction

La bonne gestion des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant nécessite une connaissance la plus précise possible des différents termes du bilan hydrologique. L'évaluation de ces différents termes du bilan hydrologique est basée sur le modèle classique de Thornthwaite (THORNTHWAITE et MATHER, 1957) L'objectif visé dans ce chapitre est l'établissement du bilan hydrologique et l'estimation de l'infiltration. Et ce à partir de paramètres mesurés tels que la température, les précipitations et des paramètres calculés par différentes formules empiriques, tels que l'évapotranspiration potentielle, l'évapotranspiration réelle et le ruissellement.

2.2 Collecte des données

La station météorologique de Djelfa se trouve à une latitude Nord de 34° 41' et une longitude Ouest de 4° 14' et une altitude de 1180,50 m. Les données qui y sont recueillies couvrent les années hydrologiques 1974/1975 à 2006/2007.

2.3 Contexte climatique de la zone d'étude

Dans le cadre de cette étude il apparaît fondamental de bien définir les paramètres climatiques. En effet, Le climat est important pour la recharge des nappes aquifères. Il conditionne également de manière très forte la teneur en isotopes lourds du signal pluie d'entrée d'où la nécessité de préciser les caractéristiques essentielles du climat.

2.3.1 Aperçu du cadre climatique de la zone d'étude

Le bassin versant des Zahrez, de par sa localisation, entre deux régions climatiques très différentes : le Nord du pays caractérisé par un climat humide et le Sud dont le climat est aride. Le bassin des Zahrez est ainsi situé dans une classe climatique intermédiaire : le semi-aride, avec une saison estivale sèche et chaude alternant avec une saison hivernale pluvieuse, fraîche sinon froide (TELIBI, 2004). II s'agit cependant d'une forme particulière de ce climat :

- les précipitations, plus faibles, présentent une grande variabilité inter mensuelle et interannuelle.
- les régimes thermiques, relativement homogènes sont très contrastés de type continental.

2.3.1.1 Températures

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

Les données issues de la station météorologique de Djelfa (1974-2007) montre que Les températures marquent un contraste important entre l'hiver et l'été : les hivers sont frais (4.6 °C) et les été chauds (26,6 °C) (Figure 10a). La température moyenne annuelle déterminée à la station de Djelfa est de 14.7 °C, les valeurs de l'écart type et le coefficient de variation sont respectivement 7,91 et 0,54.

Il est à noter que l'amplitude thermique dans la zone d'étude est d'environ 22 °C.

La saison chaude s'étend de Mai à Octobre, alors que la saison froide correspond à Novembre –Avril.

2.3.1.2 Humidité relative

L'humidité relative moyenne mensuelle mesurée à la station de Djelfa durant la même période oscille entre un minimum d'environ 36,78 % en saison sèche (Juillet) et un maximum pouvant atteindre (75,65 %) en saison froide (Janvier) (Figure 10b).

2.3.1.3 La durée d'insolation

Les valeurs mensuelles interannuelles de l'ensoleillement durant la période (1974-2007) sont représentées sur la Figure 10c. On constate que les fortes valeurs d'insolation sont observées pendant la saison sèche avec un maximum de (321,70 heures) au mois de juillet, tandis que durant la saison pluvieuse, l'insolation atteint un minimum de 168,87 heures en décembre.

2.3.1.4 Vitesses et directions des vents

Dans la région d'étude, les directions prédominantes des vents sont celles du Nord-Ouest et des vents secs et chauds soufflant du sud et ramenant des pluies orageuses et plus fréquentes pendant le mois de juillet (TELIBI, 2004).

Les observations faites sur la période 1974-2007 (Figure 10d) montrent que la valeur maximale de la vitesse du vent ne dépasse pas (4,79 m/s), tandis que la vitesse minimale (3,37 m/s) est observée pendant le mois d'Avril

2.3.1.5 Évaporation

L'évaporation dépend essentiellement de la température, mais aussi du vent et de l'humidité atmosphériques par des relations plus complexes (BOUCHET, 1963).

Les mesures disponible sont obtenues grâce à l'évaporomètre Piche montrent que les variations de l'évaporation sont assez marquées, avec deux minimums durant la période hivernale, des valeurs moyennes mensuelles interannuelles comprises entre (45,70 mm) observée au mois de janvier et (49,30 mm) au mois de décembre (Figure 10e).

2.4 Indices climatiques et classification de bioclimat

2.4.1 Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique est établi selon la méthode de Gaussen et Bagnouls et dont les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations (Figure 11). Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égale au double de la température (P≤ 2T). Le diagramme ombrothermique (1974-2007), permet de mettre en évidence une saison de sécheresse correspondant aux mois : Juin jusqu'à Octobre. En outre, une période humide de 7 mois, s'étale de mois de Novembre jusqu'à Mai.

2.4.2 Indice d'aridité annuelle de De Martonne

En se basant sur le régime des précipitations et températures Demartone (1923) a défini un indice d'aridité (I) (AGOUSSINE et al., 2004):

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

P : les précipitations moyennes annuelles en mm,

T : la température moyenne annuelle en °C.

Les types de climat se classent comme suit (AGOUSSINE et al., 2004):

20 < I < 30 : climat tempéré.

10< I < 20 : climat semi-aride.

7.5< I < 10 : climat steppique.

5 < I < 7,5 : climat désertique.

I < 5: climat hyperaride.

Pour la station de Djelfa, l'indice d'aridité est de I= 12,93 Ce qui correspond à un climat semi-aride.

2.4.3 Indice d'aridité mensuelle de De Martonne

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante (AGOUSSINE et al., 2004):

$$i = \frac{12.P}{T + 10}$$

Où

i : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

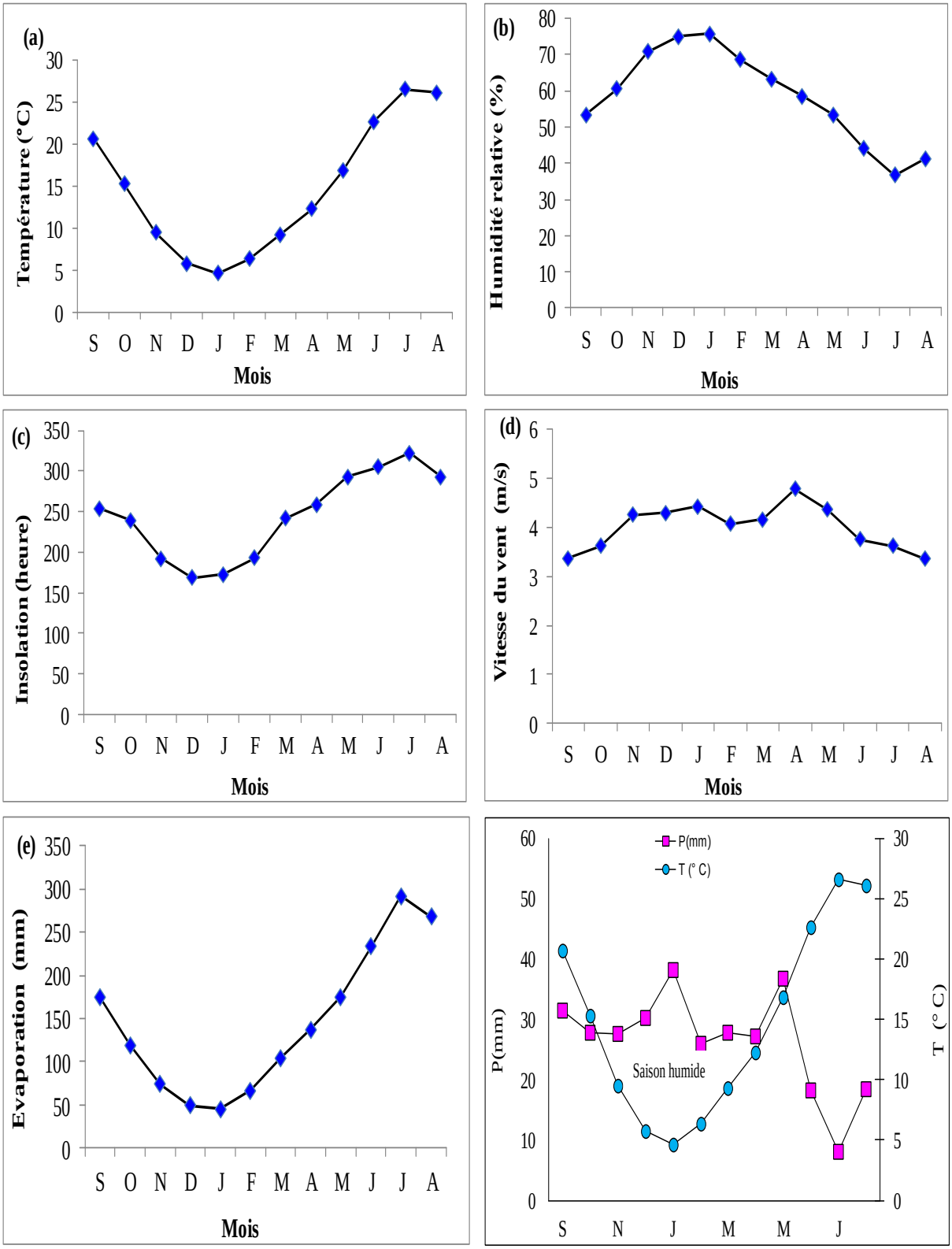


Figure 10 : Évolution des variables climatiques durant la période (1974-2007)

Figure 11 : Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls Station de Djelfa

L'application de la formule (2) a permis de dresser le Tableau 16

Tableau 16: Indices d'aridité mensuels (i) à la station de Djelfa.

Mois	i	Étage bioclimatique
Septembre	13,84	Semi-aride
Octobre	14,74	Semi-aride
Novembre	23,13	tempéré
Décembre	24,41	tempéré
Janvier	29,99	tempéré
Février	23,86	tempéré
Mars	21,10	tempéré
Avril	15,71	Semi-aride
Mai	18,43	Semi-aride
Juin	7,89	steppique
Juillet	3,30	hyperaride
Août	7,50	steppique

Selon la classification précédente par De Martonne, les mois de Septembre, Octobre, Avril et Mai présentent un climat semi-aride. Un régime tempéré règne sur la zone d'étude pendant les mois suivants : Novembre, Décembre, Janvier et Mars.

Les mois de Juin et Août connaisse un régime steppique, alors que le mois de juillet devient hyperaride.

2.4.4 Climagramme de Louis Emberger

La classification bioclimatique la plus utilisée en Afrique du Nord et en Algérie en particulier est celle d'Emberger. Qui est un abaque comportant en abscisses la température moyenne des minima de la saison froide et en ordonnée la valeur du Q_2, qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement des mois le plus froid et le plus chaud (DAGET, 1977).

$$Q_2 = 2000.\left[\frac{P}{(M^2 - m^2)}\right]$$

Où : P : La précipitation moyenne annuelle, en (mm).

M : La température maximum du mois le plus chaud, en degré kelvin (K°).

m : La température minimum du mois le plus froid, en degré kelvin (K°).

Avec : T (K°) = T (C°) + 273,15

A la station de Djelfa :

P = 315 mm

M= 307,05 °K

m = 272,85 °K

Ce qui donne :

$\mathbf{Q_2}$ = 31,77

Les valeurs de $\mathbf{Q_2}$ sont reportées sur un climagramme pluviothermique (Figure 12). Ce graphe montre que le climat à la station de Djelfa est de type : semi-aride, cela est concordant avec l'indice de De Martone.

2.5 L'évapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évapotranspiration maximale d'un couvert végétal quelconque, maximal signifiant que le couvert est bien alimenté en eau et en phase active de croissance et donc que l'eau n'est pas un facteur limitant de l'évapotranspiration (THORNTHWAITE, 1948; TURC, 1961). L'évapotranspiration réelle (ETR) est la combinaison de l'évaporation d'un sol nu ou d'une surface d'eau libre et de la transpiration végétale. L'évapotranspiration réelle résulte de facteurs liés à l'atmosphère (rayonnement solaire, humidité et température de l'air, vitesse du vent), de facteurs liés au sol (propriétés hydrodynamiques, humidité) et de facteurs liés à la végétation (types de végétaux, stade de développement...etc) (ALLEN et al., 1998).

2.5.1 Méthodes d'estimation de l'ETP

Les formules mises au point pour calculer l'ETP sont nombreuses. Elles sont divisées en deux catégories : les méthodes empiriques (basées sur le coefficient cultural, une estimation de l'évapotranspiration d'une culture de référence et le bilan hydrique du sol) et les méthodes analytiques (modèles basés sur le bilan énergétique). Depuis 1950, plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration potentielle, à savoir : Thornthwaite (1948), Blanney-Griddle (1950), Turc (1961), Hargreaves-Samani (1985) et Penman-Monteith-FAO (1998) (NGOM, 2002; HAMADI et CHIRAZ, 2003; ALLEN et al., 1998; XU, 2005). L'utilisation de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que, les températures maximale et minimale de l'air, les humidités relatives maximale et minimale, la radiation solaire globale et la vitesse du vent (NGOM, 2002).

2.5.1.1 Méthode de Thornthwaite (1948)

La formule de Thornthwaite est utilisée lorsqu'on ne dispose que de la température comme seule donnée climatique (THORNTHWAITE, 1948). Elle exprime l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^{a} \cdot f(\varphi)$$

T : température moyenne de l'air sous abri pour la période considérée ;

I : indice thermique annuel, est la somme de douze indices mensuels "i";

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

$f(\varphi)$: Terme correctif fonction de la durée théorique de l'insolation, la latitude et du mois.

a : fonction complexe de l'indice I.

$$\mathbf{a = 0{,}016I + 0{,}5}$$

2.5.1.2 Formule de Turc (1961)

Cette méthode fait intervenir la température moyenne mensuelle, la radiation globale du mois considéré et l'insolation relative ; l'ETP est exprimée en mm/mois par les formules suivantes (TURC, 1961) :

Si Hr > 50 %, on a :

$$ETP = 0.40 \cdot \frac{T}{T + 15} \cdot (Ig + 50) \text{ (mm/mois)}$$

Si Hr < 50 %, on a :

$$ETP = 0.40 \cdot \frac{T}{T + 15} \cdot (Ig + 50) \cdot \left(1 + \frac{50 - Hr}{70} \right) \text{ (mm/mois)}$$

$$Ig = Ig_A \left(0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H} \right) \text{ (cal/cm}^2\text{/jour)}$$

2.5.1.3 Formule de Blaney-Criddle (1950)

La méthode de Blaney –Griddle, fait intervenir la température moyenne mensuelle et le pourcentage d'éclairement du mois considéré ; l'ETP est exprimée en mm/mois par la formule suivante (HAMADI et CHIRAZ, 2003) :

$$ETP = K.P.(0.46.T + 8.13) \quad \text{(mm / mois)}$$

T : température moyenne mensuelle en c° ;

P : pourcentage d'éclairement mensuel, il est fonction de la latitude de la zone d'étude

K : coefficient fonction de la culture et de la zone climatique.

2.5.1.4 Formule de Penman-Monteith-FAO(1998)

$$ET = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{t+273} \cdot u_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Rn : radiation nette à la surface du sol $\left(MJm^{-2}j^{-1}\right)$; G : densité de flux de chaleur du sol $\left(MJm^{-2}j^{-1}\right)$; T : température moyenne journalière (°C) ; e_a : pression saturante de vapeur d'eau (KPa) ; e_d : pression actuelle de vapeur d'eau (KPa) ; Δ pente de la courbe de la pression de vapeur en fonction de la température moyenne de l'air $\left(KPa^0C^{-1}\right)$; γ constante psychométrique $\left(KPa^0C^{-1}\right)$, u_2 : vitesse du vent à 2 m de hauteur (m s^{-1}) (ALLEN et al., 1998; XU, 2005).

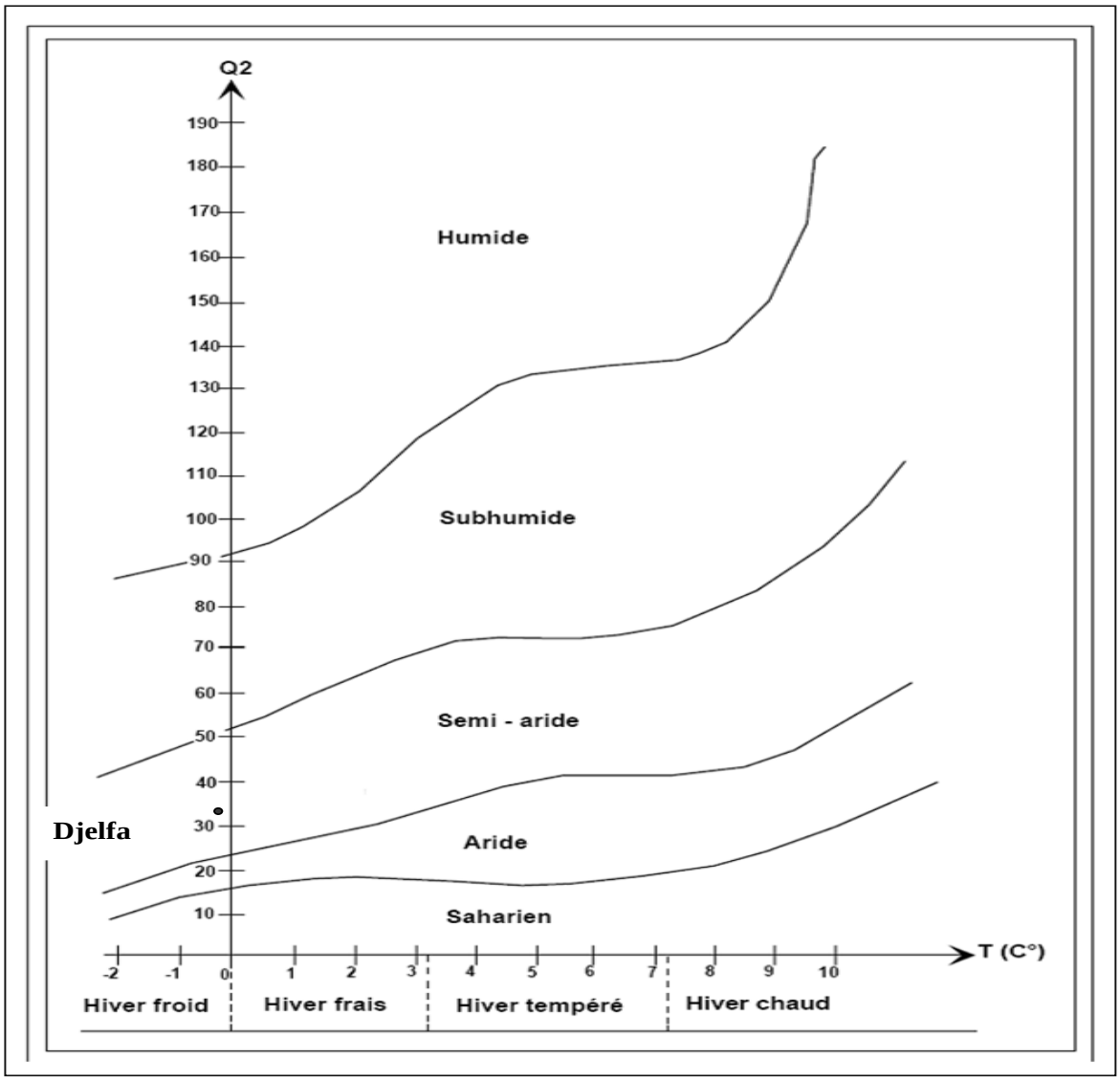


Figure 12 : Climagramme d'Emberger de la station de Djelfa

2.5.1.5 Méthode de Hargreaves- Samani (1985)

Cette formule fait intervenir la température et le rayonnement solaire extraterrestre, qui s'écrit :

$$ETP = 0.0023 * R_a * TD^{0.5} * (T + 17.8)$$

ETP: évapotranspiration potentielle (mm/j)

Ra : rayonnement solaire extraterrestre (cal/cm2 /j)

La valeur de Ra dépend uniquement de la latitude, les valeurs utilisées dans nos calculs, sont celles de la FAO (1998) (HAMADI et CHIRAZ H, 2003; HARGREAVES et SAMANI, 1985).

TD : différence entre la température maximale et la température minimale (c°)

T : température mensuelle moyenne (c°)

2.5.2 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle ont été comparés à l'ETP (Piche), en se basant sur les valeurs de l'écart relatif « ER ». Ainsi, des corrélations linéaires ont été établies entre les résultats des différents modèles par rapport à L' ETP (Piche).

2.5.2.1 Échelle mensuelle

Les résultats obtenus, par l'application des différentes formules d'estimation de l'ETP mensuelle moyenne sont illustrés par la Figure 13. Il en ressort que les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont comprises entre 8,87 mm/mois (Thornthwaite) et 218,44 mm/mois (Penman-Monteith). Par ailleurs, les valeurs de l'ETP obtenues par la formule de Penman-Monteith s'approchent de celles l'ETP (Hargreaves-Samani), avec un écart variant de 1,5 à 21,6 %. Signalons que durant la saison humide l'écart est important (12,1 à 21,6 %) (Tableau 17). D'autre part, les valeurs de l'ETP (Thornthwaite) sont nettement inférieures à celles de l'ETP (Turc,Blaney-Criddle, Penman-Monteith et Hargreaves-Samani) (Tableau 17), ce qui permet de constater que la formule de Thornthwaite sous-estime l'ETP, avec un écart pouvant atteindre un maximum d'environ (88,6%) (BOUTELDJAOUI et al., 2012).

2.5.2.2 Échelle annuelle

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP durant la période (1974-2007) sont représentés sur la Figure 14. L'analyse comparative des valeurs de l'ETP obtenues par les différents modèles, permet de mettre en évidence :

L'ETP calculées en utilisant la formule de Thornthwaite donne des valeurs plus faibles, avec un écart variant de 6,5 à 67,3 %. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'équation de Thornthwaite fait intervenir uniquement la température, mais elle ne tient pas compte des autres facteurs importants à savoir : la durée et l'intensité réelle de l'insolation et la du vent. Les valeurs d'évapotranspiration calculées selon la méthode de Blaney-criddle donnent les valeurs les plus élevées durant la période (1974-2007). L'ETP calculée selon Penman, qui décrit au mieux les conditions physiques de l'atmosphère, possède des valeurs très proches de celles de Hargreaves. La comparaison des ETP Penman et Hargreaves fait apparaître un écart variant de 0 à 24,3 %.

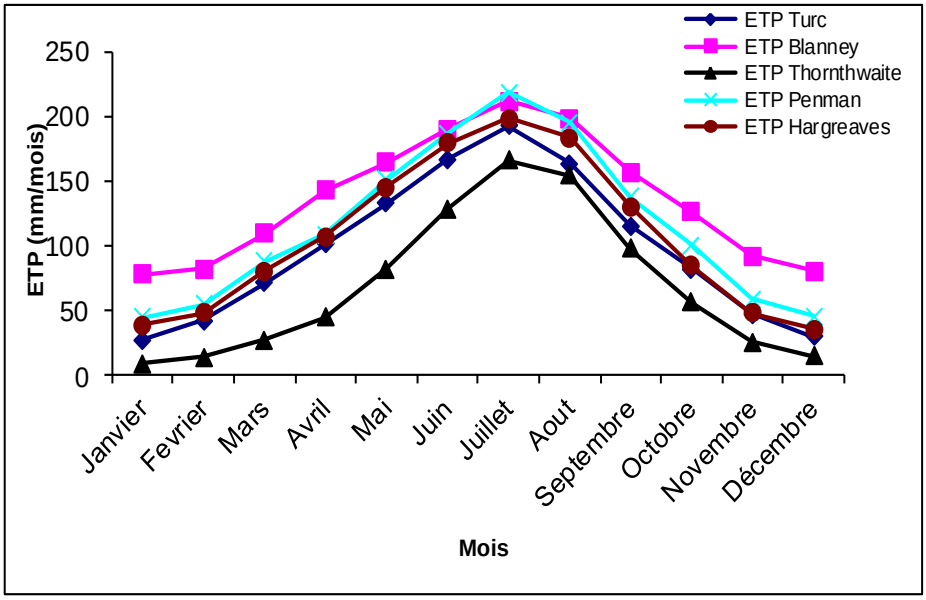


Figure 13 : Évolution mensuelle de l'ETP calculée par les différentes formules (1974-2007).

2.5.3. Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée

A partir des relations entre l'ETP (Piche) et celle estimée à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents modèles de calcul (coefficient de corrélation > 0,9) (Figure 15). Il est à noter que la meilleure corrélation est obtenu entre l'ETP (Piche) et (Thornthwaite), avec un coefficient de corrélation (R^2 =0,9908).

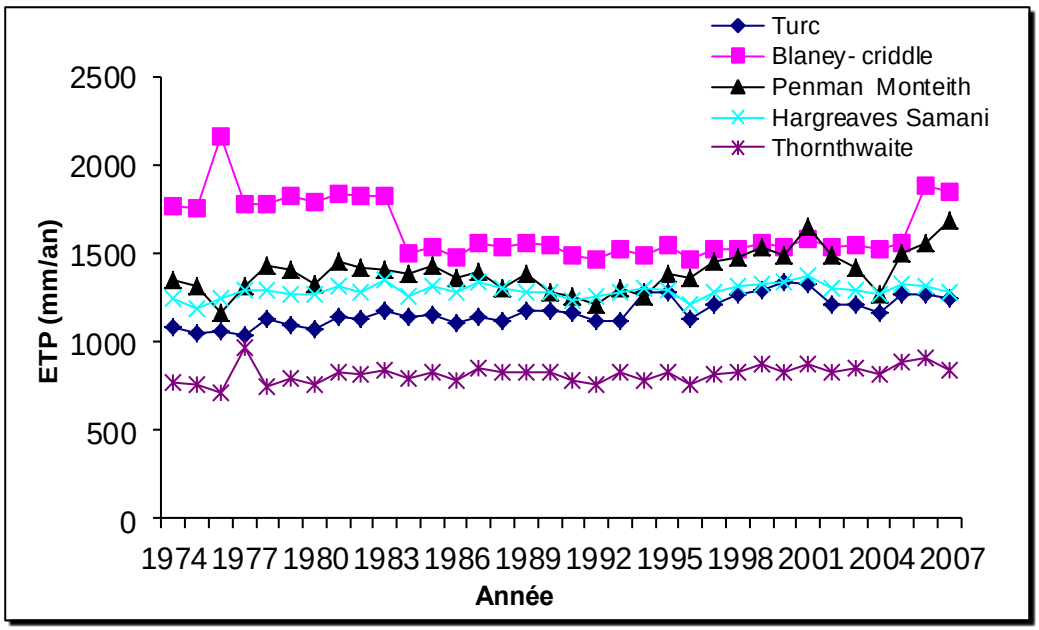


Figure 14 : Evolution annuelle de l'ETP calculée par les différentes formules (1974-2007).

Tableau 17: Ecart relatif des différentes méthodes d'estimation de l'ETP comparées à celle de l''ETP (Piche) (échelle mensuelle)

Mois	ETP Turc	ETP Blanney	ETP Thornthwaite	ETP Penman-Monteith	ETP Hargreaves-Samani
Janvier	29,35	-98,96	78,25	2,70	-4,55
Fevrier	22,76	-43,85	76,03	8,59	11,12
Mars	13,78	-24,54	67,21	-0,57	4,10
Avril	13,35	-5,25	61,10	0,94	8,22
Mai	16,18	3,22	48,89	3,08	10,25
Juin	26,36	22,93	44,49	15,93	24,02
Juillet	37,42	36,80	46,93	27,07	38,28
Aout	41,44	34,70	45,75	30,46	36,80
Septembre	37,84	21,96	49,23	27,34	31,73
Octobre	16,33	-18,11	44,45	5,67	17,26
Novembre	21,41	-42,12	61,23	15,95	23,24
Décembre	27.94	-85.12	71,82	7,44	13,52

2.5.4 Évapotranspiration réelle (ETR) et déficit d'écoulement :

2.5.4.1 Formule de Turc

La formule de Turc est valable pour tout type de climat. Elle est en fonction de la précipitation et de la température :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{p^2}{L^2}}}$$

Où : **ETR :** L'évapotranspiration réelle, en (mm).

P : La précipitation annuelle, en (mm).

L : Un paramètre calculé en fonction de la température selon la formule :

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T : La température moyenne annuelle en °C

2.5.4.2 Formule de Coutagne :

Cette formule fait intervenir la pluviométrie et la température comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2, \text{ avec : } \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

Cette formule n'est valable que pour des valeurs du P comprise entre : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$.

Où : P : La précipitation moyenne annuelle, en m. T : La température moyenne annuelle, en C°. Dans le cas ou $P< 1/(8.\lambda)$, le déficit d'écoulement est égal aux précipitations moyennes annuelles est le terme d'écoulement Q est nul.

2.5.5 Méthode du bilan de Thornthwaite

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU); cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU), qui est de l'ordre de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm (voir organigramme de calcul en Annexe 2) (THORNTHWITE et MATHER, 1957; BROCHET et GERBIERS, 1975). Dans la méthode de Thornthwaite, on admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement ou l'infiltration. C'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait écoulement, il faut avoir satisfait la relation ETP = ETR. Par ailleurs, la satisfaction de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

Si **P > ETP**, alors :

- **ETR = ETP** ; si il reste un excédent **(P–ETP)**, il est affecté à la **RFU** si nécessaire, et à l'écoulement (et/ou l'infiltration) quand la **RFU** est complète.

Si **(P<ETP)**, alors :

- la valeur de **(ETR=P+RFU)**, jusqu'à égalisation avec **ETP**. Si la **RFU=0**, il va se produire un déficit agricole (**Da= ETP-ETR)**, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

2.5.5.1 Les termes du bilan hydrologique

Le bilan de l'eau global a pour but principal d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves (GAUD, 1976). Ainsi, pour déterminer le bilan de la région d'étude il est indispensable d'évaluer ses composantes. Le schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite est basé sur le principe selon lequel la pluie tombée sur le bassin se répartit entre l'évapotranspiration réelle, le ruissellement et l'infiltration dont l'équation générale est :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S$$

Où :

P : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : L'évapotranspiration réelle en (mm).

R : Le ruissellement en (mm).

I : L'infiltration en (mm).

ΔS: Variations des réserves (mm)

2.5.5.2 Ruissellement superficiel

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

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \qquad \ldots$$

R : Ruissellement (m).

P : Précipitations moyennes mensuelles (m).

ETP : Évapotranspiration potentielle (m).

2.5.5.3 Analyse des résultats du bilan hydrologique de Thornthwaite

Partant de la connaissance des précipitations P, de l'ETP et d'une valeur standard facilement utilisable du Sol RFU (100 mm) (LALLAHEM, 2002). Les résultats de l'application de la

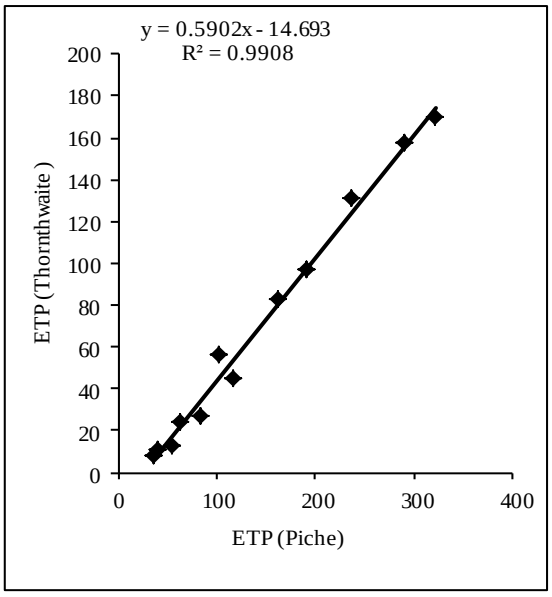
méthode du bilan hydrologique de Thornthwaite, afin de déterminer les différentes composantes du bilan sur une période de trente ans (1974-2007) sont illustrés sur la Figure 16. L'analyse de ces résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Ce graphe montre que les valeurs maximales de l'ETR ont été observées pendant les mois d'Avril, Mai et Juin, avec des valeurs respectivement : 44,60 mm, 68,40 mm et 81,70 mm. Par ailleurs, la période Juin – Octobre est caractérisée par un déficit agricole, variant de 25.93 mm à 156,25 mm, avec des valeurs maximales pouvant atteindre : 13,80 mm (Aout) et 156,25 mm (Juillet). Ce qui nécessite une irrigation pour les zones cultures.

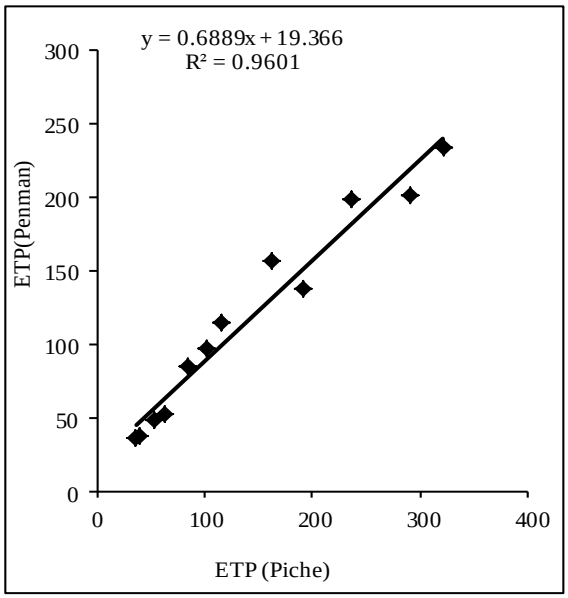
D'autre part, pendant les mois de Décembre, Janvier, Février et Mars on observe un excédent qui varie de 6,50 mm (Mars) et 28 mm (Janvier) (Tableau 18). Lorsque la recharge dépasse la RFU, ce surplus va partir pour réalimenter les nappes souterraines et les écoulements de surface.

Tableau 18 : Bilan hydrologique (1974-2007) à la station de Djelfa, d'après la méthode de Thornthwaite.

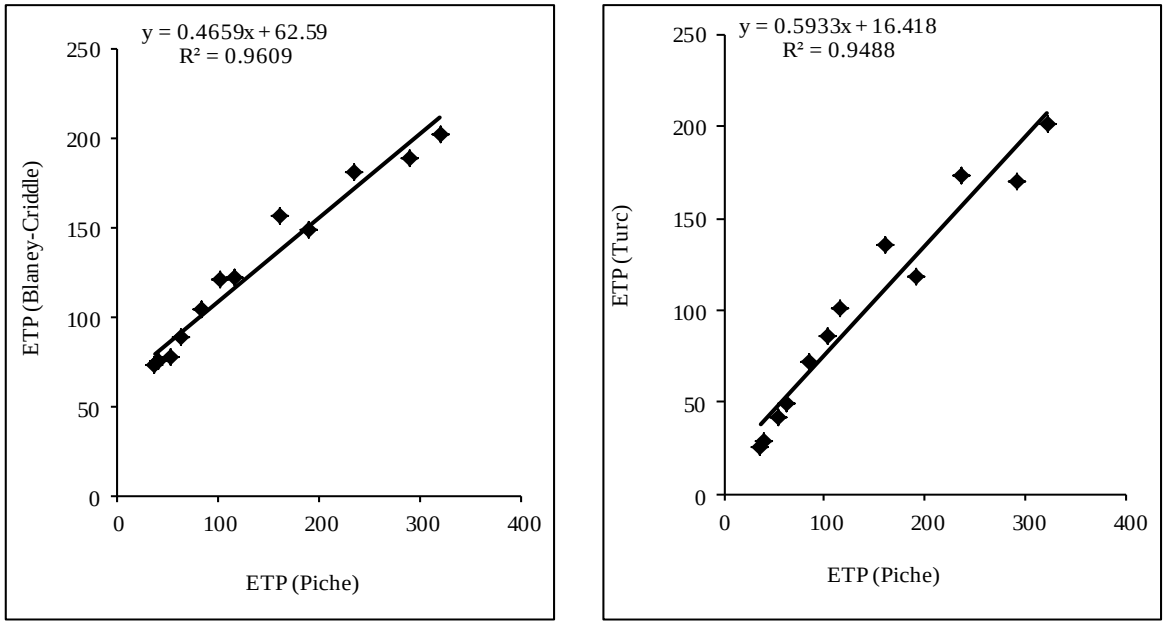
Mois	**S**	**O**	**N**	**D**	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**
P	35,22	30,48	36,82	32,42	36,89	32,62	33,51	32,65	40,86	21,18	9,90	22,16
ETP	97,43	56,41	25,03	14,32	8,87	13,45	27,05	44,60	81,70	128,53	166,15	154,00
P-ETP	-62,21	-25,93	11,79	18,10	28,02	19,17	6,46	-11,94	-40,84	-107,36	-156,25	-131,84
ETR	35,22	30,48	36,82	14,32	8,87	13,45	27,05	44,60	81,70	68,40	9,90	22,16
RFU	0	0	4,11	100	100	100	100	88,06	47,22	0	0	0
Deficit	62,21	25,93								60,13	156,25	131,84
Excedent	0	0	0	18,1	28,02	19,17	6,46	0	0	0	0	0



a)



b)



c) **d)**

Figure 15 : Courbes des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport à Bac. Figure **a** : corrélation entre ETP(Thornthwaite) et ETP(Piche) ; Figure **b:** corrélation entre ETP(Penman) et ETP(Piche); Figure **c** : corrélation entre ETP (Blaney-criddle) et ETP(Piche); Figure **d** : corrélation entre ETP(Turc) et ETP(Piche).

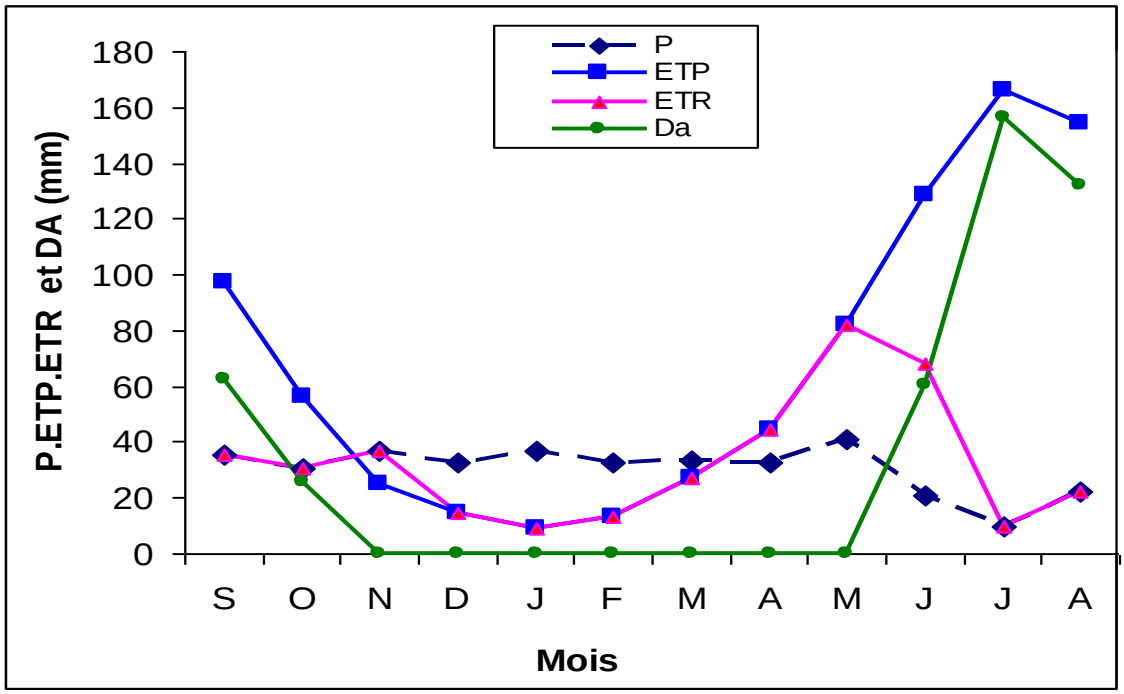


Figure 16 : Variations mensuelles des éléments du bilan hydrologique : Station de Djelfa (1974-2007)

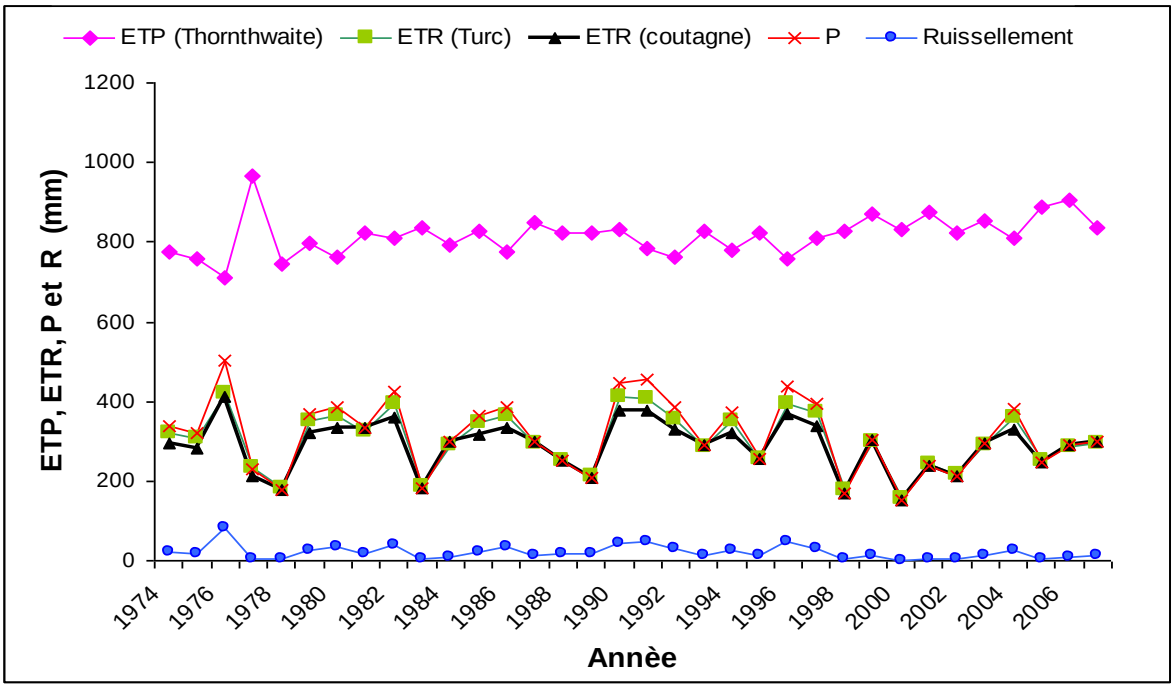


Figure 17 : Variations interannuelle des éléments du bilan hydrique : Station de Djelfa (1974-2007)

2.5.5.4 Variabilité interannuelle des composantes du bilan hydrologique

2.5.5.4.1 Évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un facteur jouant un rôle essentiel dans les modèles de bilan hydrologique des bassins versants (NGOM, 2002). Les valeurs de l'ETP obtenus à partir de la formule de Thornthwaite, durant la période 1974-2007 sont représentées sur la Figure 17. L'évolution interannuelle de l'évapotranspiration calculée, fait apparaître des fluctuations entre 708,50 mm (1976) et 968,10 mm (1977), ce qui correspond à une variation de 26,80 %. D'autre part, la variation interannuelle de l'ETP, présente une moyenne de 816,60 mm. Il est à signaler, que les années 1976, 1978 et 1996 ont enregistré les valeurs de l'ETP les plus faibles, alors que les années 1977, 2005 et 2006 ont enregistré quant à elles, les valeurs les plus élevées de l'ETP durant cette période.

2.5.5.4.2 Evapotranspiration réelle (ETR)

Les résultats obtenus par l'application des différentes méthodes d'estimation de l'ETR durant la période (1974-2007) (Figure 17), montrent que les valeurs de l'ETR oscillent entre 157,70 mm et 421,40 mm, avec une moyenne de 301,43 mm (Turc) et entre 152,40 mm et 412,30 mm, avec une moyenne de 288,50 mm.

2.5.5.4.3 Ruissellement (R)

L'application de la formule de Tixeront-Berkaloff sur la période 1974-2007 a permis d'obtenir les résultats illustrés par la Figure 17. Ce graphe fait apparaître que l'évolution interannuelle du Ruissellement se caractérise par des valeurs qui varient entre 1,70 mm (2000) et 84 mm (1976), avec une moyenne de 21 mm, ce qui représente respectivement un pourcentage de 1,12 %, 16,70 % et 6,70 % de la précipitation.

2.6 Conclusion

Cette étude a permis l'estimation de l'évapotranspiration par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Blaney Griddle, Hargreaves- Samani, Penman-Monteith et Piche en se basant sur les variables climatiques (température, humidité relative, vitesse du vent, durée d'insolation), enregistrées au niveau de la station météorologique de Djelfa durant la période 1972-2007. L'analyse comparative des résultats obtenus par l'application des différents modèles a permis de mettre en évidence :

À l'échelle annuelle, la formule de Blaney-Criddle conduit à une estimation satisfaisante de la composante climatique; tandis que la méthode de Thornthwaite sous
estime considérablement l'ETP, pouvant atteindre (67,3 %).

Par ailleurs, à l'échelle mensuelle, l'estimation de l'ETP par la méthode de Penman-Monteith conduit à une meilleure approximation de cette composante, avec un écart variant de 0,57 à 30,46 %. D'autre part, les valeurs de l'ETP (Thornthwaite) sont nettement inférieures aux valeurs de l'ETP (piche) avec un écart important pouvant atteindre un maximum de 78,25 %.

Chapitre 03 :

Contexte géologique et hydrogéologique

3.1 Contexte géologique

3.1.1 Introduction

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie, permettant l'identification des différents niveaux stratigraphiques susceptibles d'être aquifère, afin de mieux analyser la ressource en eaux dans son environnement.

L'étude des formations géologiques du bassin a véritablement débuté vers 1952 avec le levé de plusieurs coupes qui avaient permis la publication d'une importante carte de synthèse au 1/50000 (CORNET, 1952).

La région du Zahrez se caractérise par un grand synclinal irrégulier, plus large à l'Ouest avec 50 kilomètres, qu'à l'Est avec 30 kilomètres, et long d'environ 140 kilomètres avec une orientation Nord-Est-Sud-Ouest. Les couches géologiques du bassin versant, appartenant essentiellement au crétacé, sont recouverts par un Tertiaire continental surmonté par des dépôts du quaternaire (KHIATI, 1994).

3.1.2 Lithostratigraphie

La lithostratigraphie des formations géologique du bassin des Zahrez est bien connue grâce à la cartographie géologique et les levés détaillés de coupes significatives réalisées dans notre secteur d'études. Les principales unités stratigraphiques de la zone d'étude s'étale des terrains d'âge triasique au Quaternaire récent (Figure 18 et 19).

3. 1.2.1 Le Trias

Apparait fréquemment dans le sous bassin des oueds Djelfa-Hadjia au niveau du célèbre diapir de "rocher de sel" qui est observable à partir de la route Djelfa-Hassi Bahbah. Il est représenté par des argiles verdâtres et violettes avec du gypse ainsi que d'autre formations évaporitiques (CORNET, 1952).

3.1.2.2 Le passage du Jurassique au Crétacé

Les formations qui indiquent le passage du Jurassique au Crétacé apparaissent au niveau des monts de Ouleds Nails (aux environs de Benyagoub et à la limite Ouest du Synclinal de Djelfa) dans les djebels Meassène Guefla, El Mahreg jusqu'au djebel Taouzata, il apparaît à la faveur d'une grande faille. Cette série fait environ 250 m d'épaisseur. Elle peut être subdivisée en deux unités égales d'épaisseur dont la limite est marquée par une surface taraudée ferrugineuse (MAOUI, 2007).

3. 1.2.3 Crétacé Inférieur

Le Néocomien : Il est formé de bancs (20 à 30 m) de calcaire épais et d'argile alternant. On rencontre également quelques minces bancs de grès. Les calcaires sont très souvent dolomitiques. Il s'agit d'un faciès en régression marquant la fin de la transgression jurassique et l'installation à partir du Barrémien d'un régime de sédimentation continentale (POUGET, 1980; POUGET, 1971).

Lithologie log	Étages Ères	Description lithologie	Puissance (m)	Aquifère	T m²/s	K m/s
	Mioplio-Quaternaire	Sables et argiles sableuses	≅ 18	Aquifère non confiné	1.2×10^{-3}	2×10^{-4}
	Senonien	Argiles sableuses et gypseuses	≅ 130			
	Turonien	Calcaires clairs fissurés	≅ 130	Aquifère confiné	?	
	Cenomanien	Marnes calcaires et gypses	≅ 140			
	Albien	Grès rougeâtres avec intercalations de calcaires et de marnes	≅ 350	Aquifère confiné	?	
	Aptien	Argiles calcaires avec intercalations de gypses et de grès	≅ 200			
	Valanginien Barremien	Grès a dragées de quartz avec des intercalations de calcaires et de marnes et débris de bois salifiés	≥ 300	Aquifère confiné	?	
	Portlandien Berriasien	Calcaires incrustés d' ostreïdes calcaires marneux marnes feuilletées	≅ 250	Aquifère confiné		

Figure 18 : Log stratigraphique de la région de Zaâfrane (T: transmissivité et K: conductivité hydraulique de l'aquifère)

Le Barrémien: Il est caractérisé par un faciès de type continental proche de celui de l'Albien. Il est représenté par des grès meubles à granulométrie variable, présentant une stratification entrecroisée fréquente qui en fait un bon aquifère potentiel. Cependant, la présence de lentilles d'argile gréseuses réduit fortement la perméabilité de la formation. La puissance de cette série dépasse par endroits les 500 mètres. Il affleure sur les reliefs qui constituent les limites nord et sud de la zone d'étude (POUGET, 1980; SIDI MOUSSA, 1996).

L'Aptien : Il se caractérise par des dépôts franchement marins sur l'ensemble des Hautes Plaines. Cette formation est constituée essentiellement d'une barre calcaire entourée de marnes au toit de la formation et d'un niveau un peu plus argileux à la base. Il constitue un écran imperméable atteignant 150 m d'épaisseur entre l'Albien et le Barrémien (cf.log du forage 162-G7, **A**nnexe 3). Cette formation peut atteindre et même dépasser 200 mètres d'épaisseur, mais elle est d'environ 50 mètres au niveau du Djebel Djellal el Chergui (SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993).

L'Albien : Il est représenté par des niveaux gréseux avec intercalations de niveaux argileux. Cette formation affleure sur les reliefs qui constituent les limites nord et sud de la zone (cf. log des forages 307-F8 et Gueddid F2). Au centre du bassin sa puissance devient plus importante. Les formations de l'Albien sont localisées au sud de Zaafrane au niveau de Djebel Bousekkine, au cœur de l'anticlinal de Kef el Rhirane, dans les environs de Charef et autour de synclinal de Djelfa. La série complète de l'Albien est caractérisée par une épaisseur moyenne pouvant atteindre 350 mètres. Au djebel Djellal el Chergui, elle a une puissance de 535 mètres (CHIBANE et BOUTALEB, 2010; NEDJIMI, 2006).

III. 1.2.4 Le Crétacé Supérieur : Cette unité stratigraphique, qui commence à l'Albien Supérieur et s'achève au Sénonien, correspond à la dernière transgression marine repérable dans la région. Elle forme une épaisse série marine qui constitue le matériel de l'ensemble des synclinaux.

Le Cénomanien (et Vraconien) : Ces formations sont constituées des argiles, fossilifère avec des intercalations de bancs calcaires minces et des bancs de gypse dans sa partie médiane. Il constitue un niveau peu perméable de 400 m d'épaisseur environ (cf. log du forage 162-G7) (NEDJIMI, 2006). Le Cénomanien est très représenté au sud de Zaafrane, au niveau des chaînes des Ouleds Nails. Il affleure aux environs de Charef, qui est une commune limitrophe de Zaafrane et encadre tout le synclinal de Djelfa. Son épaisseur est de 140 mètres au niveau des monts d'Ouleds Nails mais par endroits elle dépasse les 200 mètres d'épaisseur (KHIATI, 1990).

Le Turonien : Sur le plan stratigraphique, Le Turonien, moins épais (150 m), comprend essentiellement des calcaires massifs fossilifères fissurés avec des niveaux plus marneux dans la partie médiane. La fissuration du calcaire donne au Turonien les caractéristiques d'un bon aquifère. Il affleure localement dans la partie centrale du bassin, notamment à proximité de la commune d'Hassi Bahbah (cf. log des forages HB2 et 589G07), Annexe 3), ainsi qu'en limite nord et sud de la zone d'étude (cf.log du forage 282-F8) (POUGET, 1971; A.N.R.H, 1994). En outre, cette série est bien représentée au sud de Zaafrane, dans les monts des Ouleds Nails :
- entre l'anticlinal de Charef et l'anticlinal de Kef el Rhirane.
- tout autour du synclinal de Djelfa.

Le Sénonien : Cette formation est formée par une alternance de marnes et de calcaires argileux peu perméables, et contient également des horizons gypseux. Le Sénonien, incomplet dans la région des Zahrez, est assez puissant plus au sud, où il comprend : 200 m environ d'argiles gypseuses à Ammonites, puis une soixantaine de mètres de calcaires à Oursins. La série se termine par des argiles contenant, cette fois-ci, de très gros bancs de gypse (KHIATI, 1990; A.N.R.H, 1994). Les affleurements de cette formation sont localisées dans la partie centrale du bassin (cf. log du forage 317-F8) et peut atteindre 500 m d'épaisseur. En outre, Le sénonien affleure au niveau des monts des Ouleds Nails avec la particularité d'être toujours au cœur des synclinaux (Synclinal de Djelfa). La totalité des séries sénonien dépasse les 130 mètres dans les monts des Ouleds Nails (E.N.H.Y.D, 2002).

3.1.2.5 Le Tertiaire Continental : Le Tertiaire, entièrement continental, est représenté principalement par un horizon inférieur, conglomératique à la base, et plus argileux au sommet. En général, on sépare très mal, sauf lorsque la discordance est nette, les argiles rouges de cet étage du Mio-Pliocène de même faciès qui les surmonte. Ce dernier horizon est heureusement disposé en terrasses sauf au contact des pointements diapiriques, tandis que le Tertiaire inférieur est plissé (NEDJIMI, 2006; SIDI MOUSSA, 1996). La partie conglomératique est caractérisée par une épaisseur d'environ 200 mètres (cf. log du forage 309- F8) (Annexe 3).

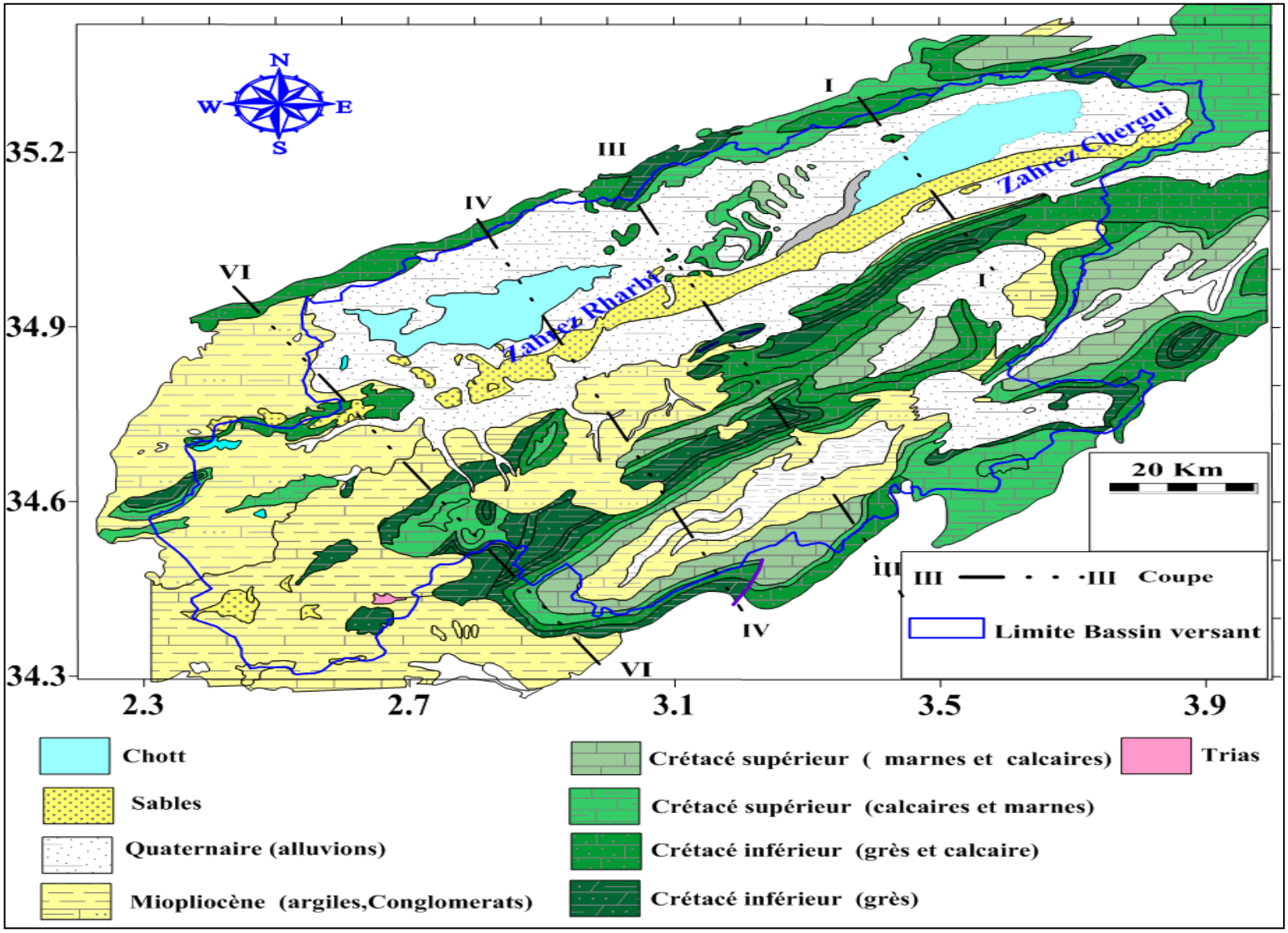


Figure 19 : Carte géologique du bassin versant des Zahrez

Le Tertiaire Continental est représenté au niveau des basses et plates du bassin versant. Dans les monts des ouleds Nails, il est rencontré dans l'axe du synclinal de Djelfa (POUGET, 1980; SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993). Les affleurements du tertiaire sont de formes très irrégulières en certains endroits et sont érodés par les eaux de ruissellement ainsi les formations du quaternaire actuel ont pris leurs places.

III. 1.2.6 Le Quaternaire

Le quaternaire est constitué d'éboulis de pente, de dunes (cf. log du forage 628G08), d'alluvions torrentielles et de croûtes minces de calcaires discontinus. Dans le bassin des Zahrez, on distingue le quaternaire récent qui est rencontré dans le sous bassin versant des oueds Djelfa et Hadjia (E.N.H.Y.D, 2002; BOUTELDJAOUI et al., 2010). Les formations du quaternaire sont localisées au niveau des parties plates que ce soit dans les régions des Zahrez ou soit dans les synclinaux des monts des ouleds nails (POUGET, 1977). Il est représenté, par des dunes de sable dans les deux bordures Nord et sud des Zahrez, dans une bande régulière qui fait 2 Km de largeur. Nous notons la présence de croûte calcaire dans les alentours des chotts. Les alluvions du quaternaire ont une faible puissance dans la région (environ 15 m dans le synclinal de Djelfa) (SIDI MOUSSA, 1996).

3.1.3 Contexte structural

La structure géologique actuelle des monts des Ouleds Nails et la région des chotts est issue des plissements tertiaires de l'orogenèse Alpine. Les séries du crétacé qui constituent l'ossature de ces monts ont été énergiquement plissées selon une direction SW-NE. La région du Zahrez se caractérise par un grand synclinal irrégulier, plus large à l'Ouest avec 50 kilomètres, qu'à l'Est avec 30 kilomètres, et long d'environ 140 kilomètres avec une orientation Nord-Est-Sud-Ouest. En outre, dans le sous bassins versant des oueds Djelfa et Hadjia nous rencontrons une série d'axes synclinaux et anticlinaux dont la succession est d'Est en Ouest. Les coupes géologiques présentées ci-après mettent en évidence la structure globale du bassin des Zahrez. Elles sont issues de l'étude hydrogéologique de Cornet (CORNET, 1952). La localisation de ces coupes est indiquée sur la carte géologique présentée en Figure 24.

Coupe I (Figure 20)

Centre du bassin

Le cœur du synclinal est représenté par de sable, graviers et argiles des formations du Mio-Pliocène et du Quaternaire. Sous ce remplissage, les conglomérats perméables du Tertiaire inférieur (Oligocène) sont déposés en discordance sur les calcaires du Séno-Turonien.

Reliefs nord et sud

Les affleurements au nord et au sud du bassin recoupent toute la série crétacée.

En limite sud, à proximité des affleurements crétacés, les forages Ouled Attia et Medjedel II atteignent les calcaires fissurés du Turonien sous 50 m de remplissage miopliocène et recouvrement quaternaire. Le forage F1 de Sidi Bayzid se localise sur un affleurement séno-turonien et traverse des calcaires marneux sur 170 m. Au nord, le sondage 307F08 traverse 150 m de grés du Crétacé Inférieur. A l'extrémité nord-est du secteur d'étude, le sondage 302F08 traverse des terrains calcaires et marneux (vraisemblablement cénomaniens) jusqu'à 230 m de profondeur.

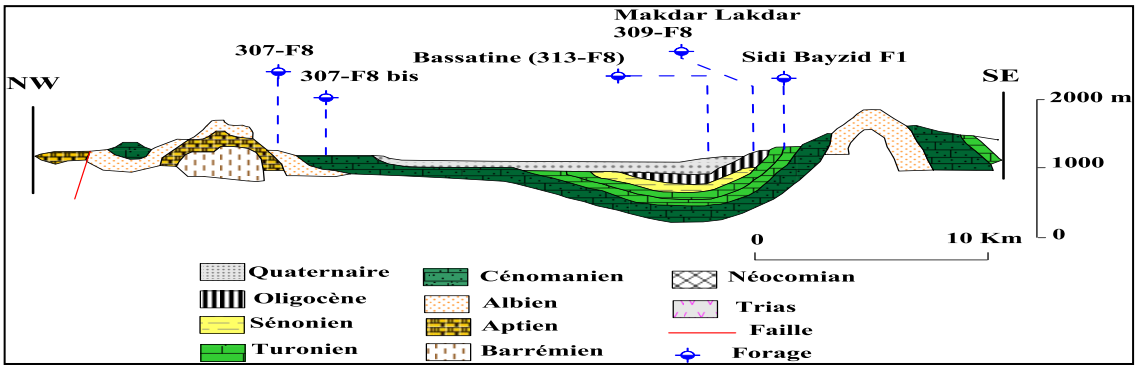


Figure 20: Coupe géologique I

Coupe III (Figure 21)

Il s'agit d'une coupe nord-ouest/sud-est transversale au bassin des Zahrez. Elle passe dans la zone intermédiaire entre les deux Zahrez, à l'est de la RN1. Elle se poursuit au sud vers le synclinal de Djelfa.

Centre du bassin

Plusieurs forages ont atteints des profondeurs supérieures à 1000 m dans la zone centrale. Il s'agit des forages El Mesrane F2 et El Mesrane F3, et du sondage 147G-7 (Ain Malakoff) (Annexe 3). Les logs de ces forages mettent en évidence la succession stratigraphique suivante :

150-200 m de recouvrement du Mio-Pliocène et du Quaternaire, 1 000 m de Séno-Turonien gypseux, 300 m de Cénomanien. La base du Cénomanien n'est pas atteinte par ces forages.

Par ailleurs, le sondage profond 162-G7 (Annexe 3) de Hassi Bahbah réalisé sur un affleurement de Crétacé Supérieur montre la succession suivante :

160 m de Turonien, 400 m de Cénomanien gypseux, 150 m d'Albien, 150 m d'Aptien gypseux, et 80 m de Barrémien. La base du Barrémien n'est pas atteinte.

Reliefs nord et sud

Les affleurements au nord et au sud du bassin recoupent toute la série crétacée. Au nord, les forages qui alimentent la ville d'Hassi Bahbah en eau potable sont implantés au niveau des affleurements du Crétacé Supérieur. Les terrains traversés par ces forages sont des terrains calcaires, que l'on retrouve jusqu'à une profondeur d'au moins 400 m (HB2).

Le forage 542-G7 (Annexe 3) atteint les calcaires fissurés du Turonien sous 70 m de recouvrement mio-pliocène jusqu'à une profondeur de 385 m. Le forage 589-G7 traverse le calcaire séno-turonien sur 150 m.

Au sud, les forages F2 d'Ain Maabed et 493-G7 (Annexe 3) sont implantés sur des affleurements albiens. Ils traversent des grès rouges localement fissurés sur 200 m. Le forage 570-G7 traverse 150 m de recouvrement mio-pliocène suivi de 400 m de calcaires séno-turoniens. Le forage de Ain Djelalia se caractérise par des terrains sénoniens très marneux sur 200 m d'épaisseur.

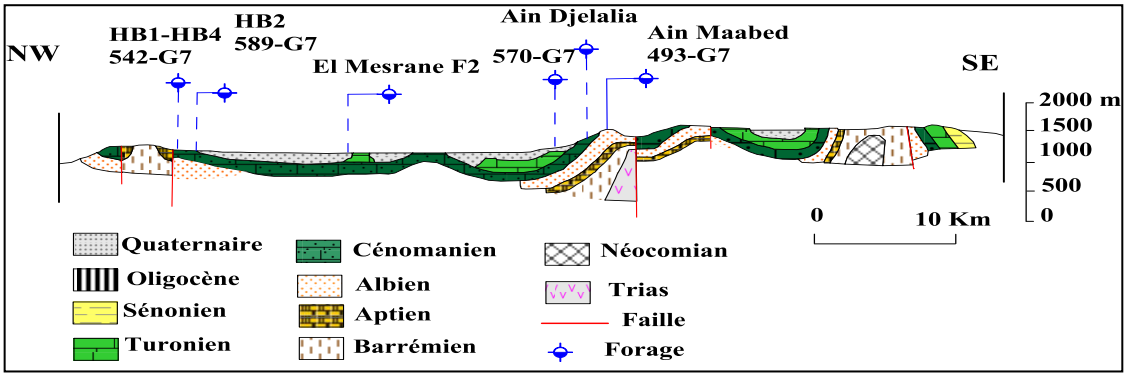


Figure 21: Coupe géologique III

Coupe IV (Figure 22)

Il s'agit d'une coupe nord-ouest/sud-est transversale au bassin des Zahrez. Elle traverse le Zahrez Rharbi à l'ouest de l'oued Kourirech et se poursuit au sud vers le synclinal de Djelfa. Au niveau du bassin des Zahrez, cette coupe met en évidence un synclinal large recoupé par un anticlinal secondaire faillé.

Centre du bassin

Au nord du Zahrez Rharbi, le forage El Morra traverse le Séno-Turonien sur 200 m de profondeur. Ce forage démontre l'existence du Séno-Turonien calcaire dans cette zone, contrairement à ce qui indiqué sur la coupe. À proximité de Zaafrane, les forages Zaafrane F1 et F2 sont implantés jusqu'à 300 m de profondeur dans le Tertiaire Terminal, constitué de sables, d'argile et de graviers. A la base du forage F1, on observe une transition vers les

terrains calcareux du Séno-Turonien (à partir de 200 m environ). Au niveau du cordon dunaire, le sondage 643-G7 (Annexe 3) traverse 120 m de remplissage tertiaire et quaternaire (dont 10 m de sables fins correspondant au cordon dunaire). Il atteint ensuite la formation séno-turonienne jusqu'à 250 m.

Reliefs nord et sud

Au sud du bassin, le sondage 644-G7 se situe sur un affleurement turonien et traverse cette formation sur 215 m.

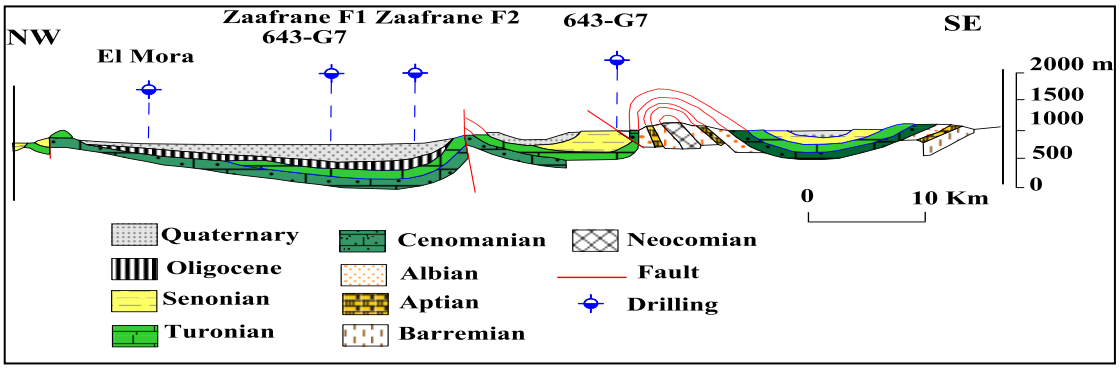


Figure 22 : Coupe géologique IV

Coupe VI (Figure 23)

Il s'agit d'une coupe nord-ouest/sud-est transversale au bassin des Zahrez. Elle passe à l'ouest du Zahrez Rharbi entre les communes de Gueddid et Charef. Cette coupe met en évidence un large synclinal à faible pendage recoupé par un anticlinal secondaire (Ech Chouchu).

Centre du bassin

Au nord, le forage militaire de Daiet-et-Bkour traverse 300 m de terrains calcaires sénoturoniens sous 6 m de croûte calcaire quaternaire. Les forages d'Oum Chegua sont implantés à proximité de l'axe de l'anticlinal secondaire de Ech Chouchu. Après 10 à 30 m de recouvrement quaternaire, les forages traversent les formations calcaro-marneuses du Séno-Turonien.

Reliefs nord et sud

Le forage F4 de Gueddid a été foré en perte totale sur toute la hauteur.Le forage F2 est foré sur un affleurement albien. Les terrains traversés sont des grès rouges parfois fissurés jusqu'à 200 m de profondeur. Le sondage Gueddid est foré jusqu'à 100 m dans le Séno-Turonien sous un faible recouvrement quaternaire. Le sondage 474-G7 situé à proximité atteint les grès albiens à 325 m de profondeur, sous des terrains calcaires du Crétacé Supérieur.

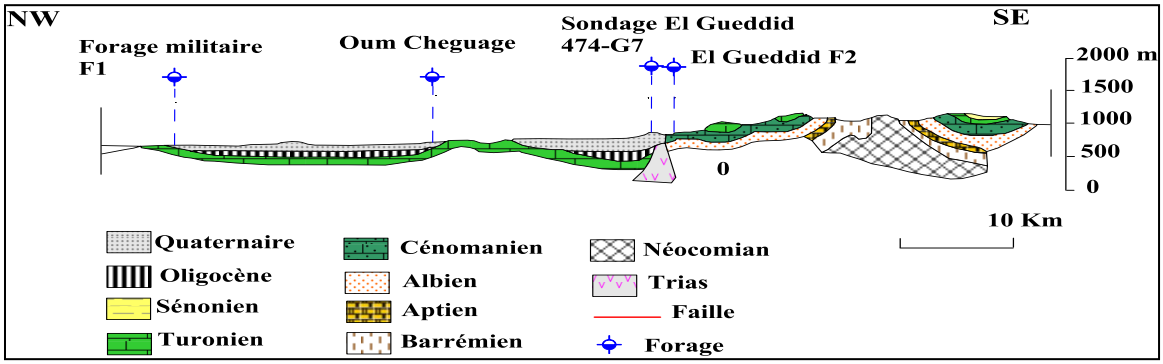


Figure 23: Coupe géologique VI

Synclinal de Djelfa

La partie centrale du synclinal correspond à une vaste cuvette d'axe SW-NE. Elle est comblée par des dépôts continentaux du Néogène et du quaternaire discordants sur des séries du crétacé.

La zone axiale de la dépression

Le synclinal est un vaste pli assez simple, coffré orienté S.W-N.E. Sa dissymétrie est bien marquée, le flanc Nord se redresse plus vigoureusement que le flanc Sud. La zone axiale caractérisée par une orographie basse, correspond à une vaste cuvette d'axe S.W-N.E. Elle est comblée par des dépôts continentaux du néogène et du quaternaire discordants sur les différents termes de la série crétacé (SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993; POUGET, 1977).

Le flanc nord : Il peut être subdivisé en deux sous-ensembles :

Une série monoclinal à pendage, S.E supérieur à 40° allant du néocomien jusqu' au sénonien en série normale. Elle correspond à une zone montagneuse parcourue par un réseau hydrographique S.E-N.W dont l'oued principal est l'oued DJELFA. Le deuxième sous-ensemble, plus au N.W, est constitué par la même série que le précèdent à pendage N.W inverse, et des pendages S.E formant des plis de Kef Haouas.

Le flanc sud : Il est constitué par une série monoclinale avec des pendages N.W relativement plus faible de 12° à 30°. Ce flan est affecté par un accident tectonique important au niveau de l'oued Seddeur. C'est un décrochement dextre dont le rejet horizontal dépasse les 5 Kilomètres. Il subdivise le flan sud du synclinal en deux Djebels (Djebel Djellal Rharbi et Djebel Djellal Chergui à l'est de la route DJELFA-LAGHOUAT) (SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993).

Tectonique de la région de Zaafrane (Sous bassin Djelfa-Hadjia)

Dans le sous bassin versant d'Oued Djelfa–Hadjia nous rencontrerons une série d'axes synclinaux et anticlinaux (Figure 25) dont la succession est d'Est en Ouest. A la limite Ouest,

l'anticlinal de Charef, son axe est rempli par les formations gréseuses de l'Albien inférieur et les deux flancs par l'Albien supérieur et le Cénomanien.Le synclinal aux environs Sud –Est de Charef à cœur Turonien. L'anticlinal de Kef El Rihane ayant la même formation axiale et les même sur les flancs que celui de Charef.

Le synclinal très chamboulé de djebel Bousekkine, cette zone est très tectonisée puisqu'on trouve des failles importantes de direction E-W et N-S, ce qui fait que ce synclinal est subdivisé en plusieurs compartiments. L'anticlinal des Djebels Meassène Guefla et Taouzata à cœur Portlandien –Berriasien. Le flanc NW est coupé par le Valanginien-Barrémien seulement (Figure 25).

L'anticlinal de djebel El Oust (Nord de Djelfa) qui est divisé en deux compartiments, le premier à l'Ouest et le second à l'Est. Le cœur de ces deux anticlinaux est occupé par l'Albien inférieur et les flans par l'Albien supérieur et le Cénomanien. Une succession de petits axes anticlinaux et synclinaux plus au Nord. Le cœur des axes synclinaux est occupé par le Sénonien ou des formations plus récentes (Mæstrichtien et Campanien), celui des anticlinaux est essentiellement formé de Turonien. Tous ces axes suivent l'orientation générale de l'Atlas Saharien (NE-SW). En outre parmi les structures importantes au niveau dans la zone d'étude, il faut souligner le diapir de Rocher de sel .La direction des principales failles est parallèles à celle de l'Atlas Saharien. Les failles transversales sont d'une importance secondaire. Nous rencontrons une faille qui change de direction du SW-NE au N-S. C'est celle qui fait apparaître le Portlandien -Berriasien.

3.2 Contexte hydrogéologique

3.2.1 Introduction

Cette approche hydrogéologique a pour objectif la caractérisation des différents aquifères et la mise en valeur des potentialités hydriques. L'étude hydrogéologique a pour finalité la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines. Comme pour la géologie, les systèmes de références hydrogéologiques datent des années 1952 (CORNET, 1952). Depuis, les études sont rares et se limitent à des rapports techniques inédits ; on trouve peu de travaux de recherche vraiment nouveaux et ils se limitent souvent à l'interprétation des données existantes. Dans ses travaux, l'accent a été mis sur une étude stratigraphique et hydrogéologique pour comprendre le fonctionnement de la nappe. En dehors de ces travaux, il existe plusieurs rapports techniques associés à des campagnes d'implantation des forages pour l'alimentation en eau des centres urbains. Ces rapports contiennent souvent les données élémentaires, des données physico-chimiques et le niveau statique de la nappe.

3.2.2 Les principaux aquifères

Dans la série stratigraphique décrite précédemment, plusieurs horizons sont susceptibles de présenter les caractéristiques d'aquifères productifs (Tableau 19):

- Les grés du Valanginien-Barremien
- Les grés de l'Albien
- Les calcaires du turonien
- Les formations du tertiaire et du quaternaire appelé communément par les hydrogéologues (Mioplio-Quaternaire) (BOUTELDJAOUI et al., 2010).

3.2.2.1 Crétacé Inférieur

Le Barrémien : Les grès friables à stratifications entrecroisés forment un aquifère potentiel dont la perméabilité globale est cependant réduite par de nombreuses intercalations argileuses. Ces grès affleurent sur les chaînons montagneux formant les limites nord et sud du bassin. Le substratum est représenté par les calcaires très durs du portlandien-Berriasien. Entre ces deux formations existe une communication par failles et fissure. Cette nappe est libre au niveau des affleurements et captive sous les synclinaux de la région (KHIATI, 1990; A.N.R.H, 2004).

L'Albien : Les grés et les calcaires de l'Albien sont perméables. La circulation des eaux se fait par interstices et par fractures pour les grés et par fracturation ainsi que par chenaux pour les calcaires.Cet aquifère constitue la principale ressource de la plaine d'Ain Oussera située plus au nord. Dans le bassin des Zahrez, l'Albien affleure sur les chaînons montagneux formant les limites nord et sud du bassin et plonge plus en profondeur dans la partie centrale. Cette nappe est libre au niveau des affleurements et captive sous le synclinal de Djelfa ou au niveau de la région de Zaafrane (KHIATI, 1994; SIDI MOUSSA, 1996). Le substratum de cette nappe est représenté par l'Aptien argileux.

3.2.2.2 Crétacé Supérieur

Le Turonien : Les calcaires très fractures du turonien sont perméables en grand (perméabilités de fracture). La circulation des eaux se fait essentiellement par fissurations (failles et diaclases) et par chenaux.

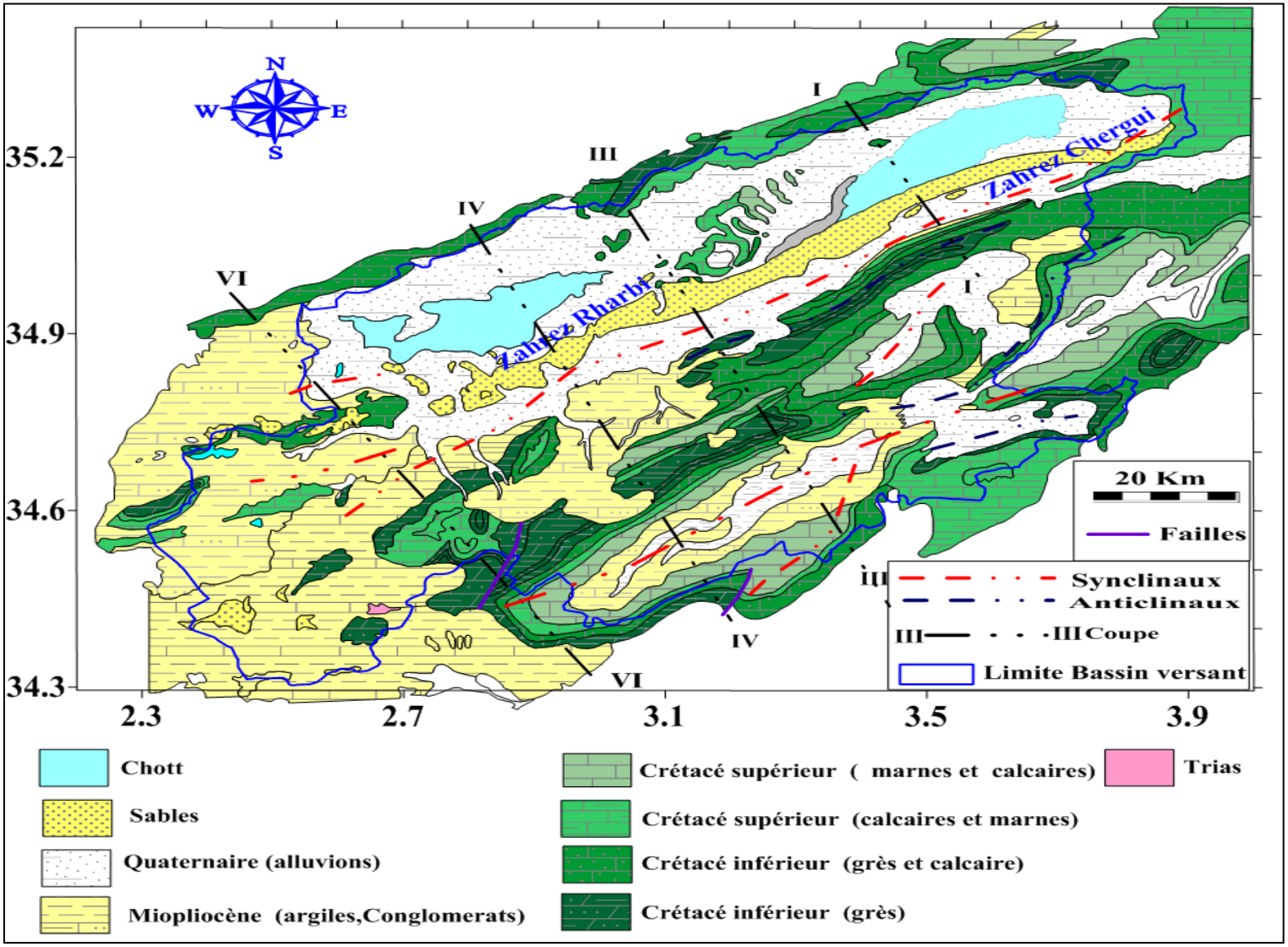


Figure 24: Carte structurale du bassin versant des Zahrez

Tableau 19 : Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations

Epoque	Etage	Description stratigraphique	Caractère aquifère	Exploitation de l'aquifère	Remarques
Quaternaire		Alluvions, sable, éboulis, dunes	Formation perméable Faible ressource	Sollicité par des forages (sud-est du Zahrez chergui) et des puits traditionnels.	Continuité Tertiaire / Quaternaire - pas de limite claire
Tertiaire Continental Terminal	**Oligocène - Pliocène**	Partie basale conglomératique, sommet et argileux	Partie basale perméable Ressource potentielle, peu connue	Pas ou peu exploité	Continuité Tertiaire / Quaternaire - pas de limite claire
Crétacé Supérieur	**Sénonien**	Calcaires argileux	Formation très peu perméable stérile	Pas exploité	Constitue un écran peu perméable entre le remplissage tertiaire et quaternaire et le Turonien
	Turonien	Calcaires massifs	Aquifère localement productif	Exploité (Hassi Bahbah, Hassi El Euch, El Guedid,. .)	Fissuration hétérogène
	Cénomanien	Niveaux argileux, bancs calcaires, gypse	Formation peu perméable Aquifère très limité, parfois plus productif localement (El Mesrane)	El Mesrane	Constitue un écran peu perméable entre Crétacé Supérieur et Crétacé Inférieur
Crétacé Inférieur	**Albien**	Grès, niveaux argileux	Formation perméable Aquifère importan	Exploité (Ain Maabed, Hammam Charef,. .)	Principale ressource de la plaine d'Ain Oussera
	Aptien	Marnes, calcaires, argiles	Formation très peu perméable stérile	Pas exploité	Constitue un écran peu perméable entre l'Albien et le Barrémien
	Barrémien	Grès meubles, Lentilles d'argile	Formation perméable Aquifère potentiellement important	Pas exploité	Peu accessible (profond)

Le cénomanien argilo-gypseux constitue le substratum des calcaires du Turonien. Ce réservoir est libre au niveau des affleurements et captif dans les synclinaux. Plusieurs forages captent cette formation, notamment les forages alimentant en eau potable les villes de Hassi Bahbah, Hassi El Euch, El Gueddid (A.N.R.H, 2004).

Le Turonien renferme en générale, dans le synclinal de Djelfa, une nappe captive sous le Sénonien et parfois en contact direct avec le Mio-Plio-Quaternaire sur les sous-ensembles du flanc nord (SIDI MOUSSA et DERAMCHI, 1993).

3.2.2.3 Le Tertiaire Continental Terminal

Seule la partie basale du Continental Terminal constituée de conglomérats est susceptible de posséder localement de bonnes propriétés aquifères. Cette formation est recouverte des argiles sableuses Mio-pliocènes. Les poudingues s'intercalent dans les argiles et leur disposition lenticulaire est très variable. L'extension et la perméabilité de la formation conglomératique restent peu connues et cette formation potentiellement aquifère n'est pas exploitée.

3.2.2.4 Le Plio-Quaternaire

Les nappes du Plio-Quaternaire sont exploitées par plusieurs forages notamment au sud-est du Zahrez Chergui (forages Zahrez et Ouled Attia). En outre cette nappe est captée par plusieurs puits parfois assez profond et à grand diamètre, dans la région de Zaafrane et le synclinal de Djelfa Nord (CORNET, 1952). L'épaisseur et la lithologie du Quaternaire ne favorisent cependant pas l'existence d'une importante ressource. Le tableau ci-après présente les différentes formations géologiques, ainsi que leurs caractéristiques hydrogéologiques.

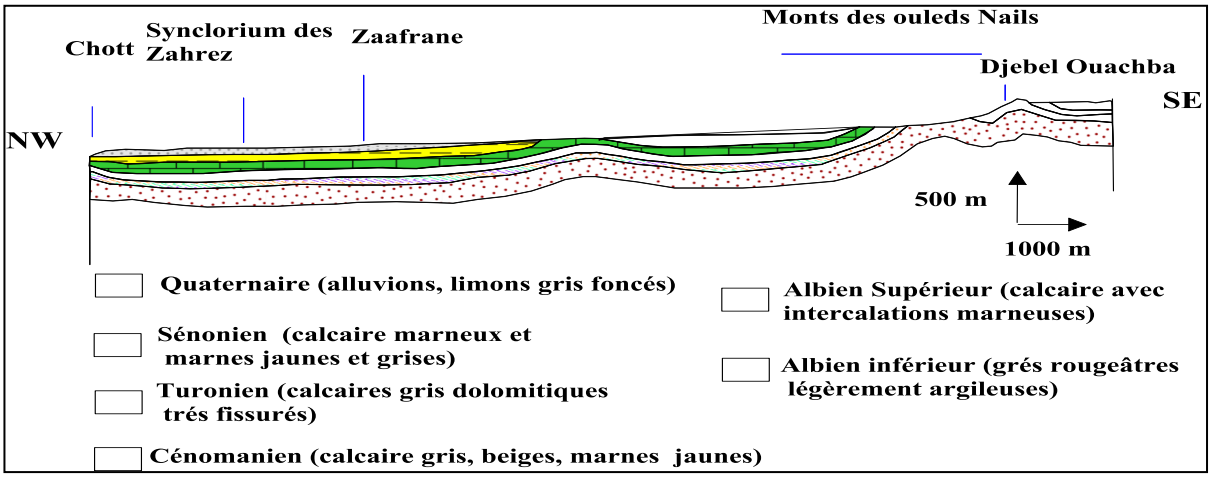
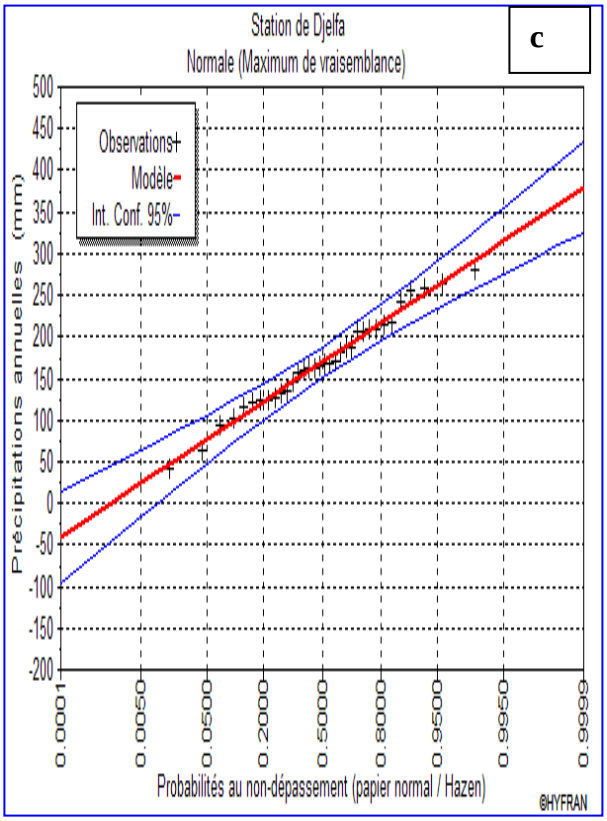
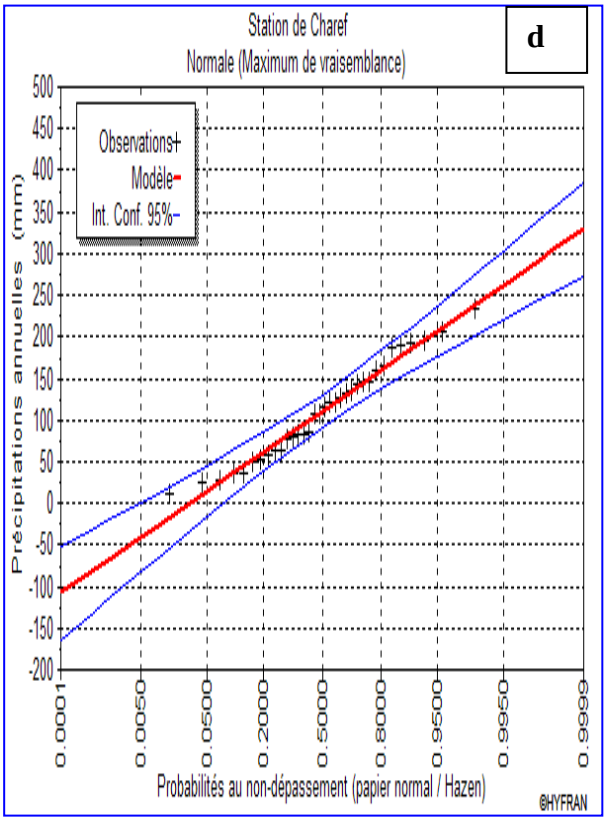
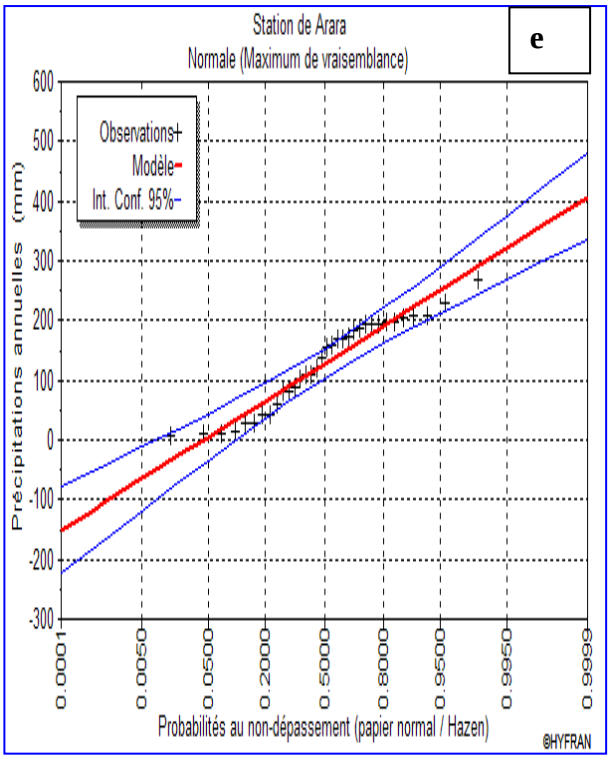
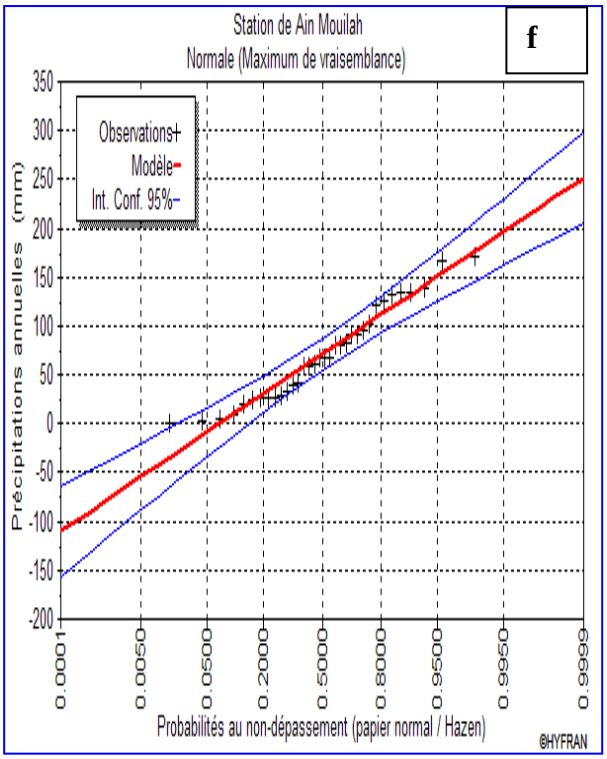


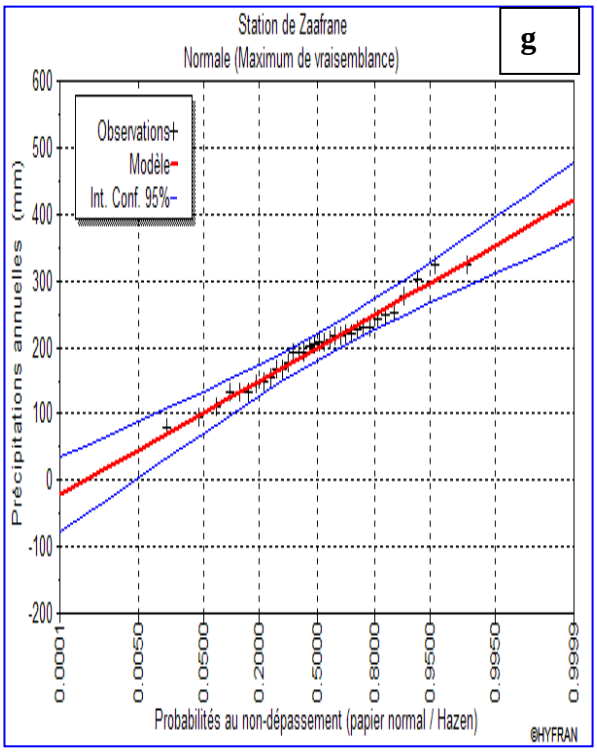
Figure 25 : Coupe géologique interprétative de la région de Zaâfrane (SIDI MOUSSA, 1996)

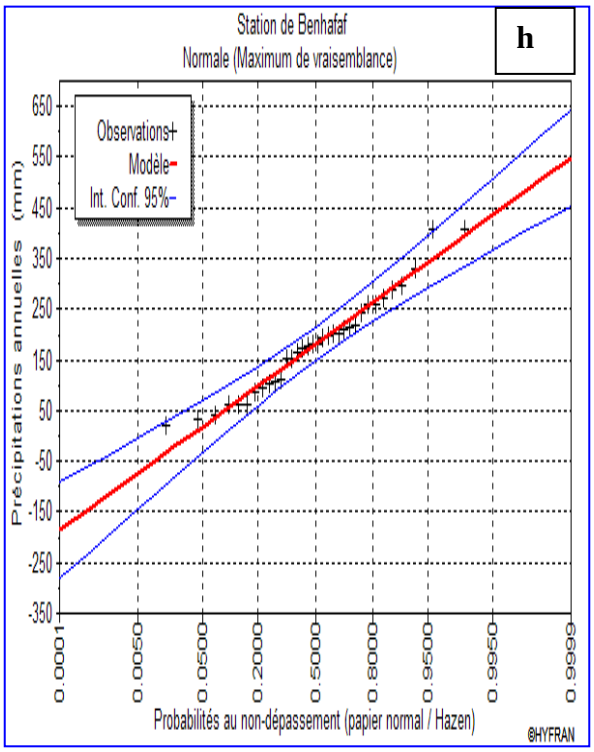

Station de Djelfa
Normale (Maximum de vraisemblance)
c
Observations+
Modèle-
Int. Conf. 95%-
Précipitations annuelles (mm)
Probabilités au non-dépassement (papier normal / Hazen)
©HYFRAN


Station de Charef
Normale (Maximum de vraisemblance)
d
Observations+
Modèle-
Int. Conf. 95%-
Précipitations annuelles (mm)
Probabilités au non-dépassement (papier normal / Hazen)
©HYFRAN


Station de Arara
Normale (Maximum de vraisemblance)
e
Observations+
Modèle-
Int. Conf. 95%-
Précipitations annuelles (mm)
Probabilités au non-dépassement (papier normal / Hazen)
©HYFRAN


Station de Ain Mouilah
Normale (Maximum de vraisemblance)
f
Observations+
Modèle-
Int. Conf. 95%-
Précipitations annuelles (mm)
Probabilités au non-dépassement (papier normal / Hazen)
©HYFRAN





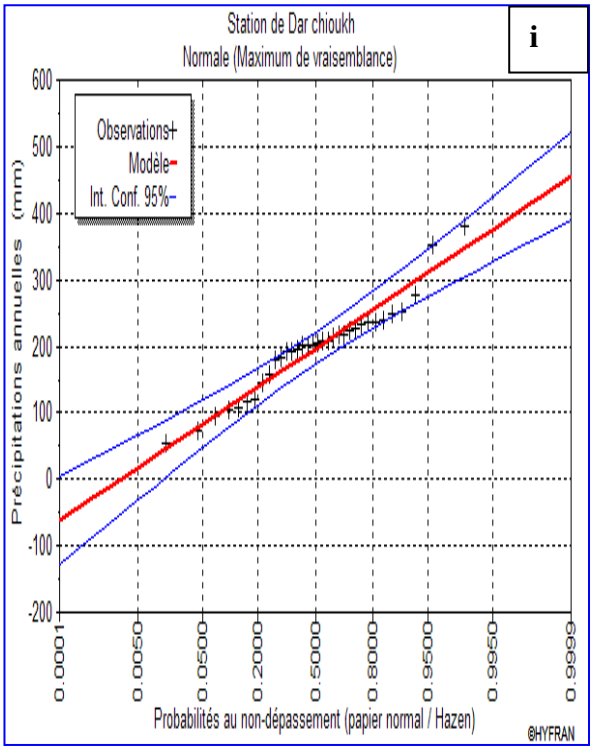
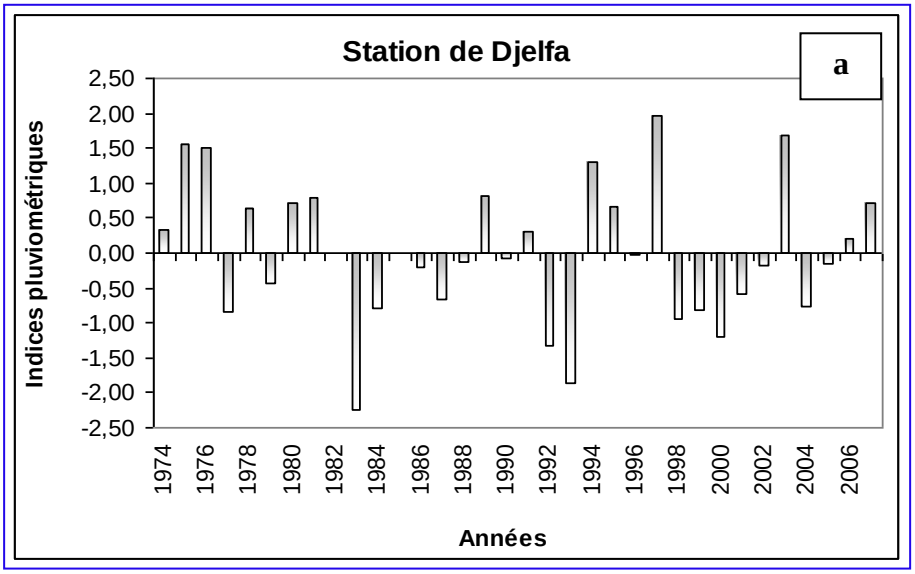
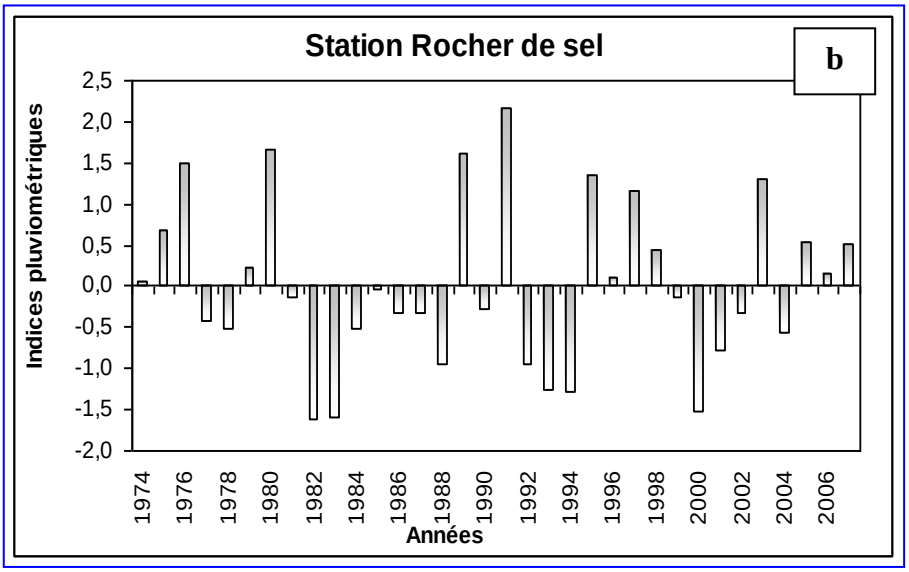
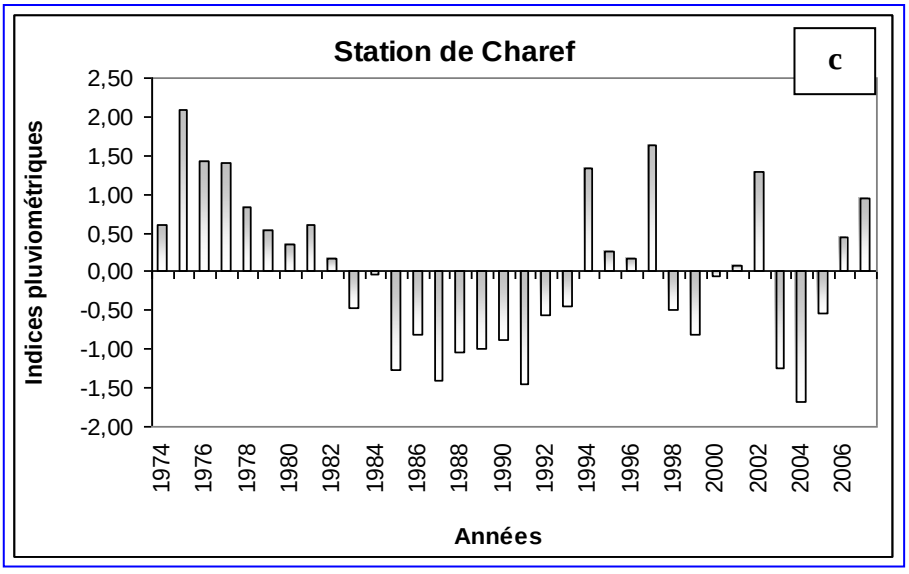
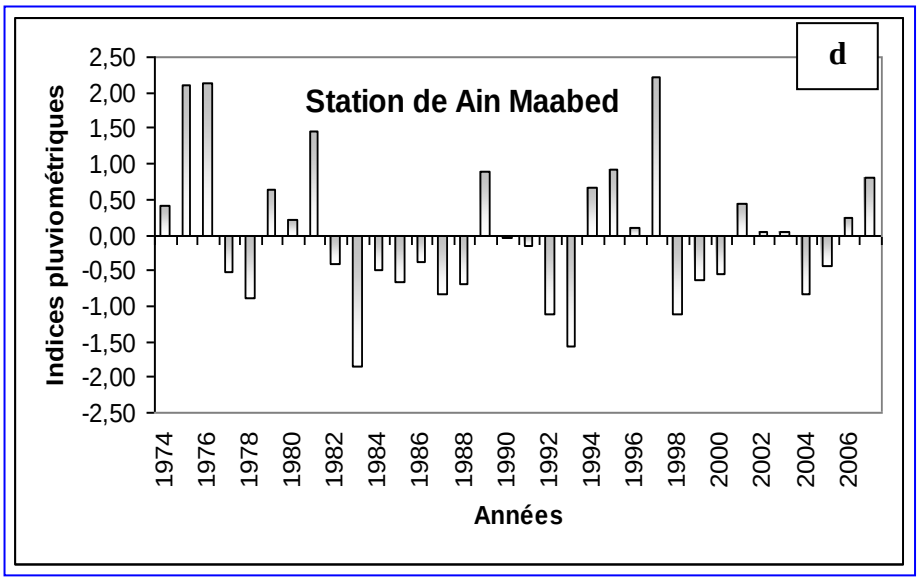


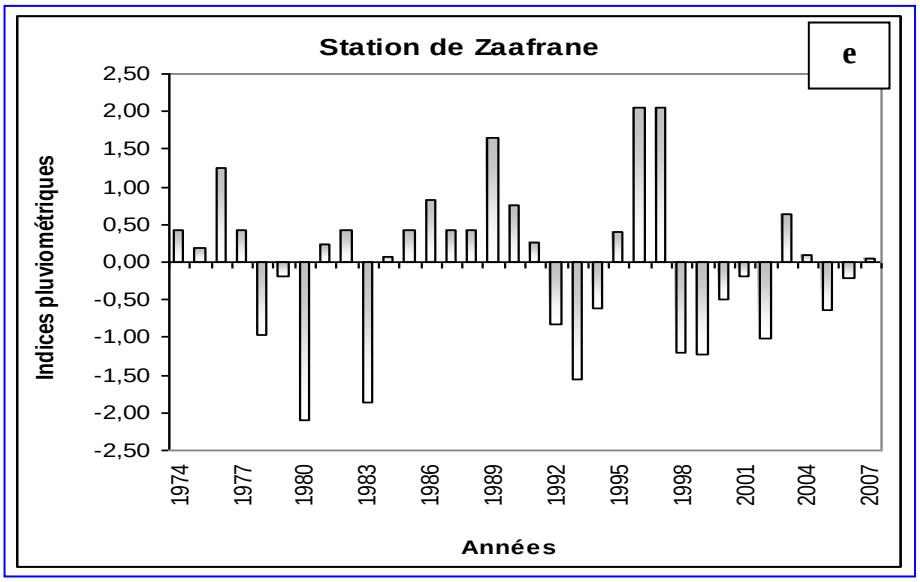
Figure 31 : Ajustement des précipitations annuelles des stations du bassin versant des Zahrez à la loi normale

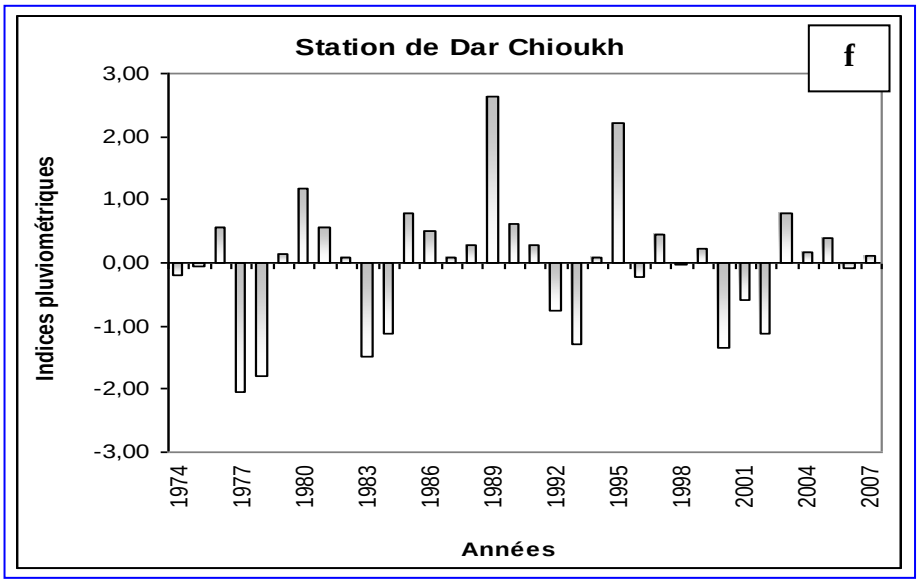

Station de Djelfa
a
Indices pluviométriques
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
-0,50
-1,00
-1,50
-2,00
-2,50
1974 1976 1978 1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006
Années


Station Rocher de sel
b
Indices pluviométriques
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
1974 1976 1978 1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006
Années


Station de Charef
c
Indices pluviométriques
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
-0,50
-1,00
-1,50
-2,00
1974 1976 1978 1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006
Années


d
Station de Ain Maabed
Indices pluviométriques
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
-0,50
-1,00
-1,50
-2,00
-2,50
1974 1976 1978 1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006
Années


e
Station de Zaafrane
Indices pluviométriques
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
-0,50
-1,00
-1,50
-2,00
-2,50
1974 1977 1980 1983 1986 1989 1992 1995 1998 2001 2004 2007
Années


f
Station de Dar Chioukh
Indices pluviométriques
3,00
2,00
1,00
0,00
-1,00
-2,00
-3,00
1974 1977 1980 1983 1986 1989 1992 1995 1998 2001 2004 2007
Années

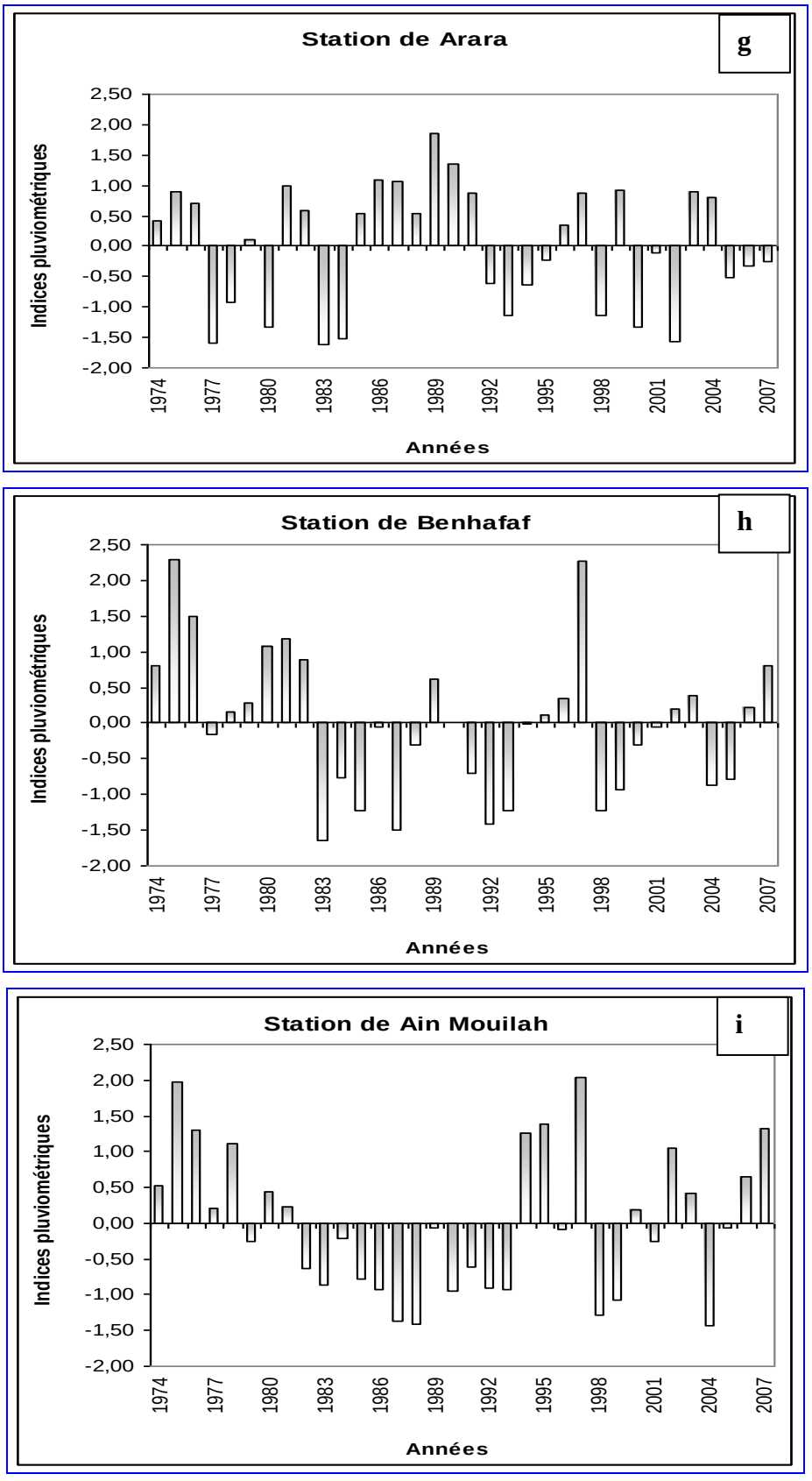
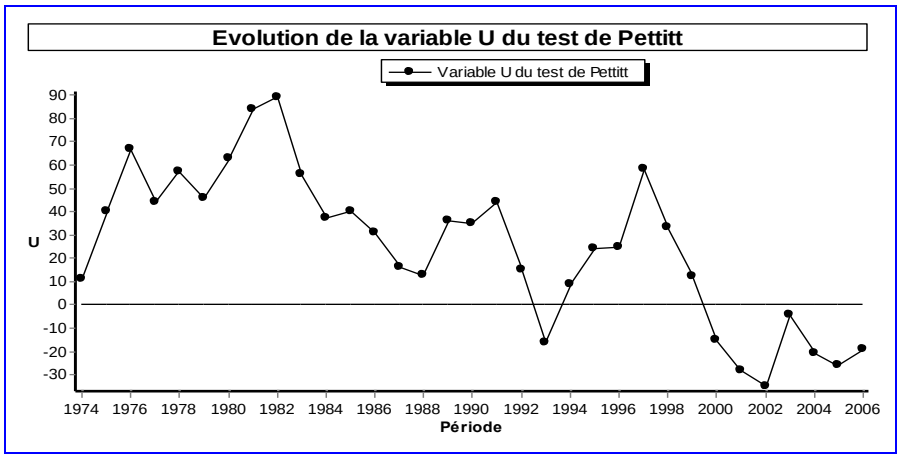


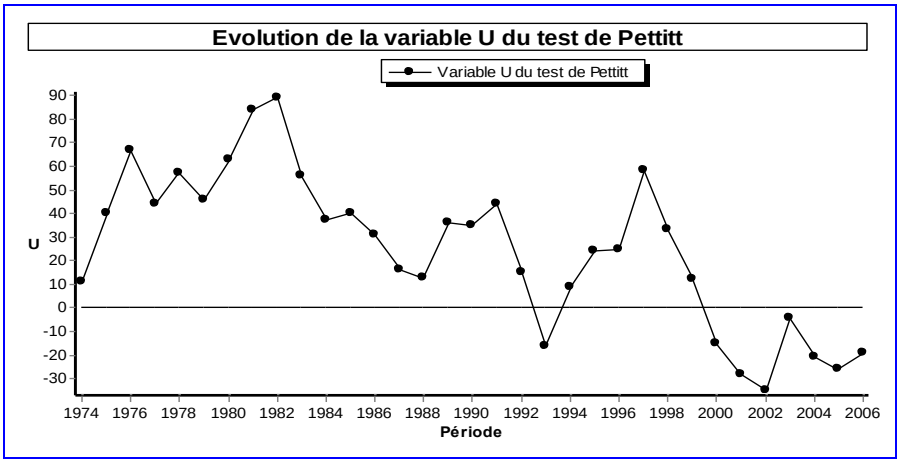
Figure 32: Évolution des Indices pluviométriques interannuelles dans le bassin des Zahrez Période (1974-2007).

1.4.5 Procédure de segmentation d'Hubert

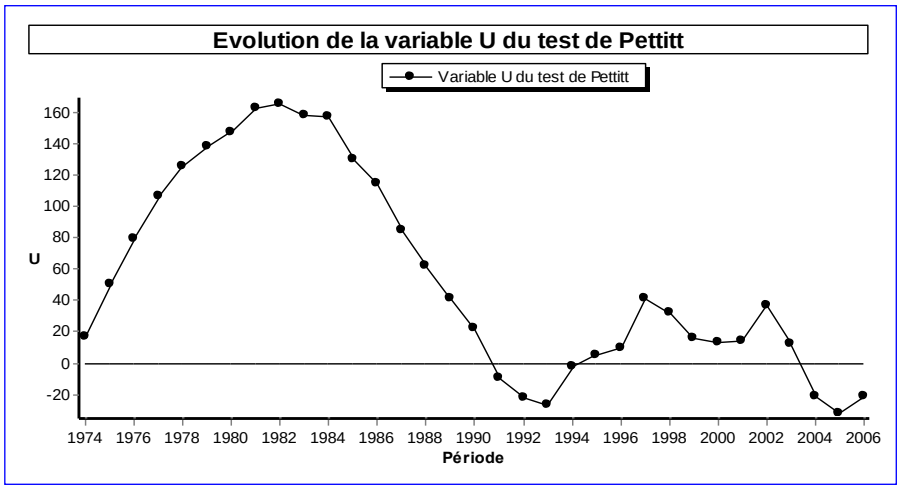
Les résultats de la procédure de segmentation de Hubert de la station de Charef (Tableau 26) proposent le découpage de la séries chronologiques des précipitations annuelles en deux segments : 1974-1981 et 1982-2007, avec une moyenne respectivement de 168,14 mm et 92,75 mm. Par ailleurs, on constate que l'application de cette procédure à la série pluviométrique de Benhafaf, a permis de détecter une rupture en 1982, permettant le découpage de la série chronologique en deux segments : 1974-1982 et 1983-2007, caractérisés par une moyenne respectivement de 269,08 mm et 149.30 mm (BOUTELDJAOUI, 2016). D'autre part les résultats de ce test statistique dont apparaître un point de rupture en 1976, sur la série des précipitations annuelles de Ain Maabed ; avec une moyenne respectivement de 283,43 mm (1974-1976) et 176,68 mm (1977-2007). Il est à signaler que les variations relatives de moyennes dans les séries pluviométriques de Charef, Benhafaf et Ain Maabed sont respectivement de -44,84 %, -44,51 % et -37,66 %.



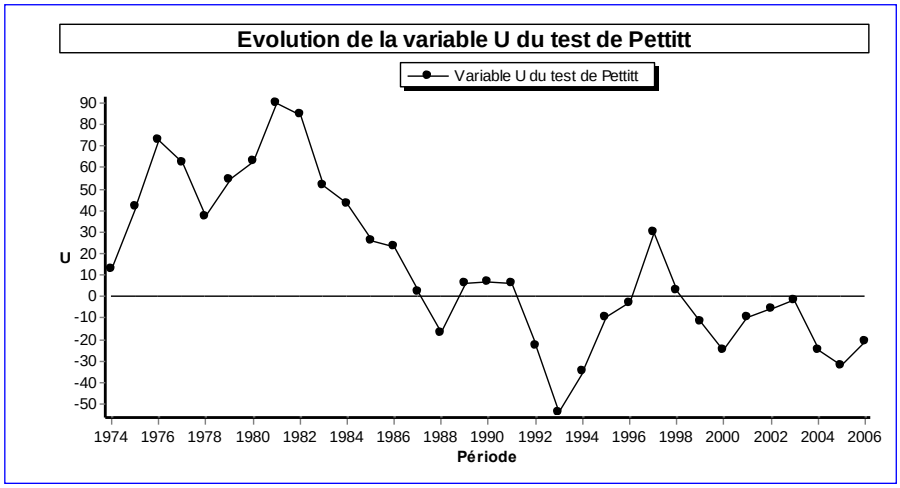
(a) Station de Djelfa



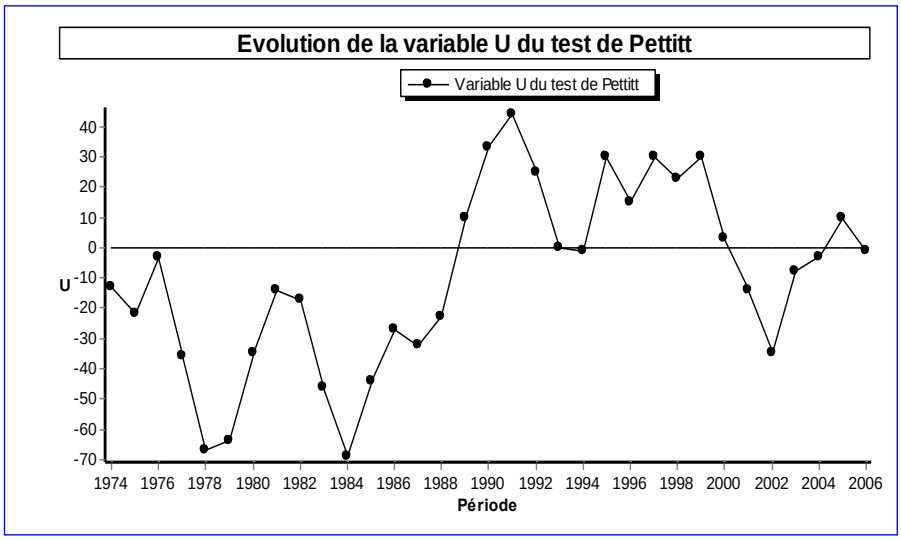
(b) Station de Rocher de sel



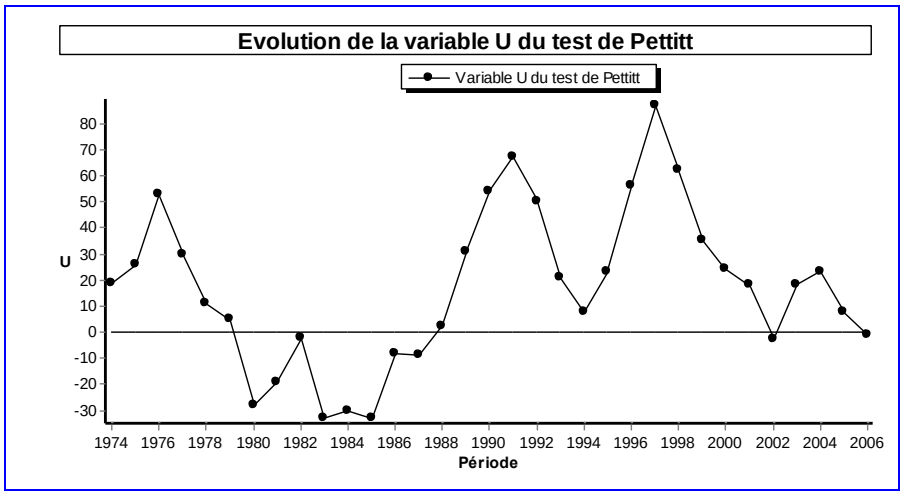
(c) Station de charef



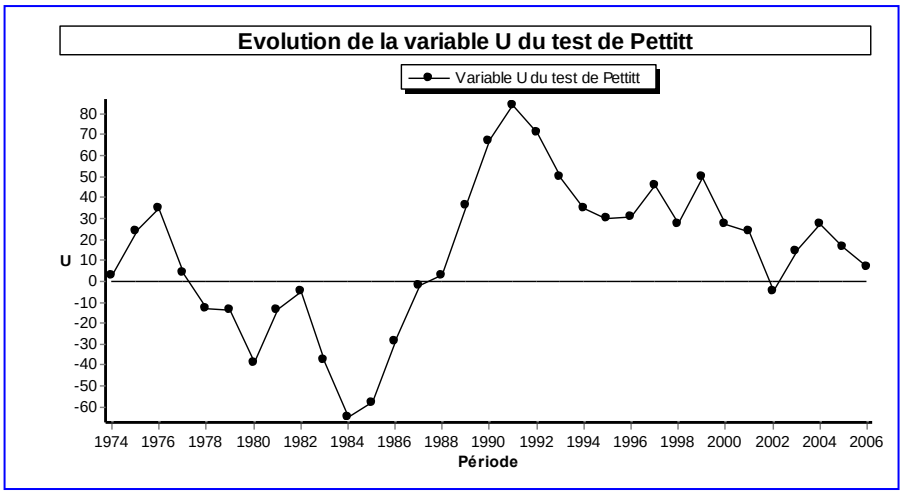
(d) Station de Ain Maabed



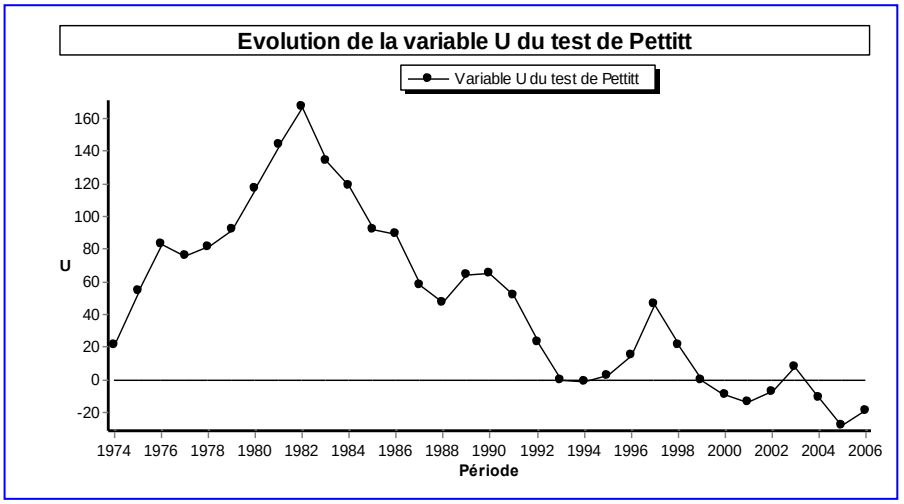
(e) Station de Dar Chioukh



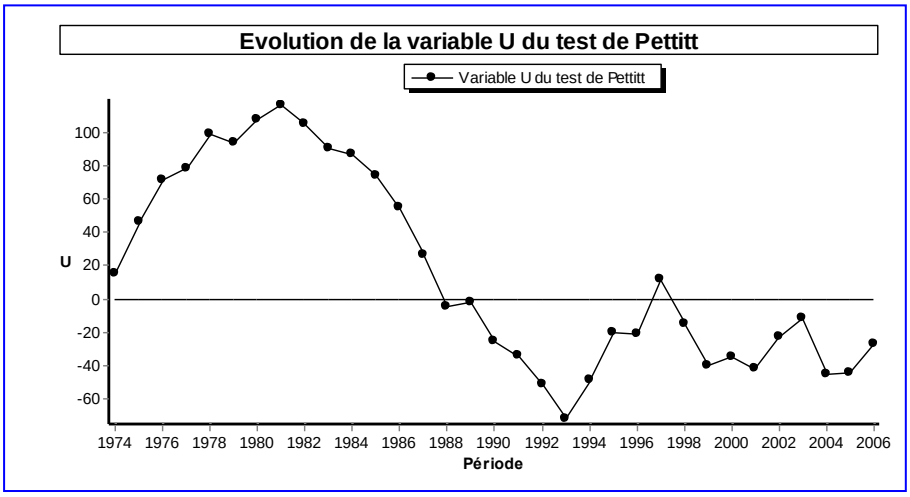
(f) Station de Zaafrane



(g) Station de Arara



(h) Station de Benhafaf



(i) Station de Ain Mouilah

Figure 33 : Évolution de la variable U du test de Pettitt des stations pluviométriques du bassin des Zahrez

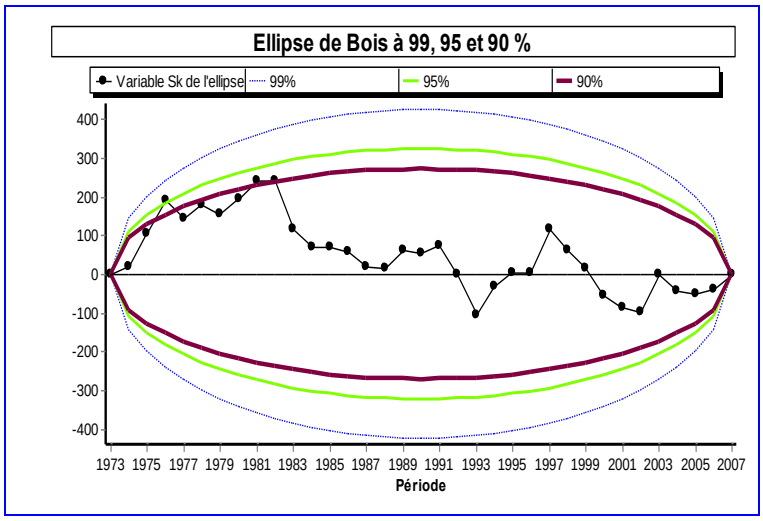
Tableau 26: Résultats de la procédure Segmentation de Hubert.

Station	Début	Fin	Moyenne	Ecart type	Variation relative des moyennes (%)
Charef	1974	1981	168,14	35,06	-44,84
	1982	2007	92,75	53,15	
Arara	1974	2007	128,30	75,09	-
Zaarfrane	1974	2007	199,31	59,44	-
Ain Mouilah	1974	2007	70,74	48,59	-
Benhafaf	1974	1982	269,08	73,50	-44,51
	1983	2007	149,30	87,65	
Dar chioukh	1974	2007	196,74	69,41	-
ONM Djelfa	1974	1997	342,66	77,22	
	1998	2007	258,10	66,20	
Rocher de sel	1974	2007	184,87	65,74	-
Ain Maabed	1974	1976	283,43	62,39	-37,66
	1977	2007	176,68	55,73	
Djelfa	1974	2007	169,42	56,41	

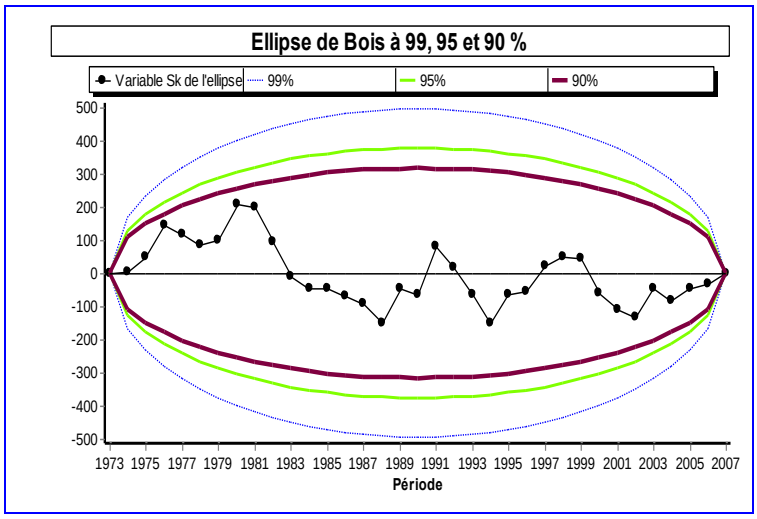
1.4.6 Ellipse de contrôle

Les résultats de l'ellipse de contrôle aux seuils de confiance de 99,95 et 99%, pour les neuf postes pluviométriques sont représentés sur la Figure 34. L'analyse de ces résultats permet de constater que les séries analysées présentent des ruptures avec un niveau de signification qui varie d'une série à l'autre. Sur l'ensemble de stations de cette étude les séries de données pluviométriques de Charef et Benhafaf présentent des ruptures plus ou moins significatives. La Figure 34 montre que l'hypothèse nulle d'absence de rupture est acceptée aux seuils de

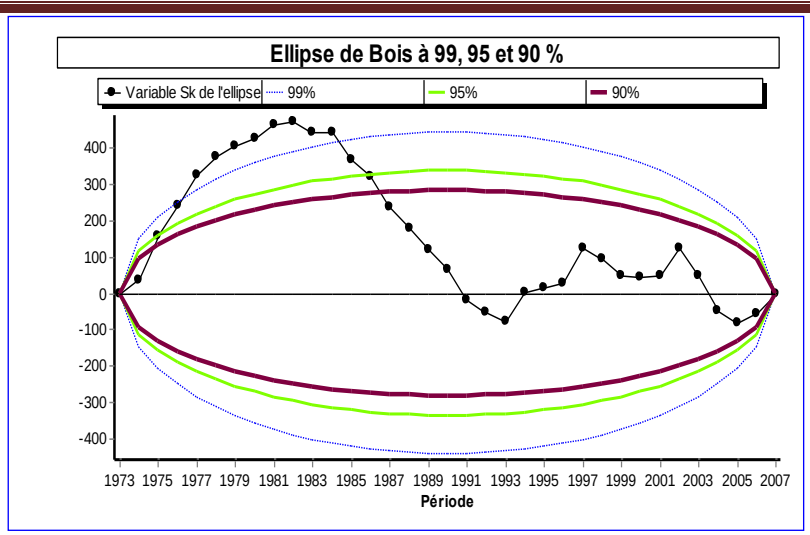
confiance de 99,95 et 90% pour les séries pluviométriques de Rocher de sel et Zaafrane. Par ailleurs les stations de Djelfa, Ain Maabed et Ain Mouilah présentent une rupture aux seuils de confiance de 95 et 90 % (BOUTELDJAOUI, 2016). Il est à signaler que les séries pluviométriques de charef et Benhafaf présentent une rupture importante aux seuils de confiance 99,95 et 99 %. La figure 7 illustre ce constat, de nombreux points sont hors de l'ellipse de Bois (BOUTELDJAOUI, 2016).



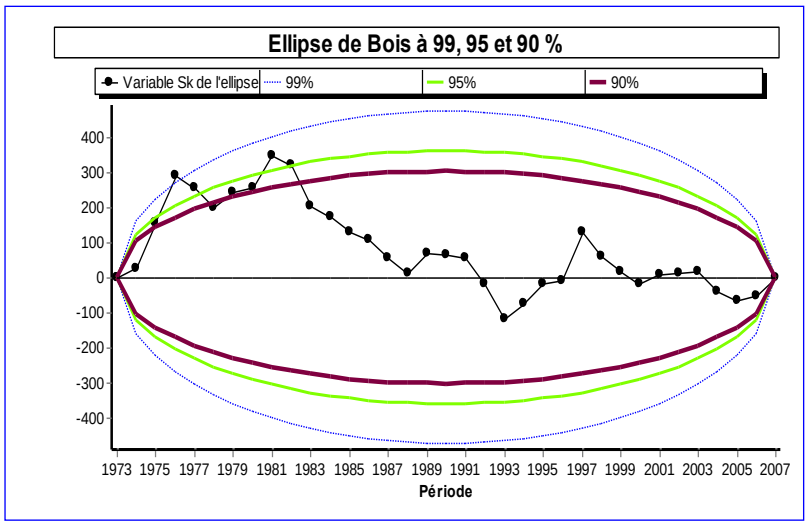
(a) Station de Djelfa



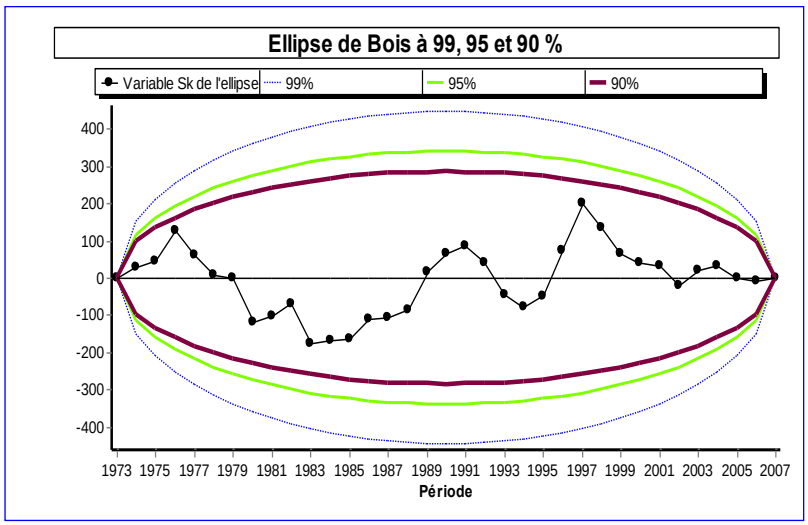
(b) Station Rocher de sel



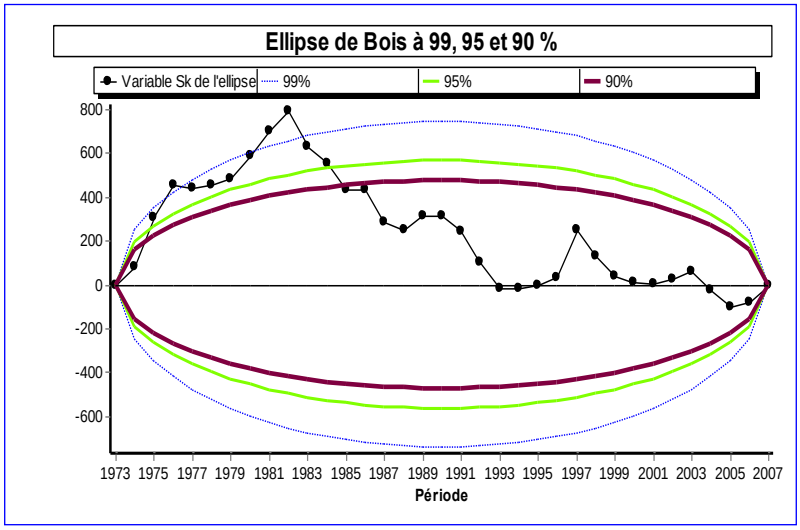
(c) Station de charef



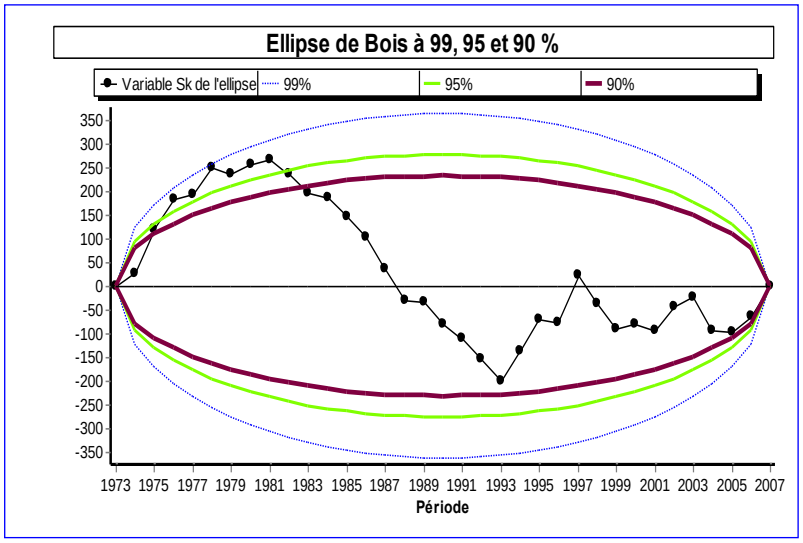
(d) Station de Ain Maabed



(e) Station de Zaafrane



(f) Station de Benhafaf



(g) Station de Ain Mouilah

Figure 34 : Ellipse de contrôle a 99,95 et 90 % pour les stations pluviométriques du bassin des Zahrez

1.5 Analyse statistique des données hydrométrique :

L'écoulement des oueds est caractérisé par un régime de crue présentant des débits maximums. Les crues sont considérées comme des évènements indépendants d'une année hydrologique à l'autre. L'étude statistique des données hydrométrique permet de déterminer les périodes de retour de crue qui est par ailleurs nécessaires pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et leur protection en cas de crue. Les données hydrologiques ont fait l'objet d'une étude statistique afin d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des débits qui permet de caractériser les régimes d'écoulement au sein du bassin versant des Zahrez.

1.5.1 Débits moyens mensuels interannuels

Les débits moyens mensuels enregistrés à la station de Medjedel durant pour la période (1988-2001) (Figure 35 et Tableau 26), montrent des débits maximums en septembre et décembre respectivement de 0,145 et 0,098 m^3/s. Les débits minimums sont observés en juillet (0,037 m^3/s), en Août (0,047 m^3/s) et en Avril (0,052 m^3/s).

1.5.2 Débits moyens annuels et interannuels

L'analyse des débits moyens annuels (Figure 36), montre que le débit moyen le plus important à la station de Medjedel a été enregistré en 2000 (0,13 m^3/s). Le minimum est observé en 1997(0,04 m^3/s) avec une moyenne de 0,076 m^3/s.

1.5.3 Ajustement statistique

En général pour un climat méditerranéen, les données hydrométriques à l'échelle annuelle ainsi qu'à l'échelle mensuelle ne suivent pas une loi normale, le plus souvent, on essaie d'ajuster les apports à une loi log–normale qui a la particularité d'être dissymétrique.

La loi log- normale est préconisée par certains hydrologues qui la justifient en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. En effet, le produit de r variables se ramène à la somme de r logarithmes de celle- ci. L'adéquation à la loi log normal a été testée par le test du χ^2 et celui de Smirnov-Kolmogorov et nous avons calculé les valeurs du quantile XT correspondant à des périodes de retour données au Tableau 27.

Tableau 27: Paramètres statistiques des débits moyens interannuels

Paramètres statistiques	Valeurs
Minimum	0,04
Maximum	0,13
Moyenne	0,076
Ecart-type	0,025
Médiane	0,07
Coefficient de variation (Cv)	0,33
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0,95
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2,50

Les débits moyens mensuels et annuels du bassin des Zahrez s'ajustement mieux à la loi Galton ou Log normale (méthode de maximum de vraisemblance) à un intervalle de confiance de 95 % (Figure 37 et 38).

Tableau 28 : Estimation des quantiles pour des périodes de retour données.

T	q	XT	Ecart-type
2	0,5	0,07	0,006
3	0,66	0,08	0,007
5	0,8	0,09	0,009
10	0,9	0,11	0,013
20	0,95	0,12	0,016
50	0,98	0,14	0,021
100	0,99	0,15	0,025
200	0,99	0,16	0,030
1000	0,99	0,19	0,041

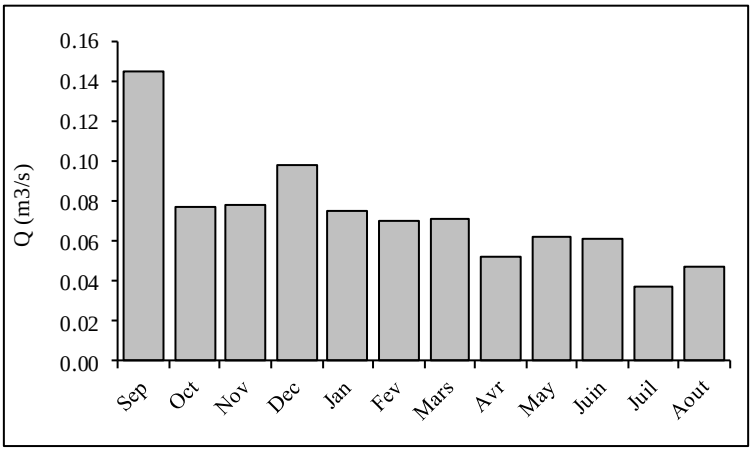


Figure 35 : Variations des débits moyens mensuels interannuelles de l'oued Medjedel

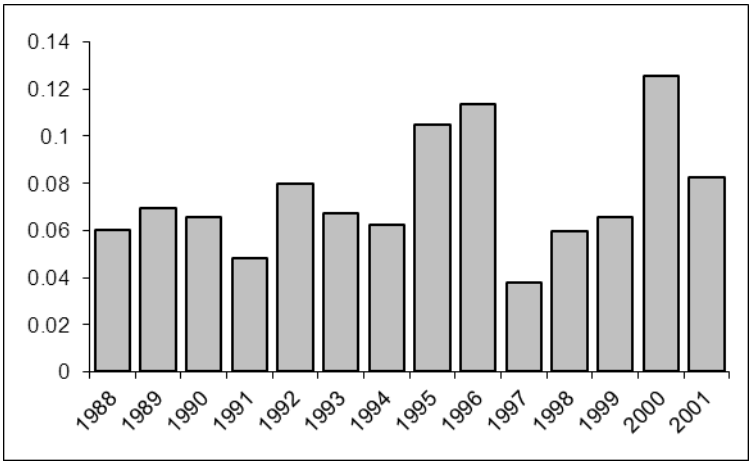


Figure 36 : Variations des débits moyens annuels de l'oued Medjedel

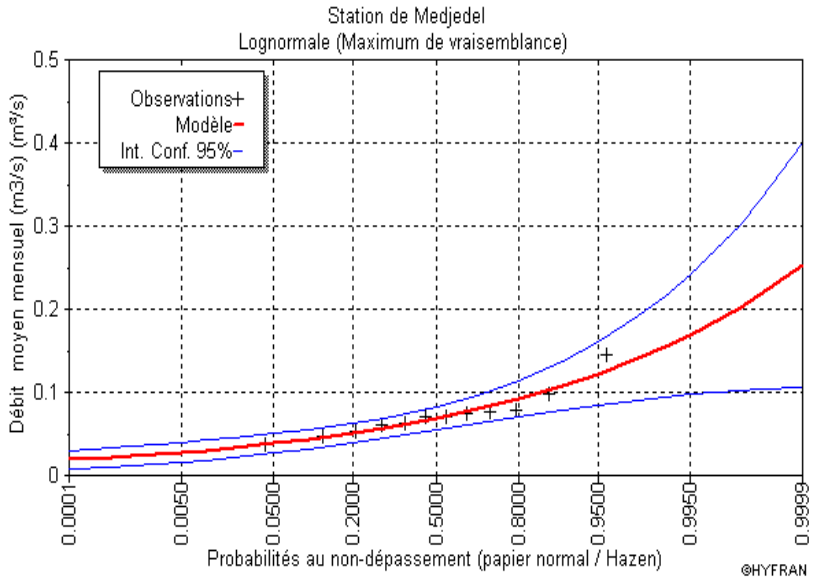


Figure 37 : Ajustement des débits moyens mensuels à la loi Log-normal

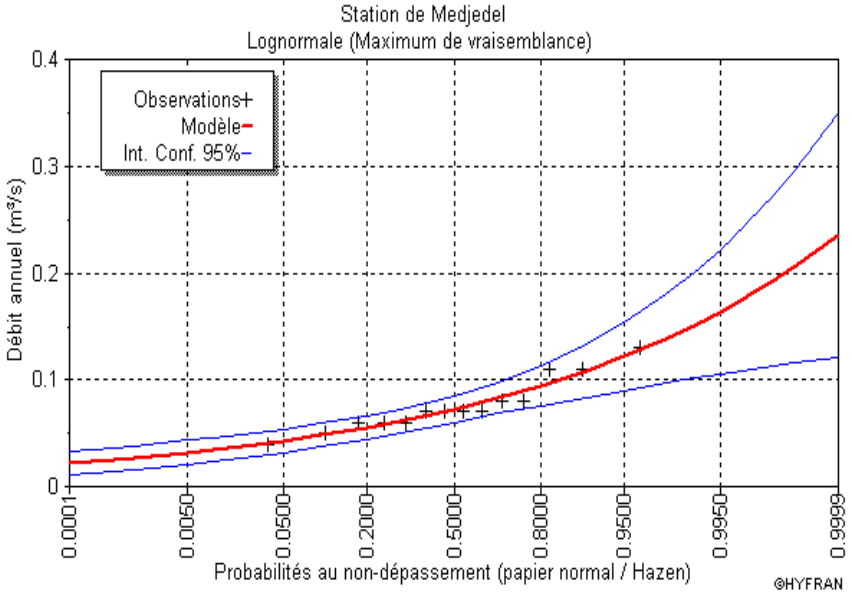


Figure 38 : Ajustement des débits moyens annuels à la loi Log-normal

1.6 Conclusion

L'analyse des séries de précipitations a permis de caractériser les principales manifestations de la variabilité climatique, observée depuis trois décennies au niveau du bassin versant des Zahrez. L'ensemble des résultats montre que pendant la période 1974–2007, plus de 60 % des postes pluviométriques retenus sont caractérisés par une succession de périodes d'excédents et de déficits pluviométriques. La première période de 1974 à 1982 et la deuxième période de 1983 à 2007. En effet, l'application du test de Pettitt, révèle la présence d'une rupture dans les séries pluviométriques des stations de Charef et Benhafaf en 1982. En outre, l'application de la procédure de segmentation de Hubert aux séries chronologiques de pluies sur la période 1974-2007 a permis d'identifier des ruptures

au cours des années 1981 (Charef), 1982 (Behafaf) et 1976 (Ain Maabed). Les ruptures identifiées au sein des séries pluviométriques dans le bassin versant des Zahrez coïncident avec celles de la plus part des stations pluviométriques en Algérie. L'analyse des chroniques de débits, sur la période (1988–2001) nous a permis d'obtenir quelques résultats concernant le régime des débits dans la zone d'étude. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés comme une base pour la mise en point d'une stratégie d'exploitation rationnelle des ressources en eau, pour faire face aux impacts des changements climatiques dans le bassin des Zahrez.

Chapitre 02 :

Caractérisation hydrodynamique du système aquifère

2.1 Introduction

Le but de cette partie est la détermination des caractéristiques hydrodynamiques par le biais des pompages d'essais, réalisés dans la région par la Direction d'Hydraulique et l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de la wilaya de Djelfa. Les paramètres hydrodynamiques disponibles sur la zone d'étude sont les débits spécifiques et les transmissivités. Nous ne disposons pas des mesures de perméabilité (absence de piézomètres d'observation).

2.2 Détermination des caractéristiques hydrodynamiques

Les équations utilisées pour le traitement analytique des essais de pompage sont des relations donnant le rabattement en fonction du débit et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Les essais de pompage interprétés sont des essais de longue durée comprenant des mesures de la descente et de la remontée du niveau dynamique. La plupart des mesures sont relevées dans les puits ou forages pompés.

2.2.1 Les essais par paliers

Ce type d'essai dit de puits, ne permet pas d'obtenir une valeur représentative de la transmissivité de l'aquifère capté. En effet, les durées de pompage trop courtes ne permettent pas de mobiliser un volume d'aquifère suffisant. La transmissivité calculée à partir de ce type d'essai correspond donc à une « transmissivité ponctuelle » (CASTANY, 1982). Cette approche a été abordée afin de combler les lacunes de valeurs de transmissivités et d'avoir une comparaison avec la méthode de corrélation qui sera présentée par la suite.

L'estimation de la transmissivité se fait en interprétant la courbe de remontée de l'eau dans l'ouvrage, après arrêt du dernier palier de pompage à condition que les couples expérimentaux (t/t', s) tracés sur un papier semi-logarithmique s'alignent sur une droite. Deux types d'essai par paliers ont été réalisés :

- Essai à débits multiples avec remontée à chaque cycle,
- Essai à débits multiples sans remontée.

a) Essai à débits multiples avec remontée à chaque cycle

Dans ce cas de pompages par paliers non enchaînés, un temps d'observation de la remontée du niveau de l'eau est respecté après chaque palier. Ce temps de repos est d'une durée au moins égale à celle du palier de pompage de manière à retrouver approximativement le niveau d'eau initial dans le forage. Le nombre de paliers va de 3 à 5 suivant l'importance du débit et la durée varie de 45 à 60 minutes (CASTANY, 1982).

b) Essai à débits multiples sans remontée

Dans ce cas, les pompages sont enchaînés sans interruption avec une seule remontée en fin d'essai. L'interprétation se fait de la même façon que celle des essais par paliers de débits non enchaînés, mais en utilisant les rabattements corrigés. Chacun des paliers ayant une influence sur les rabattements des paliers suivants, une correction s'avère nécessaire afin d'obtenir des rabattements comparables entre eux. Pour les ouvrages dont le débit est faible (≈ 2 m3/h), il est exécuté un ou deux paliers uniquement avec des temps de pompage suffisamment longs (environ 180 minutes) afin d'effacer l'effet de capacité CASTANY, 1982).

2.2.2 Pompage de longue durée

Les paramètres hydrodynamiques (T et S) sont déterminés à partir de pompages d'essai de longue durée (72 heures) à débit constant (CASTANY, 1982).

En régime transitoire, le rabattement en tout point de la nappe, est donné par la formule de Theis (CASTANY, 1982):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) ; \; u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Avec Q : le débit (m^3/s)

T : la transmissivité (m^2/s)

R : la distance du point considéré à l'axe du puits de pompage (m)

S : le coefficient d'emmagasinement (adimensionnel)

T : la durée du pompage (s)

W(u) une fonction connue et tabulée

Lorsque t devient suffisamment grand $t > \frac{100 r^2 S}{4T}$, cette équation admet une approximation logarithmique appelée approximation de Jacob :

$$s = \frac{0{,}183Q}{T} \log\left[\frac{2{,}25Tt}{r^2 S}\right]$$

Les couples expérimentaux (s, t) portés sur un papier semi-logarithmique, permettent de déterminer T ou T et S selon que le suivi a lieu dans le puits de pompage ou un piézomètre.

Après développement, on obtient l'expression :

$$s = \frac{0{,}183Q}{T} \log t + \frac{0{,}183Q}{T} \log \frac{2{,}25Tt}{r^2 S}$$

C'est l'équation d'une droite de la forme : y = ax + b, avec :

$$\begin{cases} y = s & a = \dfrac{0{,}183Q}{T} \\ x = \log t & b = \dfrac{0{,}183Q}{T} \log \dfrac{2{,}25T}{r^2 S} \end{cases}$$

On reporte sur un papier semi-logarithmique les valeurs mesurées sur le terrain, en abscisses les logs des temps et en ordonnées les rabattements correspondant [s = f (logt)].

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative qui est déterminée par l'accroissement des rabattements, à l'aide d'un module logarithmique, noté «a». La transmissivité est calculée par l'expression :

$$T \frac{0{,}183Q}{a}$$

2.2.3 Transmissivité

La transmissivité d'un aquifère est un paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule d'un aquifère par unité de largeur, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Elle renseigne sur la capacité productive de l'aquifère. Elle est calculée en fonction de son coefficient de perméabilité (K) et de son épaisseur (e) et s'exprime en m^2/s.

Les valeurs de transmissivité ont été déterminées à partir de pompages d'essai de durée allant de 24 heures à 60 heures ; effectuées après l'exécution de chaque forage dans la région d'étude ; nous disposons d'une trentaine de pompages d'essai réalisés dans le cadre des programmes d'hydraulique par la direction d'hydraulique de Djelfa (Annexe 4). L'interprétation des données a abouti aux paramètres hydrodynamiques (Figure 39). Notons que la répartition des forages est très hétérogène sur le plan lithologique. Ce qui rend difficile la généralisation de l'information hydrodynamique acquise. En effet, les paramètres hydrodynamiques obtenus sont à caractère très localisé et de ce fait ne peuvent être généralisés à l'ensemble de l'aquifère capté par les ouvrages testés.

A partir des données existantes, obtenues par interprétation des essais de pompage effectués sur les forages implantés dans la zone d'étude, on peut remarquer que les valeurs de transmissivité sont très variables.

Elles sont comprises entre $2{,}17.10^{-5}$ et $1{,}05.10^{-1}$ m^2/s. La valeur moyenne est de $1{,}17.10^{-2}$ avec un écart type de $2{,}01.10^{-2}$.

La répartition statistique des valeurs (Figure 40) est dissymétrique, avec une dominance de valeurs inférieures à $8\ 10^{-3}$ m^2/s (67 %). Il est à signaler que les valeurs les plus fortes s'observent au niveau des forages captant le turonien (HB1, HB2, HB3, HB4, F2 El Guedid et F11 Djelfa), avec des transmissivités variant entre $1{,}2\ 10^{-2}$ et $1{,}05\ 10^{-1}$ m^2/s. D' autre part, les

forages captant le quaternaire (F1 Sidi Baizid, Z1 Zaafrane et Hassi El Mora) sont caractérisées par de très faibles valeurs de transmissivités, comprises entre 2,17 10^{-5} et 5,54 10^{-4} m^2/s. La grande dispersion des valeurs des différents paramètres hydrodynamiques provient de l'importante hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés au niveau de chaque niveau aquifère (Tableau 4.1, Annexe 4).

2.3 Relation débit spécifique et transmissivité

Le débit spécifique est l'un des paramètres hydrauliques dont la mesure est facile sur un ouvrage, il est le rapport du débit de pompage (Q) sur le rabattement observé (s) dans le puits.
La couverture spatiale des informations hydrodynamiques n'étant pas optimale (une trentaine de valeurs pour une si grande superficie), les débits spécifiques ont été utilisées afin d'estimer les transmissivités des zones dépourvues. En effet ces deux paramètres semblent être corrélés (SHAKEEL, 1987).
Pour justifier la détermination de la transmissivité sur la base des données de débits spécifiques, il est nécessaire de comprendre que la transmissivité est proportionnelle au débit spécifique d'un puits selon l'équation de Dupuit-Thiem pour les aquifères non confinés et selon l'équation de Theis pour les aquifères confinés (SHAKEEL, 1987).
Les points de mesures communs aux deux paramètres ont donc servi à établir ces corrélations.
Pour les propriétés physiques et hydrodynamiques (notamment la transmissivité et le débit spécifique), il est admis que leurs lois de probabilité suivent généralement une loi log normale (BANTON et BANGOY, 1997). Par conséquent, une transformation logarithmique peut être appliquée à ces deux variables. On rappelle que le débit spécifique est donné par la pente moyenne de la courbe débit (Q) en fonction du rabattement (s).
En régime permanent, le débit dans un puits peut être exprimé en fonction du rabattement par la relation :

$$\text{En nappe captive : } Q = \frac{2\pi T}{\ln(R / r_0)} (h_i - h)$$

$$\text{En nappe libre : } Q = \frac{\pi k}{\ln(R / r_0)} (h_i^2 - h^2)$$

Où h_i et h sont les niveaux piézométriques initiales et stabilisés respectivement, r_0 le rayon du puits, R le rayon d'action, T la transmissivité et k la conductivité hydraulique.
Les débits spécifiques estimés des forages sur la zone d'étude (Tableau 29 et Figure 41) varient entre 0,03 l/s/m et 33,93 l/s/m, avec une moyenne de 3,95 l/s/m.

Il est à signaler que la répartition des débits spécifiques présente une dispersion assez élevée, avec un écart type de 7,11 et un cœfficient de variation de 1,80. Par ailleurs les résultats de corrélations entre le débit spécifique (Qs) et la transmissivité montrent qu'une bonne corrélation existe entre ces deux paramètres, avec un cœfficient de corrélation de 0,91 (Figure 42).

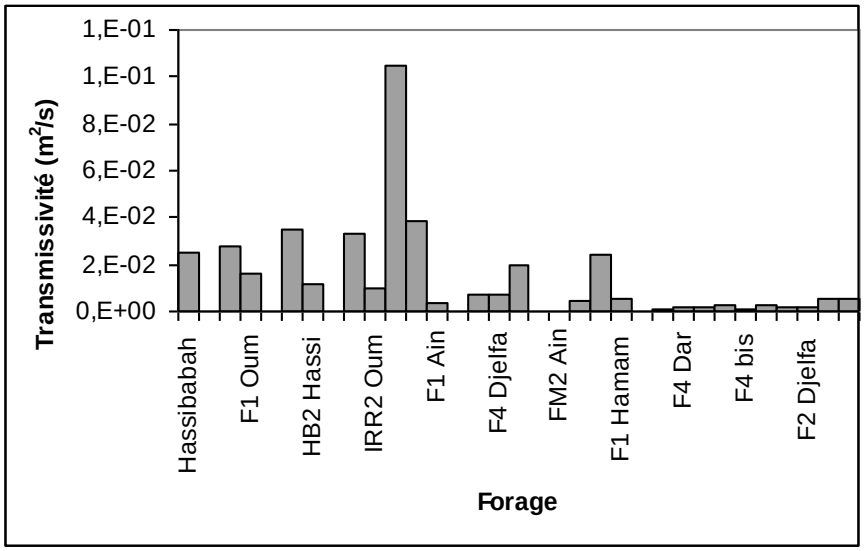


Figure 39 : Transmissivité estimées par les pompages d'essai des différents forages.

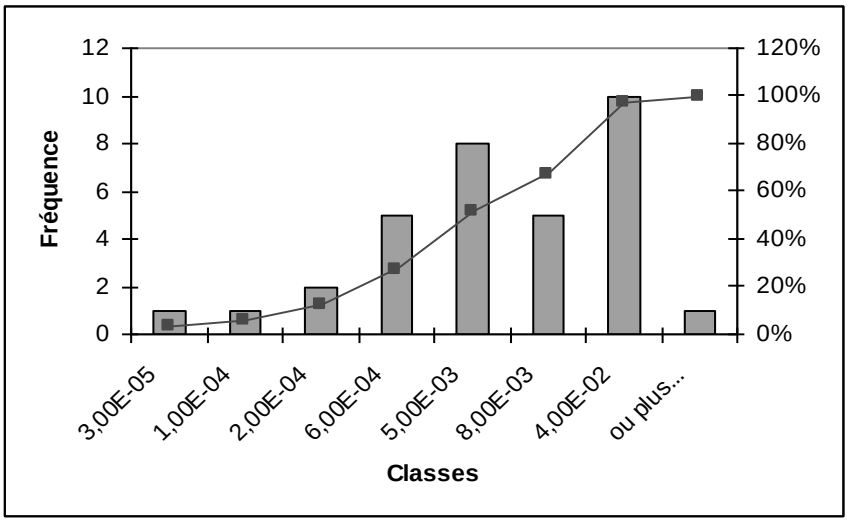


Figure 40 : Distribution des valeurs de transmissivité du système aquifère de bassin versant des Zahrez.

Tableau 29: Statistiques des valeurs de transmissivités et des débits spécifiques

Paramètre	T (m^2/s)	Qs (l/s/m)
Moyenne	0,01173	3,95
Médiane	0,00390	1,06
Écart-type	0,02010	7,11
Minimum	0,00002	0,03
Maximum	0,10520	33,93
Coefficient d'asymétrie	3,34776	3,01
Coefficient de variation	1,71294	1,80

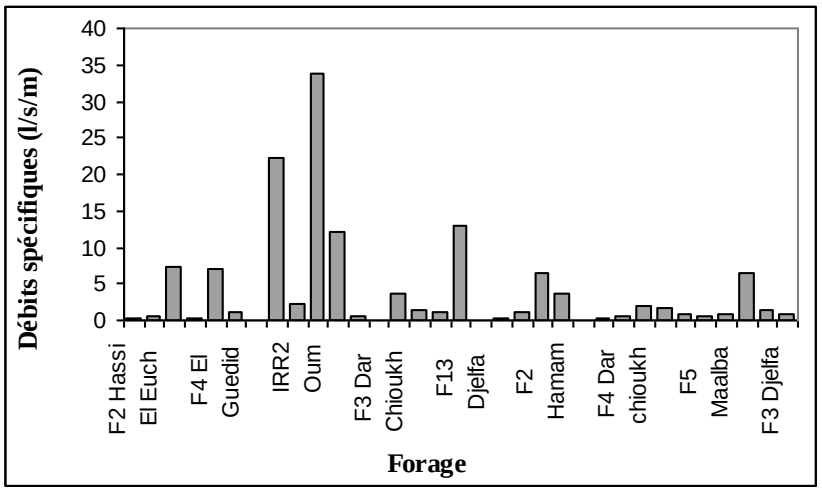


Figure 41 : Valeurs du débit spécifique des différents forages

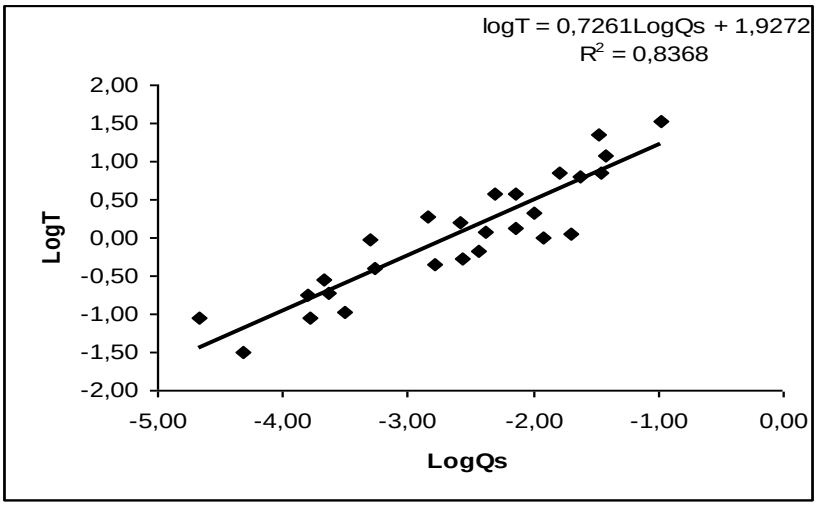


Figure 42 : Corrélation LogT-LOgQs (bassin versant des Zahrez)

2.4 Étude piézométrique

La piézométrie est fournie par la base de données hydrogéologique rassemblant les informations techniques sur les points d'eau du réseau de surveillance piézométrique installés par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH).

Pour nos compagnes piézométriques, nous avons sélectionné une soixantaine d'ouvrages représentatifs, où nous possédons le maximum de données, autorisant le suivi de l'évolution piézométrique dans le bassin versant des Zahrez. Il est à signaler que les données piézométriques interprétées dans cette partie sont les mesures saisonnières faites en Janvier, Avril, Mai, octobre et Novembre, pendant la période allant de Janvier 1994 au Mois d'octobre 2010.

La Figure 43 illustre la répartition spatiale des ouvrages du réseau piézométrique

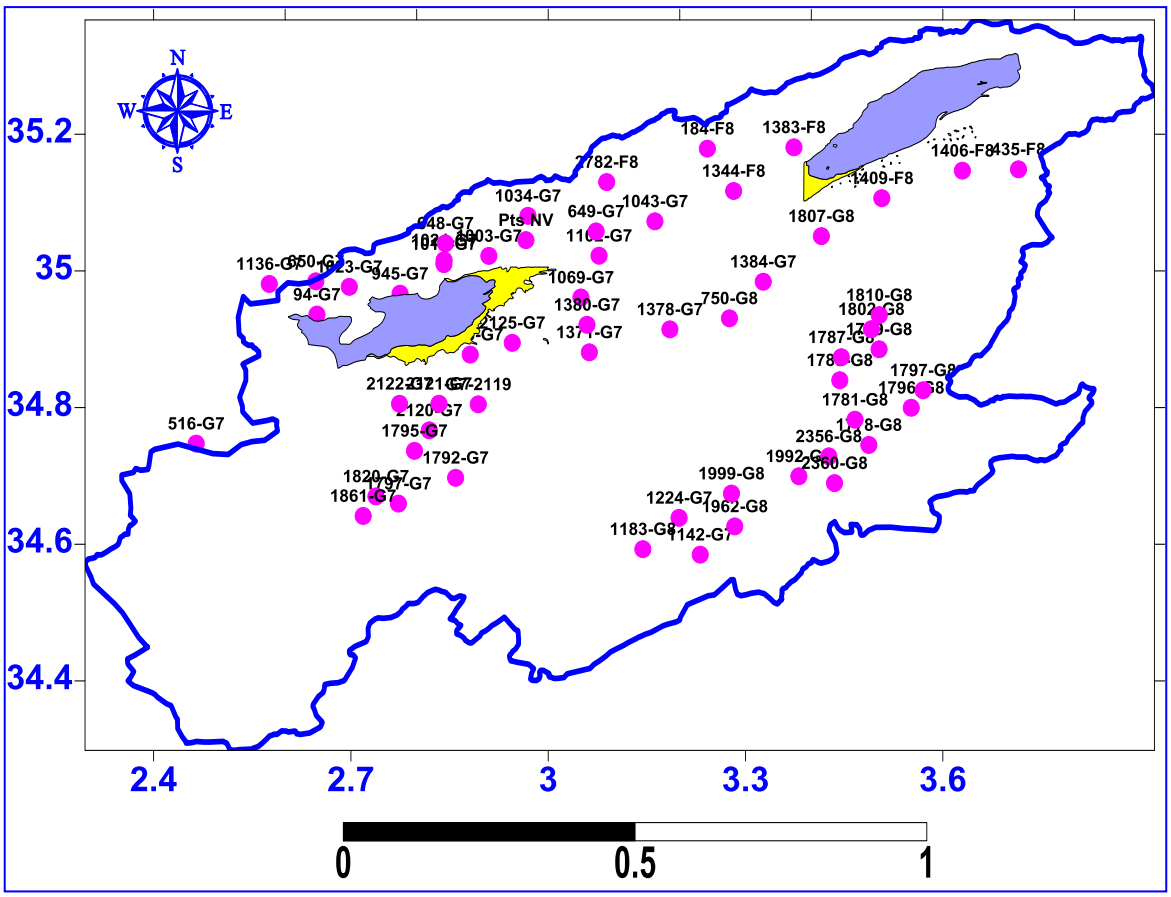


Figure 43 : Carte du réseau de suivi piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez

2.4.1 - Variation temporelle de la piézométrie

Les chroniques piézométriques permettent d'observer le niveau d'eau et d'en interpoler les tendances (hausse, baisse, stabilisation) d'évolution d'une nappe en un point et à un instant donné. Cette évolution du niveau du plan d'eau résulte de la variation des précipitations, des volumes d'exploitation, des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, ainsi que des apports des eaux de surface. Afin de mieux cerner l'évolution temporelle de la piézométrie du secteur d'étude, nous avons procédé à une démarche en deux étapes. La première étape

consiste en l'étude et l'analyse des fluctuations piézométriques des différents points du réseau piézométrique couvrant une bonne partie du bassin versant des Zahrez pendant des période plus au moins longues. La deuxième étape consiste à l'élaboration des cartes piézométriques en période de hautes et de basses eaux.

2.4.1.1 Évolution de la piézométrie (1994-2010)

a) Premier groupe

Dans ce paragraphe, nous présenterons les résultats du suivi des évolutions piézométriques de quelques ouvrages du premier groupe, localisés dans la partie Est du basin des Zahrez. Le but de cette étude est de mettre en valeur la différence des réponses piézométriques d'un ensemble d'ouvrages situés dans la même zone. Dans la Figure 44, nous avons illustré les résultats soulignant l'évolution piézométrique. L'analyse de ces graphes nous montre que durant la période d'étude (Janvier 1994–Avril 2010) les évolutions piézométriques de tous les ouvrages ont des allures comparables avec seulement des différences dans les amplitudes de variations. Cependant, une variation remarquable du niveau piézométrique est enregistrée dans l'ouvrage 1142 où le niveau piézométrique est le plus important, entre 1155 et 1169 m. Une variation moins marquée pour les ouvrages 1810-G8 et 1992-G8 où la cote piézométrique oscille entre 1073 et 1142 m. Les chroniques piézométriques de l'ouvrage 1962-G8 ne montre qu'une légère évolution de son niveau piézométrique durant toute la période de suivi (BOUTELDJAOUI et al., 2016). Il est à noter que les piézomètres 1810-G8 et 1992-G8 sont fortement influencés par les pompages car on observe plusieurs basses et hautes eaux pendant toute la période d'observation.

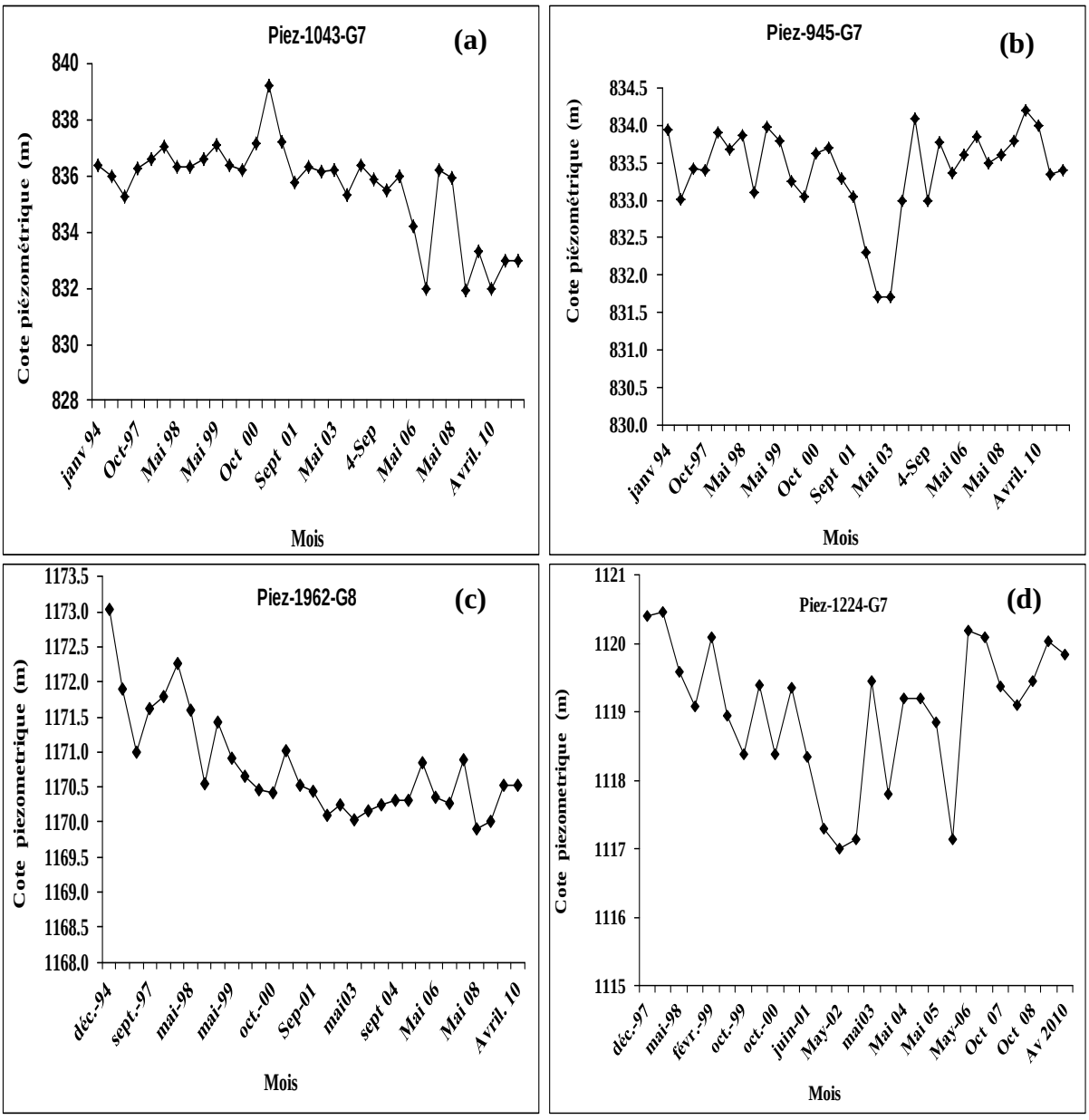
b) Deuxième groupe

Sur la figure (Figure 44), nous présentons les évolutions piézométriques de quelques ouvrages appartenant au deuxième groupe. En d'autre terme, l'évolution des niveaux piézométriques durant la période Janvier 1994 - Avril 2010. Les piézomètres de ce groupe se localisent dans la partie Ouest de la zone d'étude. L'analyse des résultats illustrés sur la figure ci-dessus montre une allure générale identique des évolutions piézométriques pour tous les ouvrages (BOUTELDJAOUI et al., 2016). Parmi les piézomètres pris en considération, seulement deux d'entre eux (2120-G7et le 1043-G7) ont enregistré une évolution importante de leurs niveaux où la cote piézométrique oscille entre 832 et 904 m durant toute la période de suivi.

Les différences de variations piézométriques de ces ouvrages sont dues à plusieurs phénomènes. En effet, ces variations sont multiples et liées essentiellement aux

caractéristiques des ouvrages, de la géométrie locale de l'aquifère, à des causes artificielles et à des phénomènes naturels qui peuvent être classés en deux groupes :

Les variations naturelles et les variations artificielles. Parmi les variations naturelles, nous distinguerons les fluctuations saisonnières réparties sur l'ensemble d'une année. En effet, les nappes passent par un maximum qui apparaît en général entre mars et mai et un minimum qui se situe en fin d'année. Il peut parfois être légèrement avancé (Novembre) ou reculé (Janvier). Certaines variations piézométriques présentent un caractère cyclique se répartissant sur plusieurs années groupées. Parmi les causes artificielles, nous distinguerons essentiellement les pompages, parfois intensifs, dans les zones agricoles.



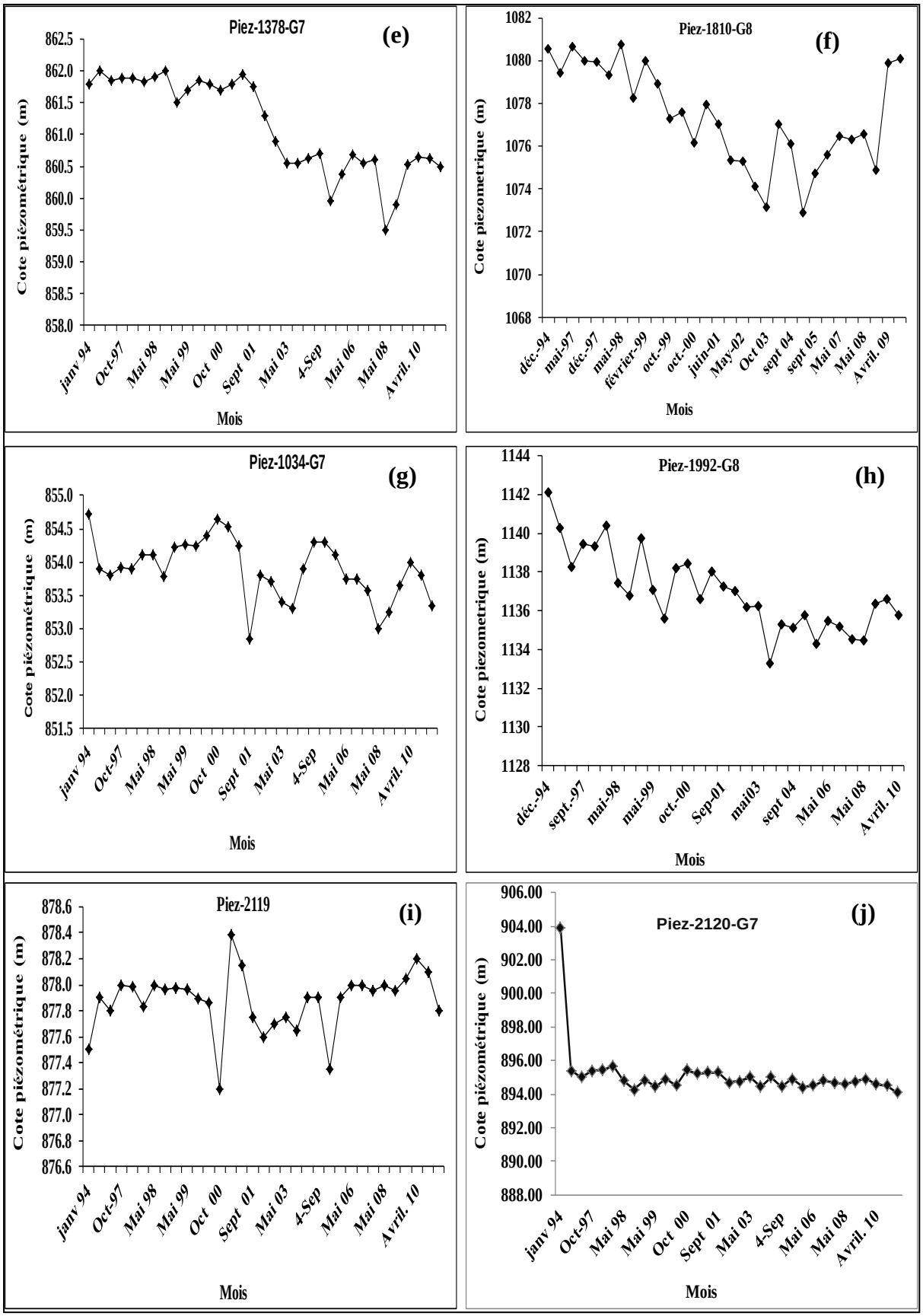


Figure 44 : Evolutions piézométriques de la nappe (Mio-Plio-Quaternaire) du bassin versant des Zahrez, de Janvier 1994 à Avril 2010.

2.4.2 Variation spatiale de la piézométrie

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers nous renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche. Comme les eaux souterraines représentent le moyen de transport des substances minérales et organiques, la détermination de leur itinéraire renseigne sur leur minéralisation et l'origine de leur pollution.

La cartographie piézométrique a été obtenue en tenant compte de la topographie et des relevés piézométriques des différentes campagnes, après interpolation des données de terrain par la méthode du krigeage développé par Matheron (1962), en utilisant le logiciel Surfer 9 **(**MATHERON, 1962).

2.4.2.1 Interprétation des cartes piézométriques

a) Carte piézométrique Mai 2002 :

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique des hautes eaux (Mai 2002) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant une direction du Sud-Ouest vers le Nord-Ouest dans la partie ouest du basin (Zahrez gharbi), tandis que dans la partie est du basin l'écoulement général des eaux souterraines de la nappe se produit du Sud-Est vers le Nord-Est (Zahrez chergui) (Figure V.7a). La cote piézométrique s'établit entre 760 et 1160 m. Les cotes piézométriques maximales (1000-1160) sont localisées au niveau de la partie Sud du bassin, tandis que les cotes piézométriques minimales (760-840 m) se retrouvent au niveau de la partie Nord-Est du basin (Zahrez chergui) (BOUTELDJAOUI et al., 2016).

Dans la zone centrale de la nappe, les courbes isopièzes sont resserrées, indiquant un gradient hydraulique de l'ordre de 0,003. Dans la zone Nord, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique de l'ordre de 0,001, ce qui indique une bonne perméabilité et/ou un faible flux.

b) Carte piézométrique Octobre 2002 :

Cette carte piézométrique correspond à la période des basses eaux (Figure 45). Elle possède la même morphologie piézométrique que la carte précédente, ce qui traduit le même régime d'écoulement. Le niveau piézométrique de la nappe varie de 770 m (en Nord-Est) à 1226 m au Sud du bassin.

c) Carte piézométrique Mai 2010 :

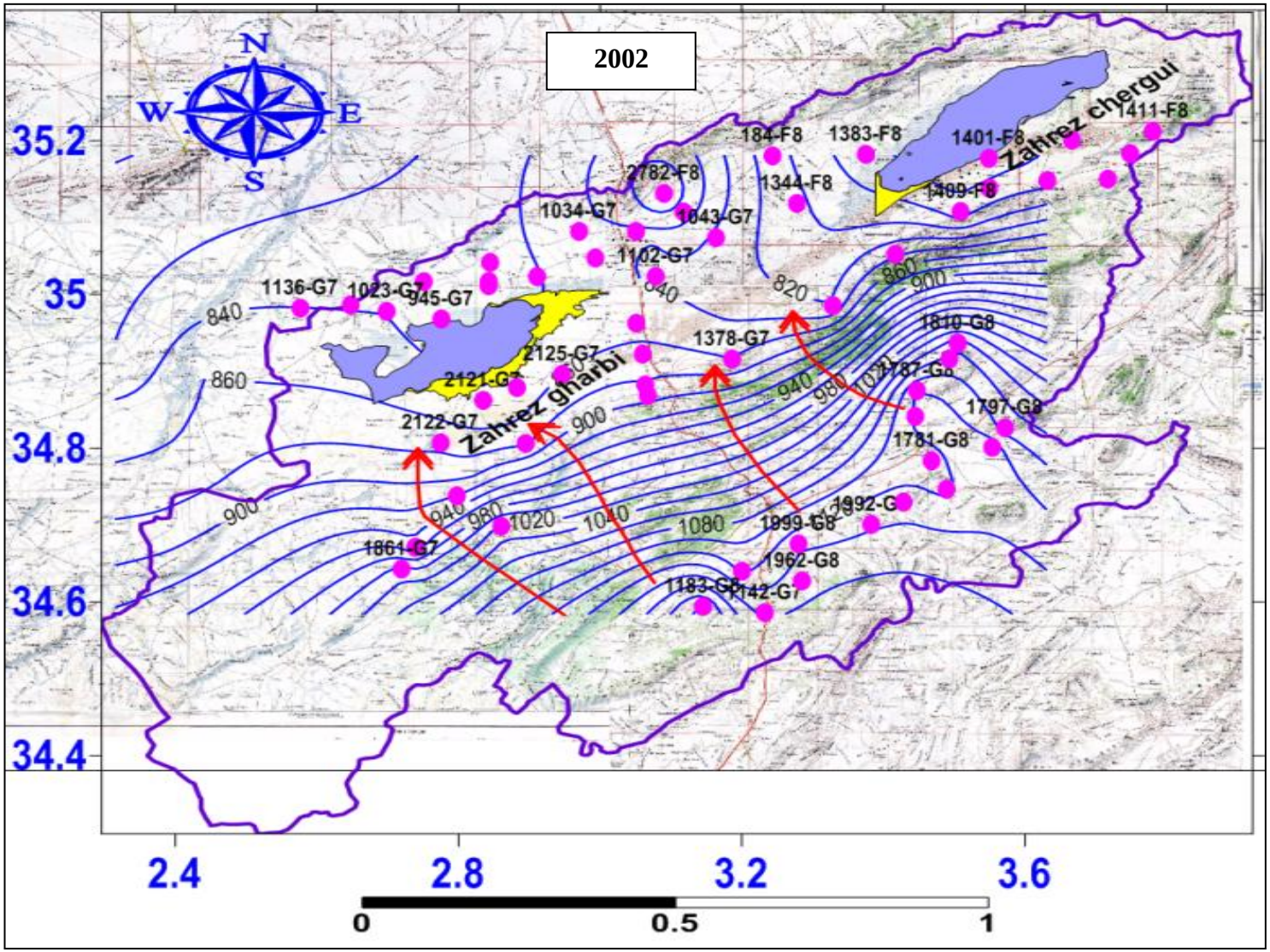
L'analyse de cette carte (Figure 45) révèle un changement de l'allure des courbes isopièzes, ainsi que le sens d'écoulement dans la partie située au Nord-Est du bassin, ceci pourrait être dû à l'accroissement des pompages d'eau pour l'AEP de la Ville de Djelfa. Le niveau piézométrique de la nappe atteint 759 m au Nord-Est, et 1224,80 m au Sud du bassin.

d) Carte piézométrique Octobre 2010 :

L'examen de la carte piézométrique ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie ou de l'allure des courbes piézométriques par rapport à la carte précédente, traduisant ainsi le même régime d'écoulement (Figure 46); ceci est dû à la faible recharge qui n'arrive pas à combler l'exhaure de la nappe. Le niveau piézométrique de la nappe varie de 758 m (en Nord-Est) à 1224,50 m au Sud du bassin.

2.4.2.2 Cartes des écarts piézométriques

Afin de quantifier et bien localiser les zones où l'on mesure des variations piézométriques entre les deux campagnes piézométriques (hautes et basses eaux), nous avons dressé deux cartes des écarts piézométriques durant la période allant de 2002 à 2010 (Figure 47). La (Figure 47a) (hautes eaux) montre que la baisse du niveau piézométrique a été enregistrée au niveau de la partie Sud et Sud-Est. En fait, la plus forte baisse enregistrée durant cette période est de l'ordre de 12,83 m. Cette forte baisse est due conjointement aux contraintes climatiques et anthropiques : absence de la recharge par les eaux de surface dû à l'irrégularité des précipitations, la surexploitation local de la nappe pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. D'autre part, la Figure 47b (basses eaux) montre que les zones où l'on enregistre une remontée du niveau piézométrique de la nappe pouvant atteindre 7,97 m sont situées à l'Est de la zone d'étude. Cette remontée est attribuée à une recharge naturelle due à l'infiltration des eaux pluviales.


2002
N
W
E
S
35.2
35
34.8
34.6
34.4
2.4
2.8
3.2
3.6
0
0.5
1
Zahrez chergui
Zahrez gharbi
184-F8
1383-F8
1401-F8
1411-F8
2782-F8
1344-F8
1409-F8
1034-G7
1043-G7
1102-G7
1136-G7
1023-G7
945-G7
1378-G7
1810-G8
2125-G7
2121-G7
2122-G7
1797-G8
1781-G8
1992-G
1999-G8
1962-G8
1861-G7
1183-G8
1142-G7
840
860
900
820
940
980
1020
1040
1080

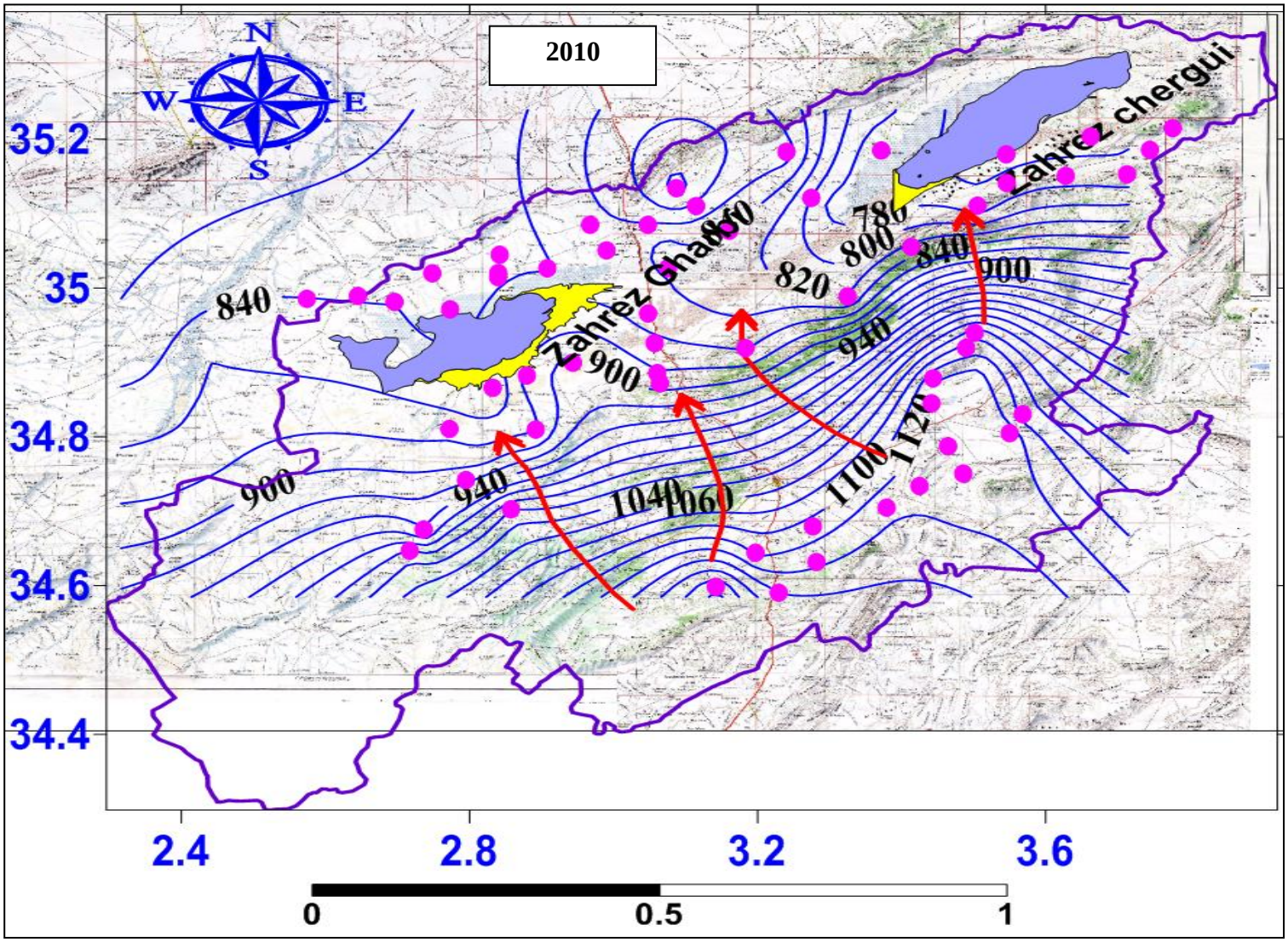
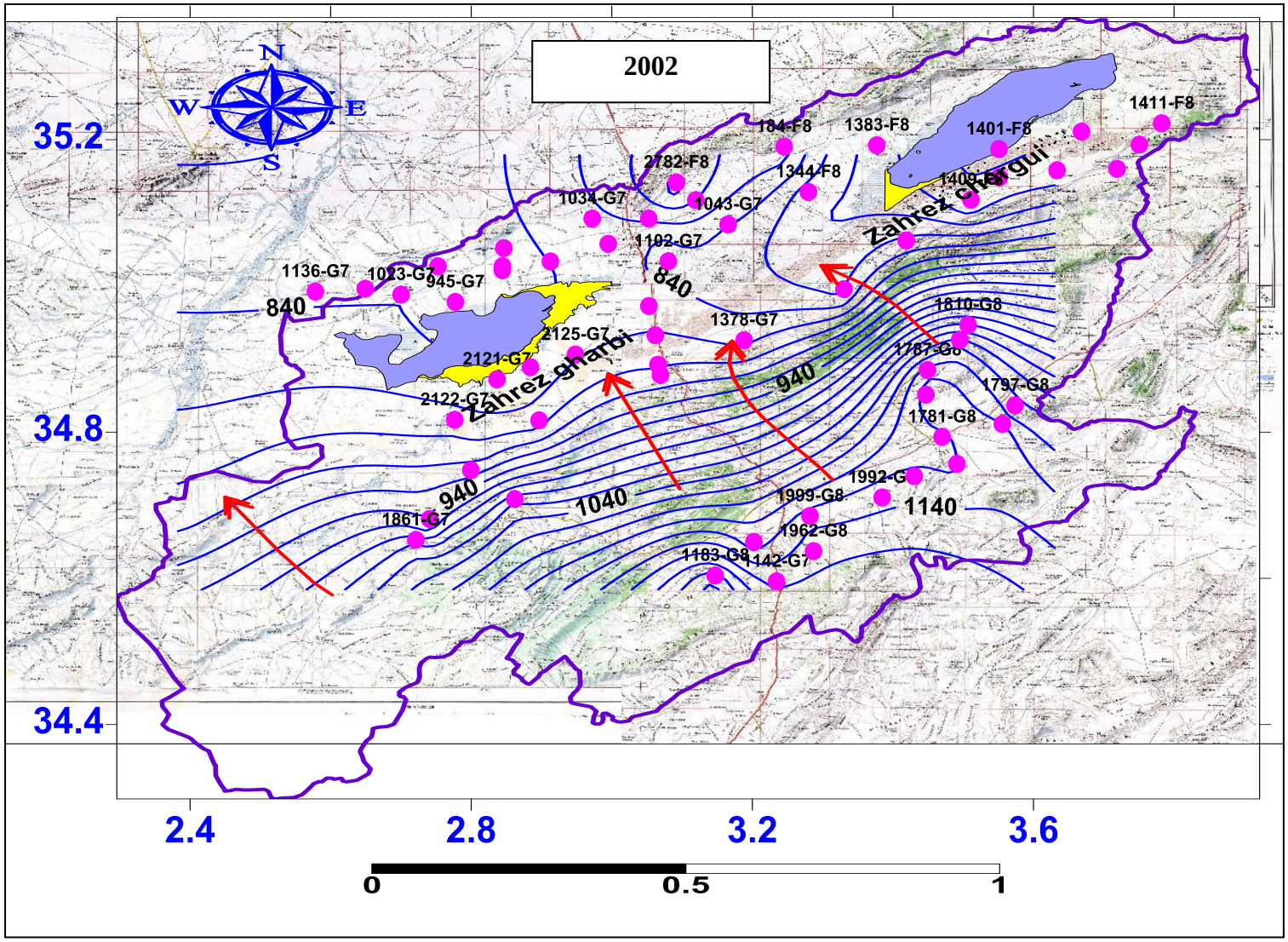


Figure 45 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez, en période de hautes-eaux (2002 et 2010)


2002
N
W
E
S
35.2
34.8
34.4
2.4
2.8
3.2
3.6
0
0.5
1
1411-F8
184-F8
1383-F8
1401-F8
2782-F8
1344-F8
1409-F8
1034-G7
1043-G7
1102-G7
Zahrez chergui
1136-G7
1023-G7
945-G7
840
840
1810-G8
1378-G7
2125-G7
1787-G8
2121-G7
Zahrez gharbi
940
2122-G7
1797-G8
1781-G8
940
1992-G
1040
1999-G8
1140
1861-G7
1962-G8
1183-G8
1142-G7

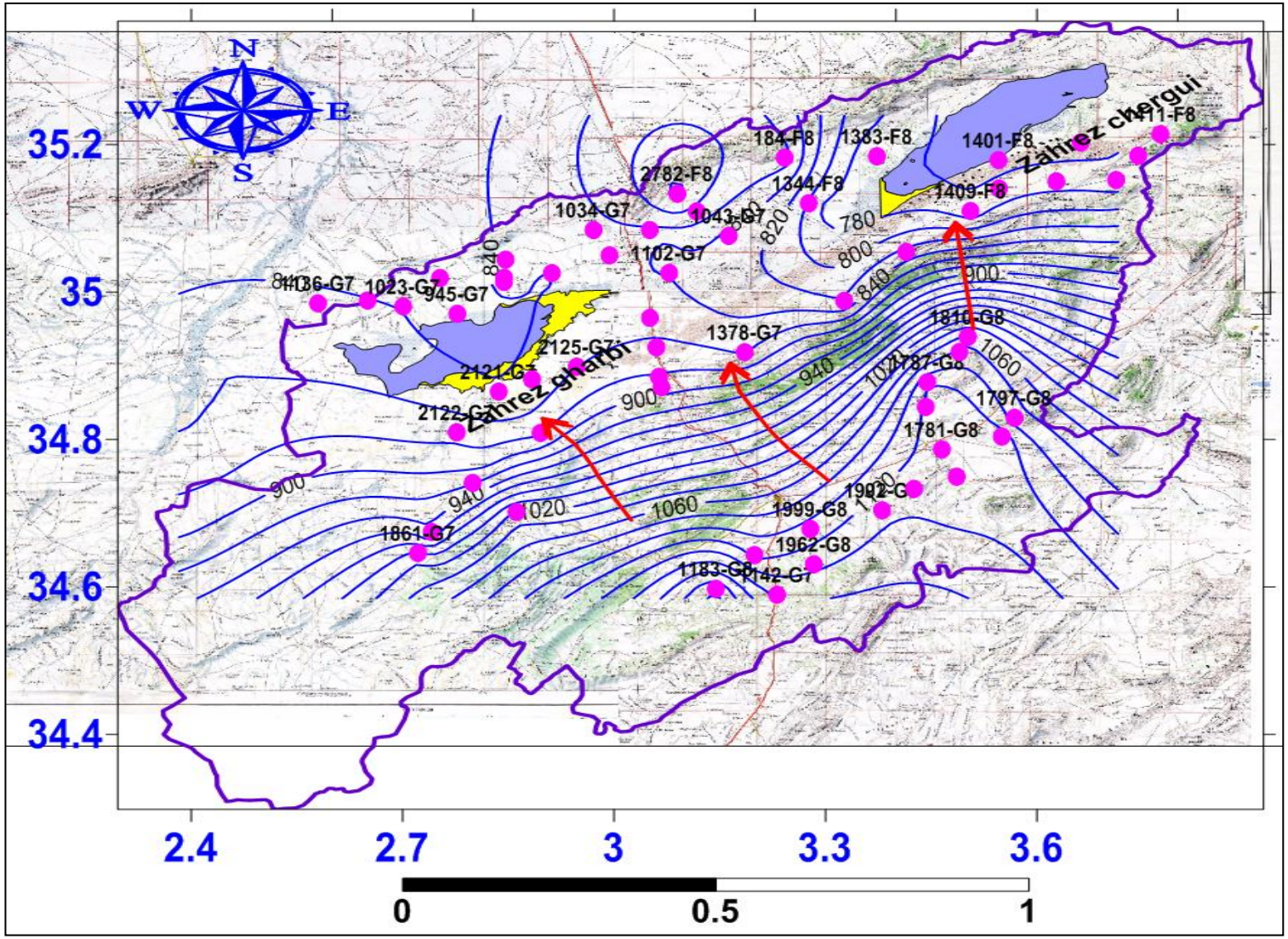
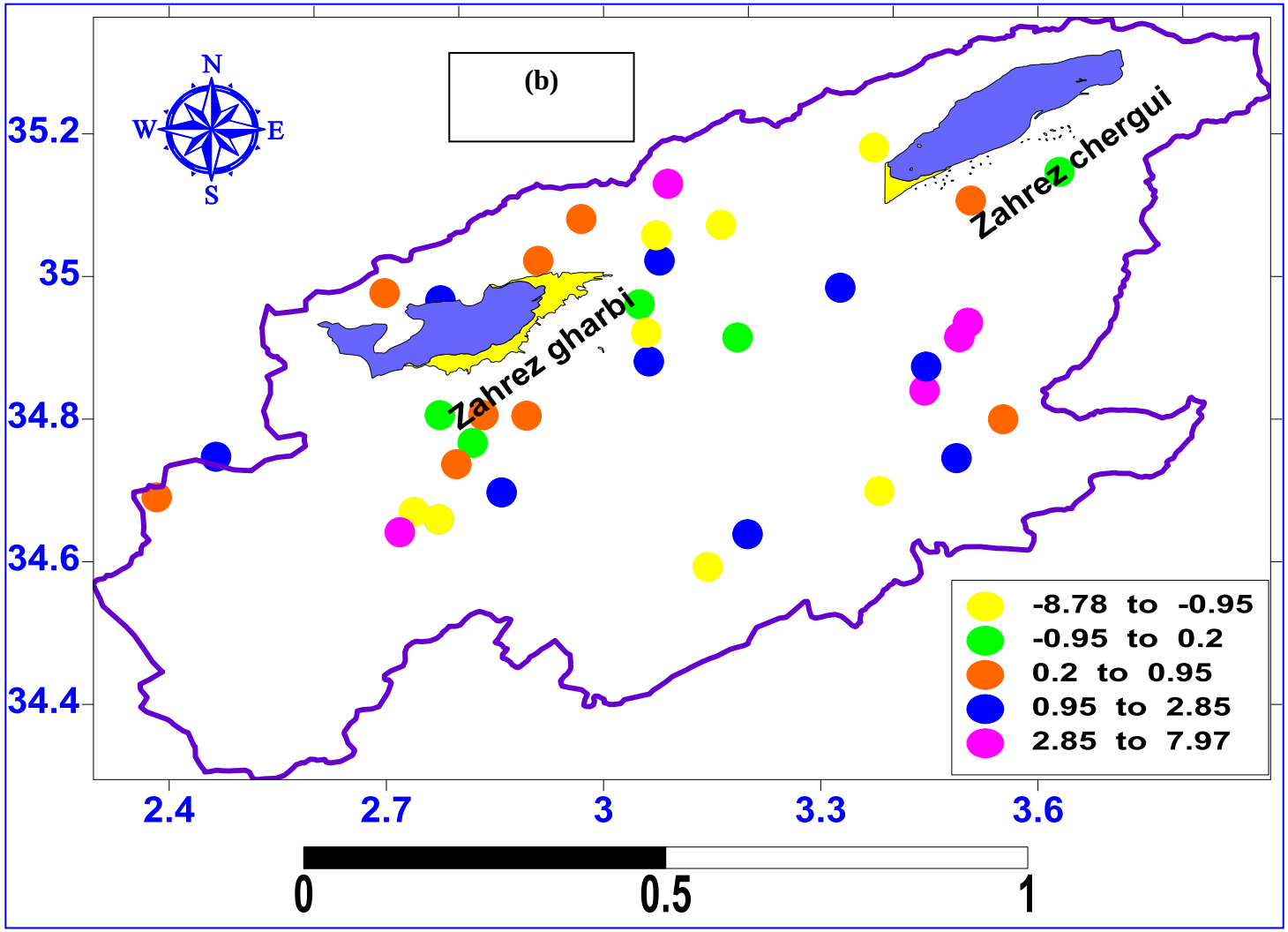


Figure 46 : Carte piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez, en période de basses-eaux (2002 et 2010)


(b)
N
W
E
S
35.2
35
34.8
34.6
34.4
2.4
2.7
3
3.3
3.6
Zahrez chergui
Zahrez gharbi
-8.78 to -0.95
-0.95 to 0.2
0.2 to 0.95
0.95 to 2.85
2.85 to 7.97
0
0.5
1

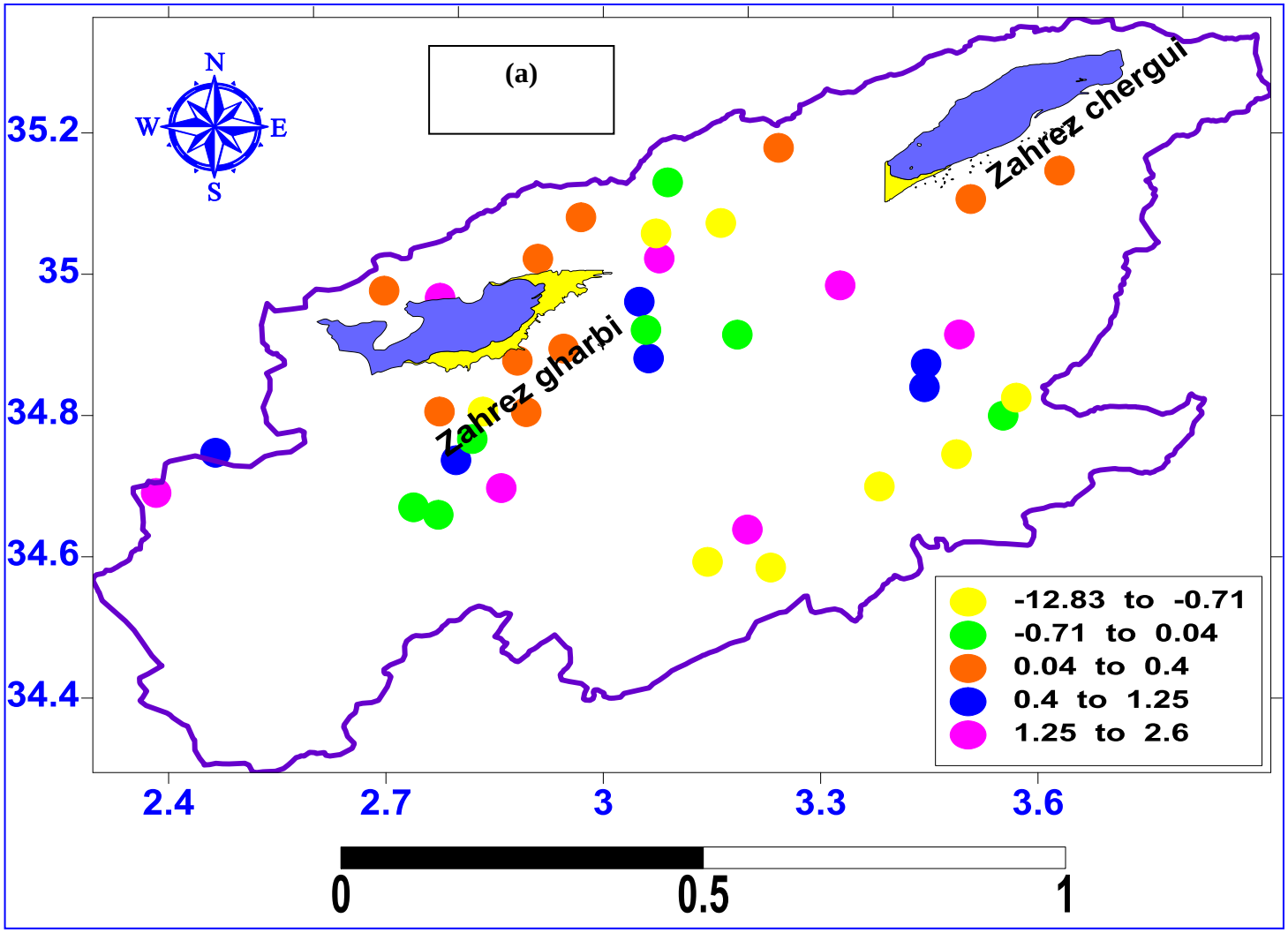


Figure 47 : Cartes des écarts piézométriques pour la de la nappe Mio-Plio-Quaternaire du bassin des Zahrez, période (2002 et 2010), (a) hautes eaux, (b) basses eaux

2.5 Conclusion

Les transmissivités déduites par interprétation des pompages d'essais de longue durée ont permis d'identifier les caractéristiques hydrodynamiques de la zone d'étude. Les valeurs des transmissivités varient entre $2{,}17.10^{-5}$ et $1{,}05.10^{-1}$ m^2/s, avec une moyenne de $1{,}17.10^{-2}$ et un écart type de $2{,}01.10^{-2}$.

L'analyse et l'interprétation des cartes piézométriques de la nappe Mio-Plio-Quaternaire ont mis en évidence que les écoulements souterrains s'effectuent généralement à partir de hauts reliefs (Monts des Ouled Naïl) convergeant vers le Chott Zahrez Chergui dans la partie Nord-Est, et vers Chott Zahrez Rharbi dans la partie Nord-Ouest, selon une direction S–N. Les comparaisons faites entre la piézométrie (1994 et 2010) ont permis d'identifier des rabattements de l'ordre de 12,83 m. Cet abaissement est lié à l'effet des dernières années de sécheresse généralisée qu'a connues le pays ainsi que l'influence des pompages des forages destinés à l'irrigation et l'A.E.P.

Chapitre 03 : Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines

3.1 Introduction

L'étude de la chimie des eaux est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. Le chimisme des eaux souterraines dépend essentiellement des caractéristiques géologiques des milieux traversés et du temps de séjour des eaux. En outre les concentrations des éléments chimiques sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface.

L'objectif de la présente étude est la classification des eaux en faciès hydrochimiques et la détermination des origines de la minéralisation.

3.2 Échantillonnage et analyse hydrochimique

La Figure 48 montre la localisation des différents points où des prélèvements ont eu lieu dans le bassin des Zahrez en Octobre 2006. Les paramètres physico-chimiques mesurés in-situ sont : la conductivité électrique, le pH et les solides totaux dissous (TDS). Les analyses effectuées au laboratoire d'hydrochimie de l'ANRH sur les eaux prélevées concernent la détermination quantitative d'éléments majeurs à savoir les cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) et les anions (Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}, NO_3^-).

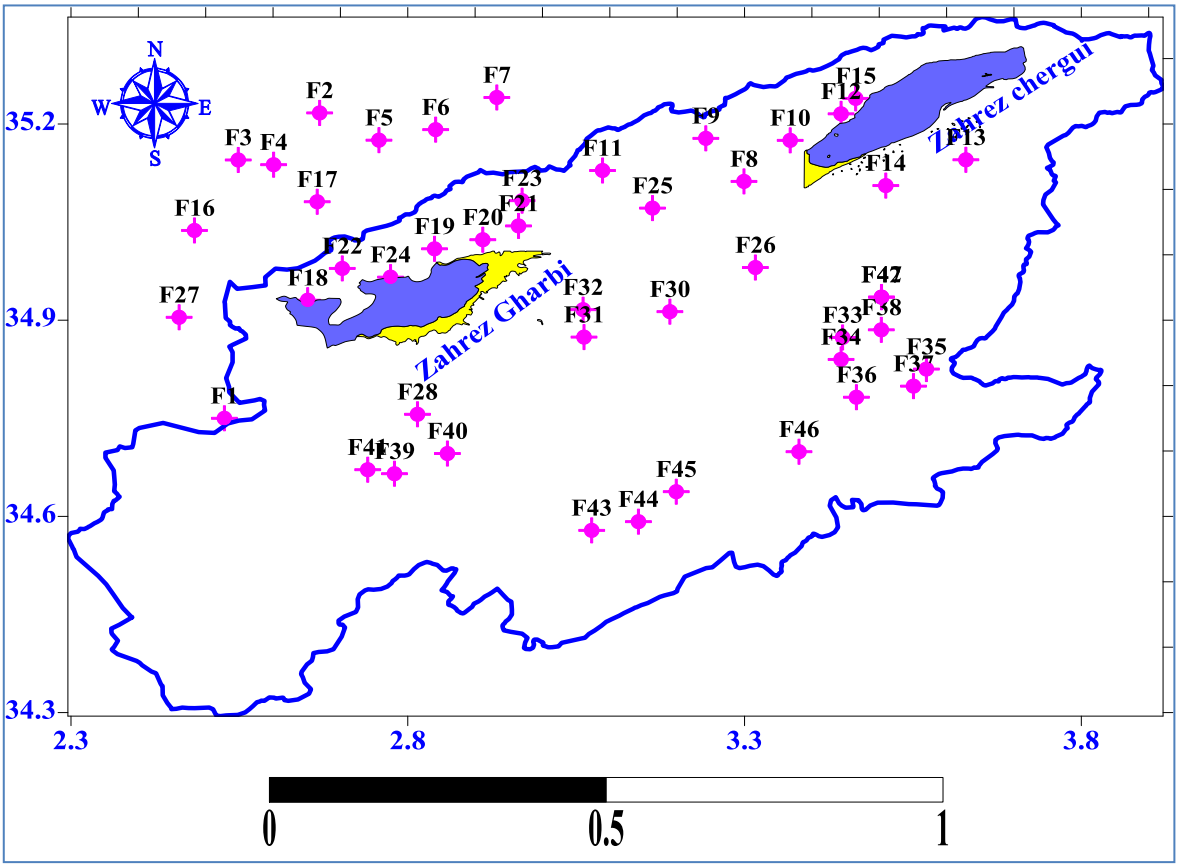


Figure 48 : Carte de localisation des points d'eaux prélevés.

3.3 Représentation graphique des faciès hydrochimiques

Pour une meilleure identification des faciès chimique des eaux souterraines, ainsi que son évolution, la représentation graphique des résultats d'analyse, reste un outil incontournable. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi les Diagrammes de représentation de Piper, Schoeller-Berkallof et Stiff.

3.3.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper en Figure 49 a été construit avec le programme Piper issu du logiciel DIAGRAMME, ceci afin de déterminer les faciès chimiques. En effet, ce diagramme permet de représenter sur un même graphique des nombreuses analyses autorisant des regroupements des faciès chimiques (PIPER, 1994; SIMLER, 2004).

Les résultats des analyses chimiques des eaux des points d'eaux (Tableaux 5.1 et 5.2, Annexe 5) sont reportés sur le diagramme de Piper afin d'identifier les faciès chimiques. L'analyse du diagramme révèle l'existence de deux types de faciès hydrochimique.

- Il s'agit du faciès chloruré sulfaté calcique à magnésienne (Ca-Mg-Cl-SO_4); ce faciès représente 87% des eaux analysées. L'origine du l'anion dominant dans ce type d'eau, à savoir le chlorure, est vraisemblablement dû à une éventuelle dissolution de l'halite, alors que l'omniprésence magnésium ne peut être expliquée par la dissolution des calcaires dolomitiques.
- Le faciès chloruré sodique (Na-K-Cl-SO_4), ce faciès représente 13% des échantillons prélevés. L'existence du faciès sodique serait liée au phénomène de dissolution des minéraux évaporitiques richent en sels et en gypse (halite, gypse, et / ou anhydrite).

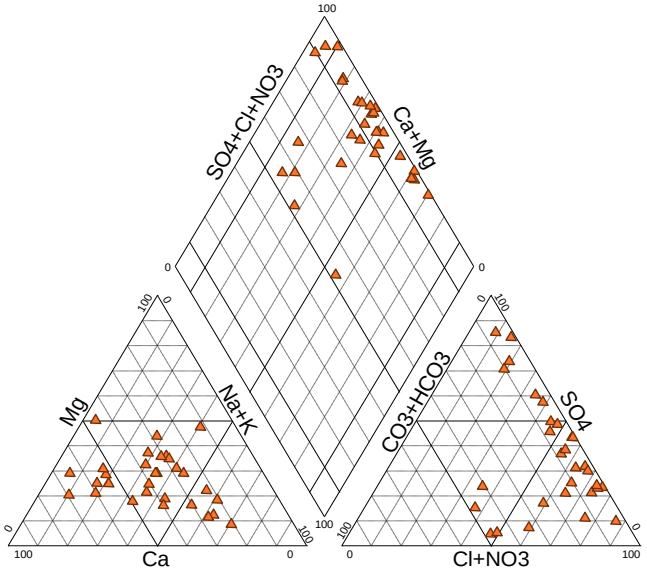


Figure 49 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du bassin des Zahrez

3.3.2 Diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF

Le diagramme a été établi par H. Schoeller, et révisé par Berkallof, il est composé de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés dans l'eau. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques (SCHOLLER, 1956; SCHOLLER, 1962; SCHOLLER, 1977).

Le diagramme tracé pour la période de Octobre 2006 (Figure 50) confirme la dominance du faciès chloruré calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- et Ca^{2+}. Secondairement, on observe deux faciès, le premier sulfaté calcique et le second chloruré sodique. Les fortes concentrations en chlorures et sulfates indiquent un état de pollution en rapport avec les activités anthropiques liées à l'agriculture et l'urbanisation.

3.3.3 Diagramme de Stiff

La représentation de Stiff consiste à construire, pour chaque échantillon, un diagramme sous forme de polygone qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés (Figure 51). La distinction entre les échantillons se base sur la géométrie du polygone qui donne une idée sur les espèces dominantes et la parenté chimique. Les trois axes du diagramme de Stiff sont respectivement, de haut en bas, Na-Cl, Ca-HCO_3, Mg-SO_4 (APPELO et POSTAMA, 1996). Les diagrammes de Stiff obtenus ont permis de diviser les eaux de la nappe en trois groupes chimiques homogènes : I, II et III

Le groupe I rassemble les points d'eaux F9; F19;F28;F7; F17; F10; F16; F18; F20; F30; F31; F14, et représentent 25,5% des eaux analysées. Ce groupe est caractérisé par un faciès chloruré sodique.

Le groupe II F2; F22; F29; F4; F34; F8; F21; F25; F26; F3; F32; F37; F47; F24, représentant environ 30 % des échantillons prélevés. Le faciès chimique de ces points d'eau est chloruré calcique.

Le groupe III est composé des points d'eaux F35;F36;F40;F41; F42; F27; F38;F39;F5, et occupe 19 % des échantillons d'eau. Il est caractérisé par un faciès sulfaté calcique.

3.4 Mécanismes d'acquisition de la charge saline

Pour mieux comprendre les différents mécanismes d'acquisition de la charge saline on s'est basé sur les corrélations entre les concentrations des principaux éléments majeurs (Cl^-, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}) et la minéralisation totale des eaux souterraines(TDS) (Figure 52). Les résultats obtenus montrent une corrélation positive des teneurs de Mg^{2+}, Na^+, Cl^- et SO_4^{2-} avec

le résidu sec (TDS), avec des coefficients de corrélations respectivement de l'ordre 0,75, 0,74, 0,74 et 0,74. Les teneurs en Ca^{2+} viennent en deuxième place avec des coefficients de corrélation de 0,67. Une faible corrélation des teneurs en HCO_3^- avec le TDS, avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,003.

La présence d'une nette corrélation positive entre ces ions le résidu sec, traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline des eaux et témoigne de la présence d'une source commune de minéralisation. Il s'agit probablement d'une mise en solution de la halite. D'autre part, les sulfates et le calcium se corrèles avec le résidu sec témoignant d'une éventuelle dissolution du gypse et / ou de l anhydrite. La dissolution de ces évaporites est d'ailleurs confirmée par les indices de saturation (IS) calculés par le programme PHREEQC (PARKHURST et APPELO, 1999). En effet, les indices de saturation de l'ensemble des eaux vis-à-vis des minéraux concernés (halite, gypse et anhydrite) montrent un état de sous-saturation pour la majorité des échantillons (Figure 63 et 64).

3.5 Étude de l'origine des éléments chimiques et les rapports caractéristiques

3.5.1 Étude de l'origine des éléments chimiques

3.5.1.1 Les éléments Na^+-Cl^- :

D'une manière générale, la présence de l'ion Cl^- et de l'ion Na^+ dans les eaux souterraines est attribuée à la dissolution de l'halite rencontrée dans les formations géologiques encaissantes. Mais, il arrive parfois que l'ion Cl^- et l'ion Na^+ aient une origine autre que naturelle, c'est à dire une origine anthropique (BELKHIRI et al, 2011, BOUTELDJAOUI et al, 2019). La représentation du graphique des teneurs en Na^+ en fonction de celles en Cl^- montre que la quasi-totalité des points d'eau se situe au-dessous de la droite 1/1 (droite de dissolution de la halite) indiquant un excès en Cl^- (Figure 53). Cet excès ne peut s'expliquer que par l'existence d'une autre origine de cet ion que la dissolution de l'halite. Les fortes teneurs en Cl^- qui ont accompagné les faibles teneurs en Na^+ sont dues aux phénomènes d'échange de bases inverses, par lesquels les ions Na^+ sont adsorbés à la surface des minéraux argileux en libérant des ions Ca^{2+} et Mg^{2+}.

3.5.1.2 Les éléments Ca^{2+} - SO_4^{2-}

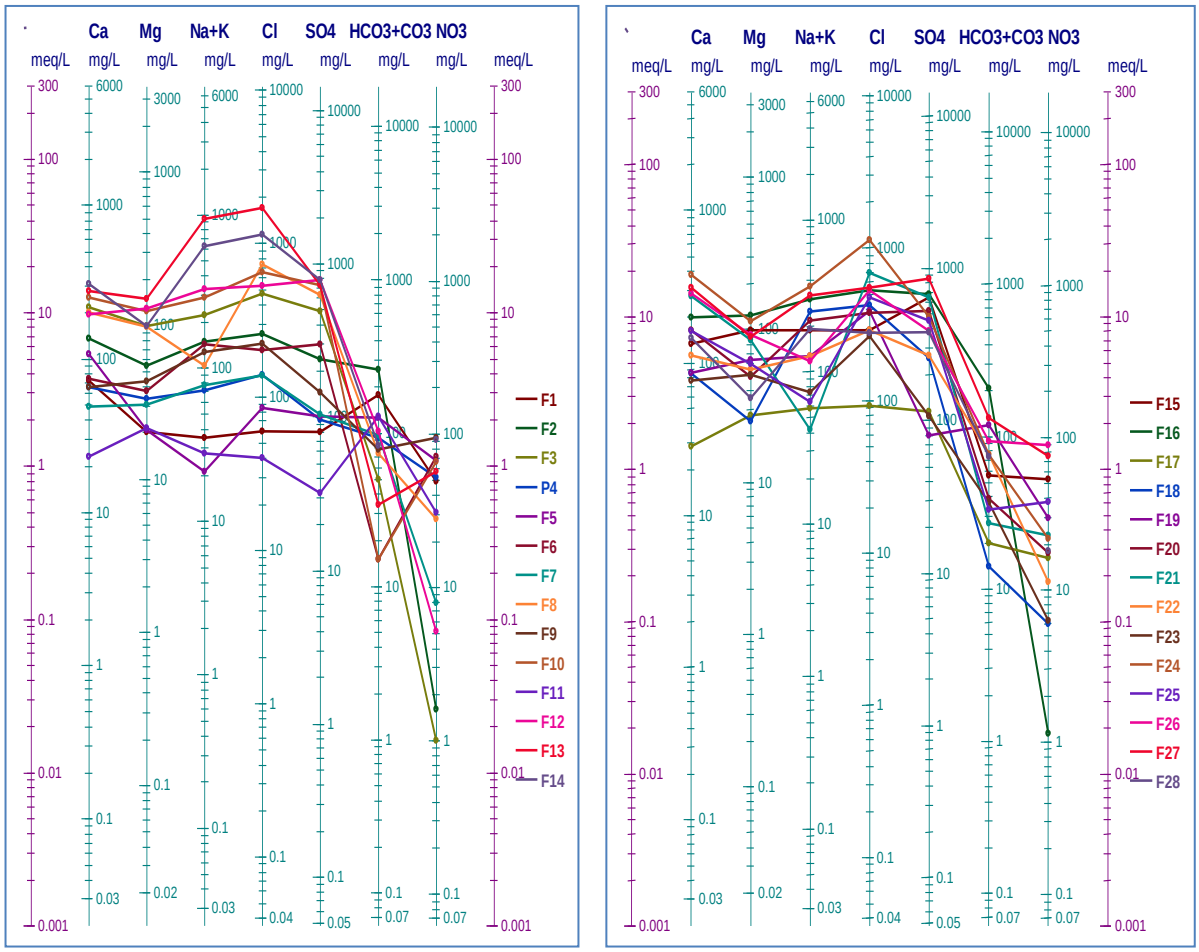
La représentation de Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (Figure 54); montre que 49% des points d'eaux se positionnent au-dessous de la droite de mise en solution du gypse traduisant un "déficit" en Ca^{2+} par rapport à SO_4^{2-}, ce qui est confirmé par l' étroite corrélation entre ces deux éléments (coefficient de corrélation, R = 0,71). En outre, 38 % des points d'eaux présentent un excès en Ca^{2+} par rapport à SO_4^{2-}. Cet enrichissement en Ca^{2+} accompagné d'un déficit en Na^+ indique

la participation de ces deux ions dans les échanges cationiques entre les eaux de la nappe et la matrice argileuse. Les argiles libèrent les ions Ca^{2+} ou Mg^{2+} et fixent les ions Na^{+} ou K^{+} suivant un processus qui peut être réversible (FEHDI et al., 2009).

3.5.1.3 Les éléments $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ - $HCO_3^{-}+SO_4^{2-}$

Les points de la relation $Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} + HCO_3^{-}$ seront proches de la ligne égale 1 si les dissolutions de la calcite, dolomite, anhydrite et du gypse sont les réactions dominantes dans un système. L'échange ionique tend à déplacer les points vers la droite due à un excès de (SO_4 +HCO_3). Si l'échange ionique renverse est le processus, il se déplacera les points vers la gauche due à un grand excès de ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) par rapport à ($SO_4^{2-} + HCO_3^{-}$) (CERLING et al, 1989; FISHER et MULICAN, 1997; MCLEAN et JANKOWSKI, 2000).

La représentation graphique de l'évolution du Ca^{2+} +Mg^{2+} en fonction de HCO_3^{-} + SO_4^{2-} (Figure 55), montre que la quasi-totalité des points d'eaux (77%) se positionnent au-dessus de la droite à pente 1, indiquant un excès des teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} par rapport aux ions HCO_3^{-} + SO_4^{2-}. En outre, 21 % des points d'eaux se positionnent sur la droite de pente 1 (droite de dissolution des carbonates et des évaporites).



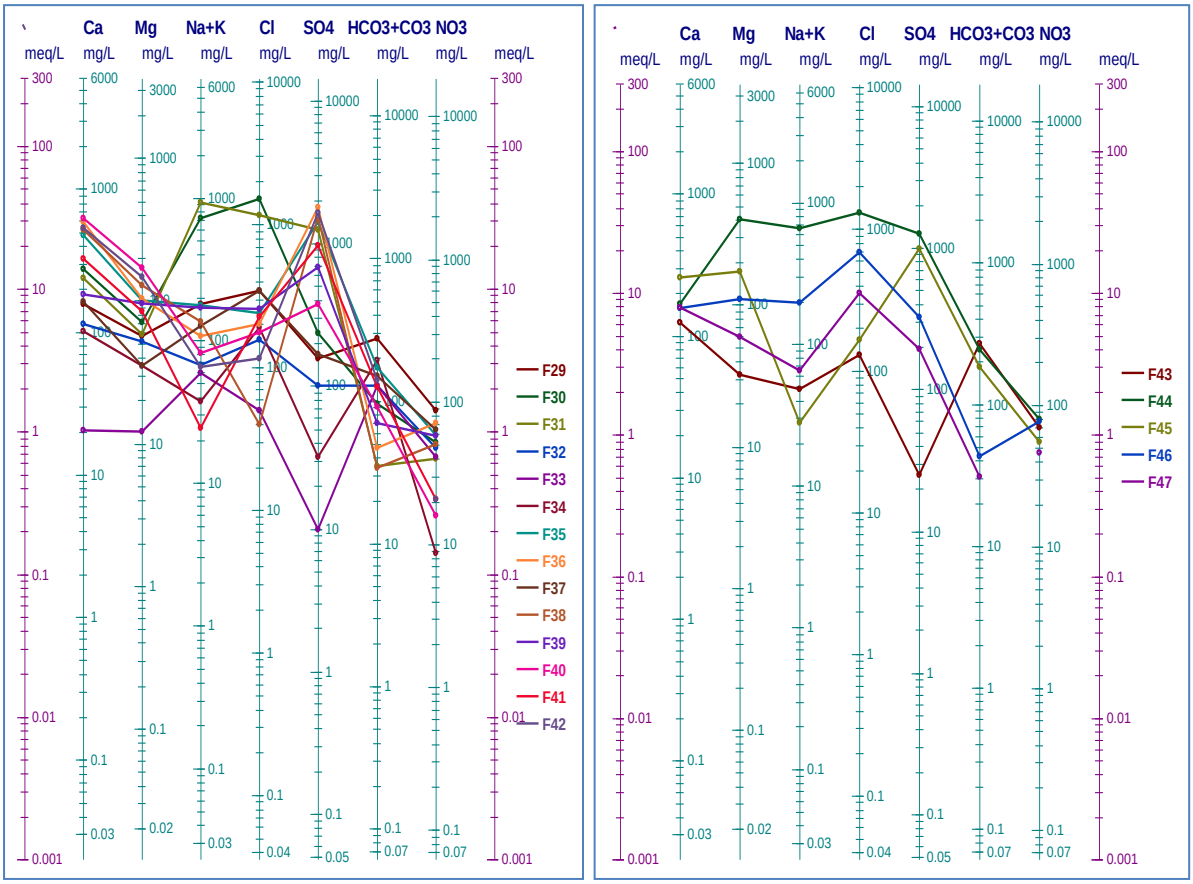
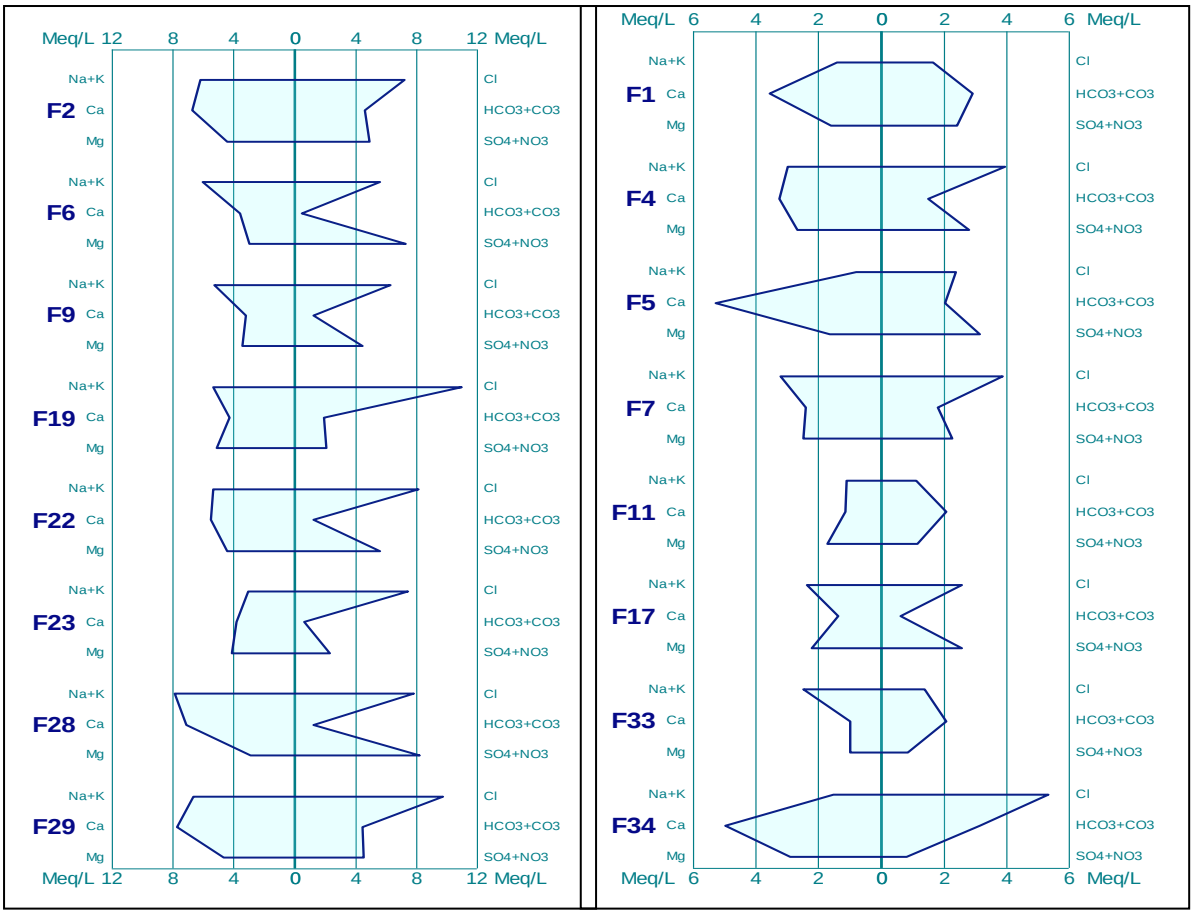


Figure 50 : Diagramme de Schoeller et Berkallof.



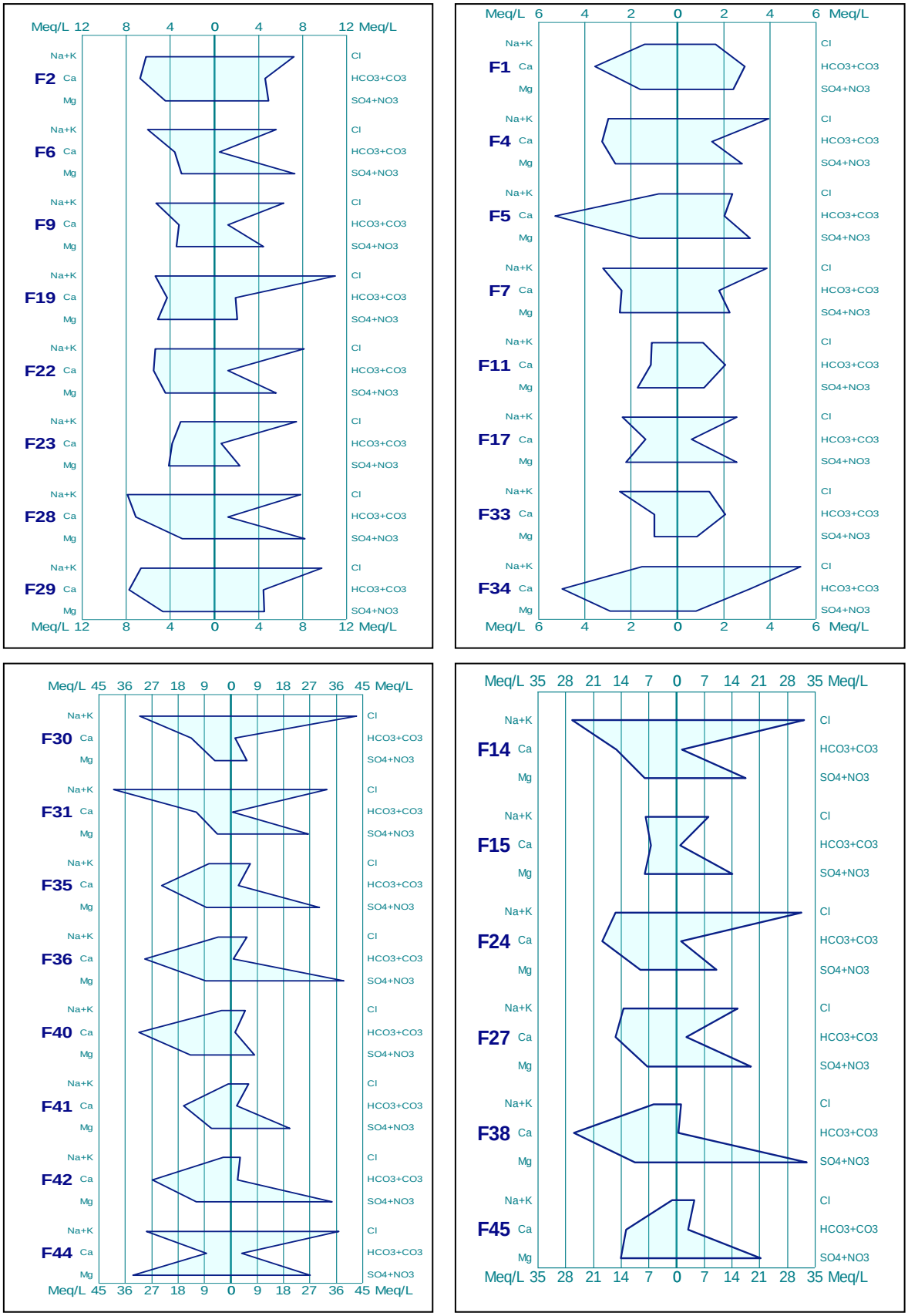
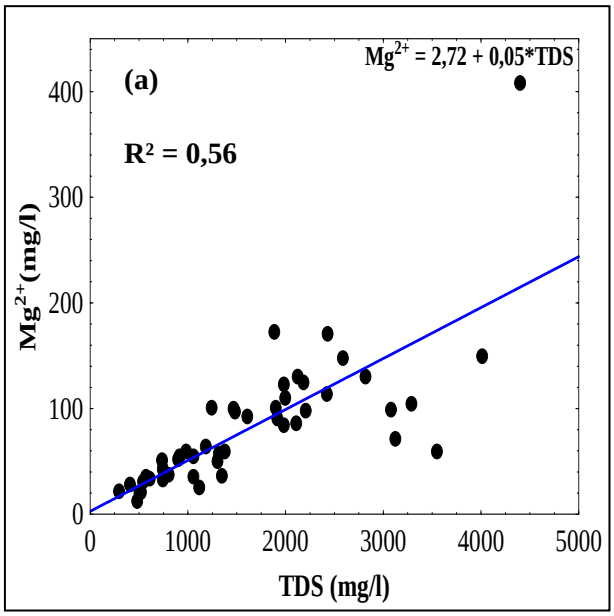
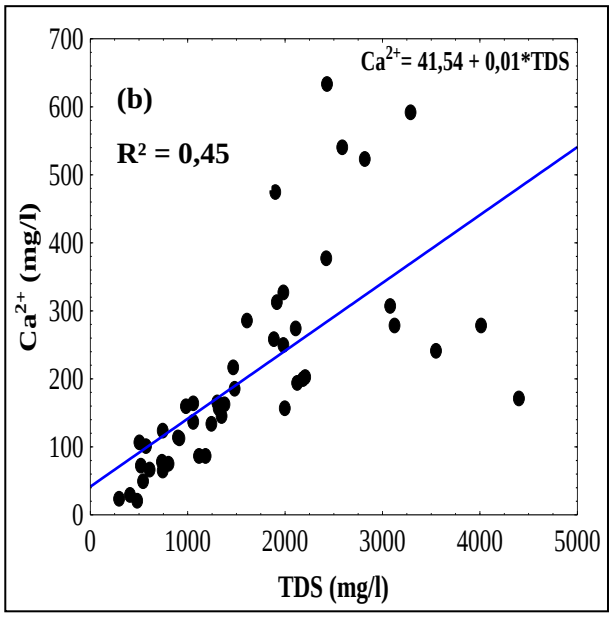
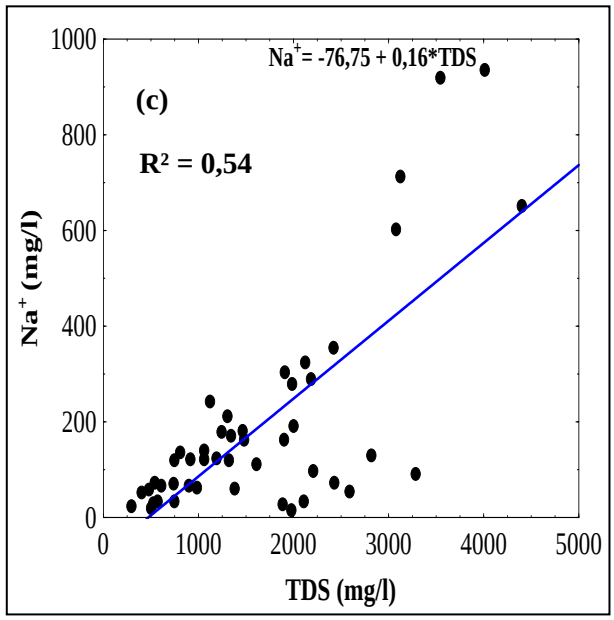
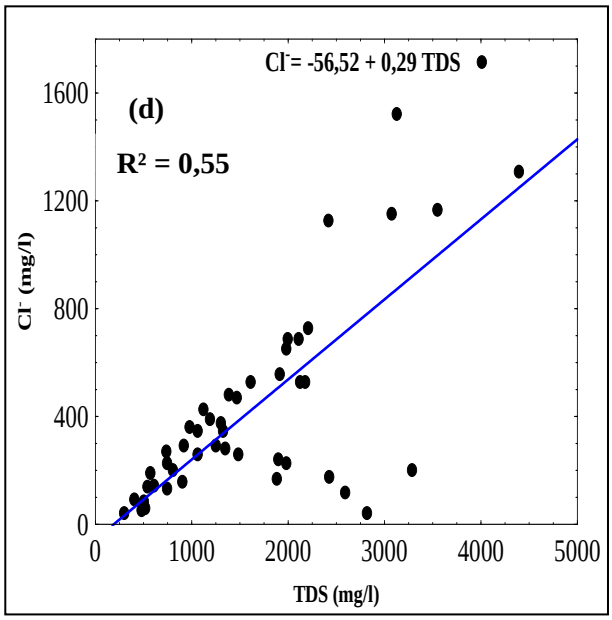


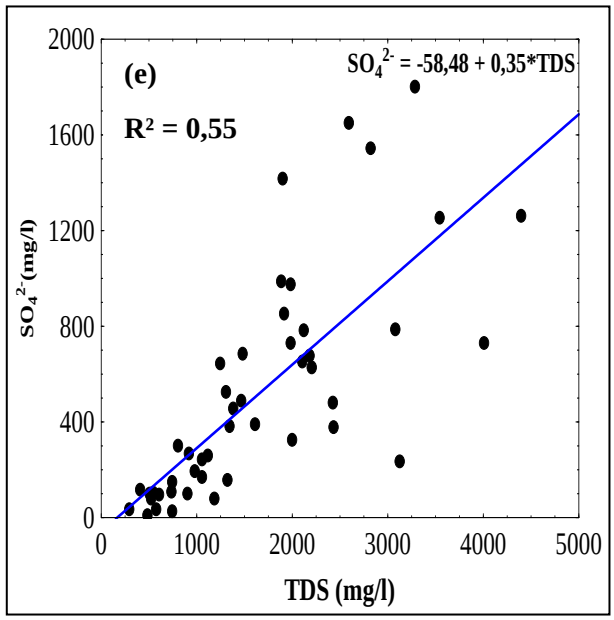
Figure 51 : Diagrammes de Stiff.

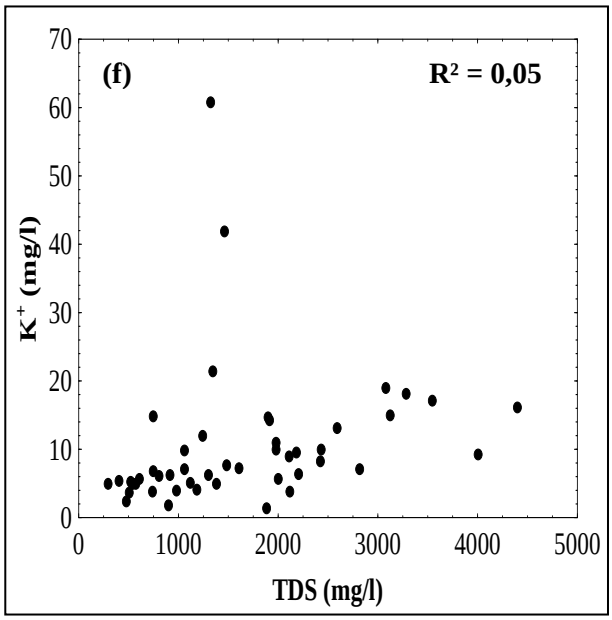

(a)
Mg^{2+} = 2,72 + 0,05*TDS
R² = 0,56
Mg^{2+} (mg/l)
TDS (mg/l)


(b)
Ca^{2+}= 41,54 + 0,01*TDS
R² = 0,45
Ca^{2+} (mg/l)
TDS (mg/l)


(c)
Na^{+}= -76,75 + 0,16*TDS
R² = 0,54
Na^{+} (mg/l)
TDS (mg/l)


(d)
Cl^{-}= -56,52 + 0,29 TDS
R² = 0,55
Cl^{-} (mg/l)
TDS (mg/l)


(e)
SO_4^{2-} = -58,48 + 0,35*TDS
R² = 0,55
SO_4^{2-}(mg/l)
TDS (mg/l)


(f)
R² = 0,05
K^{+} (mg/l)
TDS (mg/l)

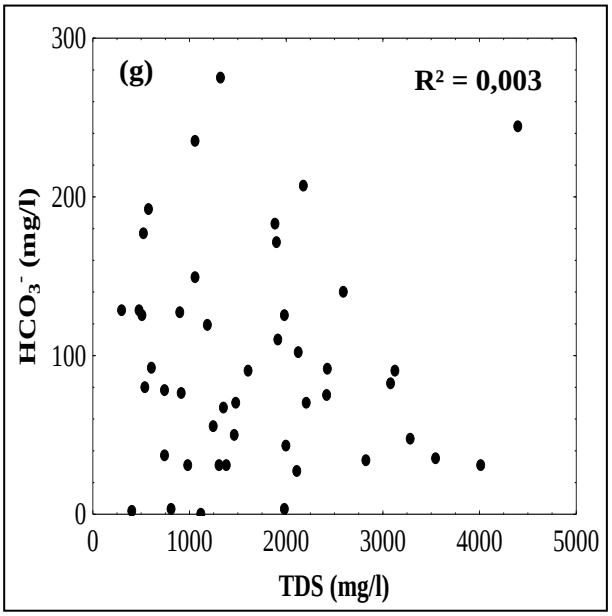


Figure 52 : Relation entre les éléments chimiques majeurs et la minéralisation totale

3.5.2 Étude des rapports caractéristiques

3.5.2.1 Le rapport Ca^{2+}/Mg^{2+}

L'étude du rapport Ca/Mg des eaux souterraines de cette région suggère la dissolution de la calcite et de la dolomite présente dans l'aquifère. C'est-à-dire, si le rapport Ca/Mg ≤ 1 la dissolution de la dolomite devrait se produire, tandis qu'un rapport plus élevé (> 1) est indicatif de la contribution de plus de la calcite (BELKHIRI et al, 2011, MAYO et LOUCKS, 1995). La Figure 56 montre bien que la majorité des points d'eaux présentent un rapport Ca^{2+}/Mg^{2+}, qui varient entre de 1 à 2, indiquant la dissolution de la calcite.

D'autre part, 23 % des points d'eaux montrent des rapports Ca/Mg ≤ 1, indiquant la dissolution de la dolomite.

La solubilité de la calcite et de la dolomite est largement contrôlée par la fugacité du CO_2 et du pH, selon les réactions :

$$CaCO_3 + CO_{2(g)} + H_2O = Ca^{2+} + 2HCO^-_3$$

$$Ca_{1-x}Mg_xCO_3 + CO_{2(g)} + H_2O = (1-x)Ca^{2+} + xMg^{2+} + 2HCO^-_3$$

La dissolution de la dolomite est une réaction plus lente (de l'ordre de quelques mois) que celle de la calcite.

3.5.2.2 Le rapport Na^+/Cl^-

Le rapport Na^+/Cl^- (Figure 57) est inférieur à 1 dans environ 83% des eaux échantillonnées, traduisant la prédominance des chlorures par rapport au sodium. Le déficit en Na est expliqué par le phénomène d'échange ionique inverse entre l'eau et l'aquifère et se traduit par une adsorption du Na et une libération du Ca (SINGH et al, 2011). En outre, 6% des points d'eaux

présentent un rapport Na^+/Cl^- supérieur à 1. Ceci met en exergue l'importance des phénomènes d'échange de bases (directes) où les ions Na^+ sont libérés du complexe et sont remplacés par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+}.

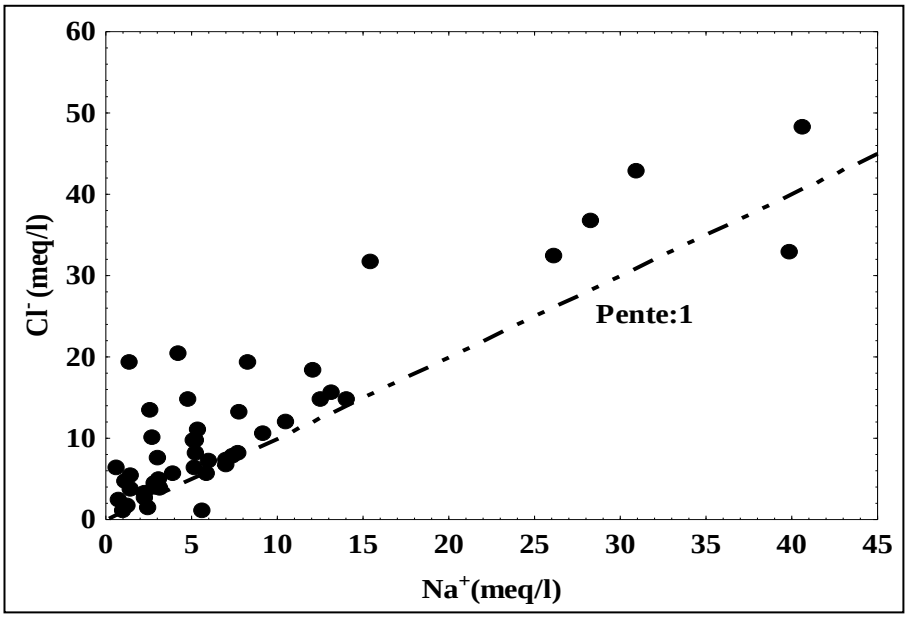


Figure 53 : Relation ionique entre Na^+ et Cl^-

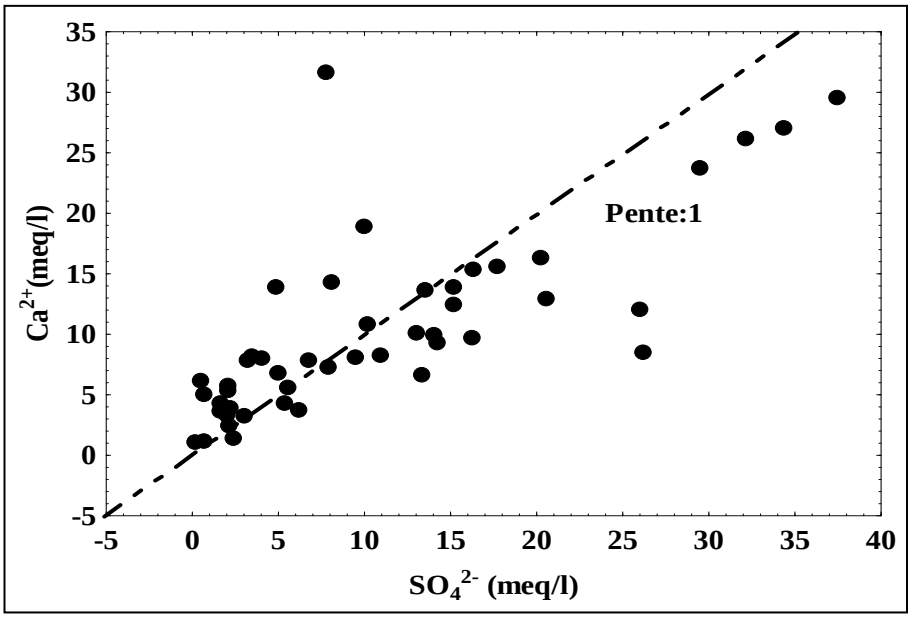


Figure 54 : Relation ionique entre Ca^{2+} et SO_4^{2-}

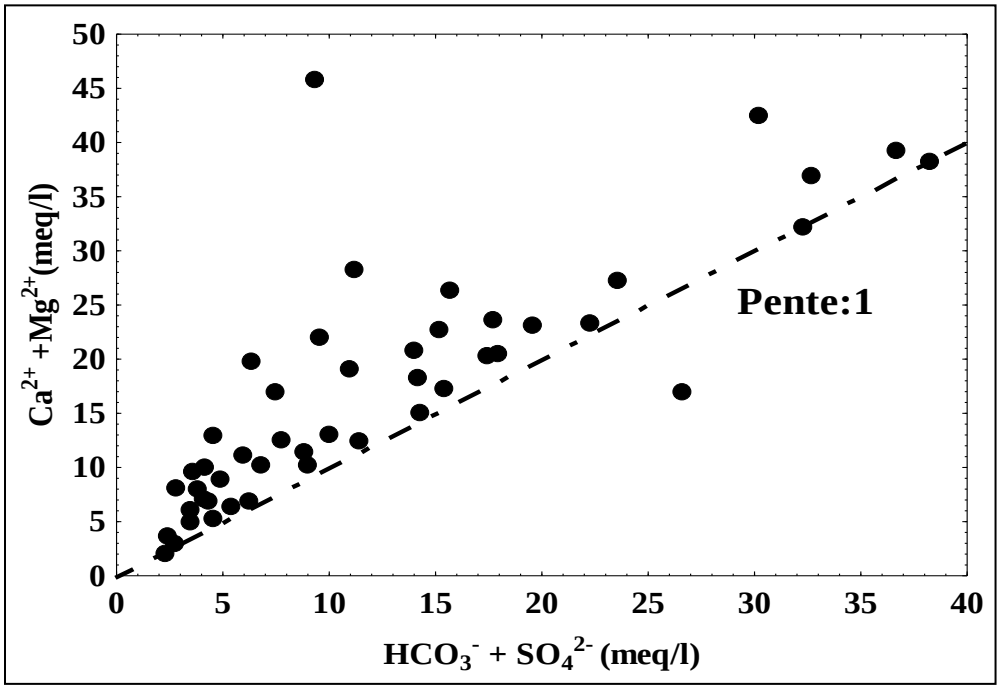


Figure 55 : Relation ionique entre $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ et $HCO_3^-+SO_4^{2-}$

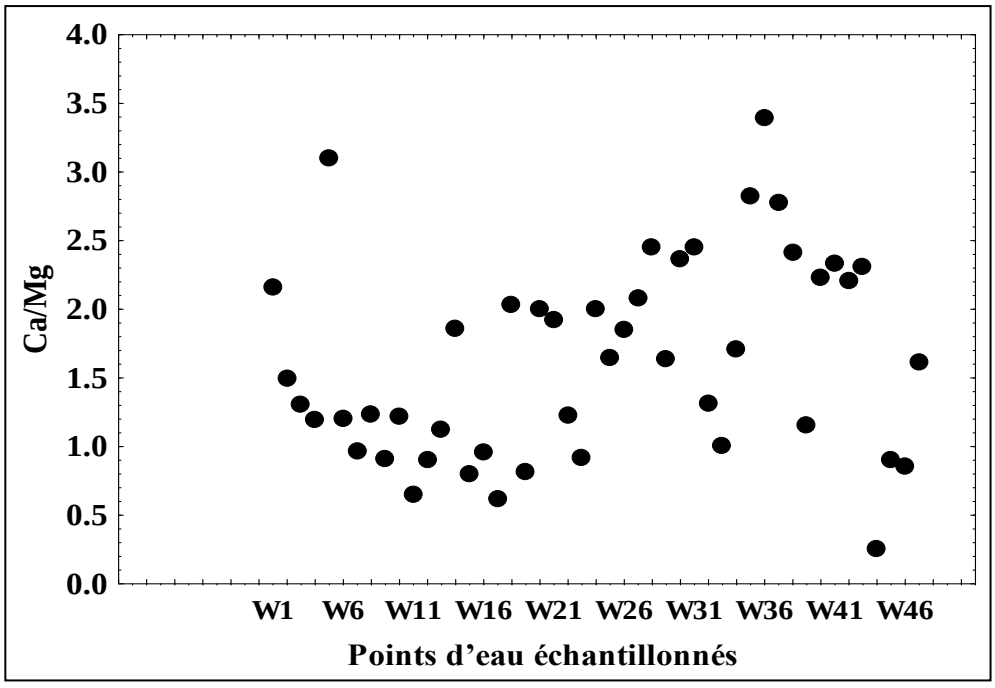


Figure 56 : Rapports caractéristiques Ca/Mg

3.5.2.3 La relation $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ – conductivité électrique

La réalisation d'un diagramme (HCO_3^-/ Cl^- et SO_4^{2-}) - Conductivité électrique fait apparaître une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité (Figure 58), Deux pôles sont observés : le premier est carbonaté et englobe 11 % des points d'eaux, il se caractérise par une dominance des ions HCO_3^- pour des conductivités inférieures à 480 µS.cm^{-1}. Le second représente le pôle évaporitique et affirme une dominance des ions Cl^- et SO_4,

représente la majorité des points d'eau (89%). Ce pôle apparaît pour des conductivités qui varient entre 830 et 7780 µS.cm^{-1}.

3.5.2.4 Le rapport Cl^-/SO_4^{2-} et la conductivité électrique

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de la halite et probablement d'une pollution anthropique. Dans l'optique de comprendre l'évolution de ces ions dans la nappe et de déterminer lequel d'entre ces ions est à l'origine de la salinité des eaux de la nappe, on a associé l'évolution du rapport de ces ions (Cl^-/SO_4^{2-}) à la conductivité électrique pour mettre en évidence l'ion dominant à l'origine de cette salinité (DEBIECHE, 2002).

Le report des points sur le graphique (Figure 59) a révélé que la majorité des points d'eau (70%) présente un rapport (Cl^-/SO_4^{2-}) supérieur à 1, indiquant une dominance des ions salifères par rapport à ceux des gypses, ce qui confirme la dominance du faciès chloruré sulfaté calcique et magnésienne. D'autre part environ 30% des points d'eau présentent des valeurs du rapport (Cl^-/SO_4^{2-}) inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère.

3.5.3 Carte des Rapports Caractéristiques

3.5.3.1 Carte du rapport Na^+/Cl^-

La cartographie du rapport Na^+/Cl^- (Figure 60), montre que les valeurs inférieures à l'unité se situent au centre du bassin des Zahrez, traduisant la prédominance des chlorures par rapport au sodium. D'autre part les valeurs supérieures à l'unité sont observées dans la partie Est, traduisant la prédominance du sodium. Ce rapport a tendance à augmenter du Sud-Ouest vers l'Est dans le sens de l'écoulement.

3.5.3.2 Carte du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+}

La cartographie du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} (Figure 61), montre que les valeurs supérieures à l'unité sont localisées au centre et à l'Est ; avec une prédominance du calcium. Ce rapport a tendance à augmenter du Nord -Est vers le Sud-Ouest de la Zone d'étude.

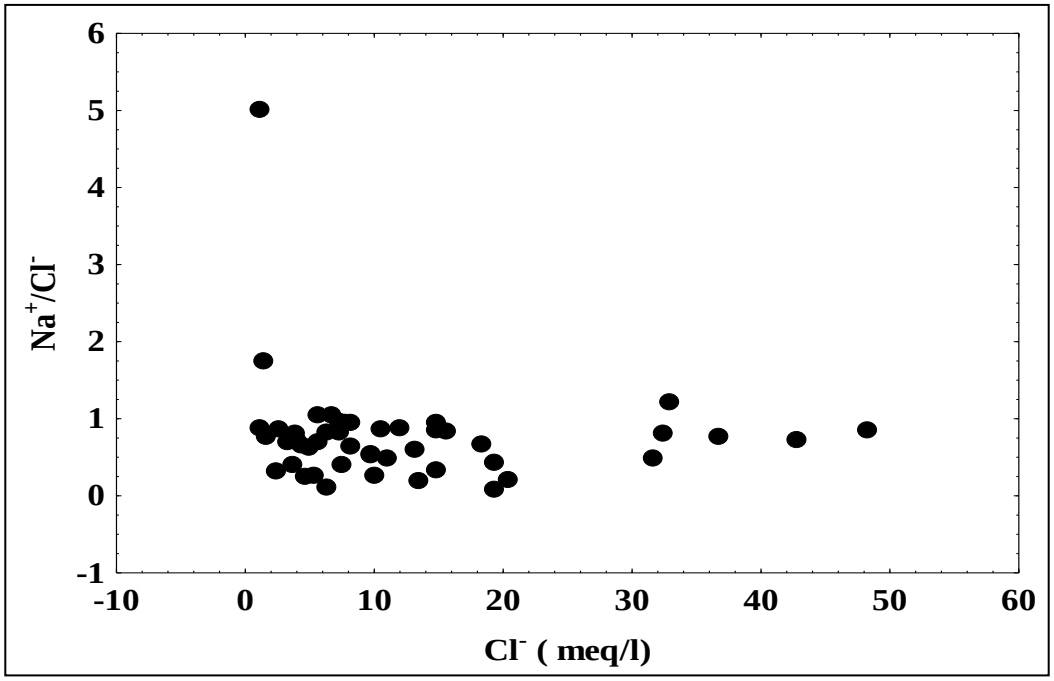


Figure 57 : Le rapport Na/Cl

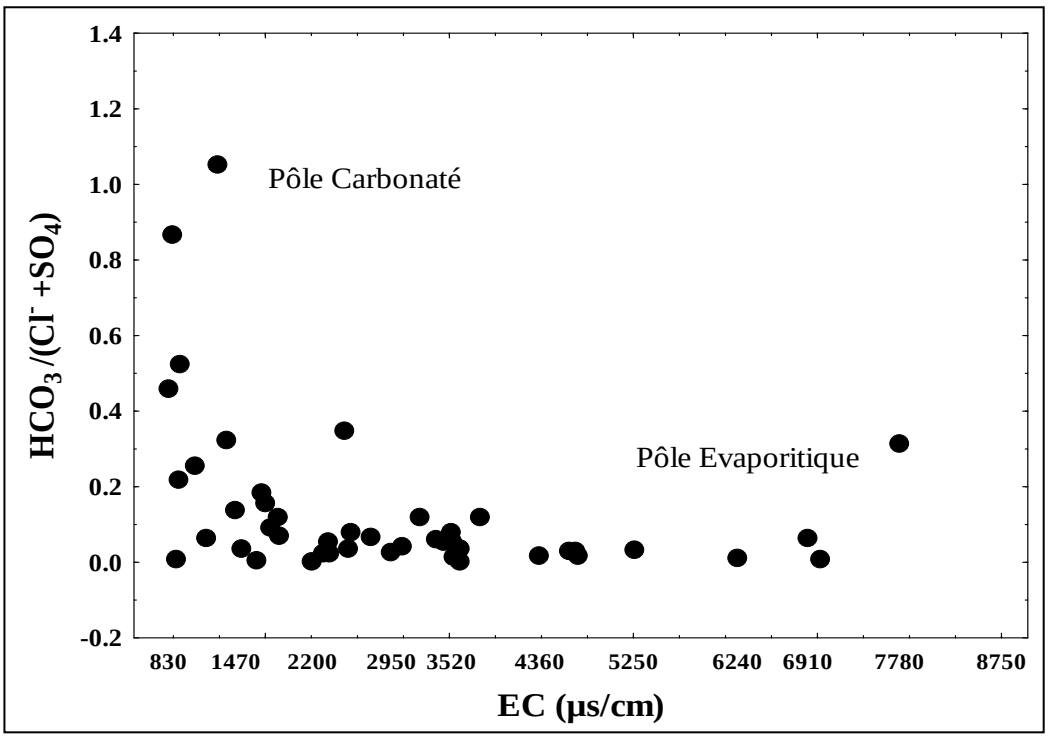


Figure 58 : Evolution du rapport $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ en fonction de la conductivité électrique

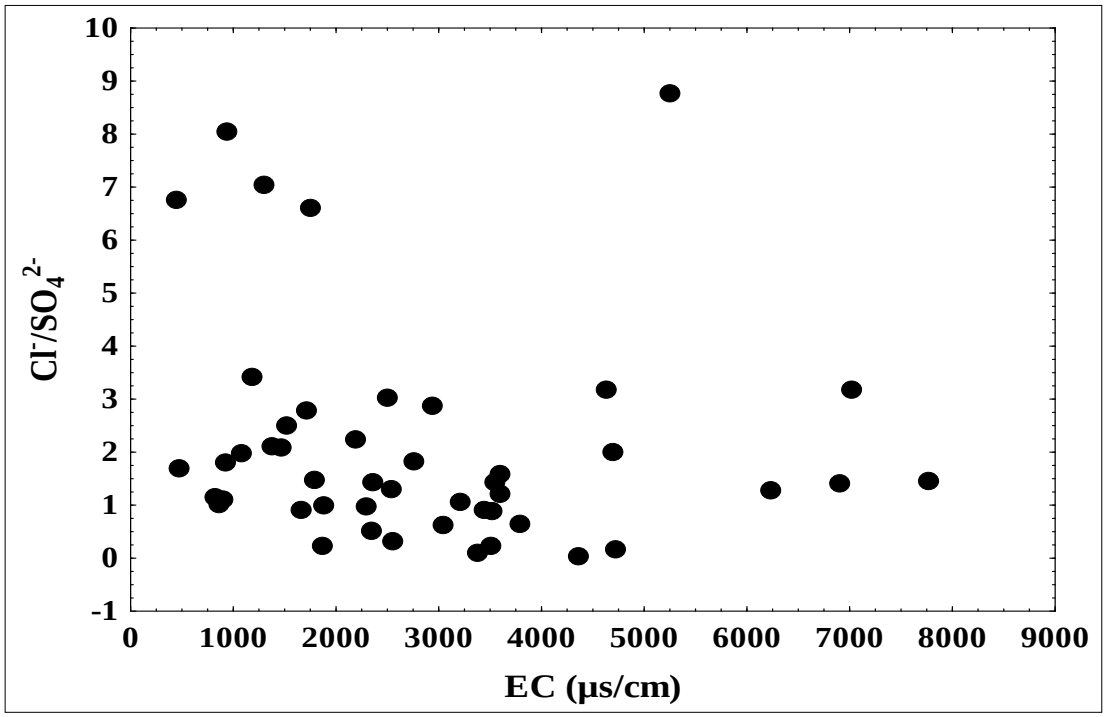


Figure 59 : Évolution des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité électrique

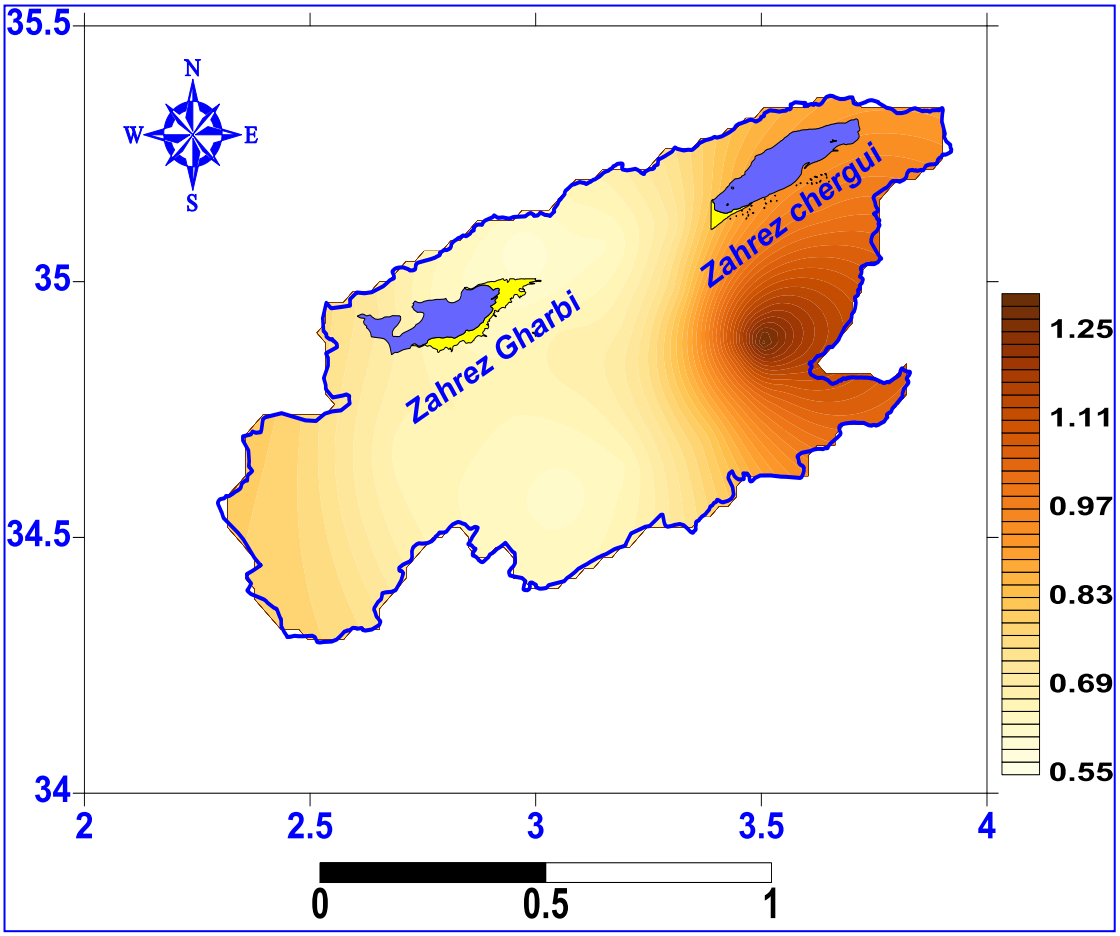


Figure 60 : Carte du rapport r Na /r Cl. Octobre 2006

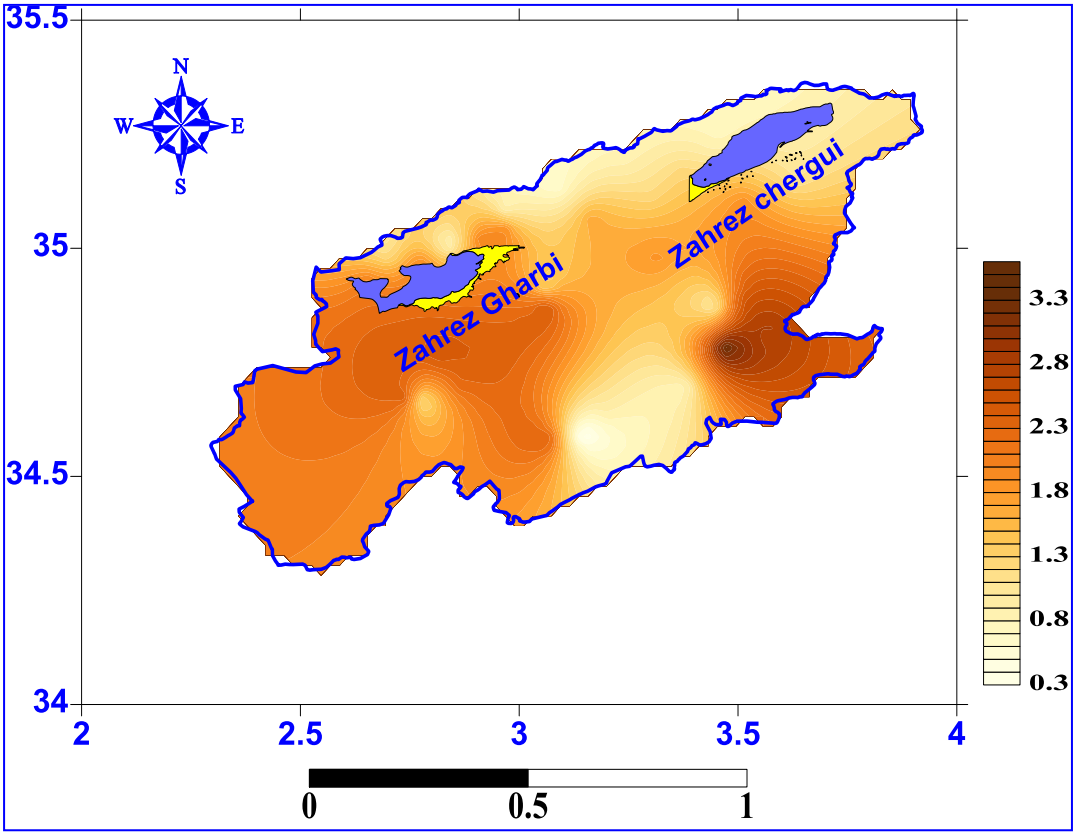


Figure 61 : Carte du rapport r Ca /r Mg. Octobre 2006

3.5.4 Mise en évidence des échanges de base

L'indice d'échange de base (i.e.b) exprime l'échange de cations entre l'eau souterraine et la matrice argileuse qui peut avoir lieu dans un aquifère, il est calculé par l'équation de Schoeller (SCHOLLER, 1977; BEN MOUSSA et al., 2012):

$$\text{ieb} = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl-}$$

- Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes.

- Si l'i.e.b est positif alors les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes.

- Si l'i.e.b = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant. Dans le cas où l'i.e.b est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permutolites, il est préférable de calculer l'i.e.b par la formule suivante :

$$\text{ieb} = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rSO_4^{2-} + rHCO_3^- + rNO_3^-}$$

L'interprétation des données des i.e.b. calculés montre que la majorité des points d'eau, ont des i.e.b. positifs, les eaux échangent donc les ions (Na^+ et K^+) contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des argiles. Seuls le point d'eau F39 présente un i.e.b négatif, où les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des eaux sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ de la roche réservoir (Figure 62).

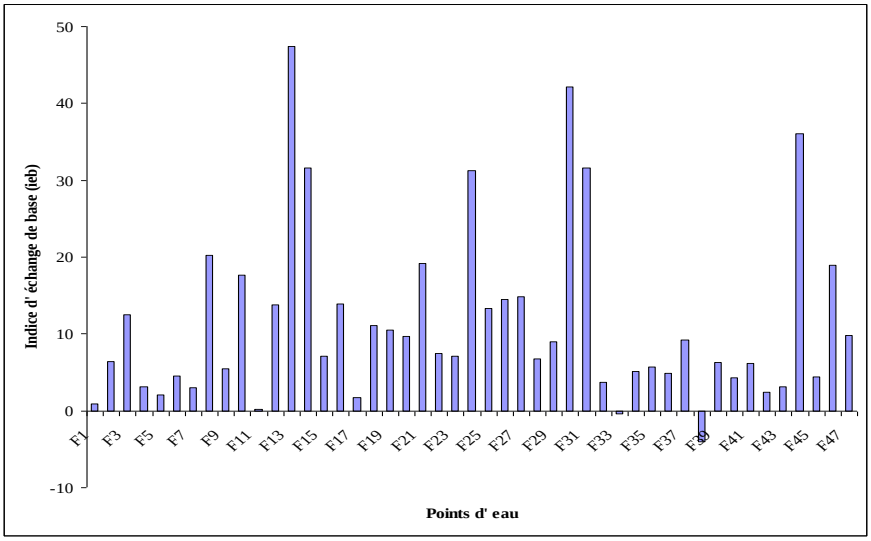


Figure 62 : L'indice d'échange de base (i e b) pour les points d'eau de la zone d'étude

3.6 Mise en évidence de la minéralisation

3.6.1 Indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux

L'étude d'équilibre chimique des eaux souterraines étudiées et de leurs états de saturation vis-à-vis des phases minérales est un outil clef dans la compréhension des processus géochimiques à l' origine de la minéralisation acquise (BOUTELDJAOUI, et al., 2019). En géochimie, il est souvent utile de déterminer le degré de solubilité d'un minéral dans l'eau. Pour cela, on calcule l'indice de saturation (IS) dans cette eau, vis-à-vis du minéral considéré (APPELO et POSTAMA, 1996). Il est exprimé par l'expression suivante :

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

PAI : Produit d'activité ionique

Ks: Constante de solubilité du produit

- IS= 0, l'eau est saturée vis-à-vis du minéral considéré,
- IS> 0, l'eau est sursaturée vis-à-vis du minéral,
- IS< 0, l'eau est sous-saturée vis-à-vis du minéral.

Dans notre étude, les indices de saturation par rapport aux minéraux et les équilibres chimiques ont été calculés à l'aide du programme PHREEQC (PARKHURST et APPELO, 1999).

3.6.1.1 Les minéraux évaporitiques

Les minéraux évoporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux Carbonatés (Figure 63 et 64). Les indices de saturation (IS) vis-à-vis de la halite pour l'ensemble des échantillons varient de –7,60 à –4,50, ce qui ce qui illustre une sous saturation des eaux vis-à-vis de ce minéral. On constate également l'étroite corrélation (coefficient de corrélation R= 0,89) qui existe entre l'indice de saturation vis-à-vis de la halite et la concentration $Na^+ + Cl^-$ (Figure 65), Ceci confirme que, majoritairement, les ions Na^+ et Cl^- dissous dans les eaux de la nappe ont une origine commune qui serait la dissolution de la halite.

La Figure 66 montre une étroite corrélation (coefficient de corrélation R =0,86) entre IS gypse et $Ca^{2+} + SO_4^{2-}$, ce qui peut indiquer la dissolution de ce minéral. Cet indice de saturation varie pour l'ensemble des échantillons analysés de -3,03 à -0,03. Les eaux souterraines de la zone d'étude sont sous saturées vis-à-vis du gypse ce qui tend à renforcer l'hypothèse de la dissolution de ce minéral dans les eaux de la nappe (BOUTELDJAOUI, et al., 2017). En outre, la Figure 66, illustrant les étroites corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de l'anhydrite en fonction de $Ca^{2+} + SO_4^{2-}$ (coefficient de corrélation R =0,86), renforce l'hypothèse de la dissolution de ce minéral.

3.6.1.2 Les minéraux carbonatés

Les minéraux carbonatés montrent des degrés de saturation différents. La dolomite enregistre des indices qui varient de -0,71 à 3,51, suivi de la calcite dont l'indice varie de -1,40 à 1,86 et enfin celui de l'aragonite qui varie de -0,53 à 1,72. Par ailleurs, le calcul des indices de saturation des minéraux carbonatés (Figure 67 et 68) montre que la majorité des eaux prélevées sont sur saturés vis-à-vis de la calcite, l'aragonite et la dolomite, cette sursaturation indique qu'une précipitation de ces minéraux peut avoir lieu dans l'aquifère. L'absence de corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite et de l'aragonite en fonction de $Ca^{2+} + HCO_3^-$ et de la dolomite en fonction de $Ca^{2+} + Mg^{2+} + HCO_3^-$ infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés. Il est a noté que la dissolution de la calcite est une réaction rapide et l'eau peut atteindre la saturation en traversant la zone non saturée (APPELO et POSTAMA, 1996). La dissolution de la dolomite est une réaction plus lente (de l'ordre de quelques mois) que celle de la calcite.

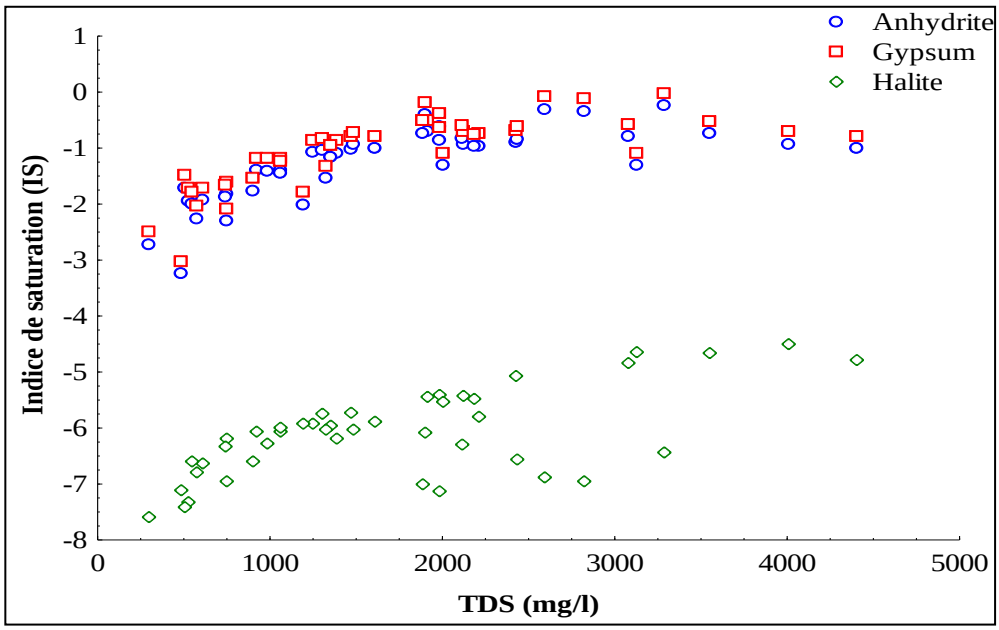


Figure 63 : Relation Résidu sec (TDS) et les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux évaporitiques

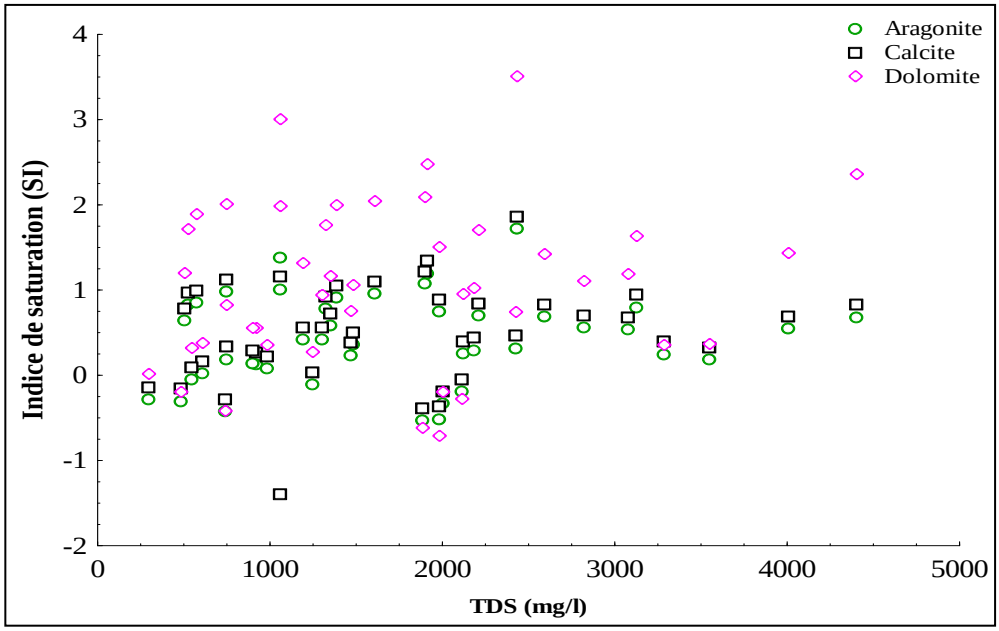


Figure 64 : Relation Résidu sec (TDS) et les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux carbonatés

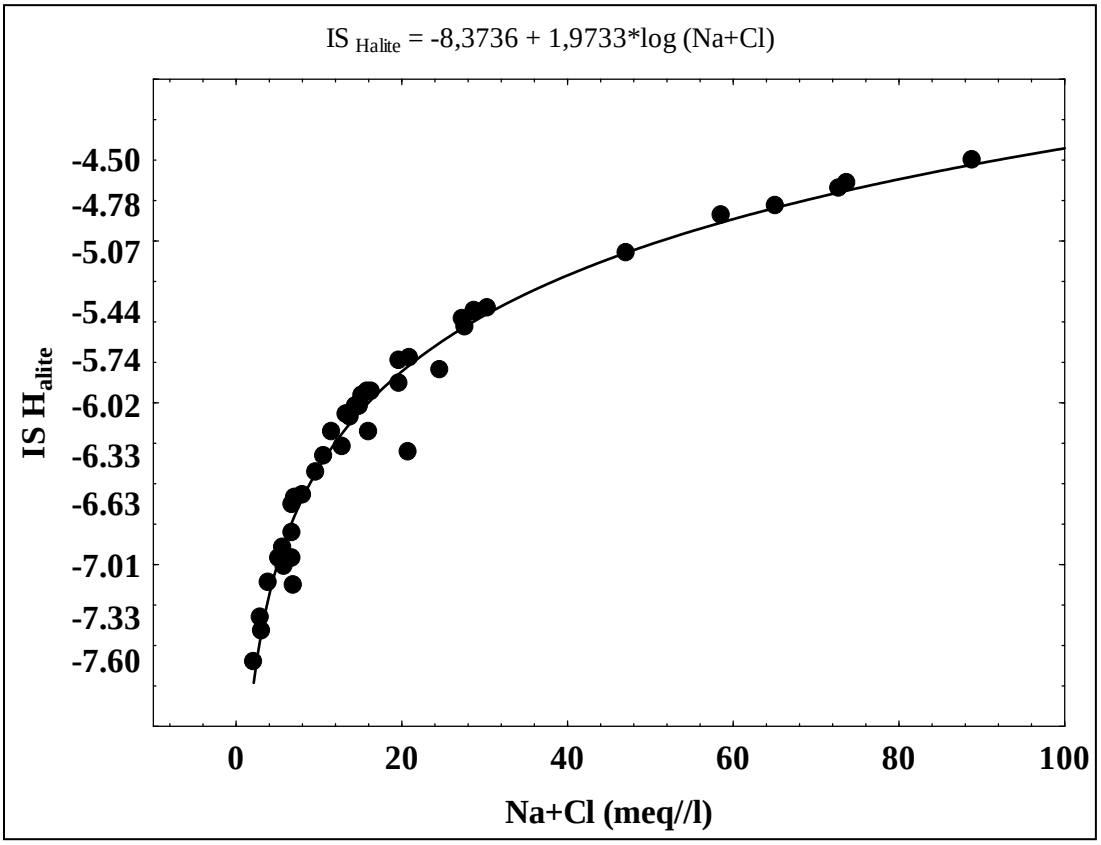
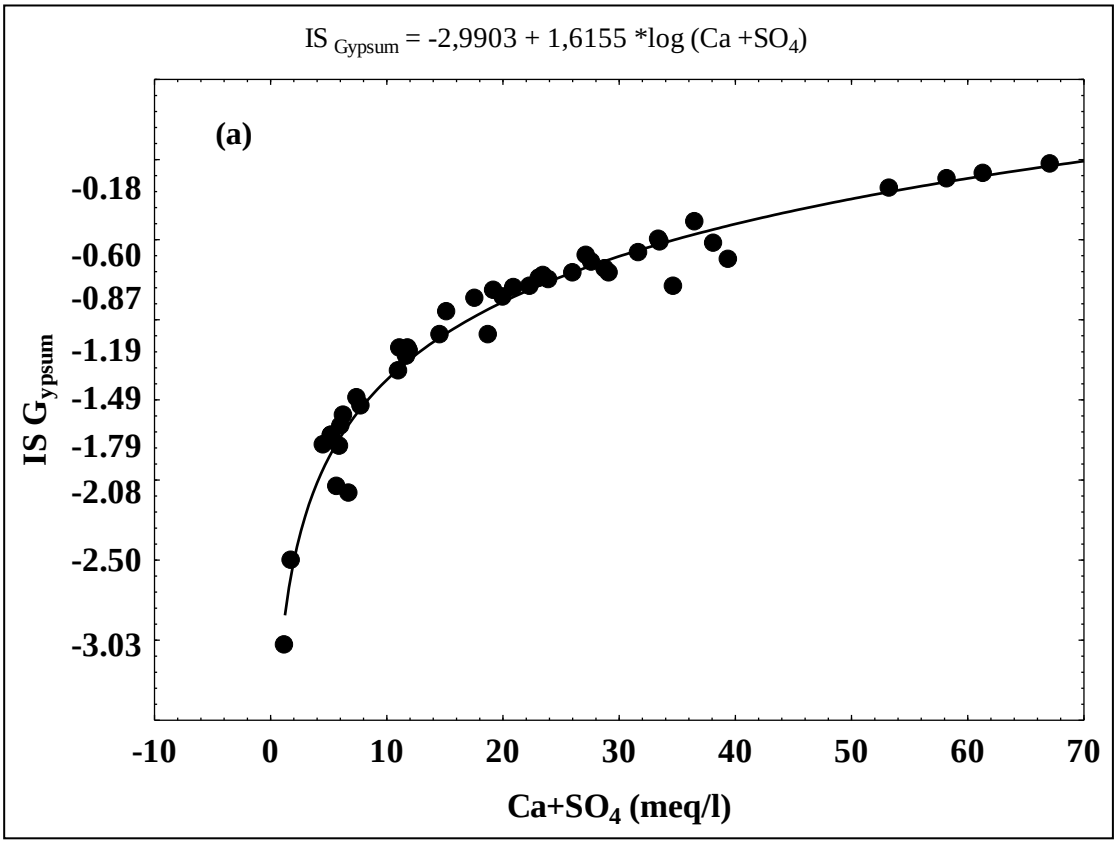


Figure 65 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la halite en fonction de Na^++Cl^-



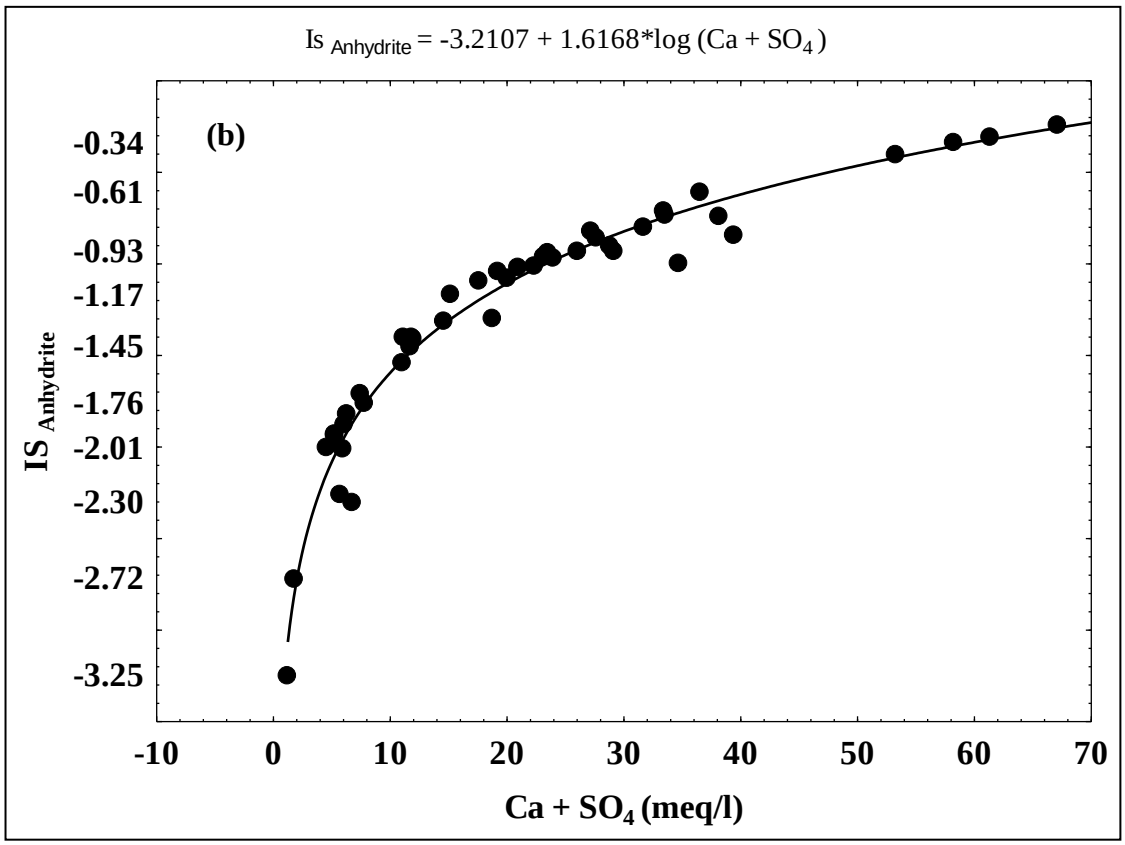
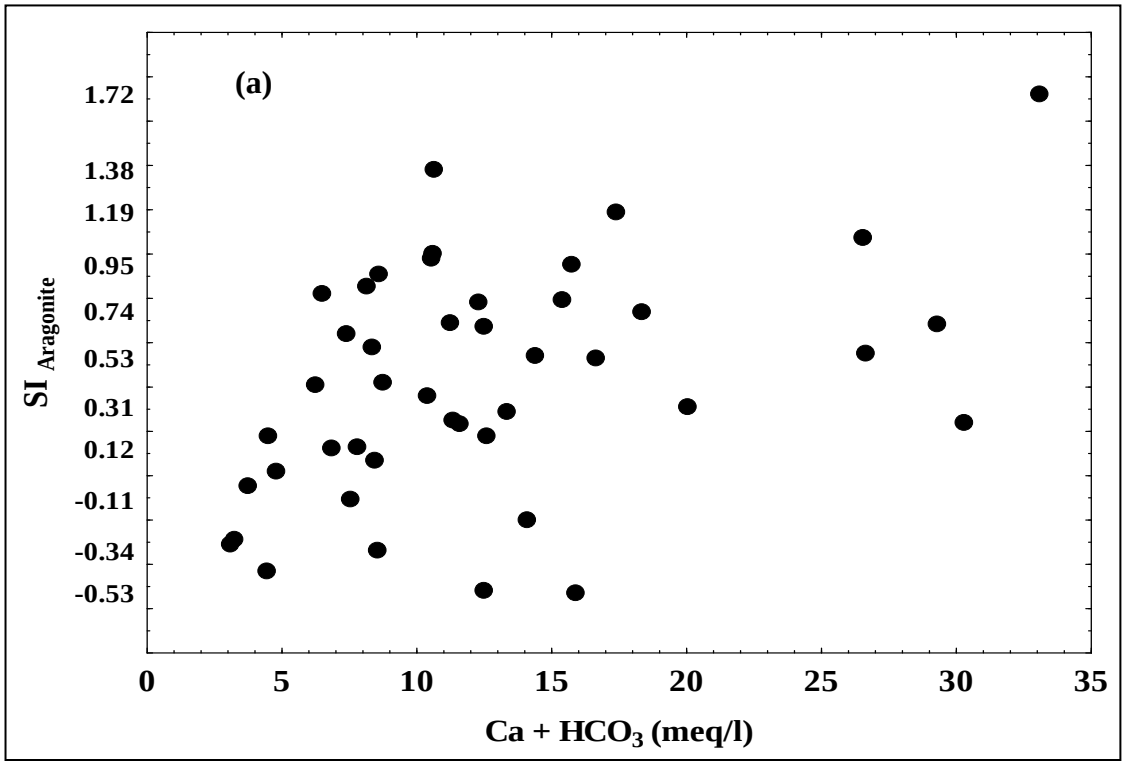


Figure 66 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux évaporitiques en fonction de Ca^{2+}+SO_4^{2-}: (a) gypse, (b) anhydrite



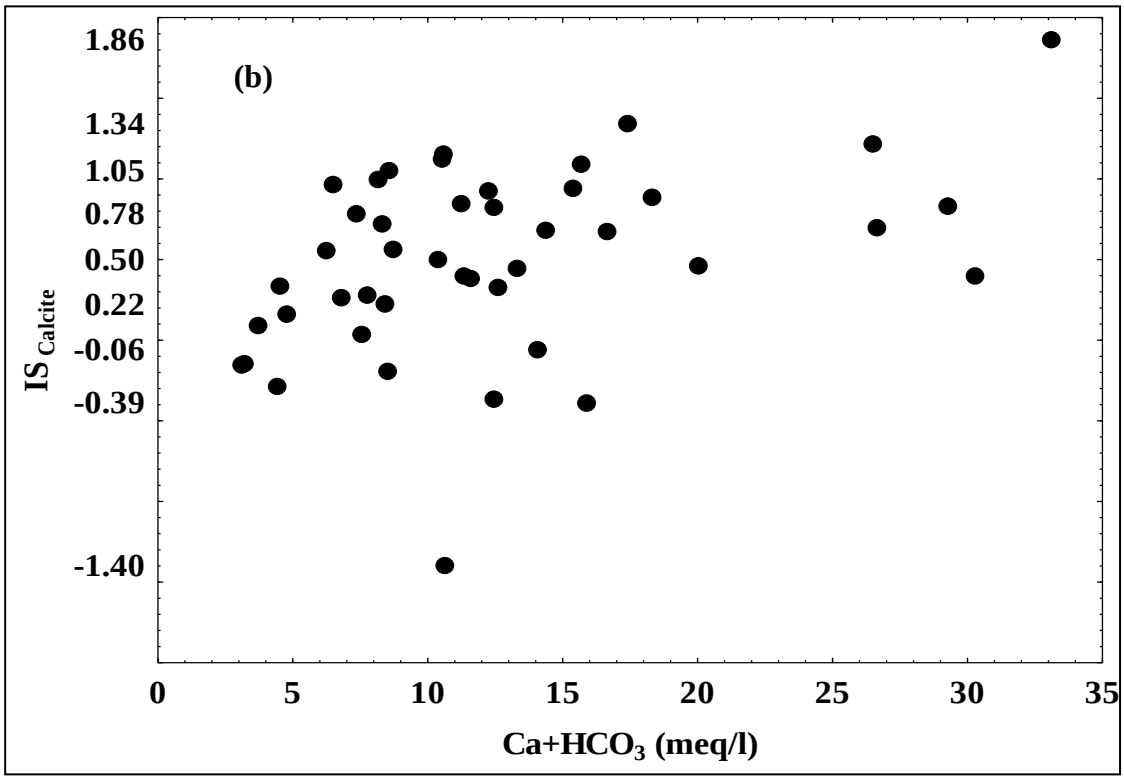


Figure 67 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés en fonction de Ca^{2+}+HCO_3^-: **(a)** aragonite, **(b)** calcite.

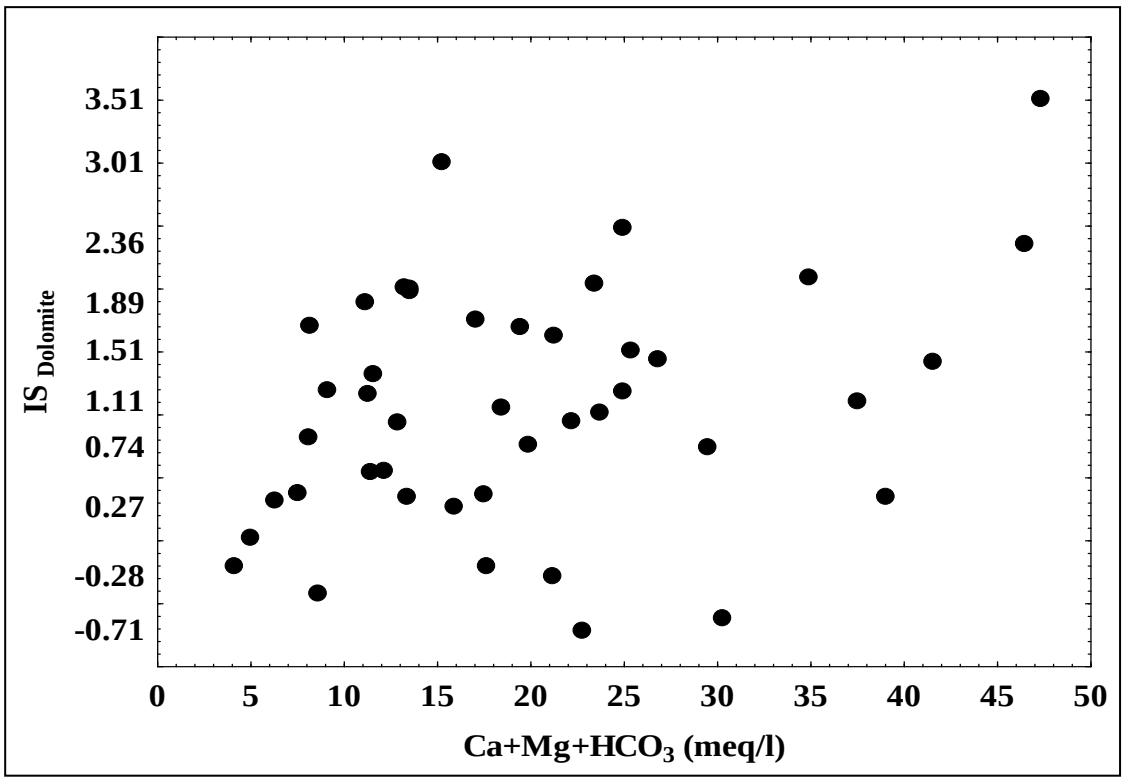


Figure 68 : Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la dolomite en fonction de Ca^{2+}+$Mg^{2+}HCO_3^-$

3.7 Diagramme de Gibbs

Le diagramme de Gibbs (1970) est largement utilisé dans l'établissement des relations entre la composition chimique des eaux et les caractéristiques lithologiques des aquifères. Gibbs s'est basé sur les rapport [r(Na+K/Na+K+Ca)] et r(Cl/Cl+HCO_3) en fonction des valeurs du solide dissous (TDS).Sur le diagramme de Gibbs et proportionnellement au résidu sec, trois zones de domaine: de la précipitation, de l'évaporation et de l'interaction eau/roche , sont distinguées (GIBBS, 1970).

Le Diagramme de Gibbs (Figure 69) montrent qu'environ 64% des échantillons prélevés se retrouvent à l'intérieur de la zone de prédominance de l'évaporation-précipitation, traduisant l'influence des conditions climatiques sur la qualité physico-chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude. D'autre part, la zone de dominance de l'interaction eau/roche englobe 36% des échantillons prélevés. Cela s'expliquerait par l'influence de la lithologie des formations géologique sur la qualité des physico-chimiques des eaux souterraines.

3.8 Aptitude des eaux a l'irrigation

L'étude chimique des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques, pour les plantes qui supportent mal les sols saturés en sodium. En plus, les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante. Dans ce travail, nous allons mettre en évidence l'utilisation à des fins agricoles des eaux de la région. Les méthodes de Richards et Wilcox, les plus fréquemment utilisées, seront développées.

3.8.1 Classification des eaux par la méthode de Richards

Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation (RICHARDS, 1954). Après avoir reporté tous les points d'eau sur le diagramme de Richards (Figure 70), selon la conductivité électrique et la valeur de SAR (Sodium Absorption Ratio), on a pu dégager la présence des quatre classes suivantes : La classe C2S1 : Cette classe englobe 4 % des échantillons d'eau analysés, présentant un danger de salinité moyenne avec un faible danger d'alcalinité. Elle caractérise une eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels. La classe C3S1 : Cette classe englobe 36 % des échantillons d'eau analysés, présentant un danger de salinité élevé et un faible danger d'alcalinité. Cette classe renferme les eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de

bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. La classe C4S1 représente 34% des points d'eau analysés. Elle caractérise une eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.

La classe C4S2 représente 13% des points d'eau analysés, Présentant un danger de salinité très élevé et un moyen danger d'alcalinité. Cette classe représente les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.

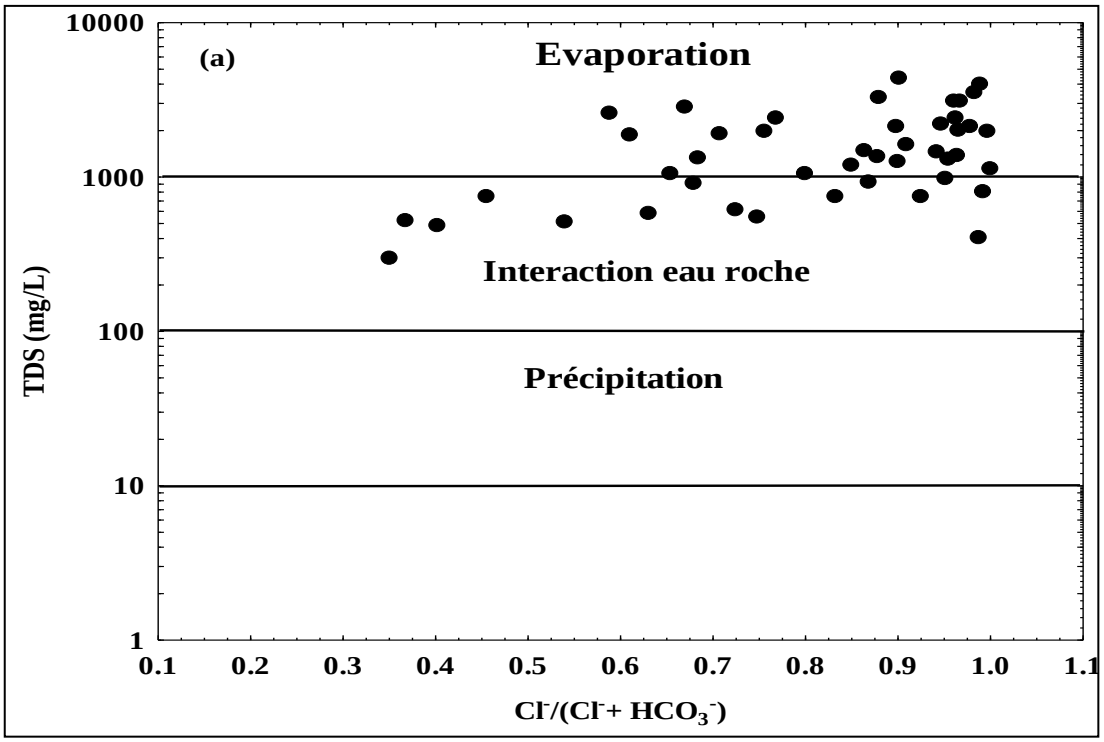
3.8.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage (WILCOX, 1958). La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (Figure 71).

Le $\%Na^+$ est défini par la formule suivante :

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

où tous les éléments sont exprimés en méq / l.



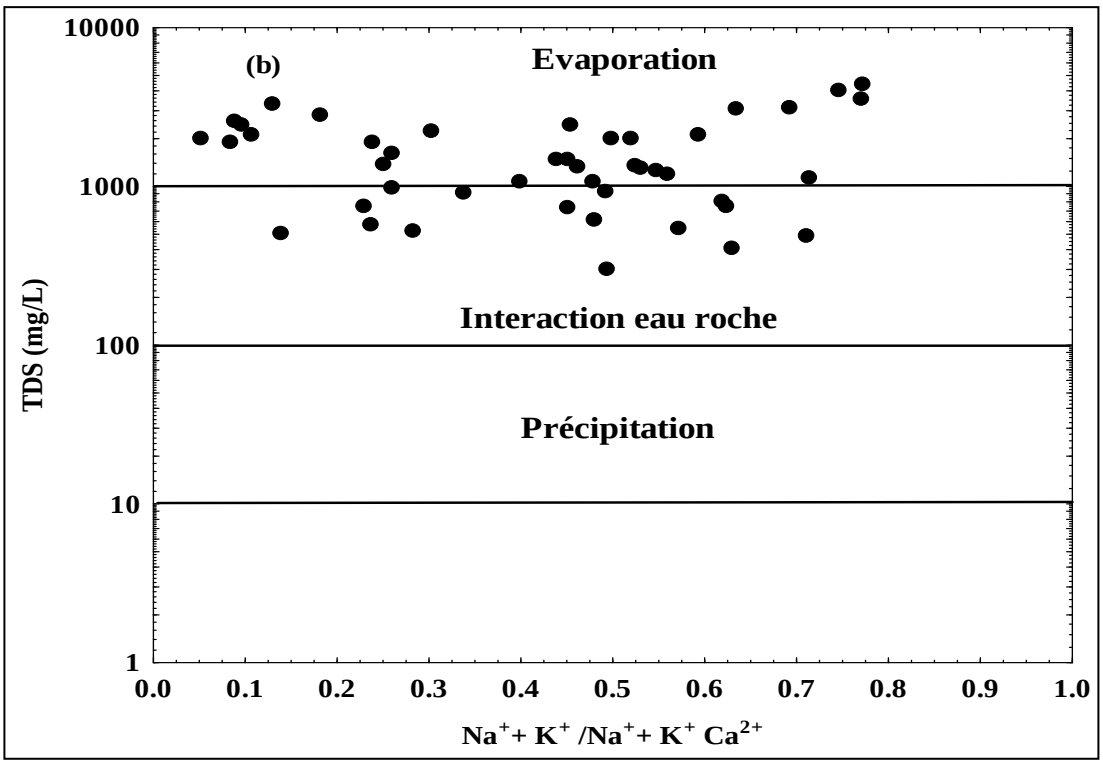


Figure 69 : Représentation graphique des points d'eaux sur le diagramme de Gibbs

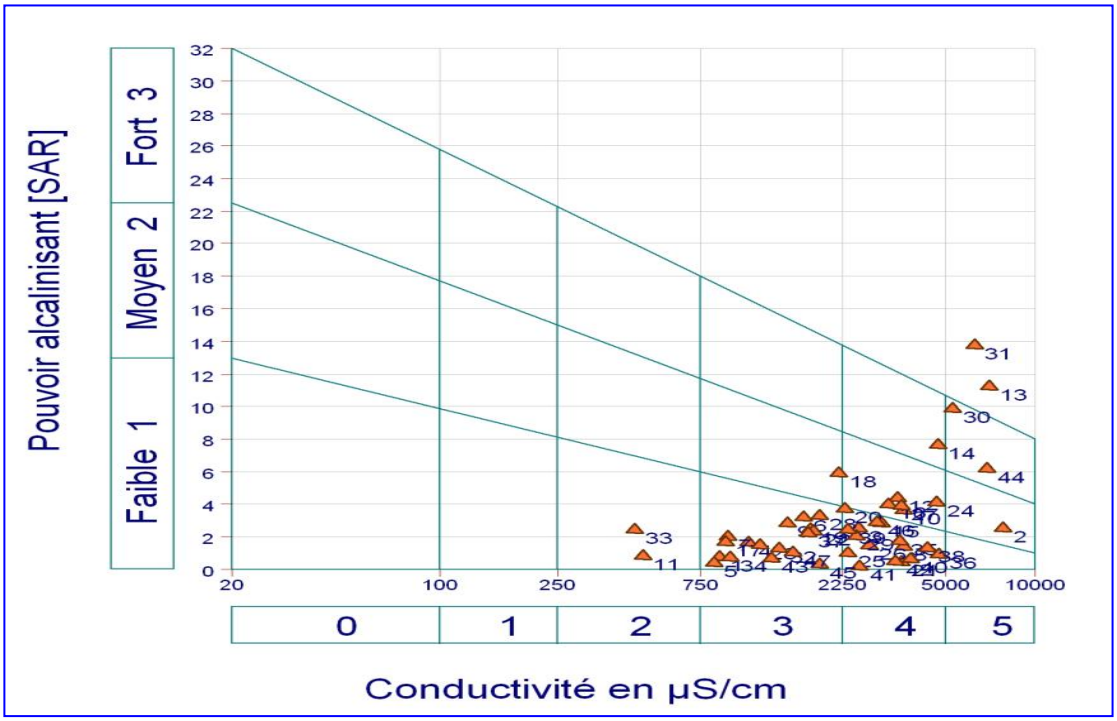


Figure 70 : Diagramme de Richards. Octobre 2006

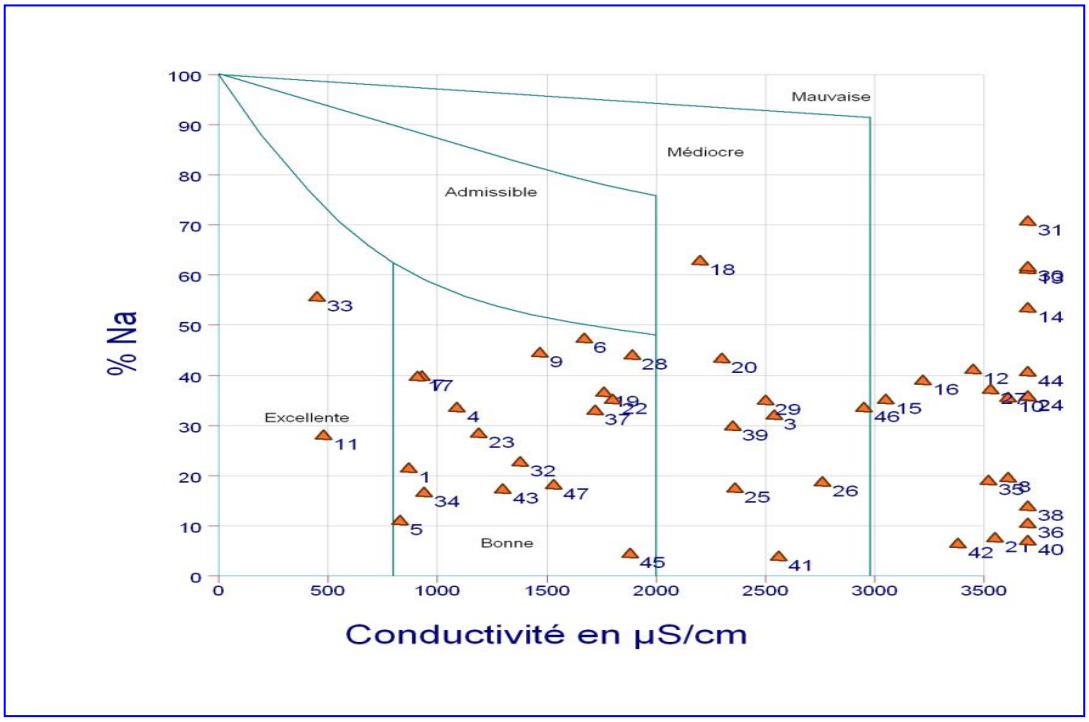


Figure 71 : Diagrammes de Wilcox. Octobre 2006

La représentation graphique des points d'eaux sur le diagramme de Wilcox montre que les eaux souterraines du bassin des Zahrez, appartiennent aux quatre classes : Excellente, Bonne, Médiocre et Mauvaise. La classe Excellente : cette classe englobe 2% des échantillons d'eau analysés. La classe Bonne : Elle est la plus répandue dans la nappe (36 %). La classe médiocre représente 17 % des points d'eau de la zone d'étude. La classe Mauvaise : cette classe regroupe 13% des échantillons d'eau analysés.

3.9 Analyse statistique multivariée des données hydrochimiques

3.9.1 Analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique de données multidimensionnelles. Cette méthode a été utilisée en France par MUDRY et BLAVOUX (1986), et RAZAK et DAZY (1990) pour le traitement des données hydrochimiques des aquifères karstiques sur des variables centrées et réduites. De même, ONUGBA (1990), et EL TAYEB (1993) l'ont utilisé dans le cadre des études du comportement hydrochimique des aquifères d'altérites fissurés ou sédimentaires en Afrique tropicale. En effet, cette méthode permet de rechercher les relations entre les variables chimiques et de regrouper celles qui présentent un comportement semblable afin d'avoir une idée sur l'évolution du chimisme des eaux souterraines. Dans cette étude, l'ACP a été appliqué aux données hydrochimiques pour extraire les principaux facteurs correspondant aux différentes sources de variation des données. L'Analyse en Composantes Principales a été

faite sur 12 paramètres physico-chimiques provenant de l'analyse d'eaux échantillonnées sur l'ensemble de la zone d'étude. Ceci afin de mettre en évidence les associations entre les différentes variables et l'existence éventuelle de sous-populations.

Plusieurs corrélations significatives à moins significatives existent entre les différents ions (Tableau 30). On considère les coefficients de corrélation supérieure à 0,7 comme significatifs tandis que ceux compris entre 0,5 et 0,7 sont moins significatifs (CLUTIER et al., 2008). Une forte corrélation (r >0,7) a été observée entre la conductivité électrique (CE) et le résidu sec (TDS), les chlorures, le sodium. Des corrélations moins significatives sont mises en évidence entre la conductivité électrique (CE) et le calcium, les sulfates et le magnésium, les coefficients de corrélation étant respectivement 0,69, 0,63, 0,61. La minéralisation est donc liée essentiellement aux chlorures et au sodium ainsi qu'aux autres éléments. Les chlorures, le sodium, le calcium participent de manière importante à la minéralisation totale des eaux. Le calcium est bien corrélé avec le magnésium (r=0,76), les chlorures (r=0,79), les sulfates (r=0,71). La forte corrélation entre magnésium et calcium renseigne sur leur origine commune. En outre, des corrélations moins significatives entre les chlorures et les sulfates (r=0,60). Le magnésium et les sulfates(r=0,69), le sodium et les sulfates (r=0,64). Ceci laisse penser que ces éléments peuvent avoir une origine liée au lessivage des niveaux évaporitiques et la dissolution du gypse et de l'halite qui peuvent augmenter respectivement les teneurs des ions calcium, sodium, sulfates et chlorures.

Tableau 30 Matrice de corrélation des variables.

	EC	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	pH	CO_3^{2-}	TDS	SO_4^{2-}
EC	1,00											
Ca^{2+}	**0,69**	1,00										
Mg^{2+}	**0,61**	**0,76**	1,00									
Na^{+}	**0,74**	**0,59**	0,49	1,00								
K^{+}	0,15	0,24	0,14	0,14	1,00							
Cl^{-}	**0,77**	**0,79**	**0,65**	**0,88**	0,13	1,00						
HCO_3^{-}	0,08	-0,06	-0,05	-0,17	0,37	-0,20	1,00					
NO_3^{-}	0,02	0,22	0,05	0,16	0,21	0,16	0,09	1,00				
pH	0,02	-0,14	-0,23	0,01	-0,19	-0,04	-0,45	0,07	1,00			
CO_3^{2-}	0,16	-0,10	-0,19	-0,07	-0,13	-0,16	-0,08	-0,13	0,63	1,00		
TDS	**0,81**	**0,83**	**0,73**	**0,89**	0,18	**0,96**	-0,14	0,15	-0,09	-0,17	1,00	
SO_4^{2-}	**0,63**	**0,71**	**0,69**	**0,64**	0,11	**0,60**	-0,25	0,06	-0,02	-0,05	**0,78**	1,00

3.9.1.1 Analyse de l'espace des variables (ACP)

Pour tenter de préciser les relations entre les éléments chimiques (variables) et de regrouper les points d'eau (individus) ayant le même chimisme, nous avons réalisé une analyse en

composante principale (ACP). L'étude statistique des données physico-chimiques (12 variables) par l'analyse en composantes principales (ACP) montre l'existence de quatre axes principaux (Figure 72), présentant une variance totale de 76 %.

La projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 (Figure 73) montre que l'axe F1 exprime 38,69% de la variance totale et il est déterminé par les variables physico-chimiques: TDS, CE, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}. Cet axe correspond aux mécanismes d'acquisition de la minéralisation évaporitique et salifère, d'origine géologique (interaction eau- roche). On note la très bonne corrélation ($0,76 \leq r \leq 0,98$) entre l'axe F1 et les variables physico-chimiques : TDS, EC, Mg^{2+}, Na^{+} et Cl^{-}, qui sont quasiment confondus sur le graphique. Les nitrates ne sont pas bien corrélés avec cet axe, à cause de leur origine différente (utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture). L'axe F2 exprime 16,64% de la variance totale, il est représenté par les variables : pH, HCO_3^{-}et CO_3^{2-}, avec une relation inverse entre les bicarbonates (HCO_3^{-}) et le pH (Tableaux 5.3 et 5.4, annexe 5). Cet axe explique l'effet de pH sur l'équilibre calco-carbonique dans le système aquifère. L'axe F3 représente 11,55% de la variance totale et il est déterminé par Cl et SO_4^{2-}. Cet axe présente plus l'origine anthropique de ces éléments, engendrés par les activités agricoles et domestiques. L'axe F4 contribue pour seulement 9,12% de la variance totale, et il est déterminé par le potassium.

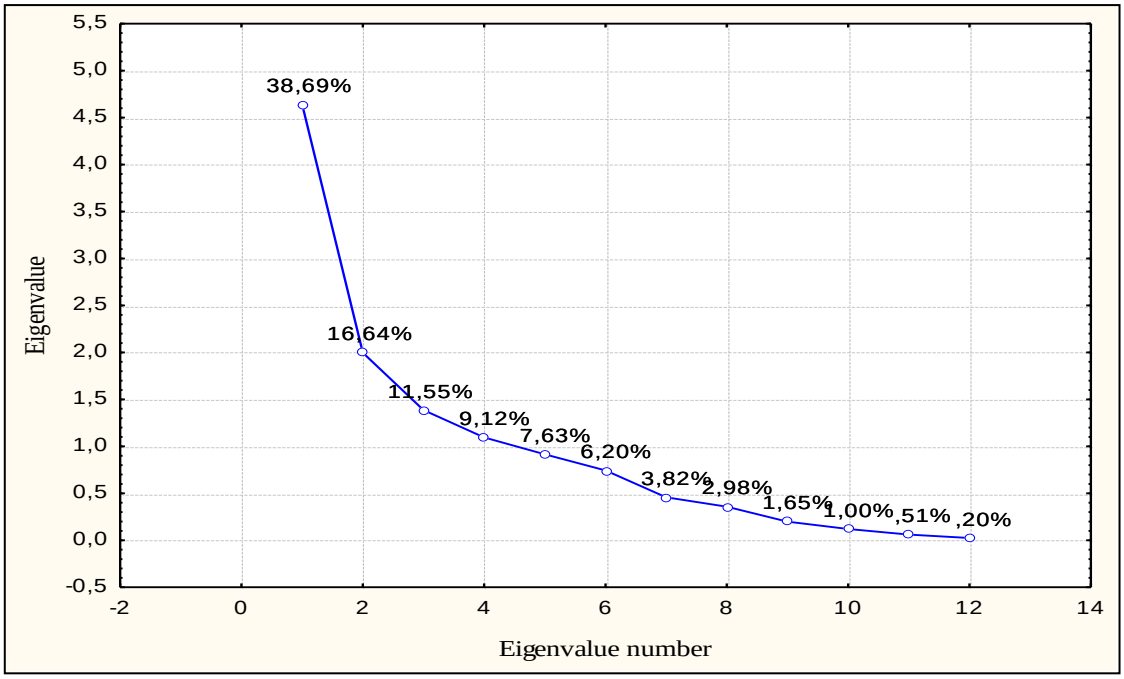
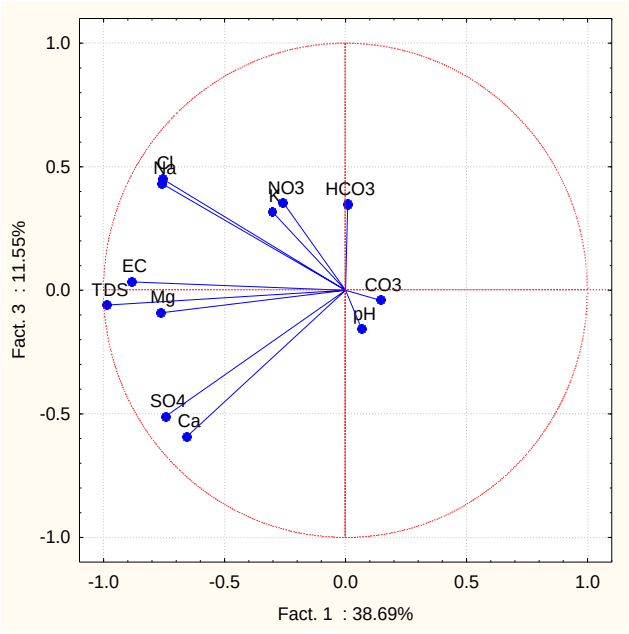
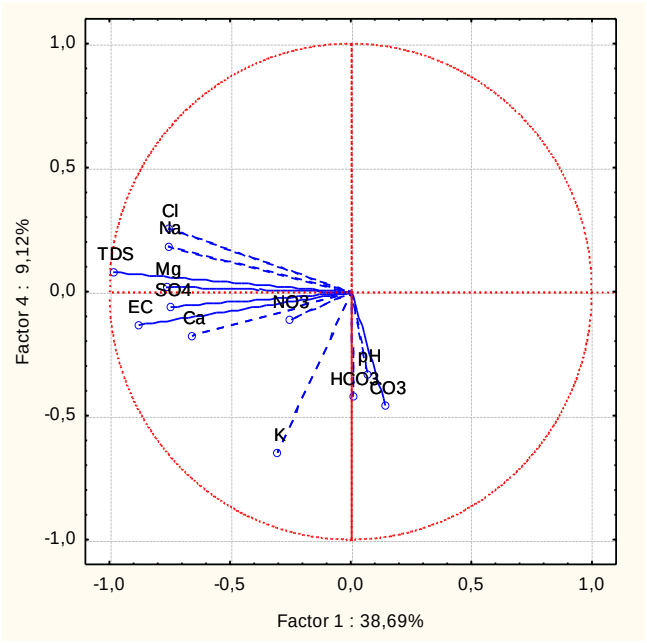


Figure 72 : Les valeurs propres de l'analyse (variances des composantes principales).





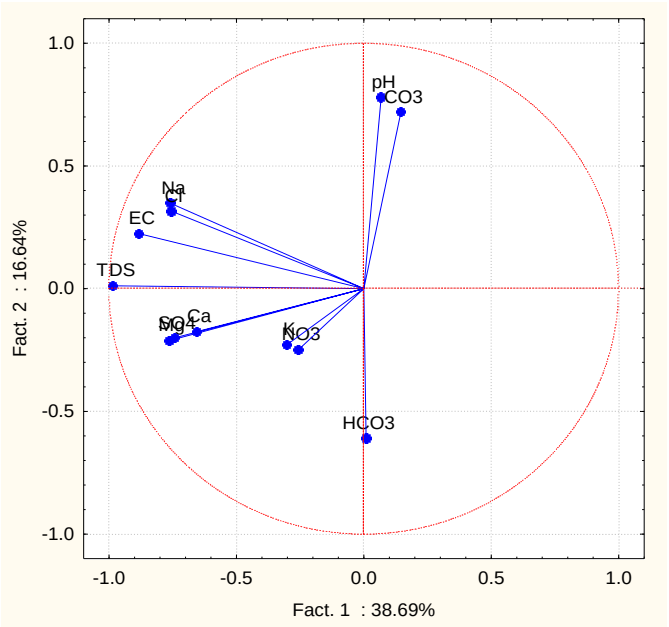


Figure 73 : ACP des données hydrochimiques des eaux souterraines dans le bassin des Zahrez

3.9.1.2 Analyse de l'espace des individus

L'analyse des Figures 74 et 75 de la projection des individus sur le plan factoriel (1x2) révèle que la répartition des échantillons se fait selon la conductivité et les teneurs en chlorures. Les eaux ayant de fortes conductivités se placent sur la partie négative de l'axe 1 (groupe 2 et 3). Le groupe 1 englobe 13 points d'eau (17-20, 22, 23, 25, 28, 32-34, 37, 43 et 47) est composé des eaux moyennement ou faiblement minéralisées. Leur conductivité est comprise entre 450 $\mu S.cm^{-1}$ et 2360 $\mu S.cm^{-1}$. Les points de ce groupe se placent sur la partie positive de l'axe 1.

Le groupe 2 est représenté principalement par les points d'eau (3, 8, 10, 12, 15, 16, 21, 24, 26, 29, 27, 35, 36, 38, 39-42 et 45-46) est caractérisé d'eaux moyennement minéralisées. Ces points se placent sur la partie négative de l'axe1. La conductivité électrique de ce groupe varie entre 1879 µS.cm^{-1} et 4730 µS.cm^{-1}.

Le groupe 3comprend les points d'eau les plus minéralisés de la région (13, 14, 30, 31 et 44), avec une conductivité électrique élevée, qui est comprise entre 4700 µS.cm^{-1} et 7030 µS.cm^{-1}. Ces valeurs relativement fortes sont dues aux teneurs en Na^+, Cl^- et SO_4^{2-}.

L'établissement des cartes isofacteurs des trois composantes principales (Figure 76, 77 et 78), révèle une forte minéralisation, due à la dissolution des formations évaporitiques localisées au Nord et à l'Ouest de la Zone d'étude. La pollution des eaux souterraines par les eaux usées ainsi que par infiltration et épandage des engrais chimiques, dans le secteur Nord-Est et le centre de la Zone d'étude.

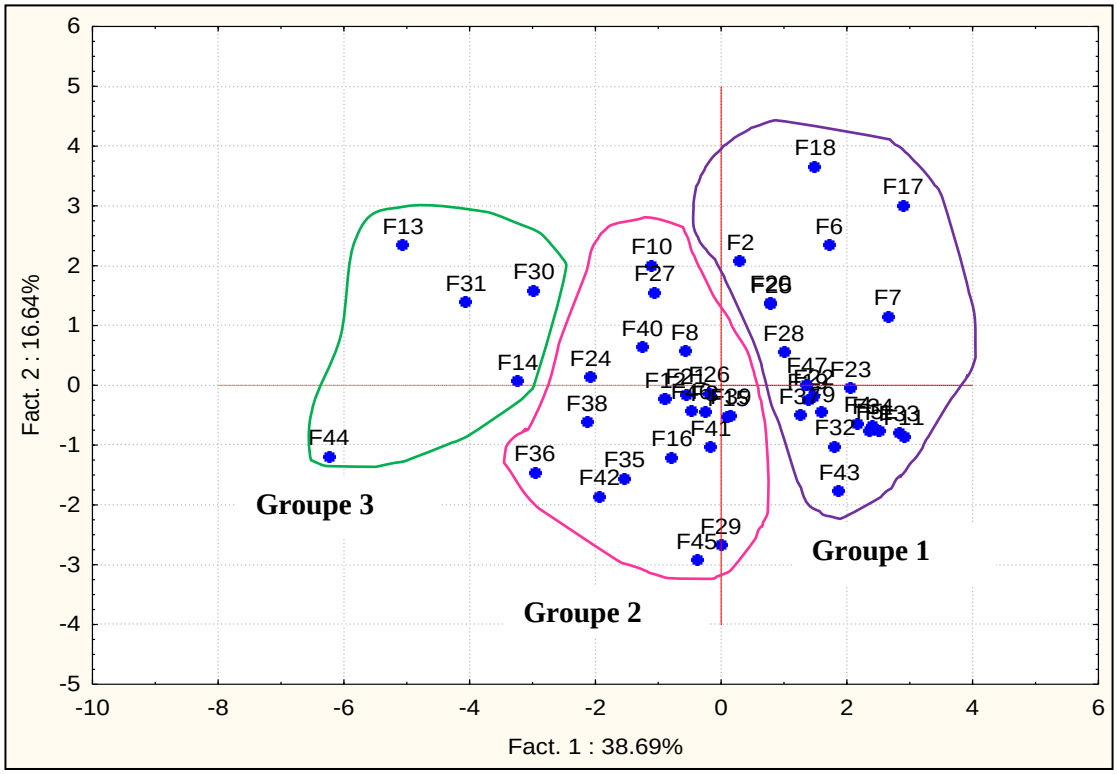


Figure 74 : Projection des individus sur le plan factoriel (1x2)

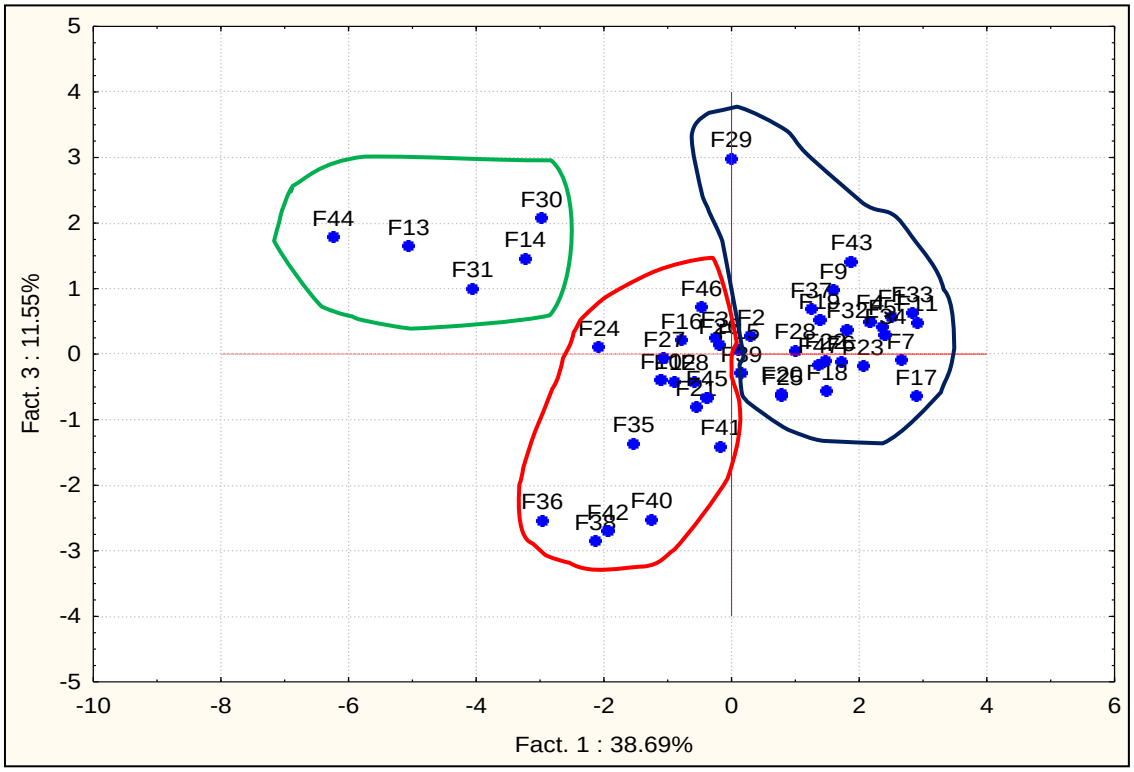


Figure 75 : Projection des individus sur le plan factoriel (1x3)

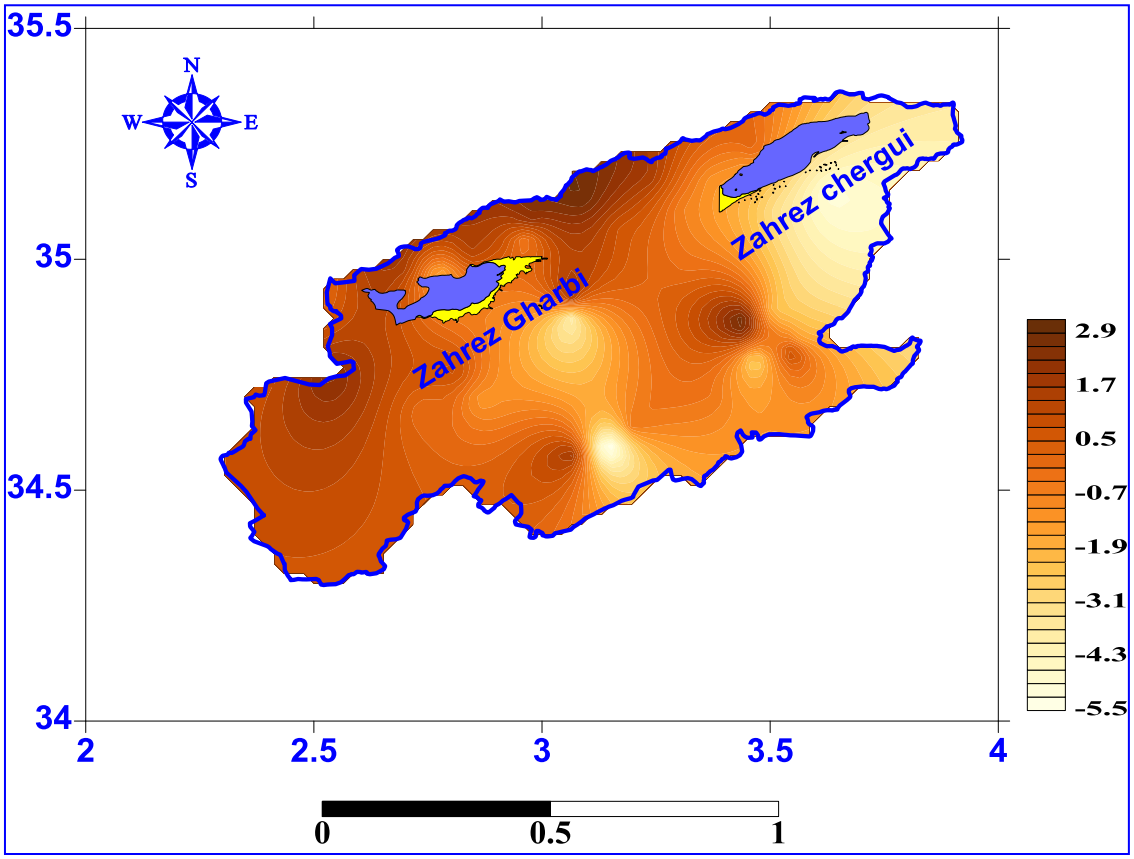


Figure 76 : Carte isofacteur de la de la première composante principale

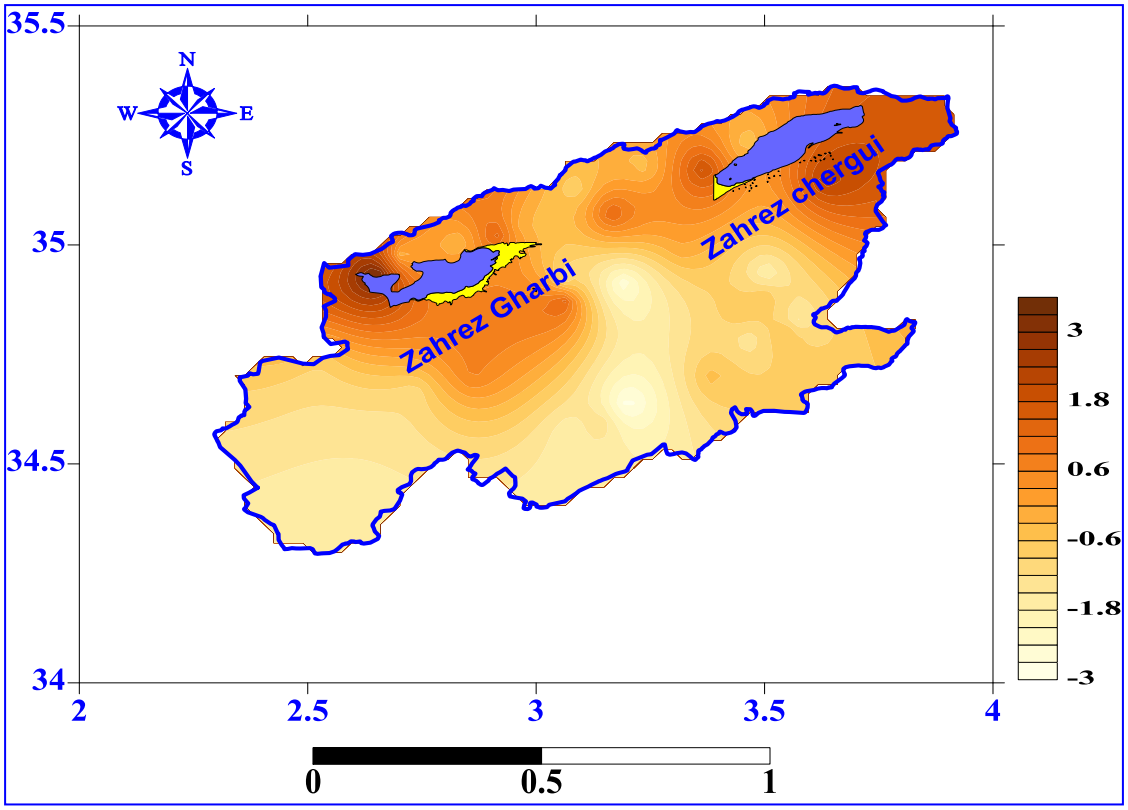


Figure 77 : Carte isofacteur de la deuxième composante principale

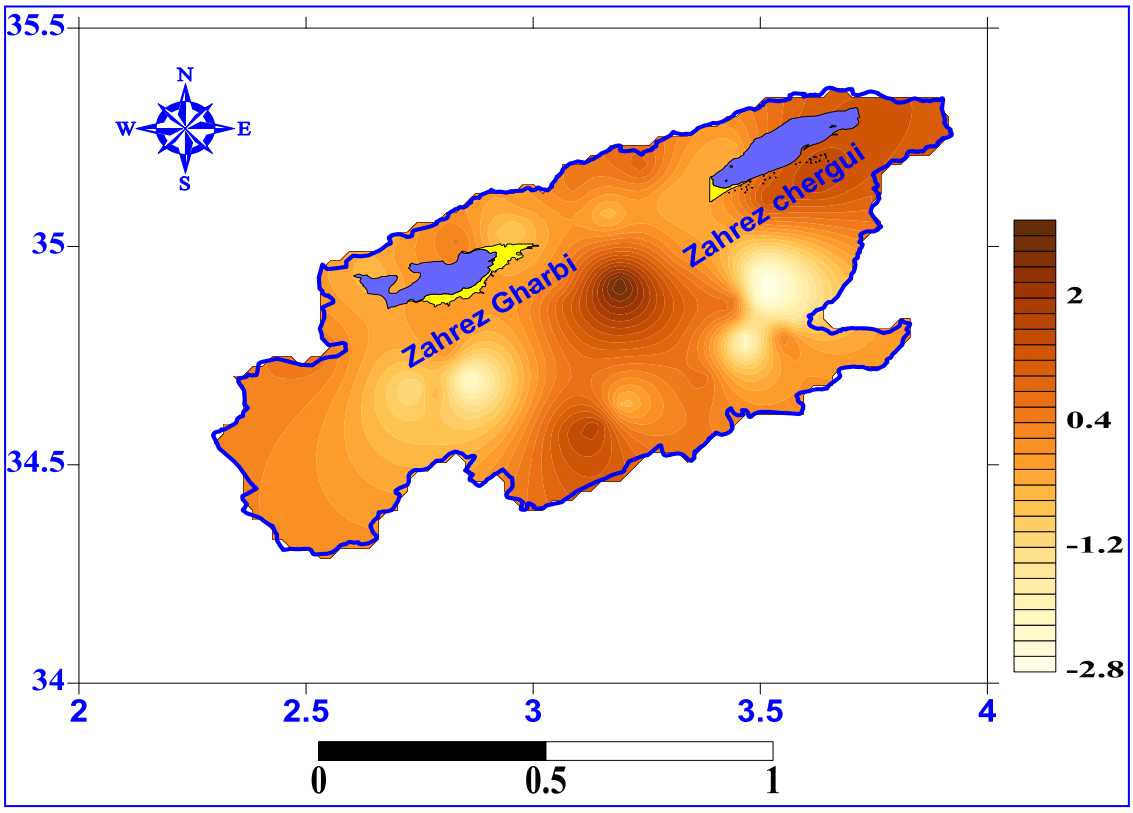


Figure 78 : Carte isofacteur de la troisième composante principale

3.9.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une technique de classification hiérarchique des données qui est largement appliquée dans les sciences de la Terre, et qui est souvent utilisée dans la classification des données hydrogéochimique. Cette méthode nous permet de distinguer les groupes d'eaux qui ont une composition hydrochimique similaire.

Il existe plusieurs mesures pour évaluer la distance ou le degré de ressemblance entre les échantillons. La distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) demeure la mesure de similarité la plus utilisée. Pour cette étude, on a utilisé la distance quadratique euclidienne (CLUTIER et al, 2008). Les sites de prélèvement avec la plus grande similitude sont d'abord regroupés. La CAH produit un arbre binaire de classification appelé dendrogramme, qui permet de décrire de façon explicite la structure finale de la classification obtenue : « plus les individus se regroupent dans l'arbre, plus ils se ressemblent »

Les données hydrochimiques ont été classées par Q-mode CAH dans l'espace à 11 dimensions (CE, TDS, pH, Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4, HCO_3et NO_3) et le résultat est présenté comme un dendrogramme (Figure 79). Trois groupes préliminaires sont choisis en fonction de l'examen visuel du dendrogramme. La conductivité électrique semble être un facteur distinctif majeur avec des concentrations croissantes dans tous les principaux ions dans l'ordre : le groupe 1, groupe 2 et le groupe 3 (Tableau 31).

Le groupe 1 est composé par les points d'eau : 1, 2, 4-7, 9, 17-19, 22, 23, 29 ,32-34 ,37 ,39 ,43et 47, et concerne 42 % des échantillons d'eau, représentant les eaux les moins minéralisées. Ce type d'eau est relativement frais avec une CE moyenne de 1640 µS /cm qui est la caractéristique de l'eau mixte (Ca- Na-Mg-Cl-SO_4-HCO_3) (Tableau 31).

Le groupe 2 est représenté par les points d'eau : 3, 8, 10, 12, 15, 16, 20, 21, 24, 25, 26, 28, 27, 35, 36, 38, 39-42 et 45-46, et occupe 47 %, représentant les eaux moyennement minéralisées, dont la minéralisation est liée principalement aux éléments chimiques SO_4^{2-}, Cl^-,Ca^{2+}et Na^+ et dans une moindre mesure à Mg^{2+}, HCO_3^- et K^+ (Tableau 31). La conductivité électrique de ce groupe est 3180 µs/cm qui est la caractéristique de l'eau mélangée Ca- Mg- Na- SO_4-Cl-HCO_3. Ce type d'eau traduit l'influence des formations carbonatées et évaporitiques sur le chimisme global des eaux souterraines de la zone d'étude.

Le groupe 3 est constitué par composé les points d'eau 13, 14, 30, 31 et 44, et concerne 11 % des échantillons d'eau, avec une conductivité électrique moyenne de 6028 µs/cm, et représente des eaux fortement minéralisées (Na-Mg-Ca-Cl-SO_4-HCO_3). Ces eaux montrent bien

l'influence des processus d'interaction eau-roche et temps de résidence sur l'augmentation de minéralisation de ces eaux. En outre, ce groupe est représentatif d'une eau très marquée par des pollutions d'origines anthropiques avec des concentrations élevées en chlorures, en sulfates et en nitrates (Tableau 31).

La carte de répartition spatiale des différents groupes de la classification ascendante hiérarchique (Figure 80) montre que le premier groupe concerne l'ensemble eaux échantillonnées dans la partie Nord et Est de la Zone d'étude. Le groupe 2 inclut les échantillons d'eaux situés au Nord et Nord-Est de la Zone d'étude. Le groupe 3 englobe les points d'eaux localisés au centre de la Zone d'étude.

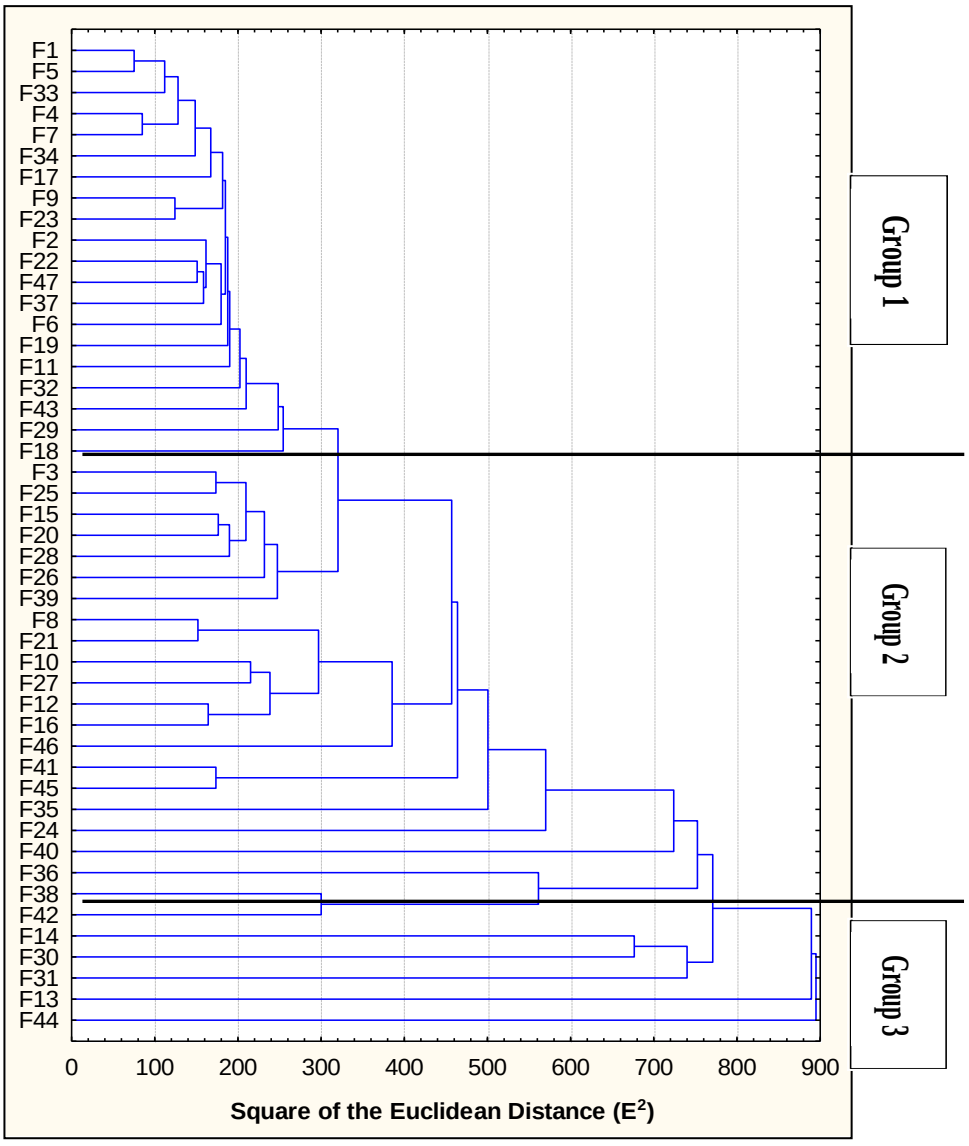


Figure 79 : Dendrogramme de classification ascendante hiérarchisée des eaux souterraine dans le bassin des Zahrez

Tableau 31: Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour les trois principaux groupes.

Group	%	EC µS /cm	TDS mg/l	pH	Ca^{2+} mg/l	Mg^{2+} mg/l	Na^{+} mg/l	K^{+} mg/l	Cl^{-} mg/l	HCO_3^{-} mg/l	NO_3^{-} mg/l	CO_3^{2-} mg/l	SO_4^{2-} mg/l
G-1 (n=20)	42	1,640	778,75	8,33	90,81	38,19	84,89	8,30	209,15	116,10	40,44	4,20	130,25
G-2 (n=22)	47	3,180	1987,55	8,21	299,91	105,18	158,37	10,99	423,33	82,84	39,35	2,50	791,86
G-3 (n=5)	11	6,028	3634,20	8,29	254,74	157,03	763,00	15,23	1371,20	96,40	64,20	1,60	851,80

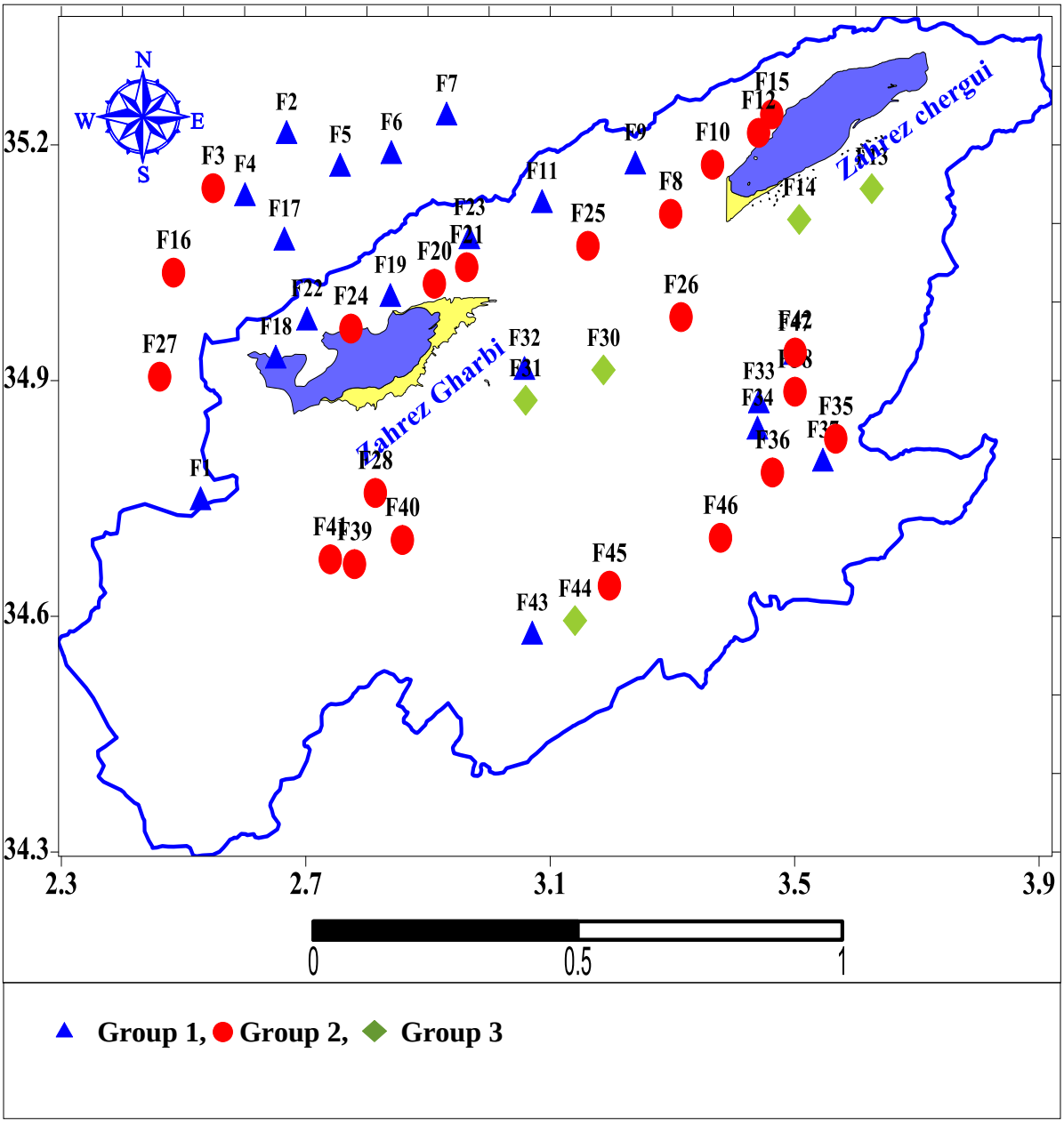


Figure 80 : Répartition spatiale des groupes (G1, G2 et G3).

3.10 Conclusion

Cette étude sur les eaux souterraines a pu mettre en évidence les différents mécanismes hydrogéochimiques régissant le processus de minéralisation dans le système aquifère du bassin des Zahrez. L'interprétation des données hydrochimiques ont montré que l'abondance des ions majeurs est comme suit : $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ et $Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$.

La représentation graphique des points d'eaux analysés sur le diagramme de Piper révèlent la présence de deux faciès, l'un sulfaté calcique (Ca-Mg-Cl-SO_4) calcique et l'autre sulfaté sodique (Na-K-Cl-SO_4).Les indices de saturation ont permis de mettre en evidence le rôle des phénomènes de dissolution des minéraux évaporitiques et la précipitation des minéraux carbonatés dans l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraine de la zone d'étude.

Les résultats obtenus par l'ACP indiquent que les processus de minéralisation évaporitique et salifère jouent le rôle le plus important dans l'évolution du chimisme des eaux souterraines dans le bassin des Zahrez. Les résultats obtenus par la CAH nous ont permis des classer les échantillons en trois types d'eaux importantes en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées.

Chapitre 04 : Cartographie hydrochimique par approche géostatistique

4.1. Présentation de la géostatistique

4.1.1 Définition et principes de base de la géostatistique

La géostatistique est une approche mathématique conduisant à la régionalisation de variables d'intérêt selon des méthodes d'interpolation de type géostatistique. Elle est fondée sur la théorie des variables aléatoires et s'oppose aux méthodes d'interpolation de type déterministes. L'approche de la géostatistique a pour premier objet l'estimation des variables régionalisées, à partir des observations faites sur un ensemble limité de points de mesures (MATHERON, 1962; MATHERON, 1963). La corrélation spatiale est présente dans tous les phénomènes naturels. En sciences de la terre, les échantillons prélevés à des distances proches les uns des autres ont tendance à être plus similaires par rapport à des échantillons prélevés sur des points bien éloignés (DELHOMME, 1978; KUMAR, 2007).

L'étude géostatistique comprend deux phases :

- Caractérisation de la structure spatiale de la variable régionalisée ;

- Estimation de cette variable en un point donné non échantillonné, en utilisant le krigeage qui est un outil d'interpolation.

4.1.2 Analyse variographique

4.1.2.1 Le semi-variogramme

Le semi-variogramme (Figure 81) est la clé de voûte de l'analyse géostatistique. Il décrit l'autocorrélation spatiale d'une variable aléatoire Z observée sur un ensemble de points si, avec i=1...n, en termes de covariance entre deux points séparés par un pas de distance h. C'est donc un outil efficace pour déterminer et d'analyser la continuité spatiale et la régularité d'un phénomène (MATHERON, 1965; MATHERON, 1970).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Où **h** représente une distance donnée, **z(x)** est la valeur de la variable étudiée et **N(h)** le nombre de paires possibles pour la distance h. ainsi, pour chaque distance h retenue, on calcule la valeur de γ.

L'utilisation du semi-variogramme est soutenue par l'hypothèse intrinsèque stipulant que l'espérance mathématique (E[Z(x)]) existe et prend la même valeur à tous les points x, que la fonction de covariance est finie et qu'elle est une fonction unique de la distance h séparant les observations (stationnarité du second-ordre).

4.1.2.2 Propriétés du semi-variogramme

L'effet de pépite (C_0), c'est la valeur de **$\gamma(h)$** quand **h=0**, qui correspond à la discontinuité du semi-variogramme à l'origine. L'effet de pépite peut éventuellement être dû à des erreurs de localisation ou de mesures. Il renseigne sinon sur la présence d'une micro-régionalisation dont l'échelle est inférieure à l'espacement des points de mesure (DELHOMME, 1978; KUMAR, 2007).

Le palier ($C+C_0$), c'est la valeur de semi-variogramme qui correspond à la portée. C'est la limite à partir de laquelle la croissance du semi-variogramme se stabilise (Figure 81).

La portée (a), correspond à la distance au-delà de laquelle les données ne sont plus corrélées (variogramme borné) (Figure 81).

4.1.2.3 Modélisation du semi-variogramme

La dernière phase de l'analyse variographique consiste à ajuster sur le semi-variogramme expérimental, un modèle de semi-variogramme théorique. La modélisation du variogramme constitue une étape clé entre la description de la variabilité spatiale et la prédiction de la variable régionalisée aux endroits non échantillonnés. En pratique, nous testerons le plus souvent les modèles les plus couramment utilisés (modèle exponentiel, sphérique, gaussien, linéaire…) ou des combinaisons linéaires de ces modèles (Figure 82). Ce modèle aura alors toutes les propriétés requises pour effectuer un krigeage sur nos données (JOURNEL et HUIJBERGTS, 2004).

Les équations des modèles les plus fréquemment utilisés sont :

Modèle sphérique : $$\gamma(h) = C0 + C\left[\frac{3}{2}\frac{h}{a} - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right]$$

Modèle exponentiel : $$\gamma(h) = C0 + C\left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right]$$

Modèle gaussien : $$\gamma(h) = C0 + C\left[1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right]\right]$$

Modèle linéaire : $$\gamma(h) = C0 + h\left(\frac{C}{a}\right)$$

Remarque :

- Dans ce modèle gaussien, l'accroissement du variogramme à l'origine est beaucoup plus lent que dans les deux modèles (modèle sphérique exponentiel) et caractérise un phénomène plus régulier.

- Le modèle sphérique atteint son palier plus vite que le modèle exponentiel.

Le choix et le paramétrage du modèle peuvent se faire d'une manière visuelle. Ils peuvent également être validés statistiquement, en utilisant des indicateurs de qualité ou par la méthode de validation croisée (WESTERN et al., 1998; COOPER et ISTOK, 1988). Dans notre étude, le choix du modèle s'est fait par l'utilisation des indicateurs statistiques pour confirmer le meilleur ajustement des variogrammes experimentaux. Parmi ces indicateurs statistiques utilisés dans l'ajustement des variogrammes, l'indice IGF (indice Goodness Fit) (PANNATIER, 1996). C'est un nombre sans unité et compare les modèles proposés. Quand il s'approche de zéro, il indique le meilleur ajustement à retenir. L'IGF est calculé selon la formule suivante :

$$IGF = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \sum_{i=0}^{n(k)} \frac{P(i)}{n(K)} \frac{D(k)}{d(k)} \left[\left\{ \frac{\gamma(i) - \hat{\gamma}(i)}{\sigma^2} \right\}^2 \right]$$

N: nombre de variogrammes directionels,

n(k): nombre de pas (inter valles) relatifs au variog ramme k,

p(i): nombres de pairs composants la classe i du variogramme k,

D(k): distance maximale relative au variogramme k,

d(k): distance moyenne entre les couples pour le pas i du variogramme k,

γ (i) : modèle du variogramme proposé pour mesurer la continuité à la distance d(i)

γ^{Λ} (i) : variogramme expérimental pour le pas i

σ^2: variance des données utilisées par le variogramme

4.1.3 Le krigeage

Le krigeage est la première méthode d'interpolation spatiale qui tient compte de la structure spatiale du phénomène à interpoler. Les travaux de l'ingénieur minier sud-africain KRIGE (1951) sont précurseurs de la méthode. Cependant, le terme krigeage et le formalisme de cette méthode sont dus au français MATHERON, qui en a aussi assure le développement au centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris (MATHERON, 1962; MATHERON, 1963)

Le krigeage est une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnée par une combinaison linéaire sans biais et variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins (WEBSTER et

OLIVER, 2007). Le krigeage a été prouvé comme une technique d'interpolation robuste, il est reconnu dans de nombreux domaines d'étude: l'hydrogéologie, l'hydrologie, sciences du sol, sciences minières, …etc. (WEBSTER et OLIVER, 2007; AKIN et SIEMES 1988). En fait, le krigeage est le nom donné à la meilleure prévision linéaire sans biais, en anglais « best linear unbiased predictor » ou « BLUP », dans un cadre spatial (BAILLARGEON, 2005). L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur d' une variable régionalisée z en un site non échantillonné x_0 par une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes.

4.1.3.1 Les types de krigeage

Il existe plusieurs types de krigeage. Dans ce travail, nous avons appliqué le krigeage ordinaire à variogramme global pour la cartographie des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

4.1.3.1.1 krigeage simple : La moyenne est la même partout. Elle est alors connue et c'est la moyenne de l'échantillon. De plus, on émet généralement l'hypothèse d'isotropie c'est-à-dire que le milieu d'étude est homogène et la répartition du phénomène étudié est la même en tout point. Le krigeage simple est aussi appelé collocation. **$\mu(s) = m$** est une constante connue.

4.1.3.1.2 krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire permet l'estimation d'une variable regionalisée Z en un point de coordonnées géographiques données selon une combinaison linéaire des observations faites en des points voisins, il est calculé comme suit :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \qquad i = 1,2,.....n$$

$Z^*(x_0)$: la valeur estimée de la variable régionalisée en position x_0

λ_i : les poids de l'estimateur que constitue le krigeage.

$Z(x_i)$: les valeurs expérimentales aux points Xi .

n : le nombre d'échantillons pris en compte dans la prédiction

Le krigeage est un interpolateur exact (la valeur estimée sur un point de mesure est egale a la valeur du point de m esure) et optimal (il minimise l a variance sur l'erreur d'estimation). Pour résoudre les équations, il est nécessaire d'introduire des conditions d'optimisations (AKIN et SIEMES 1988; MARCOTTE, 1995) :

- Il est non biaisé, ou l'absence totale d'erreur d'estimation, c'est à dire avec une espérance mathématique des erreurs d'estimation nulles.

$$E\left[Z^*(x0) - Z(x0) \right] = 0$$

-condition de variance minimale, cette condition exprime que les ponderateurs λ_i sont estimés de façon à avoir une variance minimale de l'erreur; sous la contrainte de non biais

$$var\left[Z^*(x0) - Z(x0) \right] = \sigma^2$$

4.1.3.1.2 krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices est une méthode non paramétrique reposant sur une transformation préalable de la variable étudiée en indicatrices prenant la valeur 0 et 1 selon des seuils choisis de la variable (BIERKENS et BURROUGH, 1993). L'analyse spatiale par ce type de krigeage se fait non pas sur la variable elle même mais sur la transformée de cette variable par codage binaire dite fonction indicatrice.La transformation en une variable indicatrice avec une distribution binaire se fait comme suit:

$$I(x_i, Z_c) = \begin{cases} 1 \text{ si } Z(x_i) \geq Z_c \\ \qquad\qquad i = 1 \\ 0 \text{ si } Z(x_i) < Z_c \end{cases}$$

Où, I (x_i; Z_c), est la valeur indicatrice à un emplacement x_i; Z (x_i) est la valeur mesurée à

un emplacement x_i, et Z_c est le seuil.

La procédure de mise en œuvre du krigeage d'indicatrices se fait suivant les quatre étapes suivantes :

1. Le codage des valeurs mesurées par rapport à une valeur seuil choisie. On obtient ainsi des variables qui sont codées soit en 0 soit en 1. Les valeurs seuils dépendent, en général, de la distribution statistique de la variable, mais dans certains cas, les limites de nuisance ou de toxicité (normes de potabilité d'une eau d'irrigation par exemple) seront déterminantes pour le choix de ces seuils.
2. Le calcul du variogramme des fonctions indicatrices au seuil donné détermine la structure spatiale.

$$\gamma^*(h,c) = \frac{1}{2N}(h) \sum_{i=1}^{N(h)} \left[I(x_i, c) - I(x_i + h \pm \Delta h, c) \right]^2$$

ou : N(h) est le nombre de couples d'observations distants de h ±Δh

3 Après ajustement du variogramme des fonctions indicatrices à un modèle théorique, on effectue le krigeage linéaire en un point (x_0), des I (x_i,c) par l'équation :

$$\mathbf{I^*(x0,c) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i I(x_i, C)}$$

n: le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation,

λ_i: le poids affecté aux points expérimentaux

4. La dernière étape consiste à estimer la valeur $Z(x_0)$ de la variable regionalisée Z en un point quelconque x_0 connaissant sa fonction de densité. La différence entre les estimations des fonctions indicatrices pour deux valeurs seuil consécutives permet de calculer la probabilité correspondant en tout point :

Probabilité (X=c)= Probabilité ($X \geq Z_c$) – Probabilité ($X \geq Z_{c+1}$)

Avec : Z_c et Z_{c+1} sont les valeurs seuil consécutives

L'espérance mathématique est calculée selon les différentes probabilités retenues :

$$\mathbf{E(Z) = Z_c + 2Z_{c+1} + ...}$$

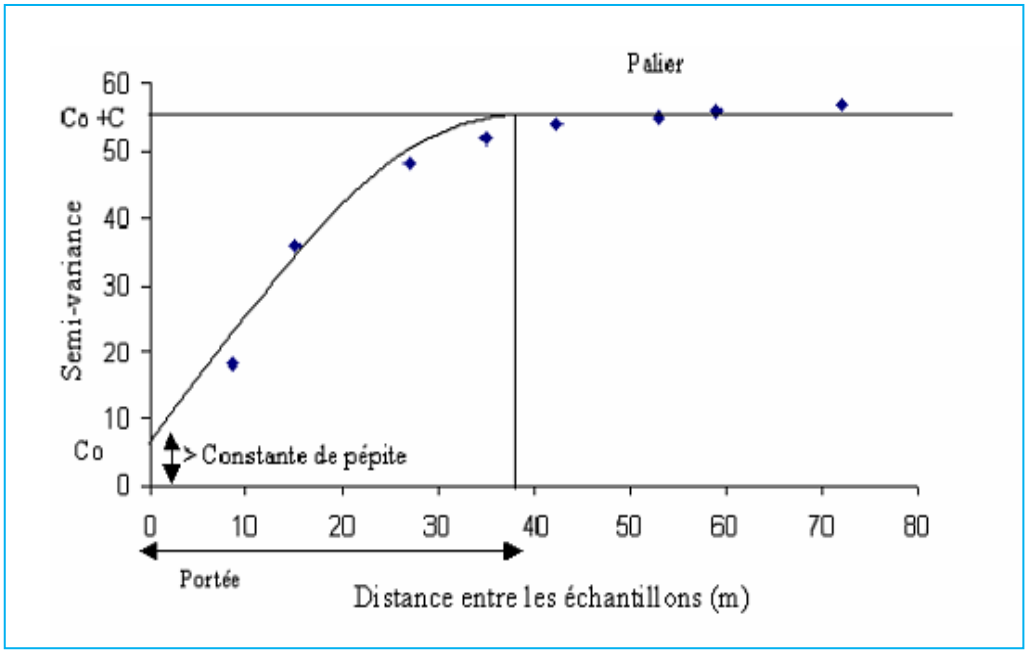


Figure 81 : Paramètres du variogramme

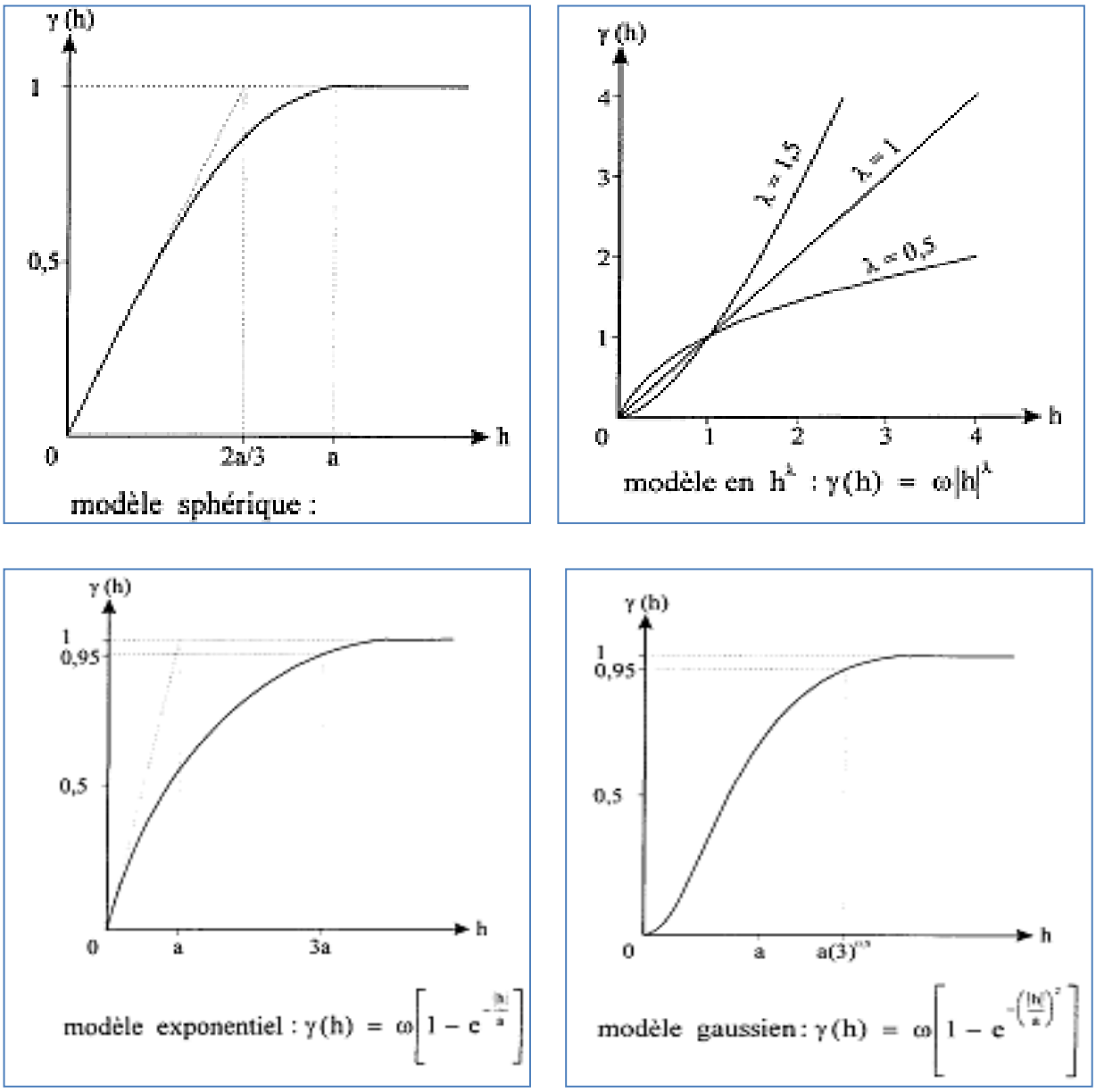


Figure 82 : Principaux modèles de variogrammes utilisés (DELHOMME, 1978).

4.2. Résultats et discussions

4.2.1 Cartographie des paramètres physico-chimiques

4.2.1.1 Analyse statistique descriptive

L'évaluation statistique descriptive est une étape importante avant toute analyse géostatistique. L'analyse statistique descriptive des paramètres physico-chimiques est présentée dans le Tableau 32. Les valeurs des paramètres mesurés sont caractérisées par une variation très élevée. Un faible coefficient de variance (7%) a été calculé pour le pH indique une faible variabilité spatiale dans la région d'étude, par contre les autres paramètres chimiques présentent une variabilité spatiale moyenne, et un coefficient de variance élevé (> 50%) est

observé pour Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-} et NO_3^{-}. Le sodium présente un coefficient de variance très élevé qui dépasse même les 100%, cela indique une variabilité spatiale très élevée.

L'estimation par krigeage est meilleure sur les données qui présentent une distribution normale (ARSLAN, 2012). Les Figures 6.1 et 6.2 (Annexe. 6) montrent la représentation des histogrammes et les graphes de probabilités des données hydrochimiques, transformées en logarithme en fonction de leurs fréquences relatives. Ces figures indiquent une bonne adéquation à la loi de type normale des données utilisées.

4.2.1.2 Analyse variographique

Après la création du varaiogarmme expérimental, il va falloir le modéliser, les paramètres sont modifiés dans la fenêtre modélisation du logiciel (Variowin 2.D) **(**PANNATIER, 1996). Selon la forme du variogarmme, nous choisissons l'un des modèle (sphérique, gaussien, exponentiel, linéaire). L'indice I.G.F (indice of goodness fit) est le résultat d'une fonction calculé à chaque fois que le modèle est modifié. Elle donne une mesure de la qualité de la modélisation et plus la valeur est proche de zéro, le modèle est meilleur. La portée, la pépite et le palier ont été les paramètres qui ont permis de caler le modèle et le facteur d'ajustement nous a permis de choisir le meilleur variogramme modélisé. En pointillé noir c'est le variogramme expérimental et en trait continu noir c'est le variogramme modélisé.

Le Tableau 33 présente les différents modèles ainsi que les paramètres des variogrammes utilisés. Les resultats obtenus montrent que le variogramme expérimental de pH a été ajusté à un modèle sphérique avec un effet de pépite de 0,284, un palier de 0,34 et une portée de 4.8Km (Figure 83(a)). Le variogramme expérimental de la CE des eaux souterraines s'ajuste sur modèle sphérique (Figure 83(b)). L'effet de pépite (C_0) est de 0,292 (µS/cm) ², le palier (C_0+C) est de 0,34 (µS/cm)² et la portée est de l'ordre de 8 Km. L'analyse variographique a mis en évidence la présence d'effet de pépite. L'effet de pépite est en général dû à l'effet combiné de deux causes principales qui sont l'existence d'une micro-régionalisation et les erreurs de mesures (erreurs d'analyse et d' échantillonnage). Par ailleurs, le meilleur ajustement des variogrammes expérimentaux des éléments chimiques (Ca^{2+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} et TDS), a été obtenu grâce au modèle exponentiel. D'autre part, les variogrammes expérimentaux de paramètres physico-chimiques (Mg^{2+}, Na^{+}, NO_3^{-}) s' ajustent au modèle sphérique (Figure 83).

Le meilleur ajustement du variogramme expérimental de HCO_3^{-} a été obtenu sur un modèle gaussien, ce qui montre le caractère régulier de ce paramètre. Les paramètres de ce modèle

sont : un effet de pépite (C_0) de 0,280 (mg/l)², un palier (C_0+C) de 0,364 (mg/l)², et une portée est de l'ordre de 6,90 Km.

Les résultats obtenus (Tableau 33) indiquent que les variogrammes modélisés de tous les paramètres physico-chimiques présentent un effet de pépite non nulle. D'après les valeurs de l'effet de pépite (C_0), nous remarquons que l'effet de pépite de pH, EC, SO_4^{2-}, HCO_3^- et NO_3^- était plus important que celui de Ca^{2+}, Na^+, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, et TDS. Les valeurs élevées de l'effet de pépite suggèrent que les intervalles d'échantillonnage ne sont pas appropriés pour évaluer la dépendance spatiale des paramètres et qu'un échantillonnage supplémentaire de ces paramètres à de plus petites distances et en plus grand nombre pourrait être nécessaire pour détecter la dépendance spatiale et une plus grande densité d'échantillonnage permettra d'obtenir une carte de répartition spatiale plus précise (CEMEK et al., 2007; YANG et al., 2011).

La distance de corrélation spatiale (portée) a été considérée comme étant la distance au-delà duquel les observations ne sont pas spatialement dépendantes. En comparant les valeurs de la portée obtenues, on peut dire que la structure spatiale des éléments (sulfates, nitrates, potassium chlorures, sodium) montre une autocorrélation régionale entre les différents couples jusqu'à des distance (portée), respectivement 96,57, 96, 40, 48 et 32 km, donc montrant un degré plus élevé de continuité. Par ailleurs, le pH, bicarbonate, CE, magnésium et calcium présentent des valeurs de la portée respectivement 4,8, 6,9, 8, 9,6, 12,8 km, donc l'autocorrélation régionale entre ces paramètres se fait à une distance limite plus faible comparativement au aux autres paramètres.

Généralement le rapport effet de pépite et le palier (C_0/(C_0+C)%) sont utilisés pour démontrer l'ampleur de la structure spatiale des variables et aussi comme un critère pour classer la dépendance spatiale des paramètres physico-chimiques (CAMBARDELLA et al.,1994). Si ce rapport est <25%, c'est une forte corrélation spatiale, s'il est compris entre 25 et 75%, c'est une dépendance spatiale moyenne, enfin un rapport > 75% indique une faible dépendance spatiale (CAMBARDELLA et al.,1994). Les résultats de Tableau 33, montrent que le rapport effet de pépite/palier variait pour tous les paramètres et dans les différents niveaux de 30,08% à 85,88%, ce qui nous permette de classer les résultats de nos paramètres en deux classes. Une classe des paramètres physico-chimiques qui présentent une dépendance spatiale moyenne comme celle de Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, TDS. La deuxième classe des paramètres qui présentent une dépendance spatiale faible pour le pH, EC et HCO_3^-.

Tableau 32 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Paramètres	Min	Max	Moy	S.D	CV (%)	Asymétrie	Aplatissement	Asymetrie[a]	Aplatissement[a]
pH	6,70	10,01	8,27	0,62	7	0,92	1,78	0,59	1,79
EC (µS/cm)	450,00	7780,00	2829,34	1776,41	63	1,02	0,72	-0,40	-0,22
TDS (mg/L)	300,00	4401,00	1648,34	999,42	61	0,87	0,27	-0,29	-0,65
Ca^{2+} (mg/L)	20,44	632,26	206,12	149,21	72	1,29	1,32	-0,58	0,42
Na^{+} (mg/L)	14,71	933,93	191,43	221,25	116	2,19	4,42	0,13	-0,33
Mg^{2+} (mg/L)	12,18	407,74	82,19	64,28	78	2,95	13,54	-0,10	0,02
K^{+}(mg/L)	1,28	60,76	10,30	10,17	99	3,41	14,21	0,26	1,05
Cl^{-} (mg/L)	40,00	1712,00	433,03	398,38	92	1,67	2,34	-0,21	-0,22
SO_4^{2-} (mg/L)	10,00	1800,00	516,70	467,43	90	1,14	0,63	-0,76	0,24
$NO3^{-}$(mg/L)	1,00	93,50	42,46	27,82	66	0,12	-1,18	-1,45	1,70
HCO_3^{-} (mg/L)	0,00	275,00	98,44	71,48	73	0,83	0,09	-1,81	3,48
SAR	0,19	13,73	2,87	2,84	99	2,21	5,35	-0,20	0,007
%Na	3,71	70,51	31,44	16,51	52,5	0,26	-0.36	-	-

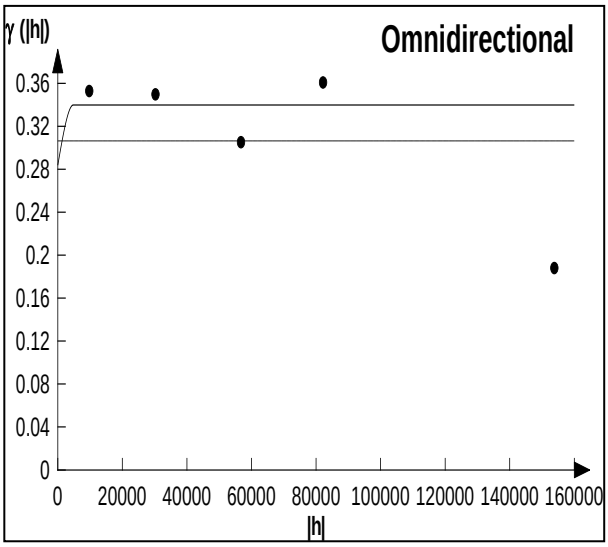
0.19 13.73 2.87 2.84 2.21 98.88 2.21 5.35

CV coefficient de variation, **S.D** écart type, **a** transformation log des données

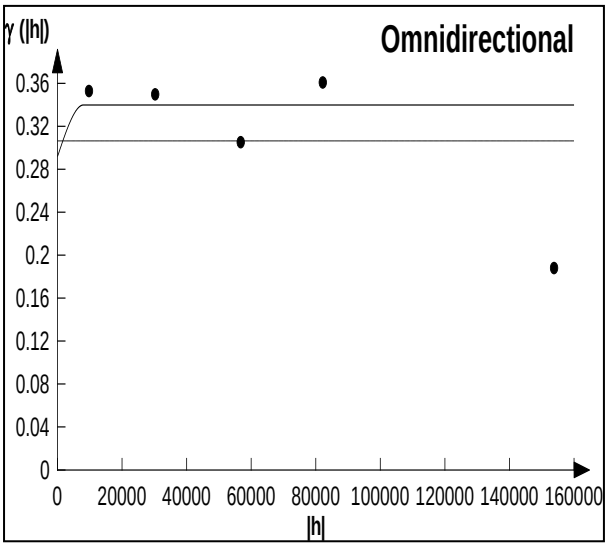
Tableau 33 : Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux des paramètres physico-chimiques

Paramètres	Modèle	Effet de pépite (C_0)	Palier ($C+C_0$)	Ratio $C0/C+C_0$) (%)	Portée (Km)	IGF
Ca^{2+}	Exponentiel	0,076	0,132	57,58	12,80	1,69E-01
Na^{+}	Sphérique	0,080	0,186	43,01	32	7,60E-02
Mg^{2+}	Sphérique	0,046	0,072	64,44	9,6	5,73E-02
K^{+}	Exponentiel	0,061	0,106	57,55	48	8,21E-02
Cl^{-}	Exponentiel	0,076	0,170	44,73	40	4,55E-02
SO_4^{2-}	Exponentiel	0,231	0,324	71,30	96,57	5,76E-02
NO_3^{-}	Sphérique	0,111	0,369	30,08	96	2,16E-01
HCO_3^{-}	Gaussien	0,280	0,364	76,92	6,90	3,63E-02
pH	Sphérique	0,284	0,340	83,53	4,80	2,33E-02
EC	Sphérique	0,292	0,340	85,88	8	2,33E-02
TDS	Exponentiel	0,058	0,082	70,60	67,20	2,50E-02
SAR	Sphérique	0,082	0,15	54,67	36,80	8,37E-02
%Na	Sphérique	0,055	0,439	12,57	78,40	4,06E-02

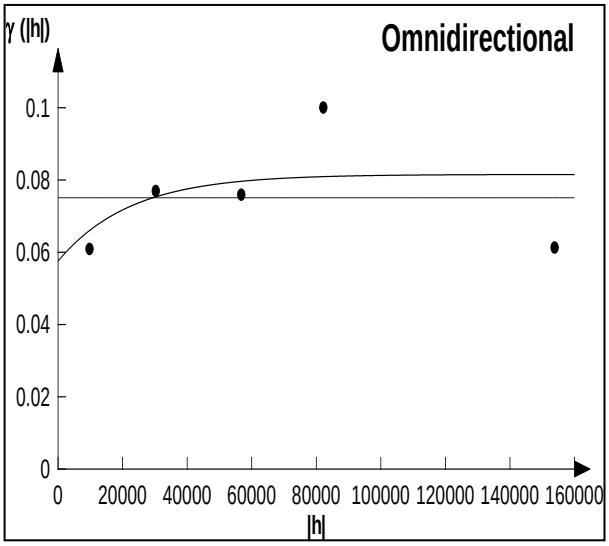
(a) **pH**



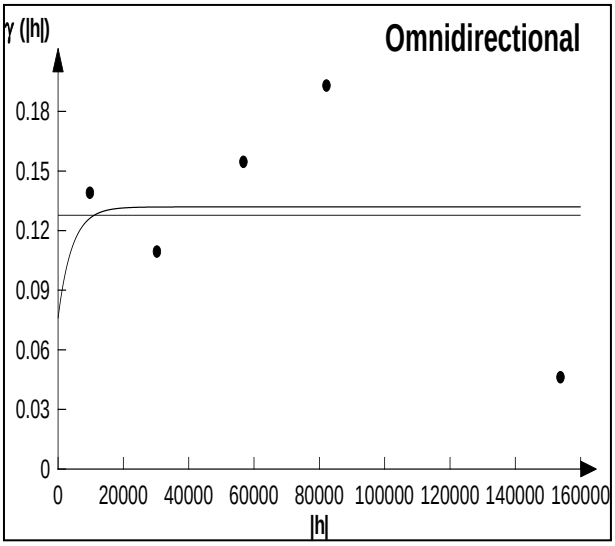
(b) **EC**



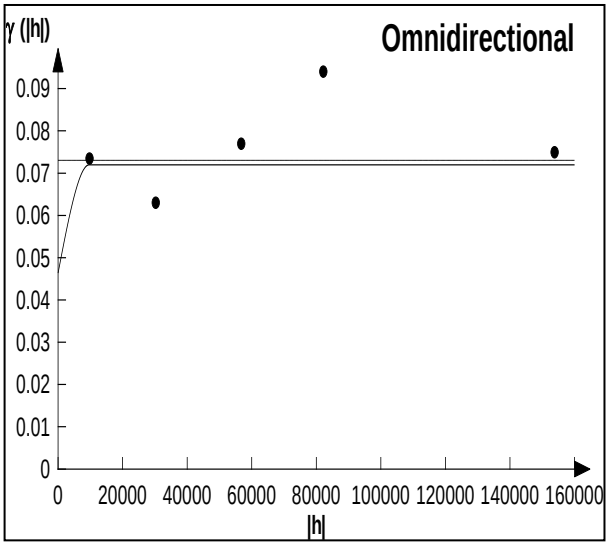
(c) **TDS**



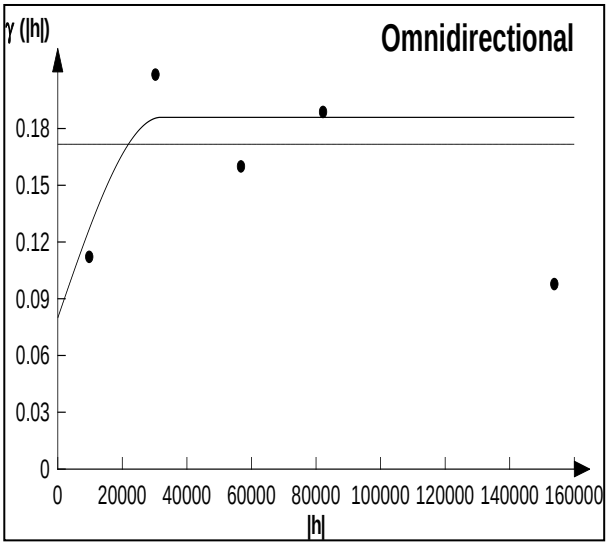
(d) **Ca**



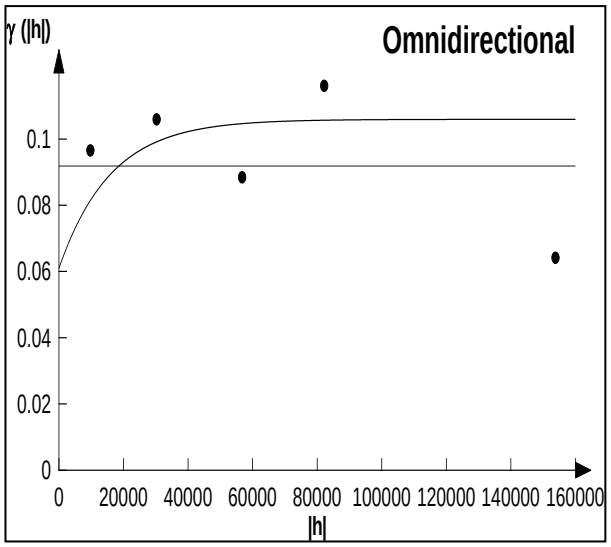
(e) **Mg**



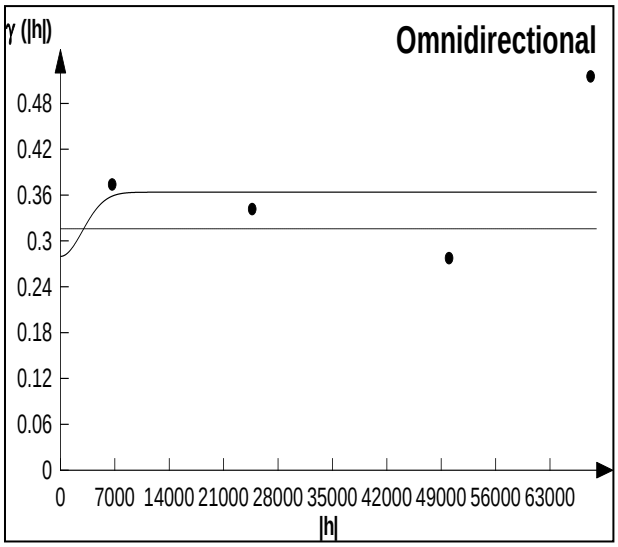
(f) **Na**



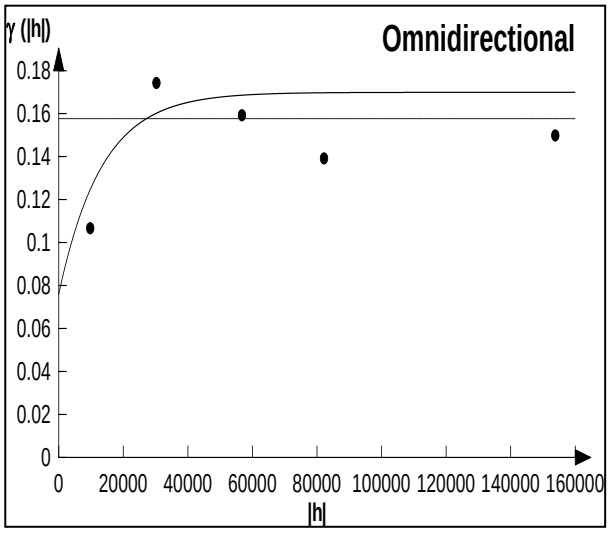
(g) **K**



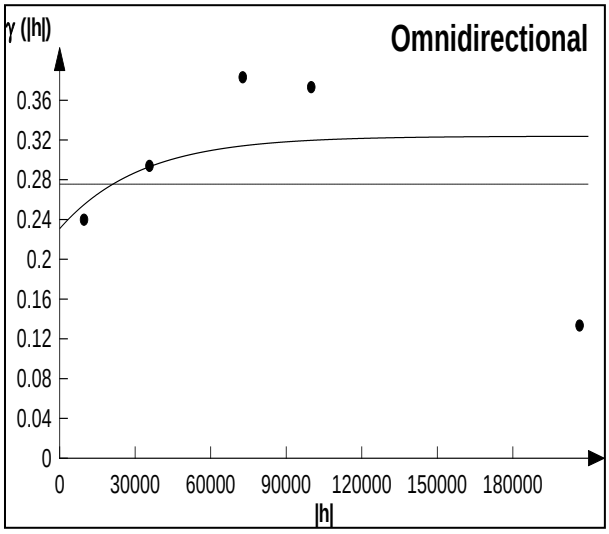
(h) **HCO_3**



(i) **Cl**



(j) **SO_4**



(k) **NO_3**

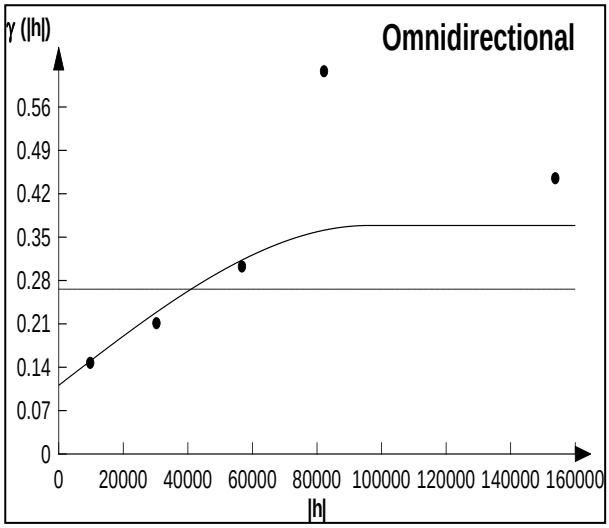


Figure 83 : Ajustement des Variogrammes expérimentaux des paramètres physico-chimiques : (a) pH, (b) EC, (c) TDS, (d) Ca^{2+}, (e) Mg^{2+}, (f) Na^{+},(g) K^{+}, (h) HCO_3^{-}, (i) Cl^{-}, (j) SO_4^{2-}, (k) NO_3^{-}.

4.2.1.3 Cartographie des paramètres physico-chimiques par Krigeage

La principale application de la géostatistique a été d'estimer et de cartographier les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines des zones non échantillonnées. Les cartes de répartition spatiale de ces paramètres peuvent être obtenues en utilisant une interpolation de krigeage ordinaire (OK) basée sur le modèle de semi variogramme calculé.

La cartographie des paramètres physico-chimiques est une étape préliminaire vers la prise de décision, comme la délimitation des zones contaminées et l'identification des zones qui nécessitent des une gestion adaptée.

a) Carte de pH

Le pH doit être compris entre 6,5 et 8,5. Des valeurs de pH inferieurs à 7 peuvent provoquer une corrosion des tuyauteries métalliques. La carte de pH (Figure 84(a)) établie révèle que les eaux souterraines de la zone d'étude ont un pH qui varie entre 6,7 et 10,01. Les fortes valeurs de pH (8,5-10) sont enregistrées aux niveaux des zones Nord-Est, Nord-Ouest et le centre de la zone d'étude; traduisant des eaux fortement alcalines.

b) Carte des conductivités électriques

La conductivité des eaux souterraines de la zone d'étude varie entre 480 µS/cm et 7780 µS/cm. La carte des conductivités (Figure 84(b)) illustre les importantes variations de minéralisation des eaux de la nappe :

L'augmentation de la conductivité se fait du Sud vers le Nord-Est et le centre de la zone d'étude. Les valeurs les plus fortes ont été enregistrées dans la partie Nord-Est et le centre, avec une conductivité électrique supérieure à 3000 µS/cm.

c) Carte des Chlorures

Les chlorures sont toujours présents dans les eaux naturelles mais a des proportions variables. Ils proviennent essentiellement : de la dissolution des sels naturels par le lessivage des terrains salifères, des rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle. La concentration maximale admissible des eaux destinées à la consommation humaine est 200 mg/l (WHO, 2008). Les concentrations, en général, oscillent entre 40 et 1712 mg/l.

La carte des Chlorures (Figure 84(c)) montre que les teneurs en chlorures croissent régulièrement selon les directions générales des écoulements souterrains. Les concentrations les plus fortes sont localisées dans la partie NE et le centre de la zone d'étude où la concentration est supérieure à la valeur maximale admissible.

d) Carte des Sulfates

La concentration des eaux naturelles en sulfates est très variable. Ils résultent de la solubilité des gypses ($CaSO_4$ $2H_2O$); l'utilisation des engrais chimiques; et du lessivage des terrains argileux et marneux. La carte des sulfates (Figure 84(d)) montre que les concentrations, en général, oscillent entre 32 et 1250 mg/l. Globalement les augmentations des concentrations se font vers le Nord-Est et vers le centre. La carte montre que les fortes teneurs en SO_4^{2-} qui dépassent largement les normes de l'OMS (250 mg/l), sont localisées au Nord-Est et le centre de la zone d'étude (WHO, 2008).

e) Carte des Nitrates

Les nitrates (NO_3^-) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont abondamment répondus dans le sol, dans la plupart des eaux et des plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Sans apport artificiel, les eaux ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrates.

Les concentrations des nitrates varient entre un minimum de 1 mg/l et un maximum de 93,50 mg/l, avec une valeur moyenne de 38,90 mg/l. La distribution spatiale de cet élément (Figure 84(e)), montre que les concentrations les plus élevées sont enregistrées au centre et au niveau de la partie Nord-Est de la zone d'étude, avec des teneurs dépassant les normes de l'OMS (50mg/l) (RODIER et al., 2009).

f) Carte de calcium :

Le calcium est élément de la dureté totale, son origine naturelle provient essentiellement de l'attaque des formations carbonatées par le gaz carbonique.

$$Ca\ \ CO_3 + CO_2 + H_2O \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} Ca^{++} + 2HCO_3^-$$

Le calcium provient aussi du gypse ($CaSO_4$ $2H_2O$).

Les concentrations du calcium varient entre un minimum de 22,9 mg/l et un maximum de 377 mg/l, avec une valeur moyenne de 166,2 mg/l. Les concentrations en calcium ont tendance à augmenter selon les directions d'écoulements souterrains (Figure 84(f)). Les concentrations les plus fortes sont observées dans la partie Nord-Est et le centre, avec des teneurs dépassant la teneur maximale admissible (100 mg/l) pour la consommation humaine (RODIER et al., 2009).

g) Carte de Magnésium :

Le magnésium est aussi un élément de la dureté totale. La mise en solution de cet ion prend beaucoup de temps. Il provient de l'attaque des formations dolomitiques par le gaz carbonique, de la dissolution

de $MgSO_4$ dans les terrains gypseux entrainant le magnésium et aussi les minéraux ferromagnésiens. Les teneurs en magnésium sont comprises entre 20 mg/l et 149 mg/l. La carte des teneurs en magnésium (Figure 84(g)) montre un accroissement des teneurs en magnésium de la partie Nord vers le centre et le Nord-Est de la zone d'étude. Les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau de la partie Nord-Est et le centre, avec des teneurs dépassant 100 mg/l.

h) Carte de sodium

Les concentrations en sodium des eaux de la région d'étude varient entre 17,16 mg/l et 933,9 mg/l. La concentration maximale admissible par la norme de l'OMS étant égale à 200 mg/l (WHO., 2008). Environ 25% des eaux donnent des concentrations en Na^+ supérieures à la concentration maximale admissible. La carte de répartition de cet élément (Figure 84(h)) montre une augmentation des concentrations du Sud vers le Nord-Est et le centre. Les concentrations les plus élevées sont observées au niveau de la partie Nord-Est et le centre, avec des teneurs dépassant la teneur maximale admissible pour la consommation humaine.

i) Carte de potassium

Les teneurs en potassium présentent des valeurs relativement faibles. Les valeurs moyennes oscillent autour de 11,2 mg/l. Le maximum et le minimum sont respectivement de 3,5 mg/l et 60,8 mg/l. Environ 30% des eaux des puits donnent des concentrations en K^+ supérieures à la concentration maximale admissible qui est de 12 mg/l (RODIER et al., 2009). La distribution spatiale de cet élément (Figure 84(i)), montre que les plus grandes concentrations sont enregistrées au centre de la zone d'étude, avec des teneurs dépassant les normes de l'OMS.

j) Carte des bicarbonates

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :

$$X \quad CO_3(roche) + CO_2 + H_2O \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} X^{++} + 2HCO_3$$

L'évolution spatiale des bicarbonates (Figure 84(j)) montre que les teneurs varient entre 0 mg/l et 275 mg/l, avec une moyenne atteignant 83,30 mg/l. Les fortes teneurs sont localisées au centre de la zone d'étude où les concentrations sont supérieures à 200 mg/l.

k) Carte des résidus secs

Le résidu sec correspond à la totalité des sels dissous et donne une idée sur la minéralisation globale des eaux. La répartition spatiale des résidus secs (Figure 84(k)) montre que les valeurs

comprises entre 300 mg/l et 4012 mg/l, avec une moyenne égale à 1545,6 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau de la partie Nord-Est et le centre de la zone d'étude où les concentrations sont supérieures à 3000 mg/l

4.2.2 Cartographie des indices de la qualité des eaux d'irrigation

Le système de classification pour évaluer l'aptitude de l'eau à usage d'irrigation peut être déterminée à travers des paramètres indice de qualité tels que le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage en sodium (% Na). Pour chaque paramètre une carte de répartition spatiale est déterminée on utilisant la méthode d'interpolation par krigeage ordinaire.

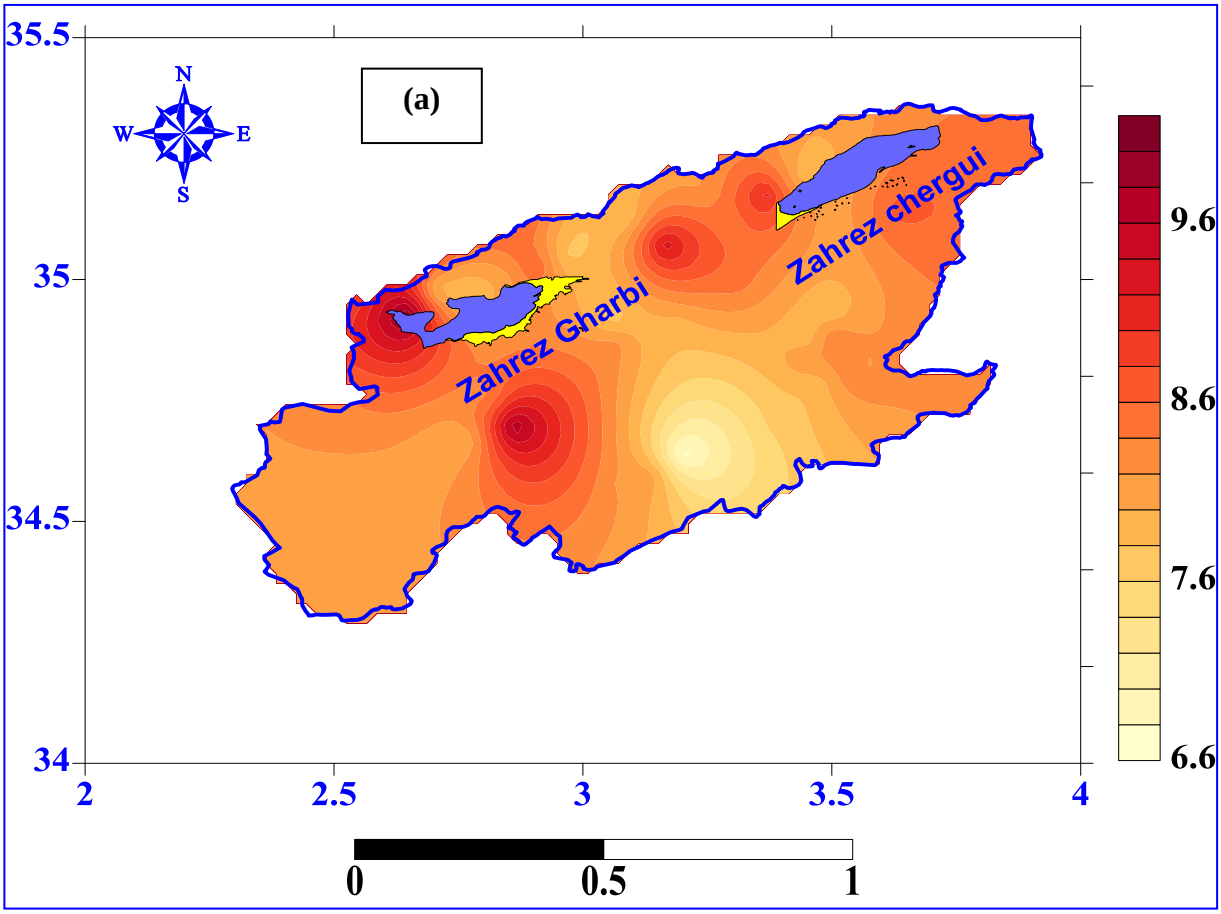
4.2.2.1 Analyse statistique descriptive

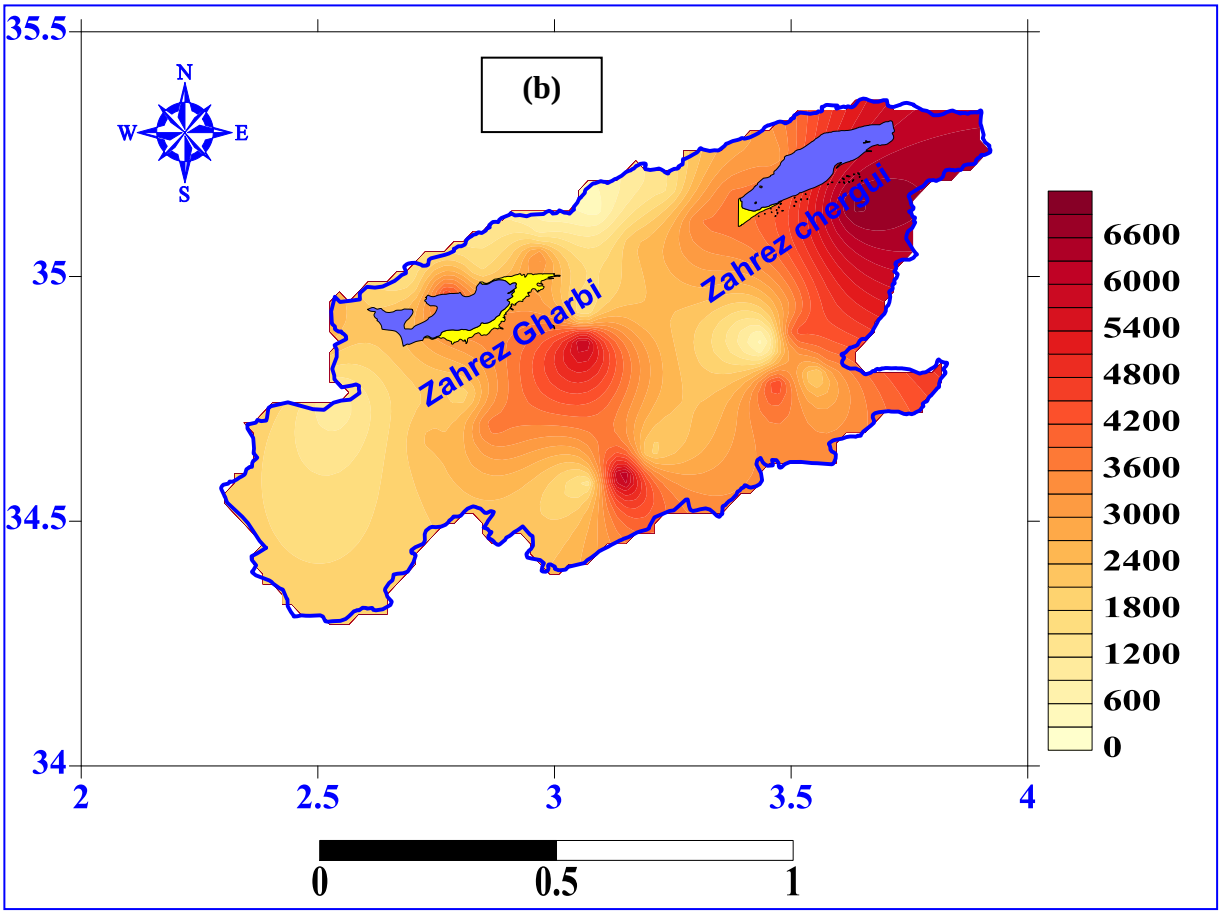
Le Tableau 32 présente les statistiques descriptives des paramètres SAR et % Na. Les valeurs de SAR varient entre 0,19 et 13,73, avec une valeur moyenne de 2,87. L'écart type est de 2,84 et le coefficient de variation de 99%, ce qui explique l'hétérogénéité spatiale des données. L'asymétrie et l'aplatissement des valeurs logarithmiques de SAR étaient proches de zéro avec -0,20 et 0,007 respectivement, ce qui valide la distribution normale des données.

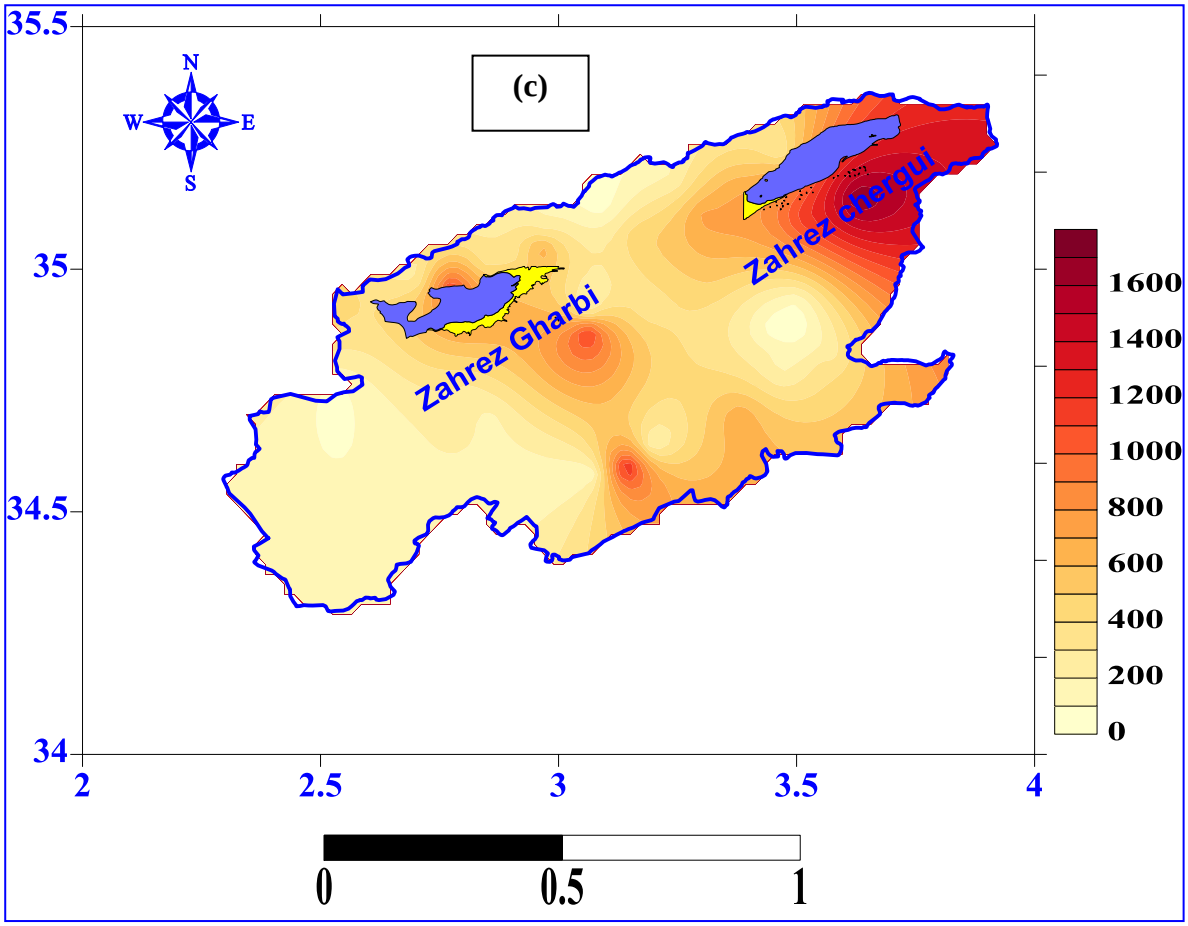
Les valeurs du % Na varient de 3,71 et 70,5 %, avec une moyenne de 31,44%. L'écart type est de 16,51% et le coefficient de variation de 52,5%, cela indique une variabilité spatiale moyenne.

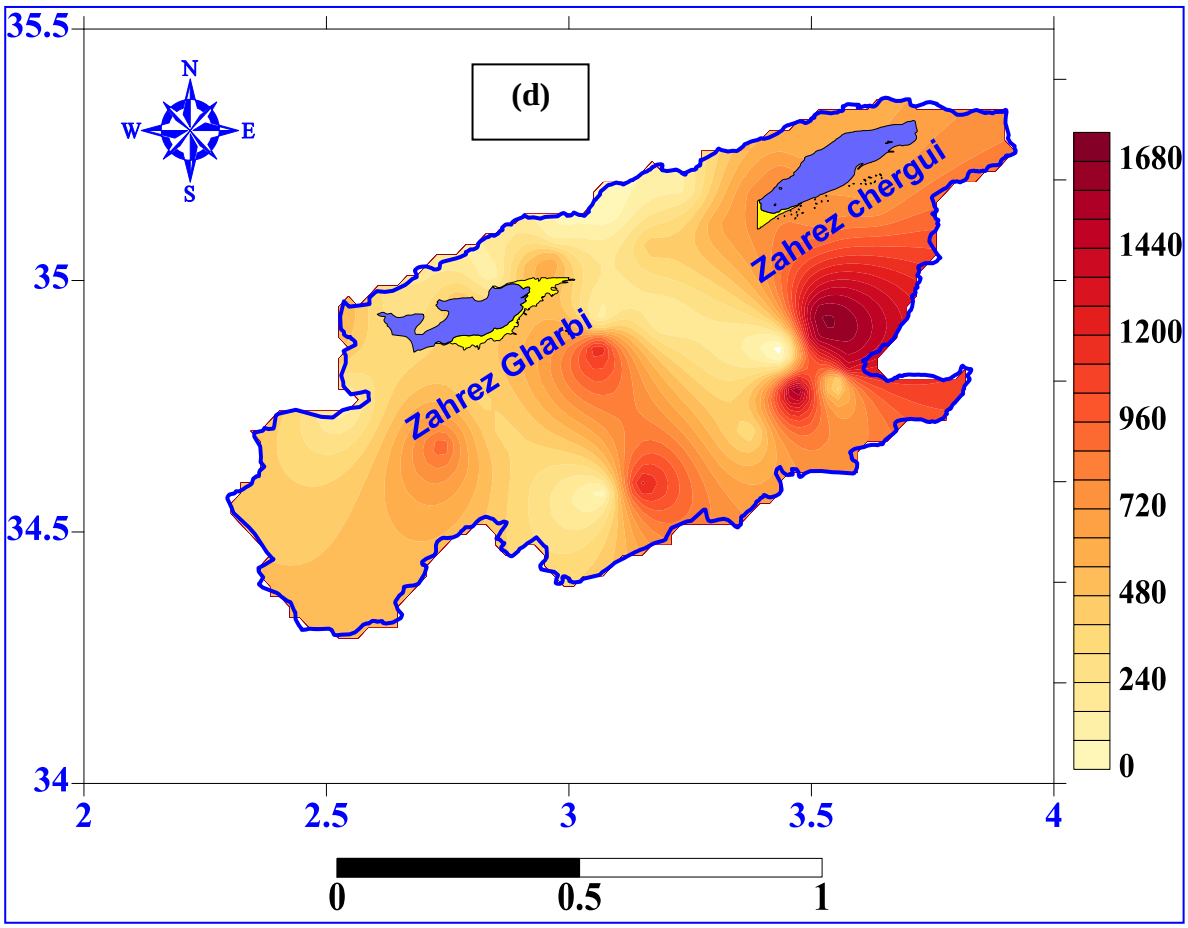
4.2.2.2 Analyse variographique

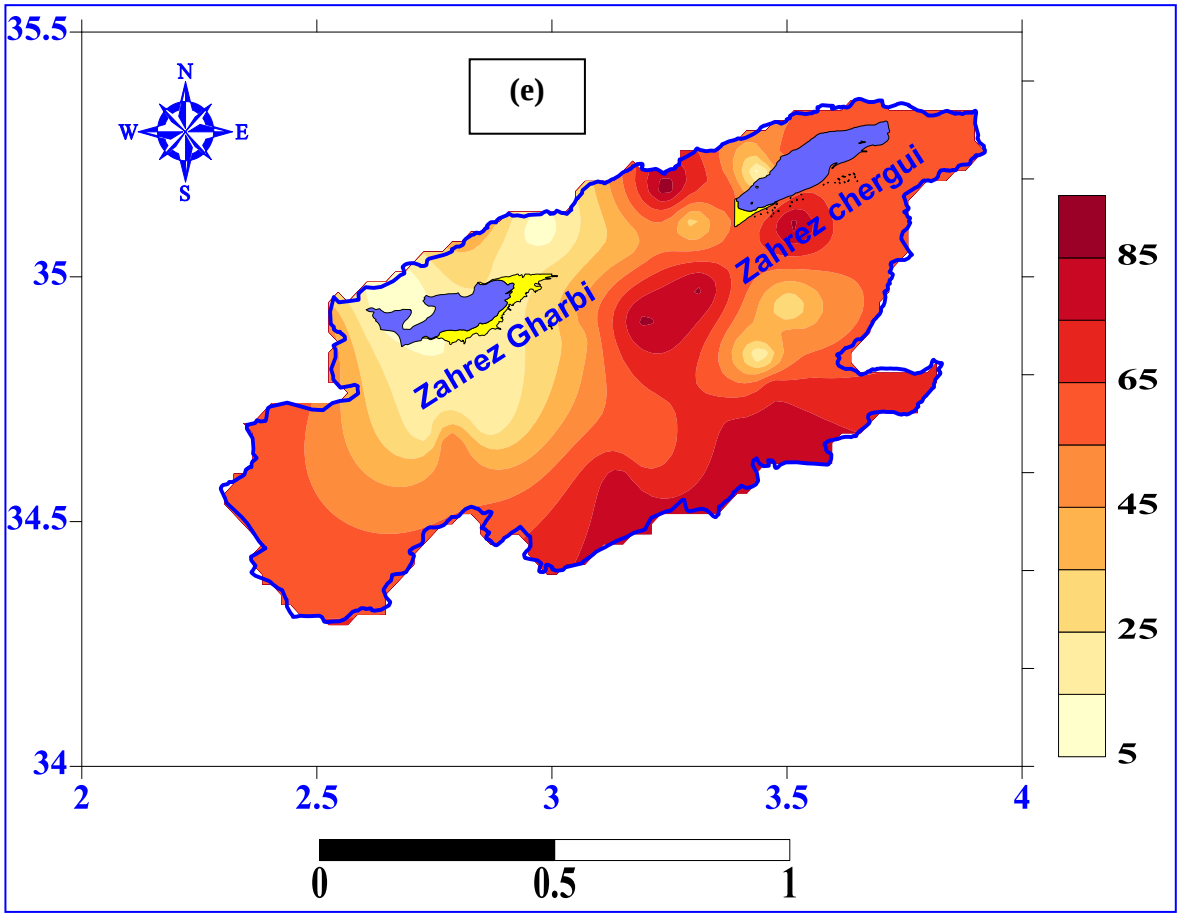
Le Tableau 33 présente les différents modèles ainsi que les paramètres des variogrammes modélisés des deux paramètres SAR et % Na. Le variogramme expérimental du SAR s'ajuste à un modèle sphérique, avec un effet de pépite (C_0) de 0,082, un palier de 0,15 et une portée de 36,80 km (Figure 85(a)). La valeur de ratio effet de pépite/palier est, dans ce cas, de 54,67 % ce qui indique que le SAR des eaux souterraines a une dépendance spatiale moyenne.
Le variogramme expérimental du paramètre %Na a été ajusté à un modèle sphérique avec un effet de pépite (C0) de 0,055, un palier de 0,439 et une portée de 78,40 km (Figure 85(b)). La valeur de ratio effet de pépite/palier est de 12,57 %, ce qui montre une dépendance spatiale forte. Tous les variogrammes présentent un effet de pépite. Ce dernier est dû à une microrégionalisation et/ ou à certaines erreurs de mesures.

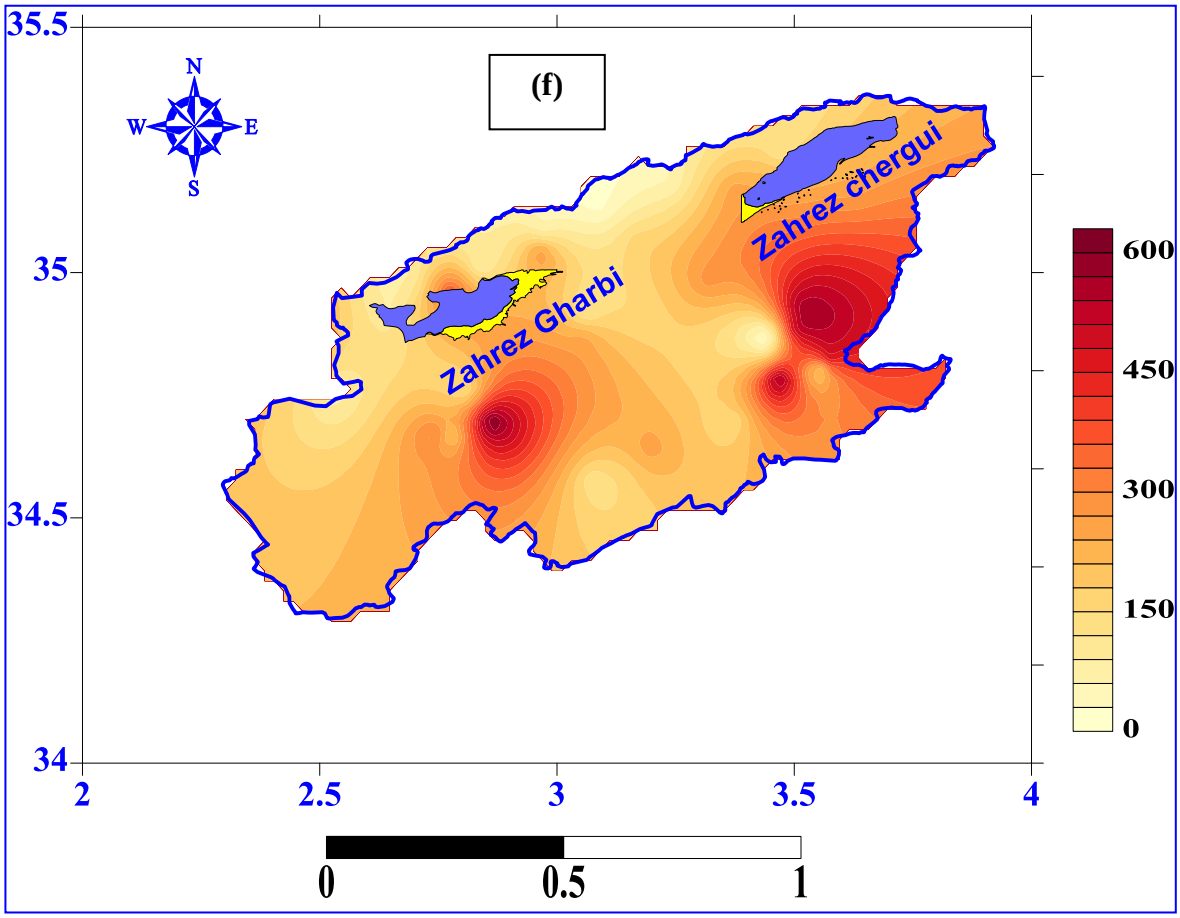

(a)
N
W
E
S
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
9.6
8.6
7.6
6.6
0
0.5
1

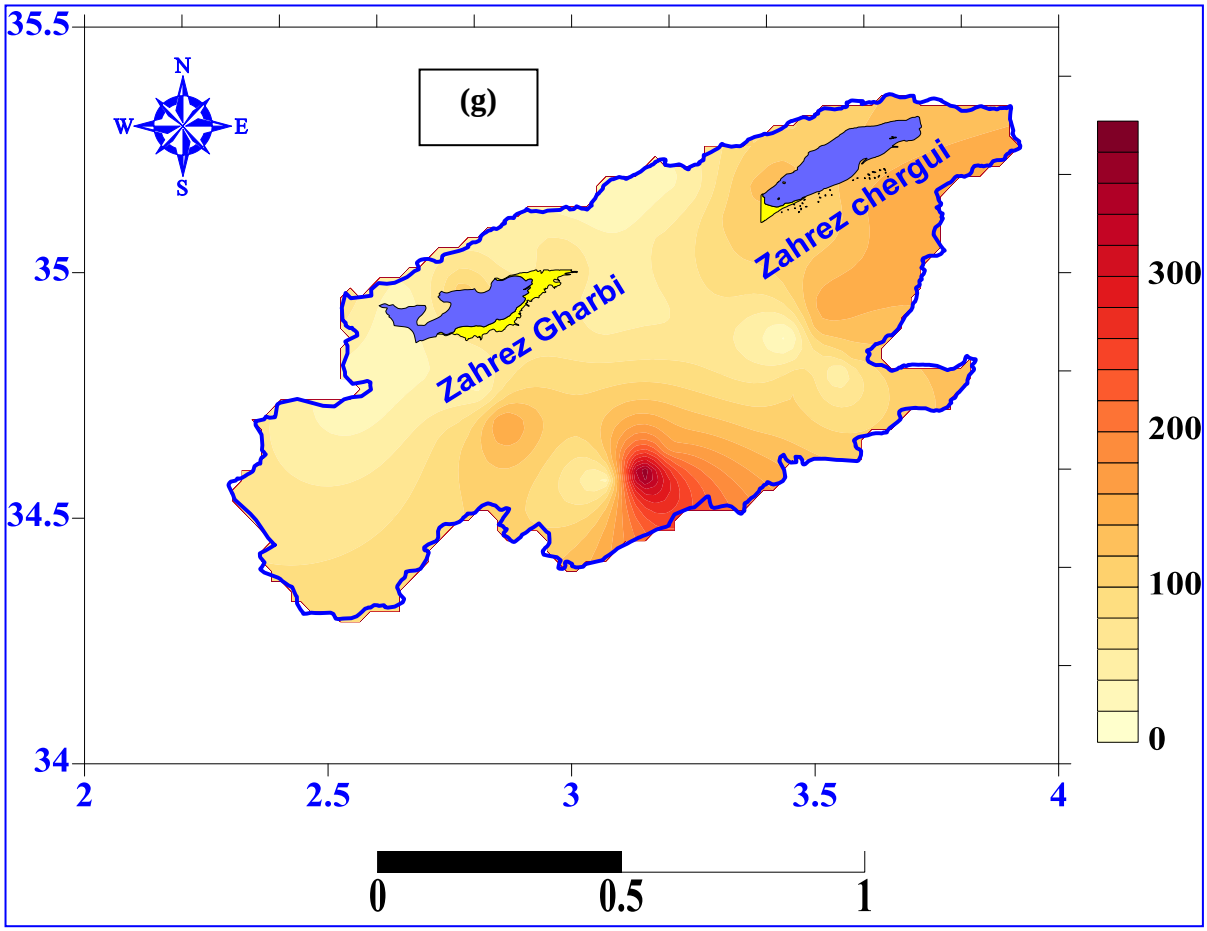

(b)
N
W
E
S
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
6600
6000
5400
4800
4200
3600
3000
2400
1800
1200
600
0
0
0.5
1

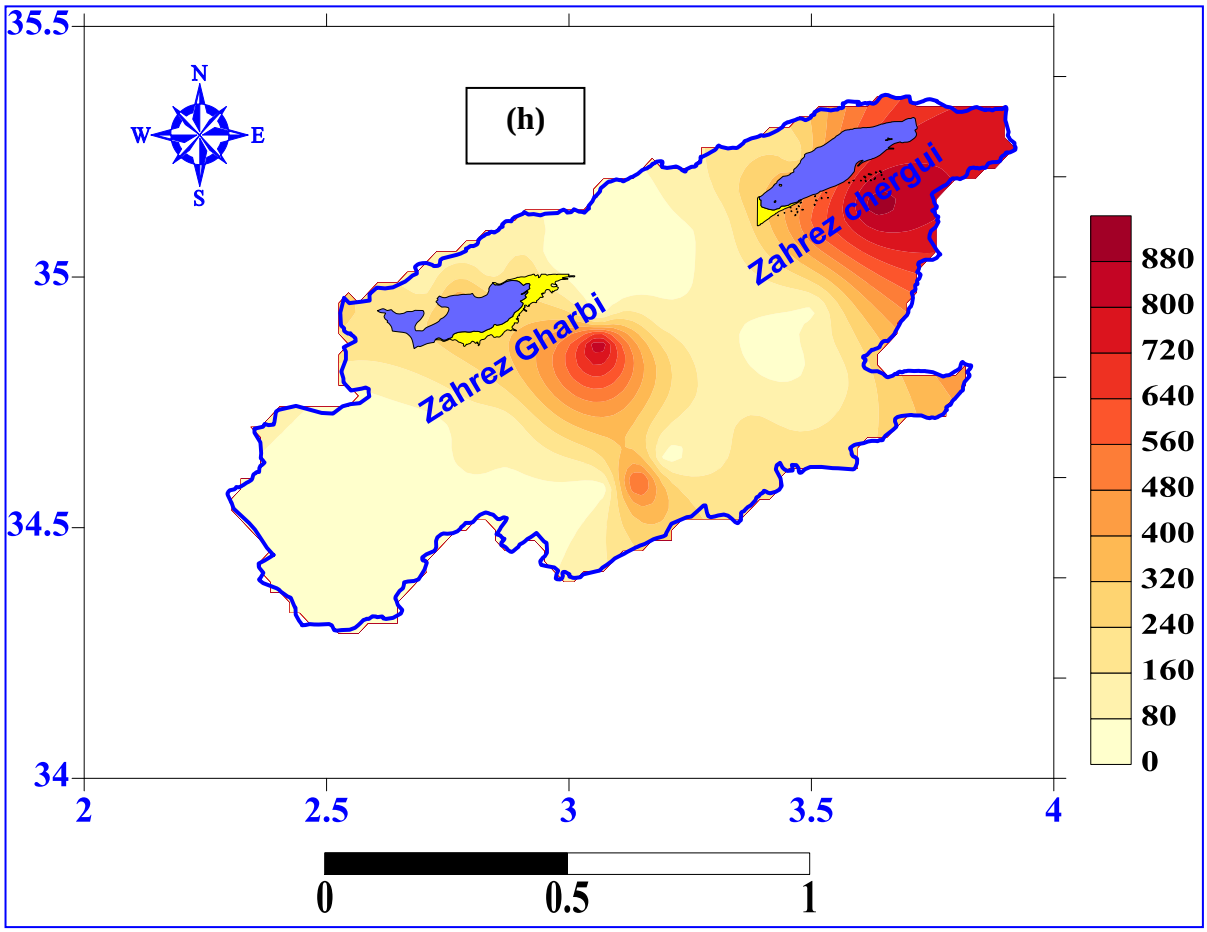

(c)
N
W
E
S
Zahrez chergui
Zahrez Gharbi
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
0.5
1

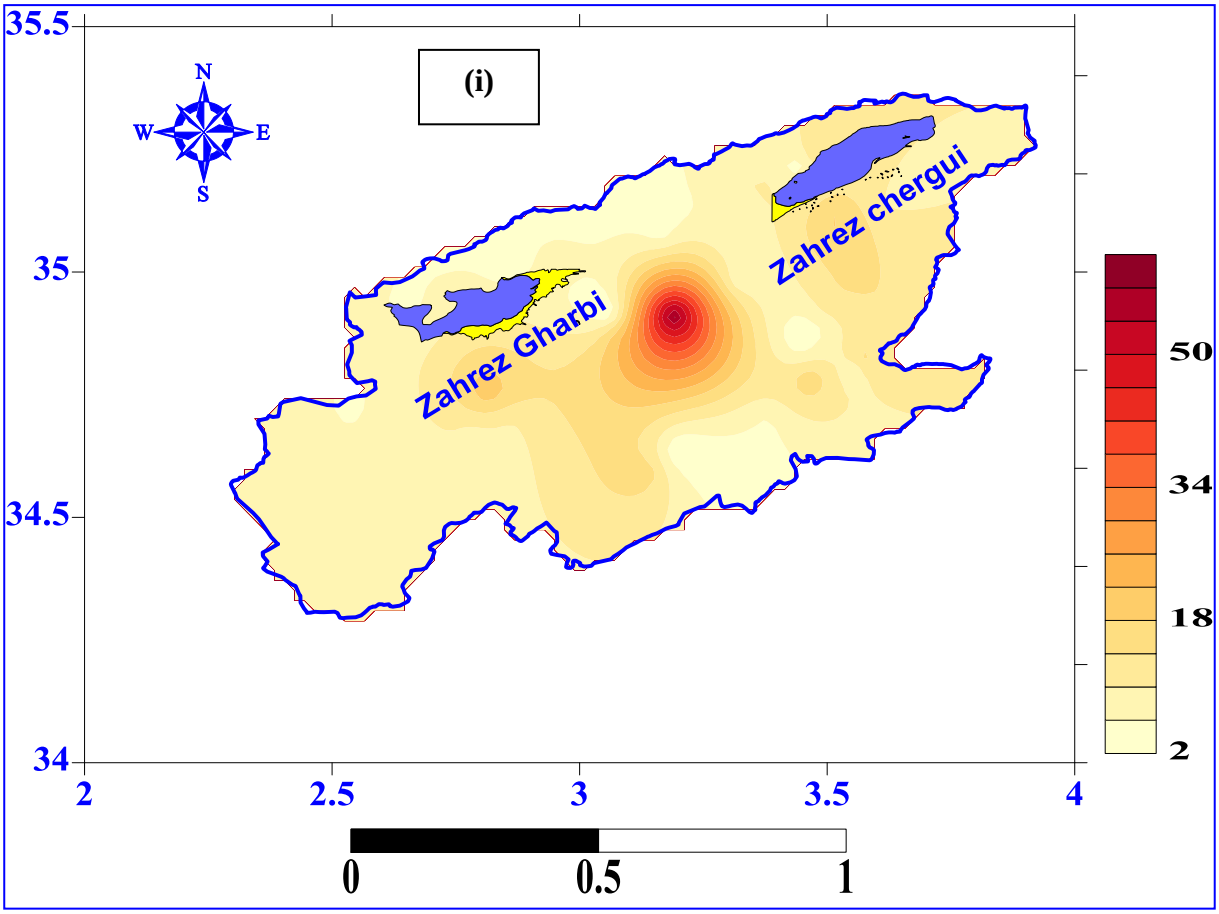

(d)
N
W
E
S
Zahrez chergui
Zahrez Gharbi
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
1680
1440
1200
960
720
480
240
0
0
0.5
1

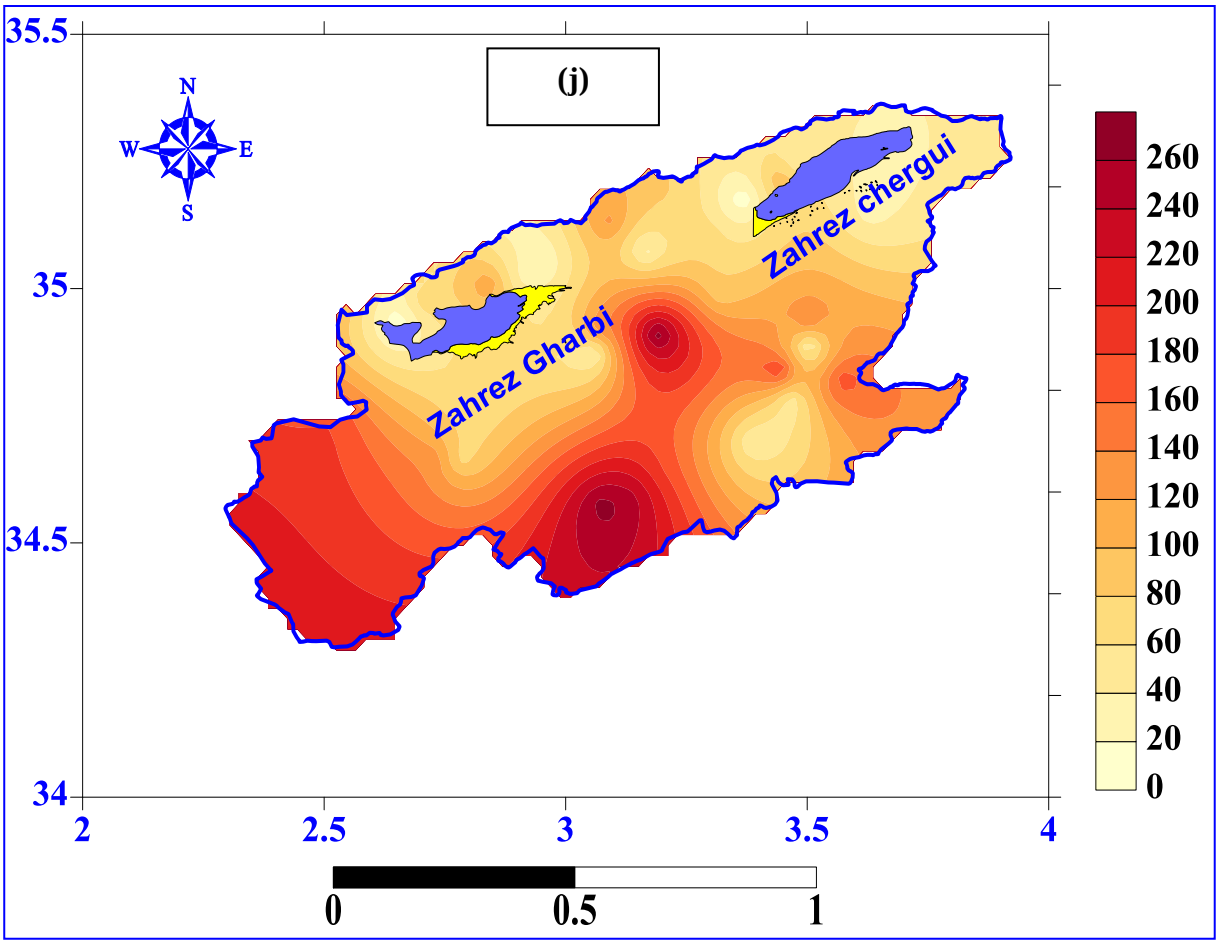

(e)
N
W
E
S
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
85
65
45
25
5
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
0
0.5
1


(f)
N
W
E
S
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
600
450
300
150
0
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
0
0.5
1


(g)
N
W
E
S
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
300
200
100
0
0
0.5
1


(h)
N
W
E
S
Zahrez Gharbi
Zahrez chergui
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
880
800
720
640
560
480
400
320
240
160
80
0
0
0.5
1


(i)
N
W
E
S
Zahrez chergui
Zahrez Gharbi
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
50
34
18
2
0
0.5
1


(j)
N
W
E
S
Zahrez chergui
Zahrez Gharbi
35.5
35
34.5
34
2
2.5
3
3.5
4
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0.5
1

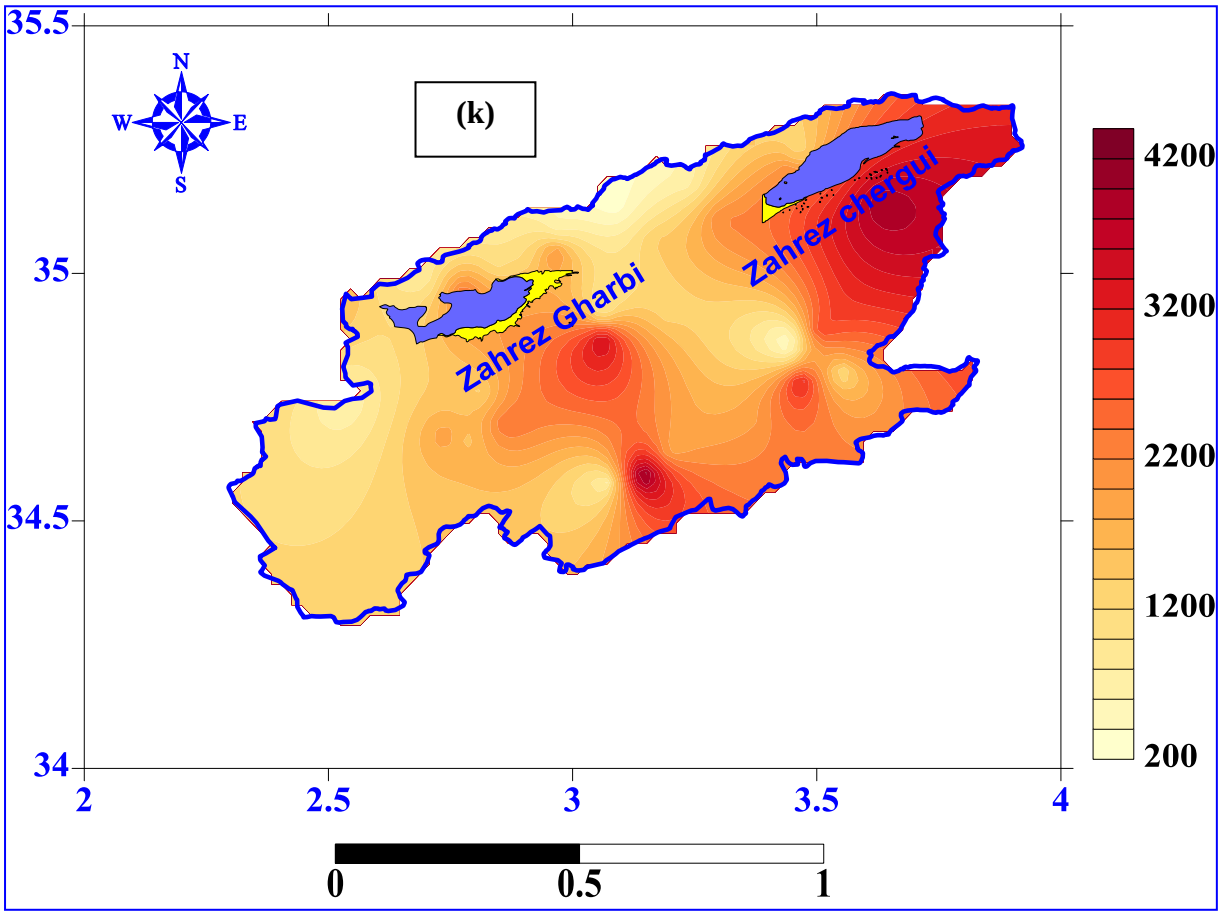


Figure 84 : Cartes de répartition spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la nappe nappe Mioplioquaternaire du bassin des Zahrez : (a) pH, (b) EC, (c) Cl^-, (d) SO_4^{2-}, (e) NO_3^-, (f) Ca^{2+}, (g) Mg^{2+}, (h) Na^+, (i) K^+, (j) HCO_3^- (k) TDS

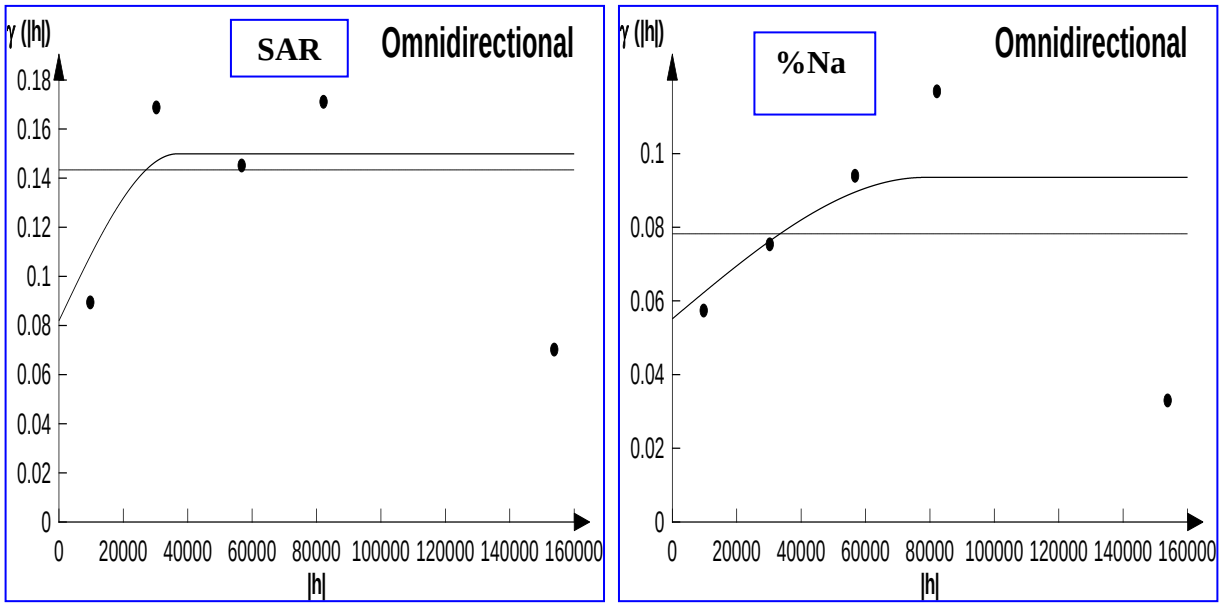


Figure 85 : Ajustement des Variogrammes expérimentaux des indices de qualité des eaux d'irrigation : (a) SAR et (b) %Na

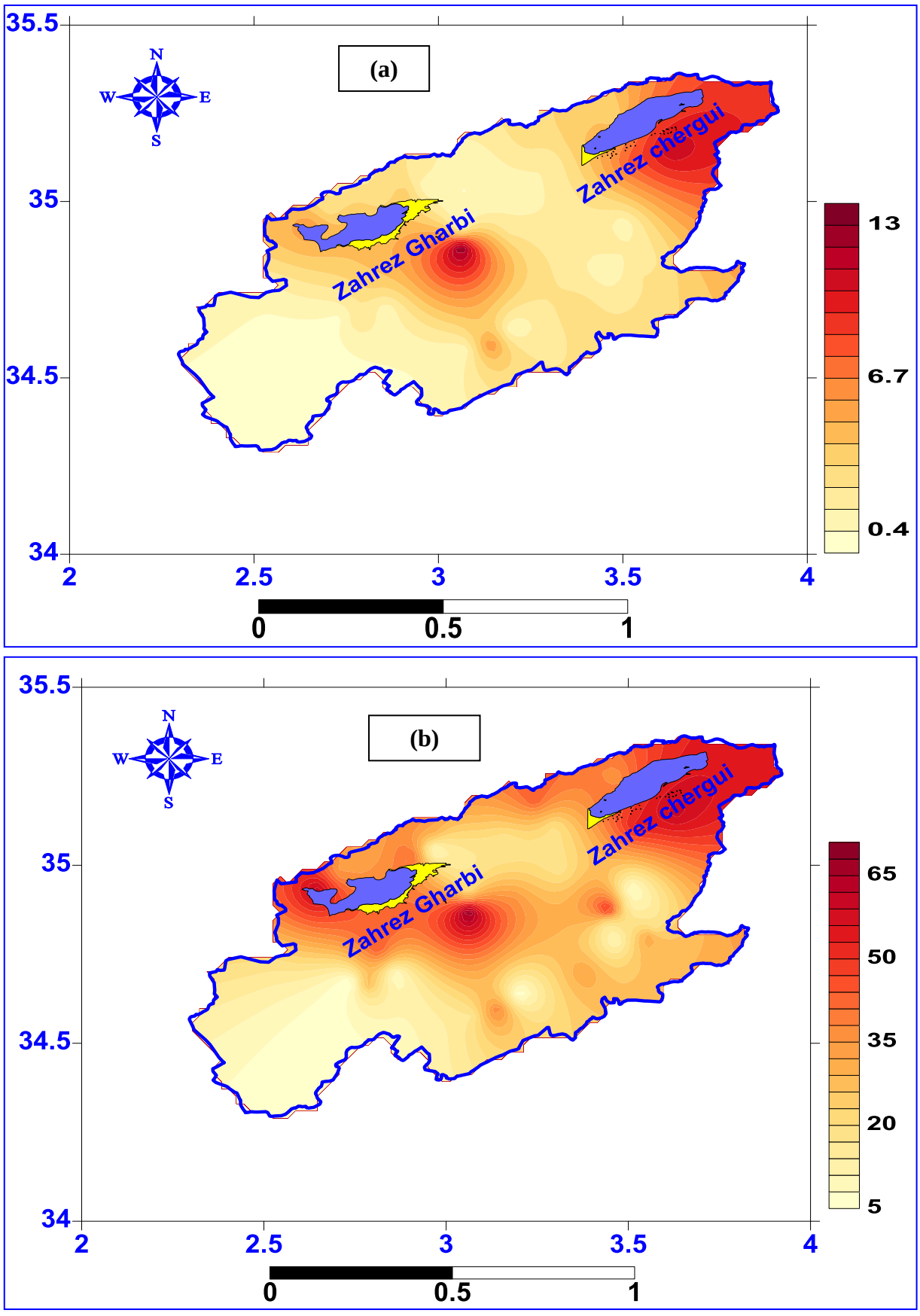


Figure 86 : Cartes de répartition spatiale des indices de qualité des eaux d'irrigation : (a) SAR et (b) %Na

En comparant les valeurs de la portée obtenues, on peut dire que la structure spatiale des paramètres (SAR et %Na) montre une autocorrélation régionale entre les différents couples jusqu'à des distance a (portée), respectivement 36,80 et 78,40 km.

4.2.2.3 Cartographie des paramètres SAR et %Na par Krigeage

a) Carte du SAR des eaux

L'examen de la carte du SAR (Figure 86(a)), nous permis de constater que valeurs les plus élevées du SAR (SAR>10) sont localisées au centre et au Nord-Est de la zone d'étude.

b) Carte du %Na des eaux

La carte de la répartition spatiale du % Na (Figure 86(b)) montre que les valeurs les plus importantes sont observées au Nord-Est, au centre et au Nord-Ouest de notre zone d'étude.

Il est à signaler que la répartition spatiale des paramètres (SAR et %Na) montre que les points d'eaux situés à proximité de deux chotts (Zahrez Gharbi et Zahrez chergui) présentent des valeurs élevées. De ce fait, l'utilisation de ces points d'eaux à des fins agricoles risque de fragiliser les propriétés physiques du sol, notamment la structure ; qui va entraîner une diminution de la perméabilité des couches superficielles.

4.3 Conclusion

L'étude de la structure spatiale des paramètres physico-chimiques par analyse variographique a permis d'ajuster les variogrammes expérimentaux des paramètres physico-chimiques sur des modèles sphérique et exponentiel. L'existence d'un effet de pépite (C_0) non nul pour tous les variogrammes modélisés, ceci s interprète par l'existence d'une micro-régionalisation dont l'échelle est inférieure à l'espacement des points de mesure et/ou des erreurs de mesures. D'autre part, pour tous les variogrammes expérimentaux la limite d'autocorrélation spatiale des paramètres physico-chimiques varie de 4,8 à 96,57 km.

L'interpolation par krigeage a permis une meilleure compréhension de la variabilité spatiale des éléments chimiques et aussi de prédire la distribution spatiale de ces éléments en des sites non échantillonnés. D'autre part, les cartes obtenues par krigeage ont permis de montrer que la quasi-totalité des éléments chimiques présentent des teneurs importantes sont localisées dans le Nord-Est et le centre de la zone d'étude. Il est à signaler que les répartitions des différents éléments dépendent du faciès géologique des formations aquifères et les activités anthropiques dû à l'utilisation des engrais azotés auquel s'ajoute la pollution par les rejets domestiques déversés directement dans les oueds.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude, qui a porté sur le système aquifère du bassin du Zahrez. Elle a pour objectif d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement du système aquifère sollicité et de mettre en place un outil de gestion qualitative et quantitative des ressources en eau qui soit représentatif du système, tenant compte de la géologie, de l'hydrogéologie et de la variabilité climatique. Ce travail a cherché, par une double approche hydrodynamique et hydrogéochimique, à mieux comprendre les processus fondamentaux du fonctionnement du système.

Après avoir étudié le contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude dans la première partie de la thèse nous avons pu déterminer les caractéristiques le rôle hydrogéologique des formations, leur comportement hydrodynamique, ainsi que les connexions hydrogéologiques entre les différentes unités et formations aquifères.

L'étude hydro climatologique a révélé que la zone d'étude est soumise à un climat semi-aride avec un hiver froid et un été sec et chaud. La température moyenne annuelle qui y règne est de l'ordre de 14,66 °C. La pluviosité moyenne annuelle est estimée à 118 mm. Le bilan hydrique est dans son ensemble déficitaire, mais il est excédentaire aux mois de Décembre, Janvier, Février et Mars.

L'étude hydrochimique a permis de mettre en évidence les différents mécanismes hydrogéochimiques régissant le processus de minéralisation dans le système aquifère du bassin des Zahrez. L'interprétation des données hydrochimiques ont montré que l'abondance des ions majeurs est comme suit : $Ca > Na > Mg > K$ et $Cl > SO_4 > HCO_3$ La représentation graphique des points d'eaux analysés sur le diagramme de Piper révèlent la présence de deux faciès, l' un sulfaté calcique ($Ca\text{-}Mg\text{-}Cl\text{-}SO_4$) calcique et l' autre sulfaté sodique ($Na\text{-}K\text{-}Cl\text{-}SO_4$).

Les résultats obtenus par la CAH nous ont permis des classer les échantillons en trois types d'eaux importantes en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées. En outre, les résultats obtenus par l'ACP indiquent que les processus de minéralisation évaporitique et salifère jouent le rôle le plus important dans l'évolution du chimisme des eaux souterraines dans le bassin des Zahrez. Les indices de saturation ont permis de mettre en evidence le rôle des phénomènes de dissolution des minéraux évaporitiques et la précipitation des minéraux carbonatés dans l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraine de la zone d'étude.

L'application de la géostatistique, et en utilisant la variographie pour étudier la structure spatiale des paramètres hydrochimiques et le krigeage comme outil d'interpolation, nous a permis de l'étude de la répartition spatiale de ces paramètres, et l'élaboration des cartes iso-teneurs des éléments chimiques. Les cartes obtenues par krigeage constituent, un outil de décision important et nécessaire pour la gestion des ressources en eau, qui peut les gestionnaires dans le bon choix des champs de captage et l'implantation des forages destinés à l 'AEP et l'irrigation, conformément aux normes Algériennes relatives à la qualité des eaux.

Recommandations et perspectives :

Dans le but d'assurer une gestion durable des ressources en eaux souterraines du bassin des Zahrez, diverses recommandations et perspectives semblent être nécessaires :

- L'installation de nouvelles stations de mesure hydrométriques et pluviométriques pour une bonne représentativité des données.

- Une étude géologique détaillée accompagnée d'une prospection géophysique de détail impliquant plusieurs techniques d'investigation (électrique, sismique, etc) dans le but d'identifier, la nature et la géométrie du système aquifère de la zone d'étude.
- Sur le plan hydrodynamique : la constitution de nouvelles données piézométriques, en incluant de nouveau points de mesures dans les zone à faible représentativité s'avère nécessaire pour caractériser de façon précise le comportement hydrodynamique des aquifères pour l'estimation de la recharge.

- La réalisation des essais de pompage de longue durée, équipés de piézomètre, et exécutés à différents niveaux, permettront une approche globale de la fonction capacitive et de la transmissivité des réservoirs.

- L'étude hydrochimique réalisée dans ce travail a permis de définir les interactions entre les eaux et les roches encaissantes et aussi d'aborder la question de l'origine de la minéralisation et de la salinité des eaux. Cependant, il serait très intéressant de compléter cette étude par des études isotopiques utilisant en plus des traceurs environnementaux pour une meilleure compréhension du temps de transit des eaux dans l'aquifère et l'identification des zones d'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AGOUSSINE, M'bark, SAIDI, Mohamed El Mehdi, IGMOULAN, Brahim. Reconnaissance des ressources en eau du bassin d'Ouarzazate (Sud-Est Marocain). *Bulletin de l'institut Scientifique, Rabat, section Science de la Terre.* 2004, n°26, pp 81-92.

AKA, André, SERVAT, Eric, PATUREL, Jean-Emmanuel, KOUAME, Brou, *et al*. Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization . *Hydrological Sciences Journal.* 1996,vol. 41, n°6, pp.959-970.

AKIN, Hikmet, SIEMES, Heinrich. *Practical geostatistics: A primer for the mining and geosciences*. Berlin: Springer, 1988, 304 p.

ALLEN, Richard G, PEREIRA, Luis S, RAES Dirk, *et al*. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 1998, vol. 129, n° 6, pp.454–457.

A.N.A.T, Agence Nationale d'Aménagement du Territoire. Avant-projet du schéma régional et du développement durable de la région des hauts plateaux centre. 2003, pp.7-46 (Rapport interne)

A.N.B.T, Agence Nationale des Barrages et des transferts. Les grands aménagements hydrauliques en Algérie. 2008, 60 p. (Rapport interne).

A.N.R.H, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Étude des ressources en eau du bassin des Zahrez. 1994, 250 p. (Rapport interne).

A.N.R.H, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits du bassin des Zahrez (Gharbi et Chergui) (1993-1994). 2004, 30 p. (Rapport interne).

APPELO, C.A.J. POSTAMA, Dieke. Geochemistry, Groundwater and Pollution. London : Balkema, 1996, 536 p. ISBN 04 1536 421 3.

ARSLAN, Hakan. Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. *Agricultural Water Management.* 2012, n°113, pp. 57– 63.

BAILLARGEON, Sophie. *Le krigeage, revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale des données de précipitations*. Mémoire de Maître ès sciences (M.Sc.): Statistique. Laval: Université Laval, Canada, 2005, 128 p.

BANTON, Olivier, BANGOY Lumony M. *Hydrogéologie multiscience environnementale* des eaux souterraines. Québec : Presses de l'Université du Québec /AUPELF, 1997, 472 p. ISBN 978-2-7605-0926-9

BELKHIRI, Lazhar, BOUDOUKHA, Abderrahmane, MOUNI, Lotfi, *et al*. Statistical categorization geochemical modeling of groundwater in Ain Azel plain (Algeria). *Journal of African Earth Sciences.* 2011, n°59, pp. 140–148.

BIBLIOGRAPHIE

BEN MOUSSA, Amor, ZOUARI, Kamel, VALLES, Vincent, *et al*. Hydrogeochemical analysis of groundwater pollution in an irrigated land in Cap Bon Peninsula, North-Eastern Tunisia. *Arid Land Research and Management.* 2012, n° *26*, pp. 1-14 .

BIERKENS, Marinus Franciscus Petrus, BURROUGH, Peter Alan. The indicator approach to categorical data. *Journal of Soil Science.* 1993, n°44, pp. 361–368.

B.N.E.D.E.R, Bureau National d'Étude pour le Développement Rural. Révision de l'étude d'aménagement forestier de Senalba Chergui. Superficie 2000ha. Rapport de Synthèse Djelfa. Algérie, 1995, 40 p. (Rapport interne).

BOUCHEDJA, Abdellah. *La Politique Nationale de l'Eau en Algérie.* Istanbul – Turquie, 17 au 19 Octobre 2012 [en ligne]. Istanbul, Euro-RIOB, 19 Octobre 2012. [Consulté le 02 Janvier 2016]. Disponible à l'adresse : https://www.riob.org/fr/file/272212/ download?token=HBxHg_HN

BOIS Philippe. *Une méthode de contrôle des séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie*. Grenoble : Laboratoire de Mécanique des Fluides, Université Grenoble I, Cours, 1971, 33 p.

BOIS, Philippe. *Contrôle de séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation, 16 et 17septembre 1986,* Montpellier. Paris : ORSTOM, 1986. ISBN 2-7099-0865-4

BOUCHET, Robert. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Annales Agronomiques.* 1963, vol.14, n° 5, pp.743-824.

BOUDJADJA, Abdelaziz, MESSAHEL, Mekki. *Ressources hydriques en Algérie du Nord. Revues des Sciences de l'Eau*. 2003.Vol. 16, n°3, pp. 285-304.

BOUTELDJAOUI, Fatah, BESSENASSE, Mohamed, KETTAB, Ahmed. *Characteristics of Mioplio-Quaternary Groundwater and its Suitability in the Agricultural Area of Djelfa (Algeria),* 24, 25 et 26 Mars 2010, Agadir, Maroc. International Association of Hydrogeologists (IAH): UNESCO, 2012.

BOUTELDJAOUI, Fatah, BESSENASSE, Mohamed., GUENDOUZ, Abdelhamid. Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Revue Nature et Technologie*. 2012, n° 07, pp. 109-116.

BOUTELDJAOUI, Fatah, BESSENASSE, Mohamed, KETTAB, Ahmed. Assessment of Climatic Variability in Zahrez Basin (Algeria). *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2016, vol.5, n°5, pp.36-44.

BOUTELDJAOUI, Fatah, KETTAB, Ahmed, BESSENASSE, Mohamed. Evaluation of Spatiotemporal Variability of Groundwater Level Fluctuations in Zahrez basin, Algeria:

Geostatistical Approach. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2016, vol.5, n°3, pp.4-11.

BOUTELDJAOUI, Fatah, KETTAB, Ahmed, BESSENASSE, Mohamed. Identification of the Hydrogeochemical Process, in Zahrez Basin (Algeria). *Algerian Journal of Environmental Science and Technology.* 2017, vol.3, n°1, pp.64-69.

BOUTELDJAOUI, Fatah, BESSENASSE, Mohamed, KETTAB, Ahmed, SCHYETT, Traugott. Combining geology, hydrogeology and groundwater flow for the assessment of groundwater in the Zahrez Basin, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences.* 2019, vol. 12, n° 804, pp. 1-17**.**

BOUTELDJAOUI, Fatah, BESSENASSE, Mohamed, KETTAB, Ahmed, et al.,. Mineralization mechanisms of groundwater in a semi-arid area in Algeria: statistical and hydrogeochemical approaches. *Journal of Water Supply: Research and Technology— AQUA.* 2019, vol 69, n°2, pp173-183.

BROCHET, Patrick, GERBIERS, Norbert. L'évapotranspiration. Monographie n° 65 de la météorologie nationale, 1975, 95p.

BOYER Jean François. 1998. *Khronostat- Statistical time series analyses software.* Montpellier : Hydrosciences, IRD - Maison des Sciences de l'Eau. 1998. [Consulté le 10 Mars 2010] Disponible à l'adresse http://www.hydrosciences.org

BUISHAND, Adri T. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology.*1982, vol. 58, pp. 11-27.

BUISHAND, Adri T. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*. 1984, vol. 73, pp. 51-69.

CAMBARDELLA, Cynthia A, MOORMAN, Thomas B, NOVAK, Jeffrey M, *et al.* Fields-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal.* 1994, vol.58, pp. 1501 – 1511.

CASTANY, Gilbert. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie.* Paris: Dunod, 1982, 236p. ISBN 2 10 004171 1.

CEMEK, Bilal, GÜLER, Mustafa, KILIÇ, Kenan, *et al.* Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment.* 2007, vol.124, pp. 223-234.

CERLING, Thure, PEDERSON B.L, DAMM K.L.V. Sodium–calcium ion exchange in the weathering of shales: implications for global weathering budgets. *Geology.* 1989, Vol.17, pp.552–554.

BIBLIOGRAPHIE

CHIBANE, Brahim, BOUTALEB, Abdelhak. Geochemistry study and Isotopic Approach in Semi-Arid Region: Case of the Djelfa Syncline (Algeria). *European Journal of Scientific Research*. 2010, Vol.45, no.2, pp.270-290

CHRYSTELLE, Auterives. *Impact du changement climatique sur la ressource en eau en région Langueduc Roussillon.* Thèse de DEA : Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Paris: Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Sud, 2002, 49 p.

CLUTIER, Vincent, LEFEBVRE, René, THERRIEN, René, *et al.* Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the Hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*. 2008, vol.353, pp.294-313.

CNES, Conseil National Economique et Social. L'eau en Algérie : le grand défi de demain, Projet de rapport, 15ème session plénière. 2000, 23p.

COOPER, Richard M, ISTOK, Jonathan D. Geostatistics applied to groundwater contamination:1. Methodology. *Journal of Environmental Engineering*. 1988, vol.114, n°2, pp. 270–286.

CORNET Gustave, XIX^{ème} Congrès Géologie International. *Etude hydrogéologique du bassin fermé des Zahrez Gharbi et Chergui*, 15 septembre 1952, Alger : Institut de Géologie. Alger, 1952.

CORNET, Gustave. Carte géologique de l'Algérie au 1/50000. 1952. Alger. Direction du Commerce, de l'Énergie et de l'Industrie, Service de la carte géologique. Gouvernement Général de l'Algérie.

DAGET, Philippe. Le bioclimat méditerranéen : analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. *Vegetation.* 1977, vol.34, n° 2, pp. 87-103.

DEBIECHE, Taha. Hocine. *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 Seybouse. Nord-Est Algérien.* Thèse de Doctorat : Sciences de la Terre: Franche Comté, France: Université de Franche comté, 2002, 199 p.

DELHOMME, Jean Pierre. Kriging in the Hydrosciences. *Advances Water Resources*. 1978, vol.1, n°5, pp.251–266.

D.P.A.T, Direction de la Planification et de l 'Aménagement du Territoire. Rapport annuel de la direction de la planification et de l'aménagement du territoire de la Wilaya de Djelfa. 2001, 55 p. (Rapport interne)

DROUICHE Nadjib, GHAFFOUR Noreddine, NACEUR, Mohamed Wahib, *et al.* Towards sustainable water management in Algeria. *Desalination and Water Treatment.* 2012, vol. 50, pp. 272–284.

BIBLIOGRAPHIE

D.S.A, Direction des Services Agricoles. Statistique agricole de la Wilaya de Djelfa. 2006, 35 p. (Rapport interne)

DUBY, Camille, ROBIN, Stéphane. *Analyse en composantes principales*. Paris : Institut National Agronomique, Université Paris-Saclay, 2006, 53 p. [consulté le 15/05/2017]. Disponible sur : http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/AnalyseComposantesPrincipales-AgroParis Tech.pdf

EL TAYEB EL, SADIG Mahmoud. *Les systèmes aquifères de la région de Géneina-Adré (confins soudano-tchadiens).* Thèse de Doctorat: Hydrogeologie. Avignon: Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 1993, 249 p.

E.N.H.Y.D, Entreprise Nationale des Études Hydrauliques, Ministères des Ressources en Eau. Étude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du Nord. 2002, 83 p. (Rapport interne).

FEHDI, Chemseddine, ROUABHIA, Abdelkader BAALI, Fethi, *et al*. The hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, northeastern Algeria. *Environmental Geology*.2009, vol.58, pp.1611–1620.

FISHER, Stephen R, MULICAN, William F. Hydrochemical evolution of sodium–sulfate and sodium–chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*. 1997, vol.10, n°4, pp. 455–474.

GAUD, Bernard. Étude hydrogéologique du système aquifère d'Annaba - Bouteldja (synthèse des connaissances et recherche des conditions de modélisation). ANRH, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. 1976, 151p. (Rapport interne).

GIBBS, Ronald J. Mechanisms controlling worlds water chemistry. *Science.* 1970, vol.170, pp. 1088–1090.

HAMADI, Habaieb, CHIRAZ, Masmoudi. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence
par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Revue sécheresse*. 2003. Vol.14, n° 4, pp. 257-265.

HARGREAVES George H, SAMANI, Zohrab A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture.* 1985, Vol.1, n°*2*, pp.96–99.

HUBERT, Pierre, CARBONNEL, Jean Pierre, CHAOUCHE Ali. Segmentation des séries hydrométéorologiques - Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology.* 1989. Vol.110, pp. 349-367.

HUBERT, Pierre, SERVAT, Eric, PATUREL, Jean-Emmanuel, KOUAME, *et al.* La procédure de segmentation, dix ans après. Water Resources in Africa during the XXth century. *IAHS publication*. 1998, Vol. 252.

BIBLIOGRAPHIE

INRS-Eau, Terre et Environnement. HYFRAN. A software for statistical modeling, University of Québec. 2003. [Consulté le 01 Fevrier 2017]. Disponible à l'adresse http://www.inrs-ete.uquebec.ca/activites/groupes/chaire_ htdro /chaire1.htm.

JOURNEL, Andre G, HUIJBERGTS, Charles J. *Mining. Geostatistics.* London: Blackburn Press, 2004, 612 p. ISBN 978-1930665910.

KADI, Ahmed. La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological Sciences Journal.* 1997, vol. 42, n°2, pp.191-197.

KETTAB, Ahmed, Water resources in Algeria: strategies, investments, and vision. *Desalination and Water Treatment*. 2001, vol.136, no.1-3, pp.25-33.

KHIATI Djida. Synthèse des données hydrogéologiques du bassin versant des Zahrez A.N.R.H, (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). 1990, 30 p. (Rapport interne).

KHIATI, Djida. Etude hydrogéologique du bassin des Zahrez. ANRH, (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). 1994, 20 p. (Rapport interne).

KRIGE, Danie. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*. 1951, vol.52, pp.119-139.

KUMAR, Vijay. Optimal contour mapping of groundwater levels using universal kriging - a case study. *Hydrological Sciences Journal*. 2007, vol.52, no.5, pp.1039–1049.

LABORDE, Jean Pierre. 2009. *Eléments d'hydrologie de surface*. Ecole Polytechnique de l'Université de Nice Sophia Antipolis, Cours, 2009, 192 p.

LALLAHEM, Sami. *Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris*. Thèse de Doctorat : Genie Civil. Lille: Université des Sciences et Technologies, 2002, 219 p.

LEE, Austin F, S, HEGHINIAN, Sylva, M. A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables – a Bayesian approach. *Technometrics.* 1977,vol. 19, n° 4, pp. 503-506.

LUBES, Hélène, GAUTIER, Franck, MASSON, Jean Marie, *et al.* Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950-1989. *Hydrological Sciences Journal*. 1998, vol. 43, n° 6.

LUBES, Hélène, MASSON, Jean Marie, SERVAT, Eric, *et al.* Variabilité climatique et statistique : Etude de simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau.* 1998, vol. 3, pp. 383-408.

MAOUI, Ammar. *Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et*

ses risques sur les sols et la végétation. Thèse de Doctorat. Hydrogéologie. Annaba : Universite Badji Mokhtar, 2007, 257 p.

MARCOTTE, Denis. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*. 1995. vol. 27, n°5, pp. 659-672.

MATHERON, Georges. *Traité de géostatistique appliquée*. Paris: Technip, 1962, 333 p.

MATHERON, Georges. Principles of geostatistics. *Economic Geology*. 1963. vol. 58, pp. 246-1266.

MATHERON, Georges. *Les Variables Régionalisées et leur Estimation.* Paris : Masson, 1965, 305 p.

MATHERON, Georges. *La théorie des variables régionalisées, et ses applications*. Paris : École des Mines de Fontainebleau, 1970, 212 p.

MAYO, Alan L, LOUCKS, Mark D. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology.* 1995, vol. 172, 31–59.

MCLEAN Wendy, JANKOWSKI Jerzy. *Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia,* XXX IAH Congress on Groundwater: Past Achievements and Future Challenges, Cape Town, South Africa, 26th November–1st December, 2000 : Cape Town, South Africa, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield. ISBN 90-5809-159-7. http://pascal-francis.inist.fr

MEDDI, Mohamed, BOUCEFIANE, Abdelkader. Climate change impact on groundwaterin Cheliff-zahrez basin (Algeria). *International journal of water resources and arid*. 2015, vol. 4,163–170

MAYO, Alan L, LOUCKS, Mark D. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*. 1995, vol. 172, 31–59.

MORGAN, Mozas ALEXIS, Ghosn. *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie.* Paris-France : Institut Prospective Économique du Monde Méditerranéen (IPEMED), 2013, 27 p. [Consulté le 15/06/2016] Disponible à l'adresse : http://www.pseau.org/outils/ouvrages/ipemed_etat_des_lieux_du_secteur_de_l_eau_en_algerie_2013.pdf

MUDRY, Jacques, BLAVOUX, Bernard. Utilisation de l'analyse en composantes principales pour méthode du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud –Est de la France. *Hydrogéologie*. 1986, n°1, pp. 53-59.

MUSY, André. HIGY, Christophe., *Hydrologie, une science de la nature :* Presses polytechniques et universitaires romandes. Suisse. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004, 314 p. ISBN 978-2-88074-546-2

BIBLIOGRAPHIE

NGOM, Fatou Diop, MALOU, Raymond, HONORE, Dacosta 2002, *et al.* Contrainte climatiques des nappes d'eaux souterraines en zone Soudano-séhélienne : cas de la nappe phréatique du bassin de la Nema dans la région du sine au centre –Ouest du Sénégal. *African Journal of Science and Technology*. vol. 3, n° 1, pp. 44-50.

NEDJIMI, Saadia. *Contribution à l'étude piézométrique et hydrochimique du Synclinal Nord de Djelfa*. Ingénieur d'État : Sciences Agronomiques. Djelfa: Université ZianeAchour, 2006, 120 p.

ONUGBA, Abraham. *Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la haute Bénoué (Nigéria).* Thèse de Doctorat : Hydrogéologie. Avignon: Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 1990, 203p.

PANNATIER, Yvan. *VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D.* New York : Springer Verlag, 1996, 91 p.

PARKHURST, David, APPELO, C.A.J. *User's guide to PHREEQC (version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-reaction, One-dimensional Transport,and Inverse Geochemical Calculations*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, 1999, 312p. [Consulté le 15/02/2015]. Disponible sur : https://pubs.er.usgs.gov/publication/wri994259.

PETTITT, Anthony. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics.* 1979, vol. 28, n° 2, pp. 126-135.

PIPER, Arthur M. A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. *Transactions American Geophysical Union*. 1994, vol. 25, n° *6*, pp. 914-923.

POUGET, Marcel. *Les relations sol-végétation dans les steppes Sud-algéroises*. Thèse Doctorat: Sciences du Sol. Marseille : Université Aix-Marseille, France, 1980, 555 p.

POUGET, Marcel. Étude agro-pédologique du bassin du Zahrez Rharbi (Feuille Rocher de sel). A.N.R.H, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. 1971, 220 p. (Rapport interne).

POUGET, Marcel. Cartographie des zones arides, géomorphologie, pédologie, groupements végétaux, aptitude du milieu a la mise en valeur. ORSTOM, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris. 1977, 101 p. (Rapport interne).

RAZACK, Moumtaz, DAZY, Jean. Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoirs with combined used of Piper's principle and factor analysis. *Journal of Hydrology.* 1990, vol. 114, pp. 371-393.

RICHARDS, Lorenzo Adolph. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils.* Washington: United States Department of Agriculture, 1954, p. 60.

ROCHE, Marcel. *Hydrologie de surface*. Paris: Gauthier-Villards, 1963, 429 p.

BIBLIOGRAPHIE

RODIER, Jean. LEGUBE, Bernard. MERLET, Nicole et coll. *L'Analyse de l'eau*. Paris : Dunod, 2009, 1526 p. ISBN 978-2-10-054179-9.

SIDI MOUSSA, Mohamed Fouzi. Ressources Hydrauliques de la zone du projet GTZ-HCDS. Coopération Algero-Allmande. ANRH, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. 1996, 176 p. (Rapport interne)

SIDI MOUSSA, Mohamed Faouzi, DERAMCHI, Mohamed. Synthèse des études et exploitation des données existantes sur le Synclinal de Djelfa. ANRH, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. 1993, 50 p. (Rapport interne).

SCHOLLER, Henri. *Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux de gisement de pétrole*. Paris : Société Technip, 1956, 213 p.

SCHOLLER, Henri. Les eaux souterraines. *Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources*. Paris : Masson et Cie, 1962, 642 p.

SCHOLLER, Henri. Geochemistry of Groundwater. In: *Groundwater Studies—An International Guide for Research and Practice*. Paris: UNESCO, 1977, pp. 1-18.

SHAKEEL, Ahmed. *Estimation des transmissivites des aquifères par méthodes géostatistiques multi variables et résolution indirecte du problème inverse.* Thèse de Doctorat. hydrologie et hydrogéologie quantitatives. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Mines, 1987, 264 p.

SIMLER, Roland, Logiciel Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon. 2004. [Consulté le 20 Avril 2012]. Disponible à l'adresse http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm.

SINGH, Kuldip, HUNDAL, H.S, SINGH, Dhanwinder. Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. *Environmental Earth Sciences.* 2011, vol. 64, pp. 1823–1833.

TELIBI Arbia. *Contribution à l'étude de l'évapotranspiration et des besoins en eaux en zone semi arides (cas de la région de Djelfa).* Ingénieur d'État : Sciences Agronomiques. Djelfa: Université ZianeAchour, 2004, 120 p.

THORNTHWAITE, Charles Warren. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 1948, vol. 38, n° 1, pp. 55-94.

THORNTHWAITE, Charles Warren, MATHER, John Russell. Instructions and Tables for Computing Potential Evaporation and the Water Balance. *Climatology*. 1957. Vol X, no. 3, 311 p.

TURC, Louis. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques.*1961, vol. 12, n° 1, pp. 13-49.

BIBLIOGRAPHIE

WEBSTER, Richard, OLIVER, Margaret A. *Geostatistics for Environmental Scientists.* London: John Wiley Sons Ltd, Chichester, 2007, 315p. ISBN 978-0-470-02858-2

WESTERN, Andrew W, BLÖSCHL, Günter, GRAYSON Rodger B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrawara catchment. *Journal of Hydrology*. 1998, vol. 205, 20–37.

WHO, World Health Organization. *Guidelines for Drinking Water Quality, incorporating first addendum.* Geneva: 2008, 494 p. [Consulté le 15 Octobre 2016] Disponible à l'adresse http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/2edvol1i.pdf

WILCOX, Lloyd V. Water quality from the standpoint of irrigation. *Journal American Water Works Association.* 1958, Vol. 50, n° 5, pp. 650-654.

WOTLING, Geoffroy, BOUVIER, Christophe, DANLOUX, Joël, *et al.* Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment, *Journal of Hydrology*. 2000, Vol. 233, n° 1-4, pp. 86-101.

XU, Chong Yu. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*. 2005. n° 19, pp. 3717–3734.

YANG, Fan, ZHANG, Guangxin, YIN, Xiongrui, LIU, Zhijun, *et al.* Field-Scale Spatial Variation of Saline-Sodic Soil and Its Relation with Environmental Factors in Western Songnen Plain of China. *International Journal Environmental Research Public Health*. 2011, n°8, pp. 374-387.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1. Photos de terrain

Figure 1.1 Rocher de sel

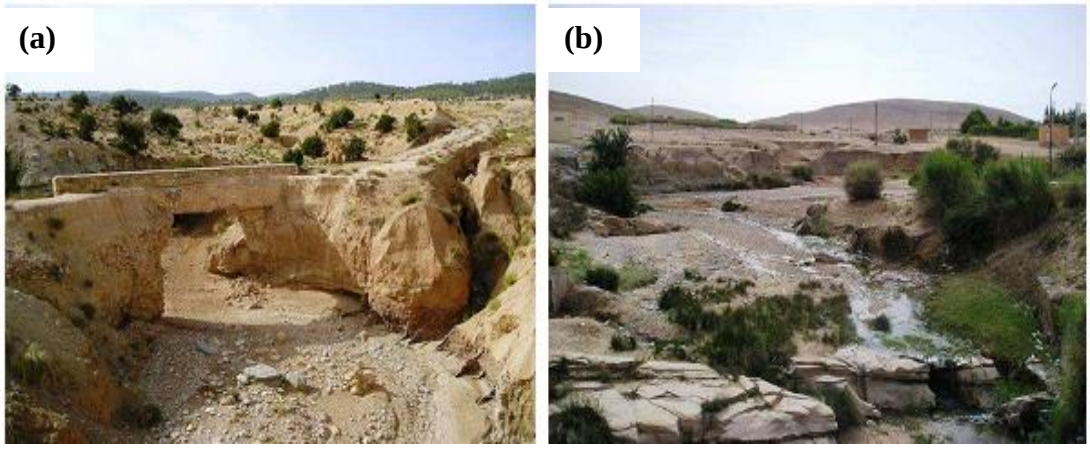


Figure 1.2 Affluent de l'Oued Hadjia, en amont de Charef

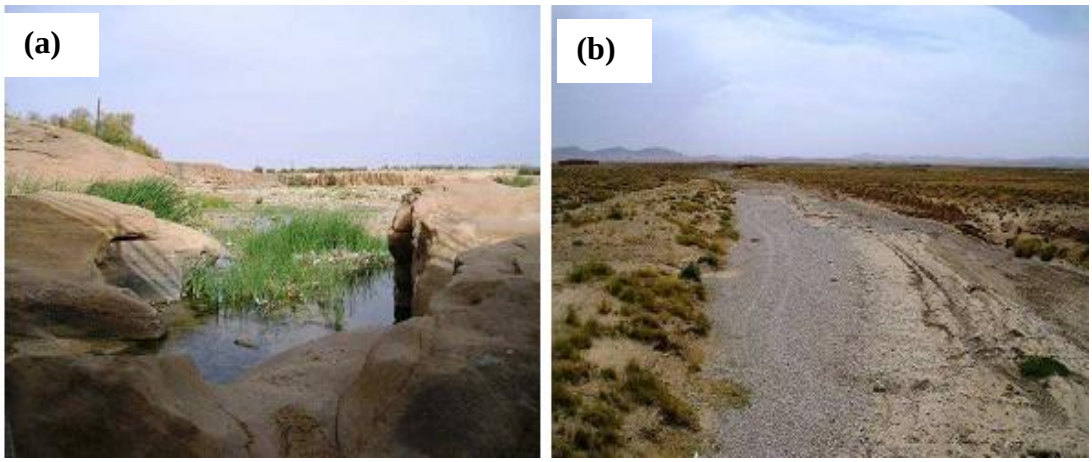
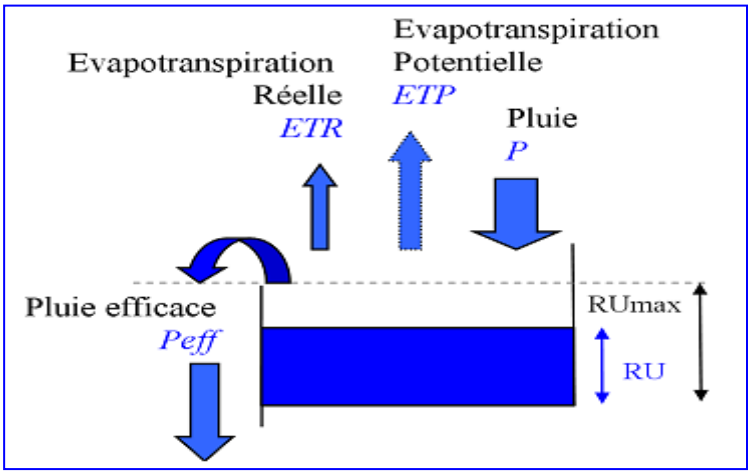
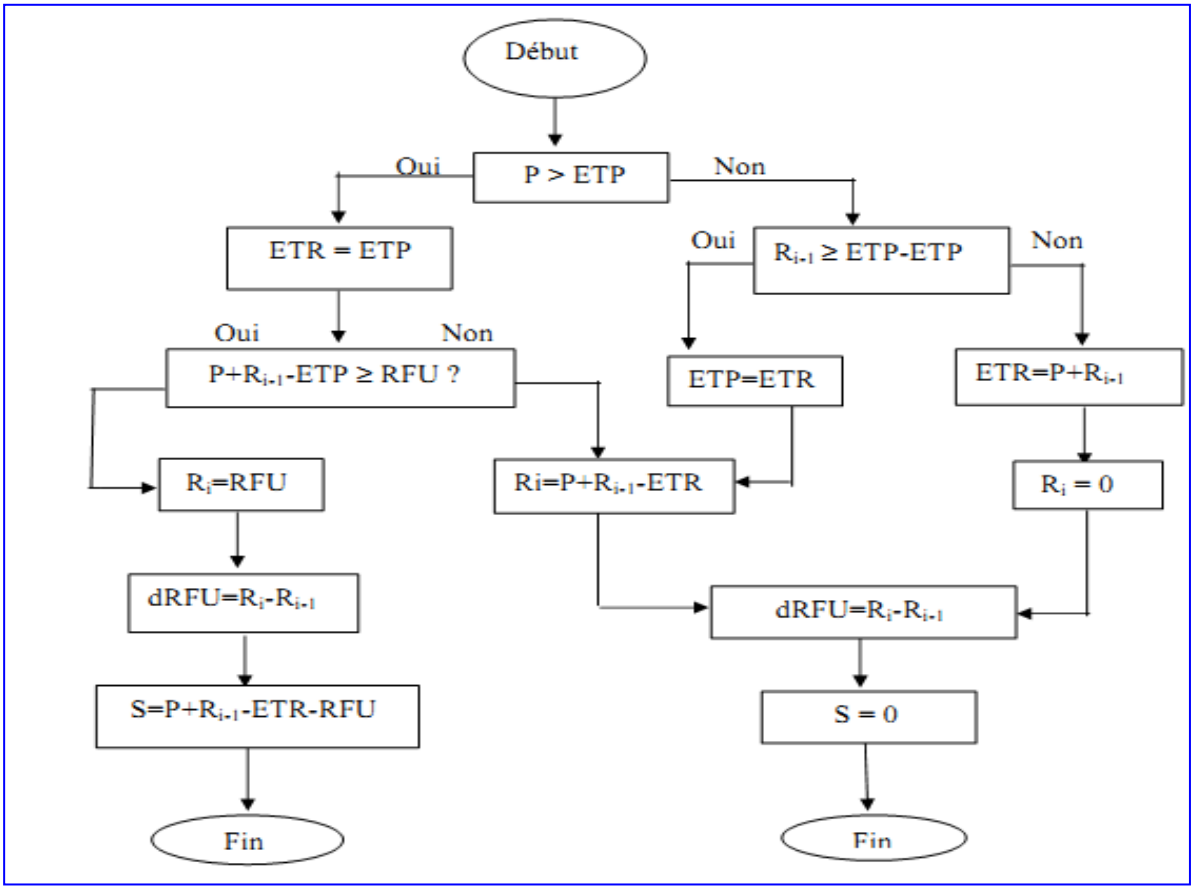


Figure 1.3 Oued Hadjia au niveau de la route Charef- Zaafrane

Annexe 2. Bilan hydrologique selon le modèle de **THORNTHWAITE** (1948)





RFU = réserve en eau du sol facilement utilisable par les plantes. Elle est fixée ici à 100 mm;

R_{i-1} = réserve effective du mois précédent ;

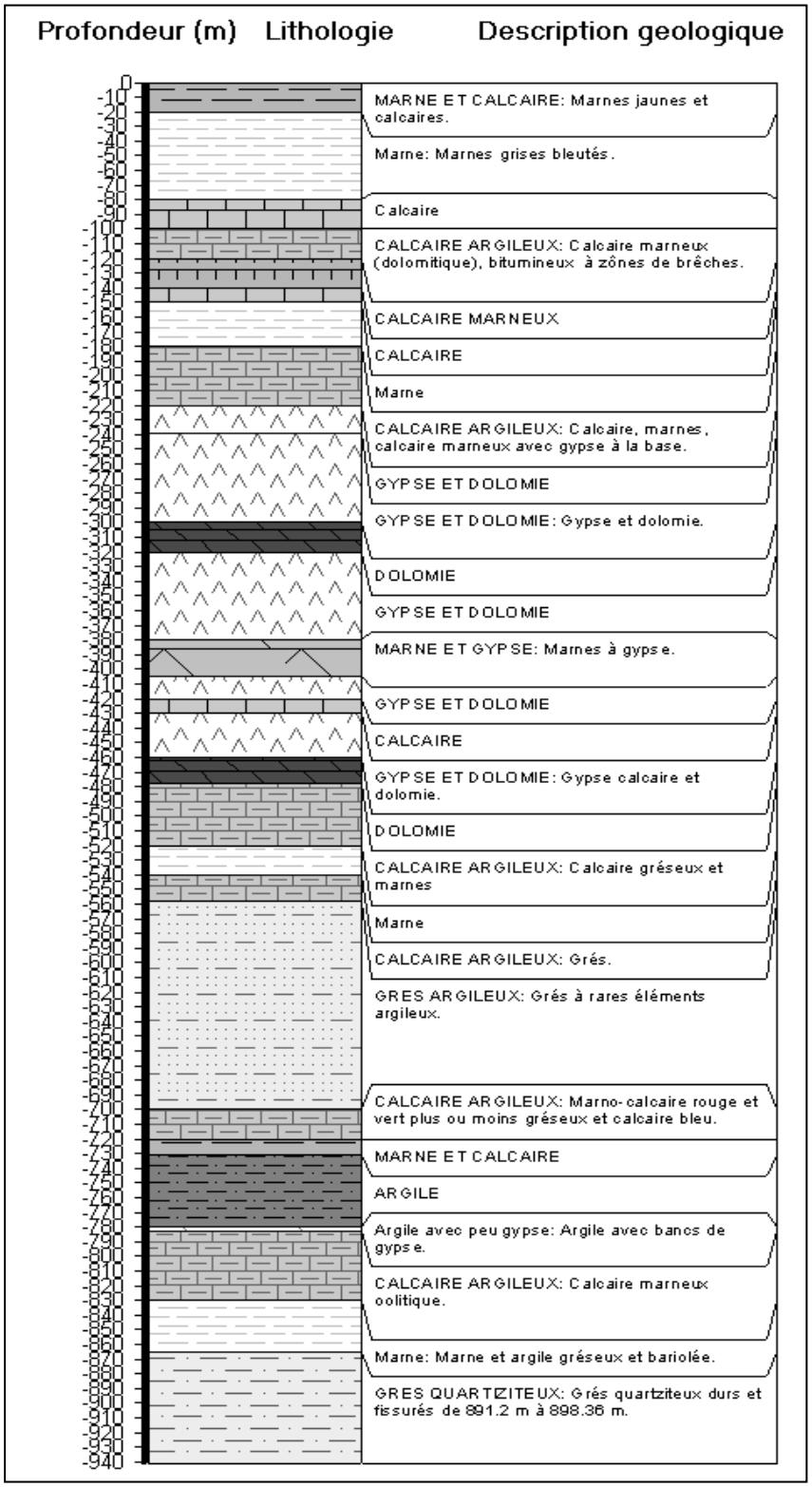
dRFU = variation des réserves ;

S = surplus disponible pour l'écoulement superficiel ou souterrain

ANNEXES

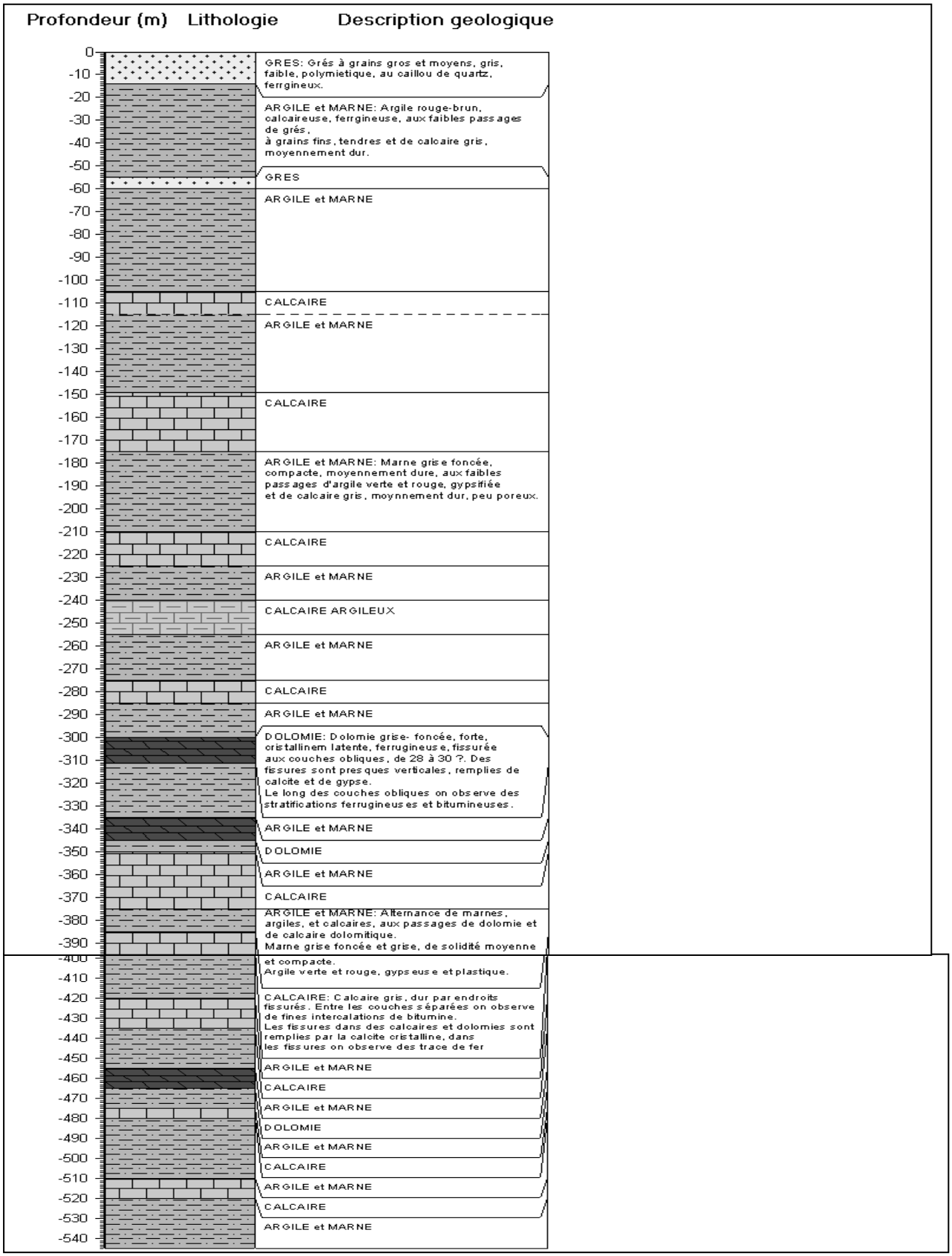
Annexe 3. Coupes lithologiques des forages

Sondage : Hassi Bahbah	**N°:** 162 G07
Carte : Guelt es Stel	**Longitude :** 0g 756
Echelle : 1/5000	**Latitude :** 38g 952

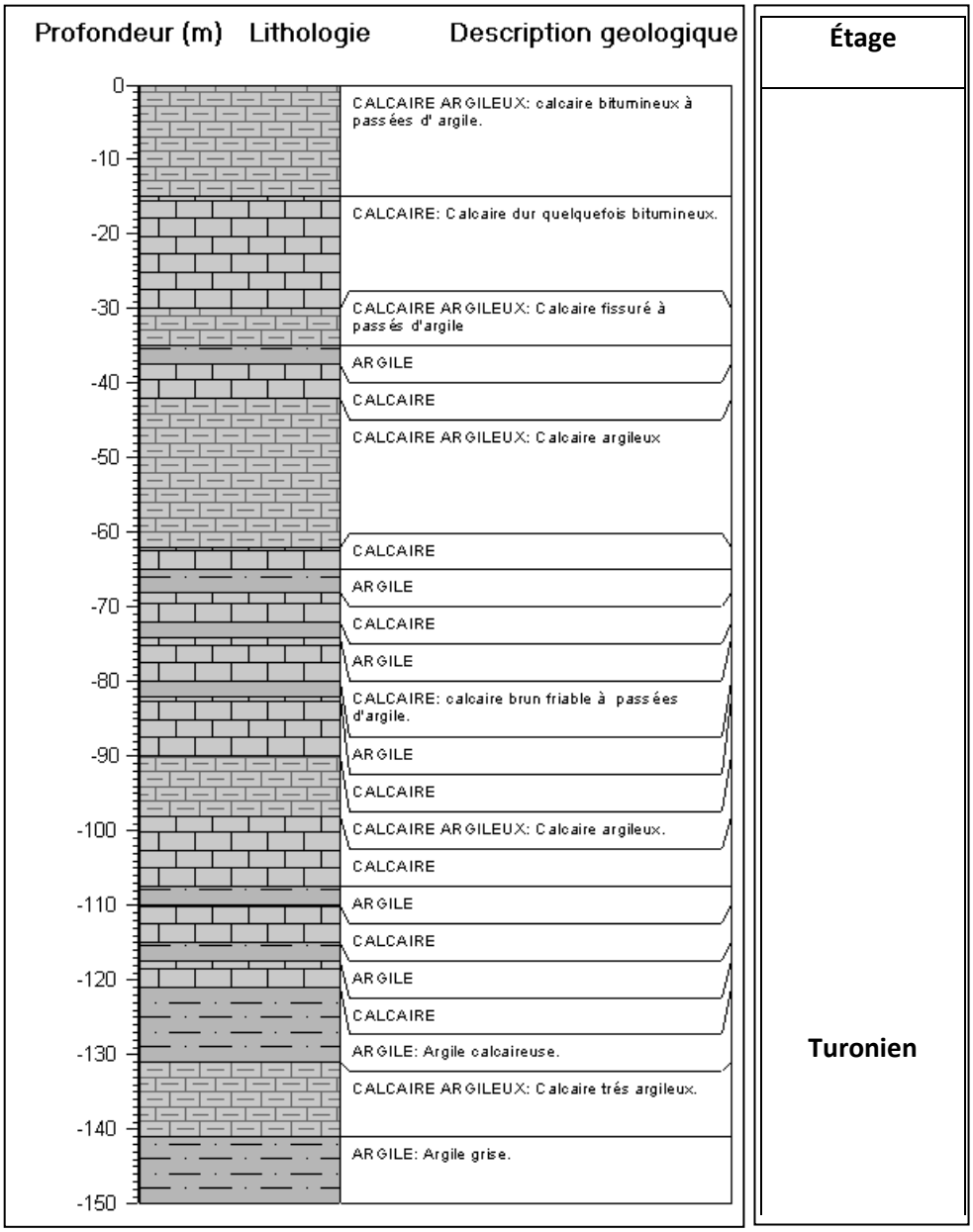


Étage
Turonien
Cénomanien

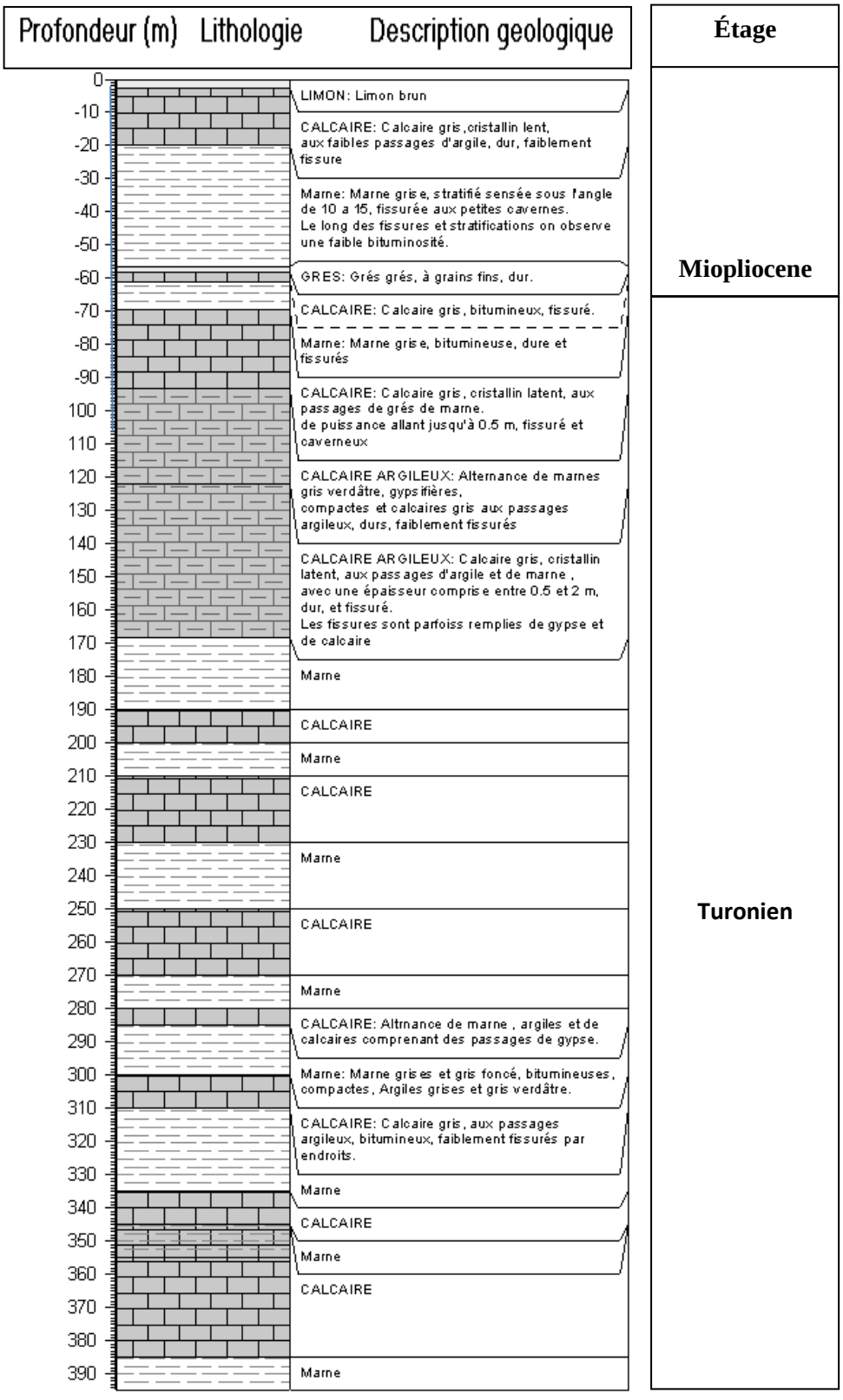
Sondage : Ain Maabed	**N°: 570 G07**
Carte : Ain Maabed N° 313	**Longitude : X=166.380**
Echelle : 1/2500	**Latitude : Y =540.980**



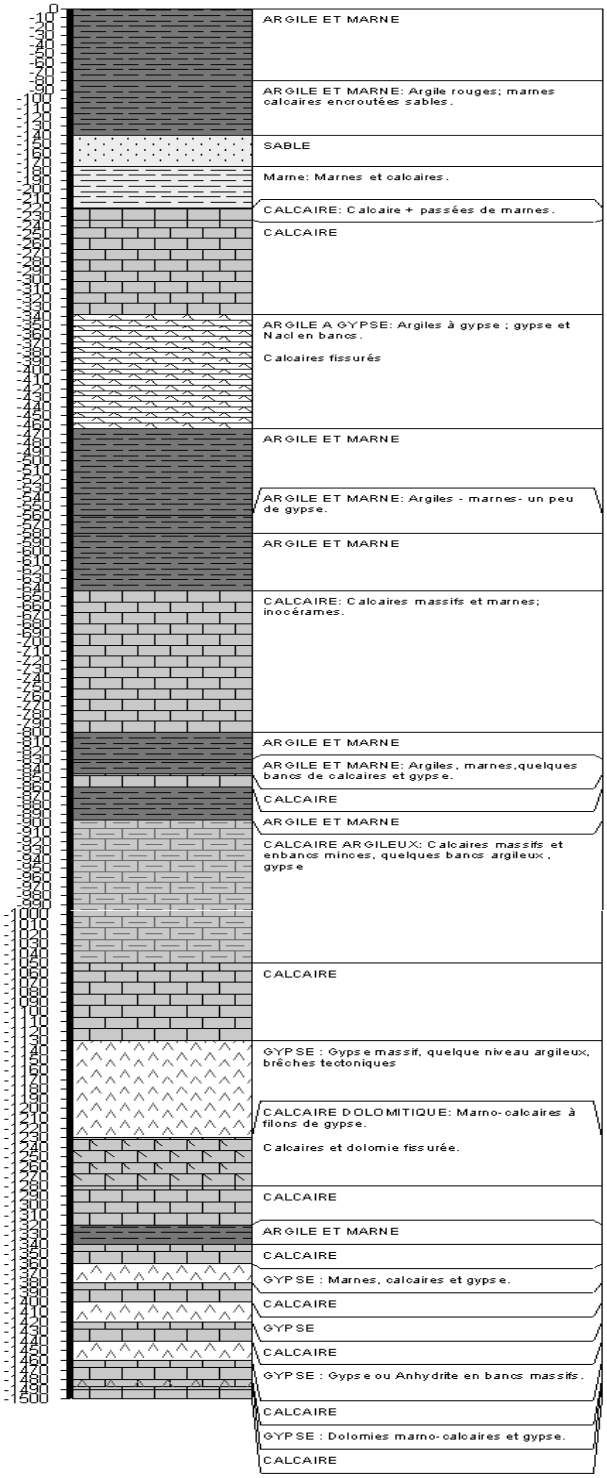
Sondage : Hassi Bahbah	**N°:** 589 G07
Carte : Hassi Bahbah **N°** 282	**Longitude :** X=526.500
Echelle : 1/1000	**Latitude :** Y =195.00



Sondage : Hassi Bahbah	**N°:** 542 G07 ou 65
Carte : Hassi Bahbah	**Longitude :** X(Lamb)=529.560
Echelle : 1/2000	**Latitude :** Y (Lamb)=198.280

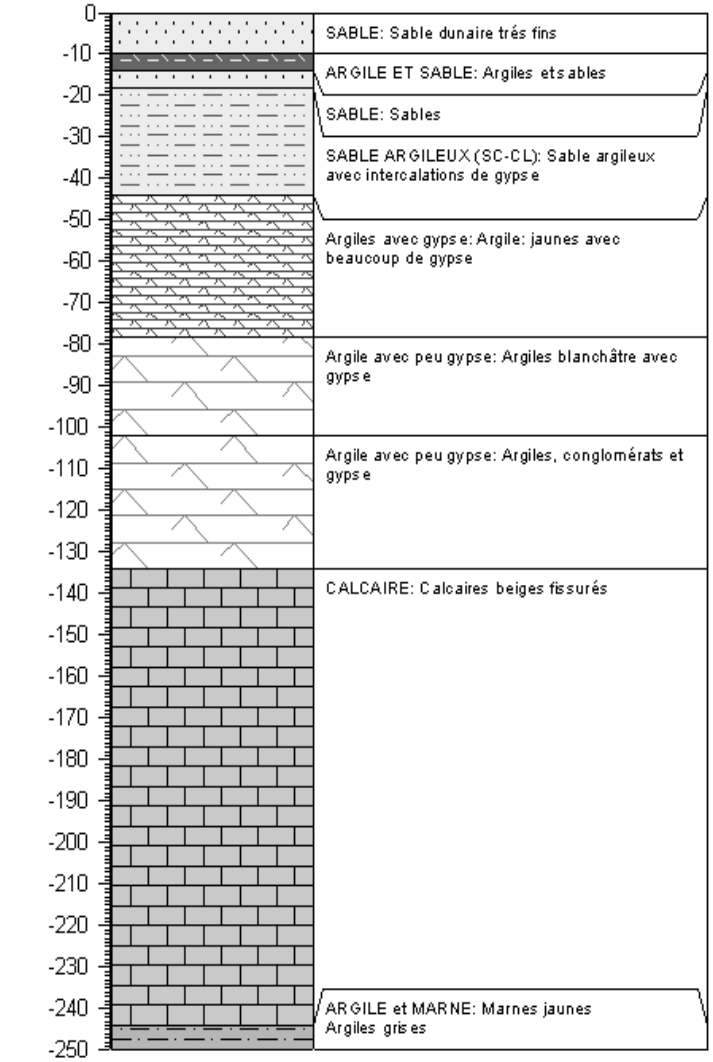


Sondage : Ain Malakoff **Carte :** Gueltet es stel **Echelle : 1/10000**	**N°:** 147 G07 **Longitude :** 0g 784 X (Lamb)=531.750 **Latitude :** 38 g 892 Y (Lamb)=190.300



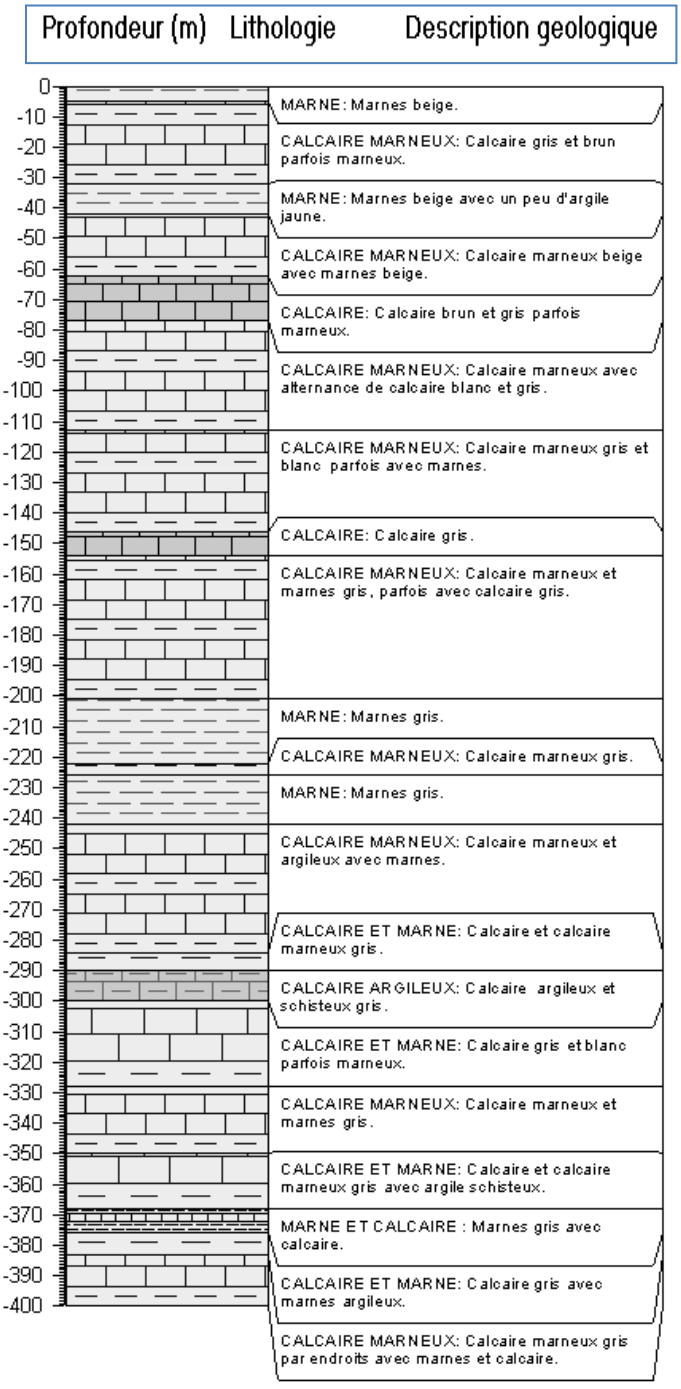
Étage
Pliocène et Miocène
Sénonien
Zône de passage
Turonien
Zône de passage
Cénomanien

Sondage : Zaafrane (F2)	**N°:** 643 G07
Carte : Zaafrane N° 312 **Ech** 1/50000	**Longitude :** X =511.400
Echelle : 1/1000	**Latitude :** Y =169.600



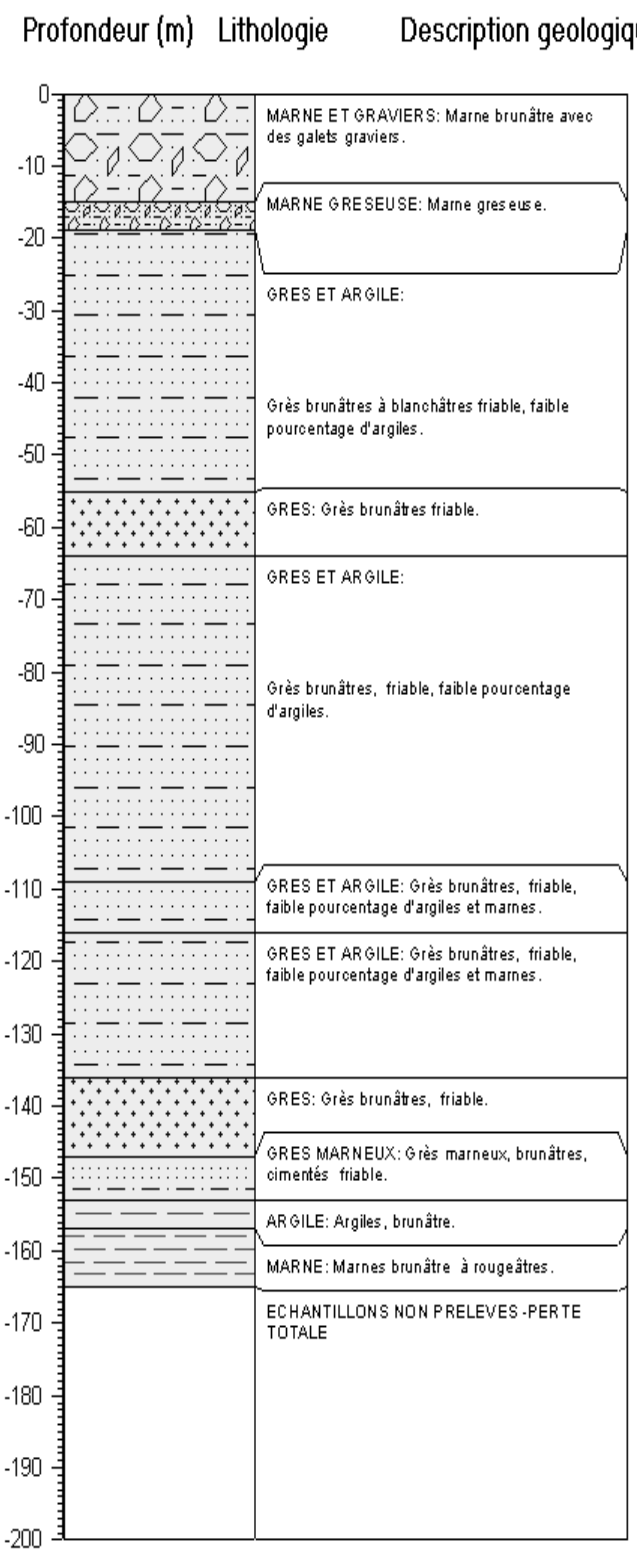
Étage
Mio-plio
Quaternaire
Sénonien

Sondage : HB2	**N°:**
Carte : El Mesrane N° 283 **Ech** 1/50000	**Longitude :** X (Lamb)=531.700
Echelle : 1/2500	**Latitude :** Y (Lamb)=196.250

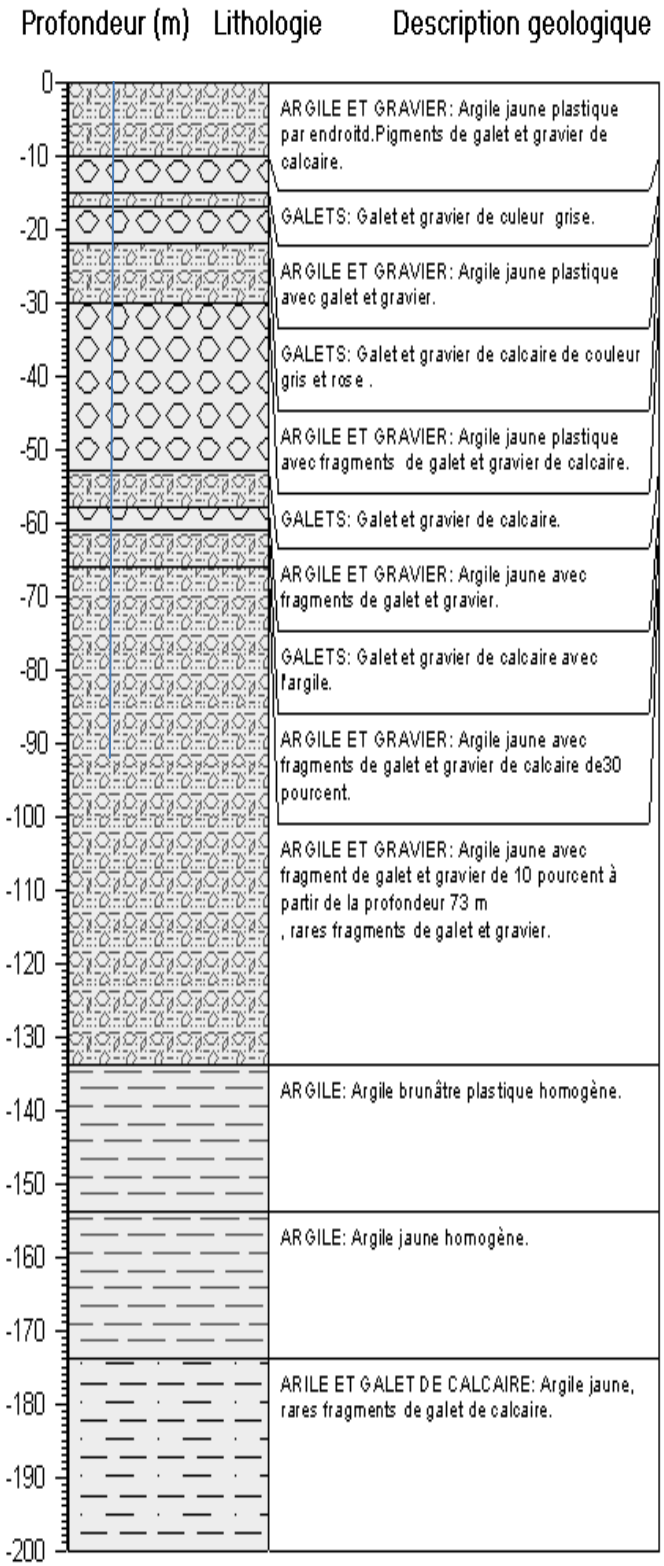


Étage
Turonien

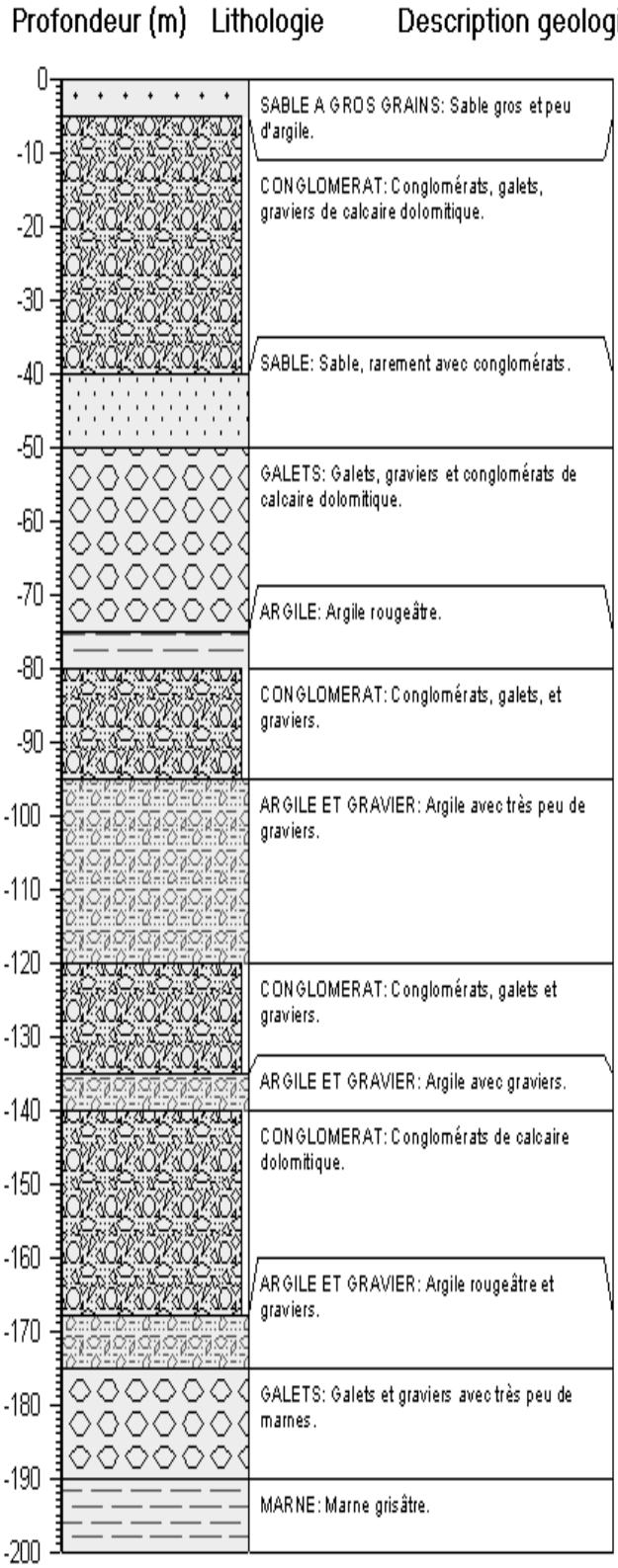
Sondage : Ain Maabed	**N°:** 493-G07
Carte : Ain Maabed N° 313 **Ech** 1/50000	**Longitude :** X (Lamb)= 539.600
Echelle : 1/1000	**Latitude :** Y (Lamb)=168.100



Sondage : Medjedel **Carte :** Medjedel N° 253 **Ech** 1/50000 **Echelle : 1/1000**	**N°:** 313-F0**8** **Longitude :** X (Lamb)= 589.000 **Latitude :** Y (Lamb)=207.000



Sondage : Ouled Sidi Yahia **Carte :** Medjedel N° 253 **Ech** 1/50000 **Echelle : 1/1000**	**N°:** 309-F0**8** **Longitude :** X (Lamb)= 591.350 **Latitude :** Y (Lamb)=206.500



Annexe 4. Pompage d'essais des forages de la zone d'étude.

Tableau 4.1 Nature des aquifères captés par les forages de la zone d'étude.

Forage	Aquifère	Forage	Aquifère
Hassibabah HB4	Turonien	F3 Dar Chioukh	Quaternaire
F2 Hassi El Euch	Quaternaire	F ZI2 Djelfa	Turonien
F2 El Guedid	Turonien	F4 Djelfa	Albien
F1 Oum Chegag	Albien	F11 Djelfa	Turonien
F2 Dar Chioukh	Quaternaire	F13 Djelfa	Turonien
F4 El Guedid	Turonien	F1 Hassi El mora	Quaternaire
HB2 Hassi Bahbah	Turonien	FM2 Ain Mouilah	Quaternaire
F3 Oum Chegag	Albien	F1 Sed oum Drou	Quaternaire
IRR1 Oum Chegag	Albien	F2 Hamam Charef	Turonien
IRR2 Oum Chegag	Albien	F1 Hamam Charef	Turonien
HB1 Hassi Bahbah	Turonien	F1 Sidi Baizid	Quaternaire
HB3 Hassi Bahbah	Turonien	Z1 Zaafrane	Quaternaire
F1 Ain maabed	Albien	F4 Dar chioukh	Quaternaire
F4 bis Djelfa	Albien	F7 Oued sedeur	Barrémien
F5 Maalba	Albien	F8 Oued sedeur	Barrémien
F3 Djelfa	Albien	F2 Djelfa	Albien
F1 Charef	Turonien	F6 Djelfa	Turonien
F7	Barremien		

Tableau 4.2 Caractéristiques des pompages d'essai réalisés dans la zone d'étude.

Forage	NS (m)	Date de l'essai	Durée de l'essai (h)	Profondeur totale (m)	s (m)	Q_{essai} (l/s)	Qs (l/s/m)
Hassibabah HB4	86	01/01/1990	48	200	39,95	22	0,55
F2 Hassi El Euch	7,46	30/03/1983	72	250	34,63	10	0,29
F2 El Guedid	28,14	01/09/1982	24	200	28,86	14,2	0,49
F1 Oum Chegag	30,68	29/05/1983	30	130	9,85	71	7,21
F2 Dar Chioukh	27,64	25/05/1981	29	201	25,02	4,8	0,19
F4 El Guedid	48,16	25/05/1993	26	200	10,04	70	6,97
HB2 Hassi Bahbah	32,46	19/09/1981	28	400	24,86	25	1,01
F3 Oum Chegag	18	01/01/1990	5	200	88,05	2,75	0,03
IRR1 Oum Chegag	9,2	08/09/1992	30	250	1,8	40	22,22
IRR2 Oum Chegag	9,5	10/01/1993	30	200	17,5	38	2,17
HB1 Hassi Bahbah	79,24	16/06/1981	24	200	0,56	19	33,93
HB3 Hassi Bahbah	89,7	17/02/1988	48	200	3,6	44	12,22
F1 Ain maabed	57,18	03/02/1981	44	200	15,28	10	0,65
F3 Dar Chioukh	10,75	01/01/1989	24	200	87,4	9,5	0,11
F ZI2 Djelfa	44,66	06/02/1982	61	199	15,79	60	3,80
F4 Djelfa	45,57	09/06/1981	49	200	20,56	27	1,31
F11 Djelfa	96	21/02/1992	50	200	31,34	35	1,12
F13 Djelfa	122,3	01/09/1998	8	250	1,91	25	13,09
F1 Hassi El mora	32,44	21/02/1989	67	200	68,48	6	0,09
FM2 Ain Mouilah	38	09/06/1982	49	200	27,75	5	0,18
F1 Sed oum Drou	58,8	13/04/1986	48	180	16,36	20	1,22
F2 Hamam Charef	5,8	01/01/1989	52	200	11,46	73,3	6,40
F1 Hamam Charef	8,32	06/04/1983	36	200	10,93	40	3,66
F1 Sidi Baizid	58,2	06/08/1983	48	171	22,5	2	0,09
Z1 Zaafrane	11,17	24/021982	50	300	20,83	8,5	0,41

F4 Dar chioukh	50,4	21/04/1990	24	200	49,05	22	0,45
F7 Oued sedeur	51,8	01/10/2007	45	286	20,94	40	1,91
F8 Oued sedeur	91,85	02/11/2007	43	300	12,56	20	1,59
F4 bis Djelfa	62,8	01/01/1992	40	245	40,82	38	0,93
F5 Maalba	109,74	01/01/1974	24	303	47,85	25	0,52

NS : niveau statique

Q_{essai} : débit de pompage

Qs: débit spécifique

.

ANNEXES

Annexe 5. Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines

Tableau 5.1 Résultats des analyses physico-chimiques

Nom	Latitude	Longitude	Z	Prof (m)	CE µS/cm	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}
							mg/l							
F1	2º31'40"	34º4500"	905	26	870	8.39	72.24	20.08	29.67	5.1	177	60	80	49.1
F2	2º40'14"	35º13'03"	765	17.1	7780	8.75	136.17	54.71	138.14	9.68	235	258	240	1.61
F3	2º32'59"	35º08'44"	762	22.1	2540	8.06	215.83	99.49	179.25	41.78	50	468	488	1
F4	2º36'08"	35º08'18"	788	16.2	1090	7.91	65.45	32.97	65.96	5.54	92	140	96	52
F5	2º45'31"	35º10'33"	788	33.1	830	8.20	106.76	20.64	17.62	3.53	125	85	100	67.33
F6	2º56'01"	35º14'28"	831	48.1	1670	9.57	74.46	37.13	135.49	6.07	3	200	298	70.67
F7	2º41'12"	36º32'20"	808	42.2	930	8.02	48.81	30.42	72.11	4.81	80	138	104	7.86
F8	3°18'02"	35° 06'47"	812	28	3610	8.47	201.97	97.95	97.13	6.3	70	725	625	27.79
F9	3°14'31"	35°10'44"	884	18.2	1470	8.20	64.96	42.8	119.61	6.77	78	224	146	93.5
F10	3°22'25"	35°10' 51"	784	25.8	3610	9.12	248.84	122.88	277.7	10.88	3	650	728	66.33
F11	3°05'20"	35° 07'48"	928	27.3	480	7.83	22.86	21.26	22.75	4.9	128	40	32	31.06
F12	3º26'36"	35°12'56"	780	28.5	3450	7.86	193.99	129.59	322.79	3.77	102	525	781	5.15
F13	3º37'43"	35º8'43"	800	65.1	7030	8.68	278.07	149	933.93	9.23	31	1712	730	57.2
F14	3°37'47"	35°08'48"	798	68.12	4700	8.09	306.64	98.89	601.85	18.93	82	1150	785	90.87
F15	2º290'5"	35º02'17"	805	30	3050	7.88	133.14	99.97	177.38	11.9	55	289	642	53.46
F16	2º29'05"	35º02'17"	799	18	3220	7.57	198.75	124.48	288.93	9.47	207	525	675	1.14
F17	2º40'01"	35º04'33"	803	31.3	910	9.48	28.16	27.24	51.82	5.32	2	92	114	16.1
F18	2°38'54"	34°56'10"	850	18.3	2200	10.01	85.34	25.21	241.45	4.97	0	425	258	5.98
F19	2° 50'29"	35°00'36"	869	31.3	1760	8.13	86.09	63.29	123.2	3.99	119	390	80	29.7
F20	2° 54'35"	35°01'19"	864	26	2300	8.61	165	49.46	210.5	6.14	31	375	525	17.46
F21	2°57'58"	35°02'42"	864	16	3550	7.81	272.86	85.27	32.54	8.92	27	685	650	22.85
F22	2°41'51"	34°58'36"	881	41.3	1800	7.95	111.76	54.76	121.04	6.15	76	290	267	11.16
F23	2°58'09"	35°04'50"	888	45	1190	7.80	76.9	50.24	70.21	3.74	37	267	106	6.21
F24	2°46'29"	34°58' 00"	842	10.15	4640	7.77	376.92	113.14	355.01	8.2	75	1125	479	21.63
F25	3°09'44"	35°04'21"	902	67	2360	9.36	162	59.18	59.18	4.83	31	478	455	37.9
F26	3°19'37"	34°59'03"	872	53.6	2760	8.44	285.12	92.56	110.48	7.21	90	525	389	88.1
F27	2°49'09"	34°46'00"	916	22.2	3530	8.69	312.11	89.9	302.45	14.21	110	556	852	75.82
F28	2° 48'52"	34°45'22"	852	4.2	1890	8.42	144.99	35.54	170.44	21.32	67	278	380	17.83

F29	3°11'06"	34°54'52"	880	21.1	2500	7.92	155.76	57.1	117.89	60.76	275	345	155	87.7
F30	3°03'45"	34°52'51"	900	25	5260	8.32	278.27	70.66	711.35	14.89	90	1521	235	52.48
F31	3°03'32"	34°55'16"	876	9.5	6240	8.28	240.87	58.88	917.26	17.06	35	1167	1250	39.96
F32	3°26'44"	34°52'25"	1127	6.3	1380	7.67	113.96	52.04	65.87	1.67	127	156	100	47.93
F33	3°26'36"	34°50'24"	1140	29.6	450	7.85	20.44	12.18	56.52	2.37	128	50	10	41.67
F34	3°34'12"	34°49'31"	1114	35	940	8.26	100.36	35.34	32.81	4.93	192	190	32	8.82
F35	3°27'59"	34°46'56"	1135	23	3520	8.18	474.48	100.79	161.64	14.57	171	240	1415	59.04
F36	3°33'07"	34°47'59"	1141	10.6	4730	7.83	591.12	104.48	90.13	18.01	47	200	1800	71.08
F37	3°30'11"	34°53'07"	1126	18.2	1720	8.41	163.27	35.29	120.39	6.97	149	345	168	64.27
F38	2°46'20"	34°39'34"	1004	5.4	4360	8.35	522.12	129.78	129.78	6.98	34	40	1542	50.9
F39	2° 51'33"	34°41'50"	1036	10.9	2350	8.13	185.2	96.25	162.24	7.65	70	259	685	57.84
F40	2°44'17"	34°40'12"	965	21	3800	9.81	632.26	170.28	71.67	9.82	91.5	176	375	15.98
F41	2°47'48"	34°44'12"	938	27	2560	8.06	326.14	83.91	14.71	9.93	125	225	972	20.8
F42	3°04'28"	34°34'46"	1280	8.6	3380	7.82	540.12	147.11	52.49	13.06	140	116	1650	20.8
F43	3°08'38"	34°35'34"	1238	12.7	1300	8.16	123.4	32.12	33.27	14.83	268	130	25	69.8
F44	3°11'56"	34°38'19"	1128	9.7	6910	8.10	169.85	407.74	650.6	16.06	244	1306	1259	80.5
F45	3° 11'55"	34°38'16"	852	4.2	1879	6.70	258.45	172.22	26.73	1.28	183	166.33	988	55.8
F46	3°30'12"	34°56'07"	1087	20.2	2950	7.65	156.52	109.64	191.03	5.63	43	687	325	77.07
F47	3°25'36"	34°43'43"	1149	17.7	1530	8.15	159	59.02	62.02	3.83	31	358	194	46.3

Tableau 5.2 : Statistiques descriptives des variables hydrochimiques (CE en µS/cm, et les autres variables en mg/l). C.V. = Coefficient de variation

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	C.V
Ca^{2+}	22.9	377	166.2	95.75	0.58
Mg^{2+}	20	149	68.2	36.81	0.54
Na^{+}	17.6	933.9	228.2	243.94	1.07
K^{+}	3.5	60.8	11.2	11.91	1.07
Cl^{-}	40	1712	506.7	422.72	0.83
HCO_3^{-}	0	275	83.3	67.06	0.80
NO_3^{-}	1	93.5	38.9	29.97	0.77
CO_3^{2-}	0	24	4.7	7.16	1.51
SO_4^{2-}	32.00	1250.00	411.13	300.97	0.73
pH	7.6	10	8.4	0.60	0.07
CE	450	7780	2829	1776.5	0.63
TDS	300	4012	1545.6	956.16	0.62

Tableau 5.3 : Corrélation entre les variables et les axes factoriels

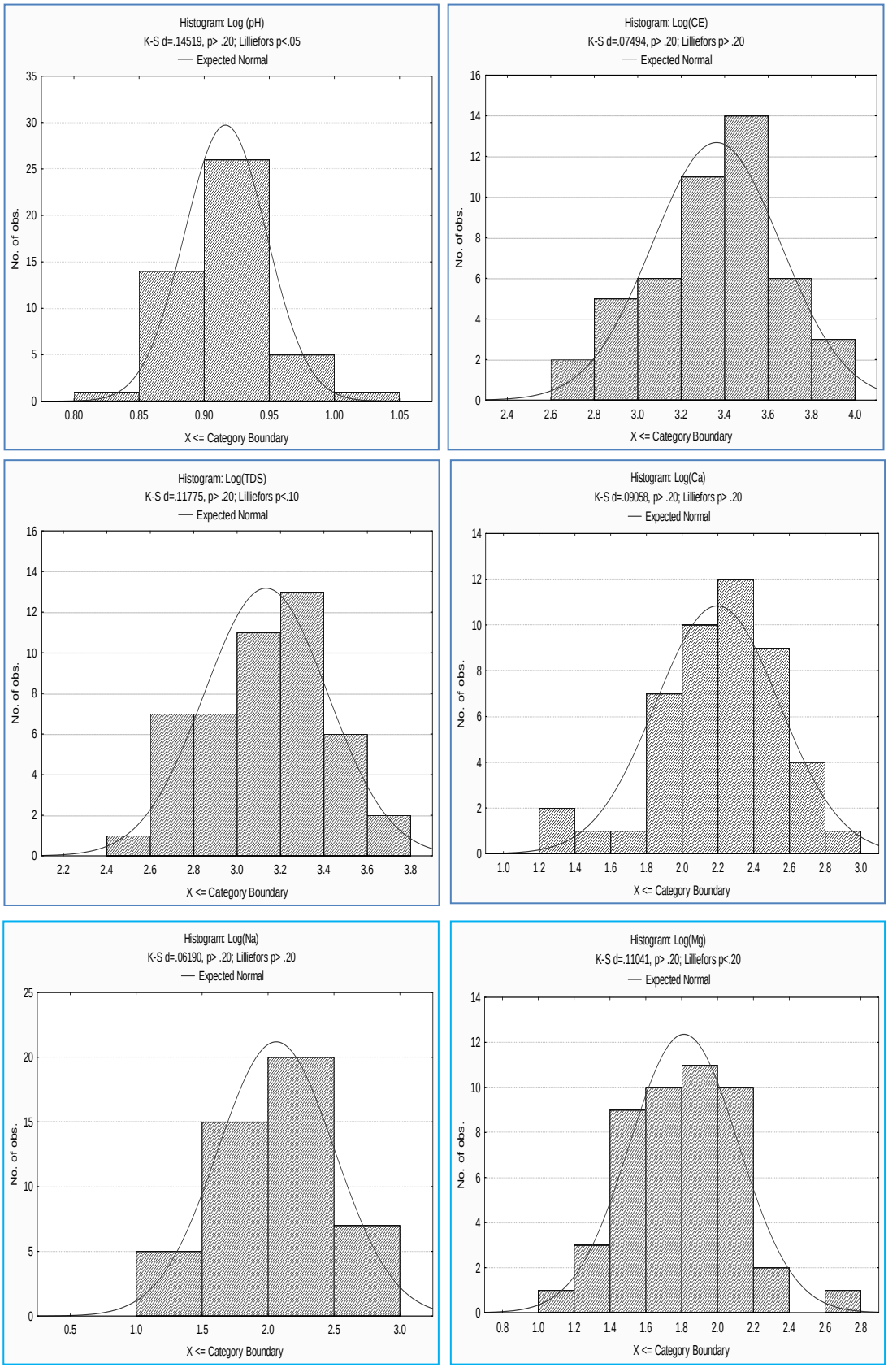
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
EC	**-0.88**	0.22	0.03	-0.14
Ca	**-0.66**	-0.18	**-0.59**	-0.18
Mg	**-0.76**	-0.21	-0.09	0.02
Na	**-0.76**	0.35	0.43	0.18
K	-0.30	-0.23	0.32	**-0.65**
Cl	**-0.76**	0.32	0.45	0.25
HCO_3	0.01	-0.61	0.35	-0.42
NO_3	-0.26	-0.25	0.35	-0.11
pH	0.07	**0.78**	-0.16	-0.33
CO_3	0.15	**0.72**	-0.04	-0.46
TDS	**-0.98**	0.01	-0.06	0.08
SO_4	**-0.74**	-0.20	**-0.51**	-0.06

Tableau 5.4 : Valeurs propres et variabilité des axes factoriels

Axes factoriels	Valeurs propres	Valeurs propres cumulées	% de variance exprimée	% de variance exprimée cumulée
1	4.64	4.64	38.69	38.69
2	2.00	6.64	16.64	55.34
3	1.39	8.03	11.55	66.89
4	1.09	9.12	9.12	76.01

ANNEXES

Annexe 6. Histogramme des fréquences et distribution normale des paramètres physico-chimiques



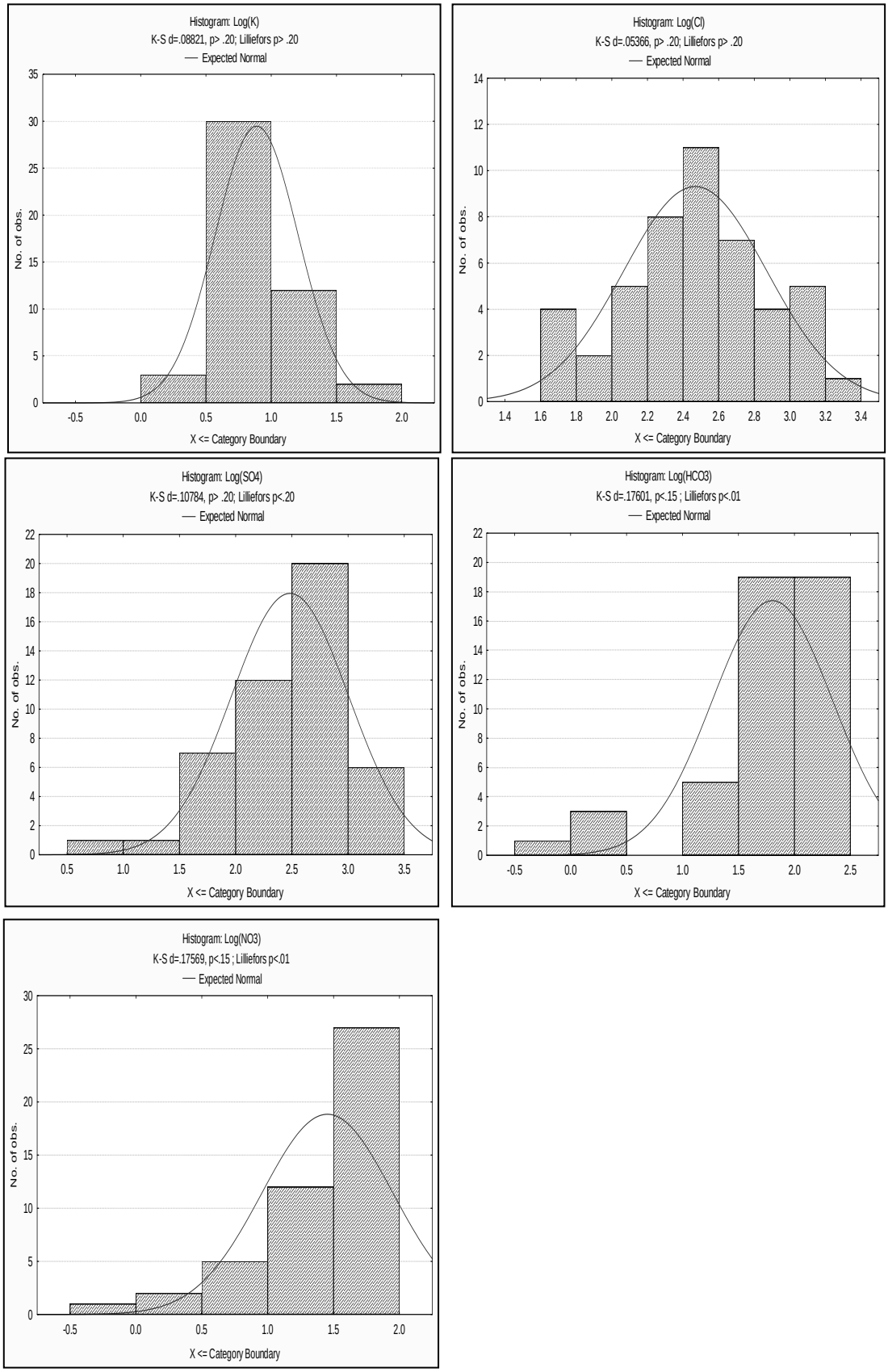
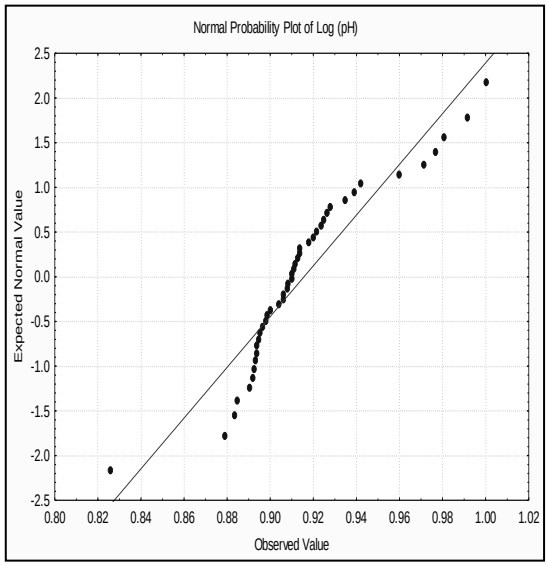
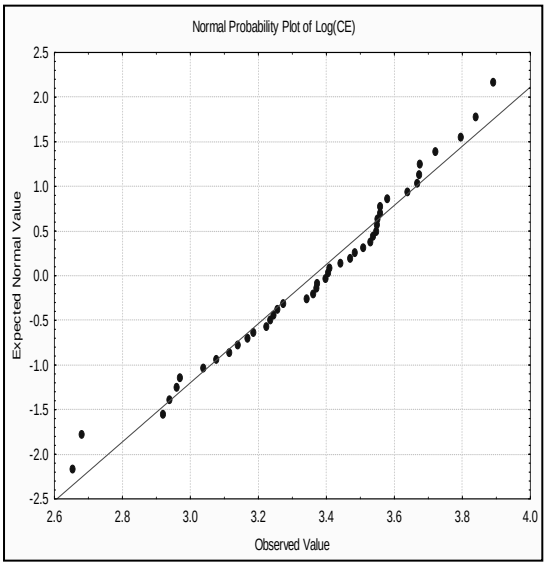
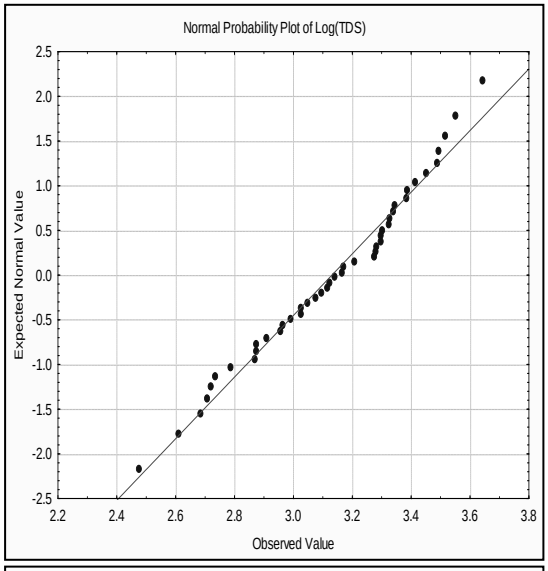


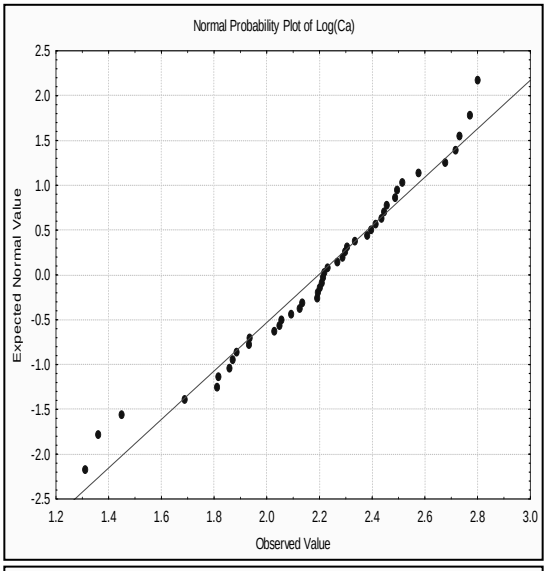
Figure 6.1 Histogrammes des fréquences des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du bassin des Zahrez.

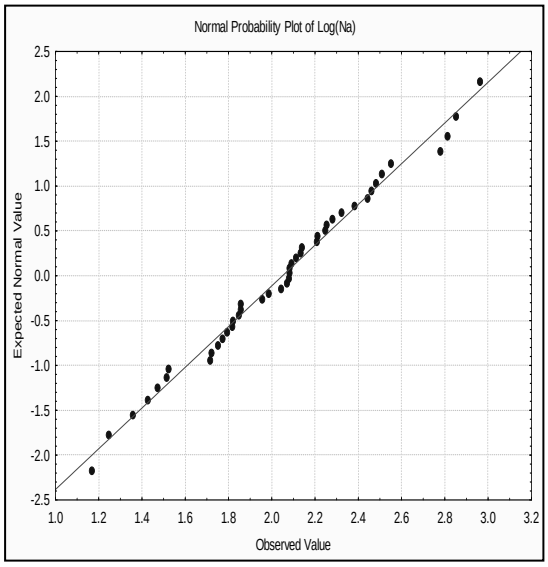
ANNEXES

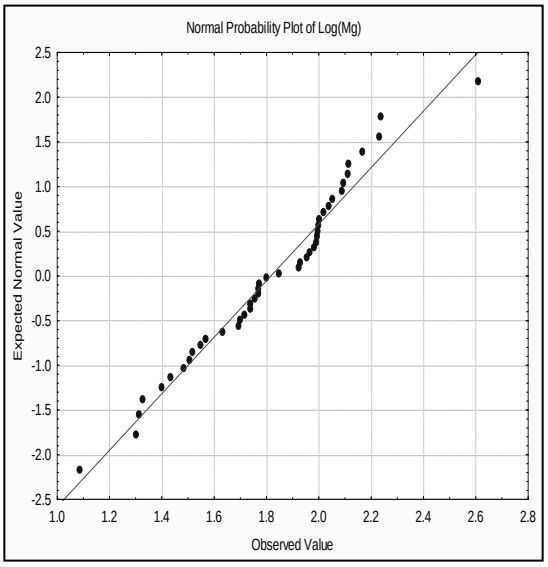

Normal Probability Plot of Log (pH)
Expected Normal Value
Observed Value


Normal Probability Plot of Log(CE)
Expected Normal Value
Observed Value


Normal Probability Plot of Log(TDS)
Expected Normal Value
Observed Value


Normal Probability Plot of Log(Ca)
Expected Normal Value
Observed Value


Normal Probability Plot of Log(Na)
Expected Normal Value
Observed Value


Normal Probability Plot of Log(Mg)
Expected Normal Value
Observed Value

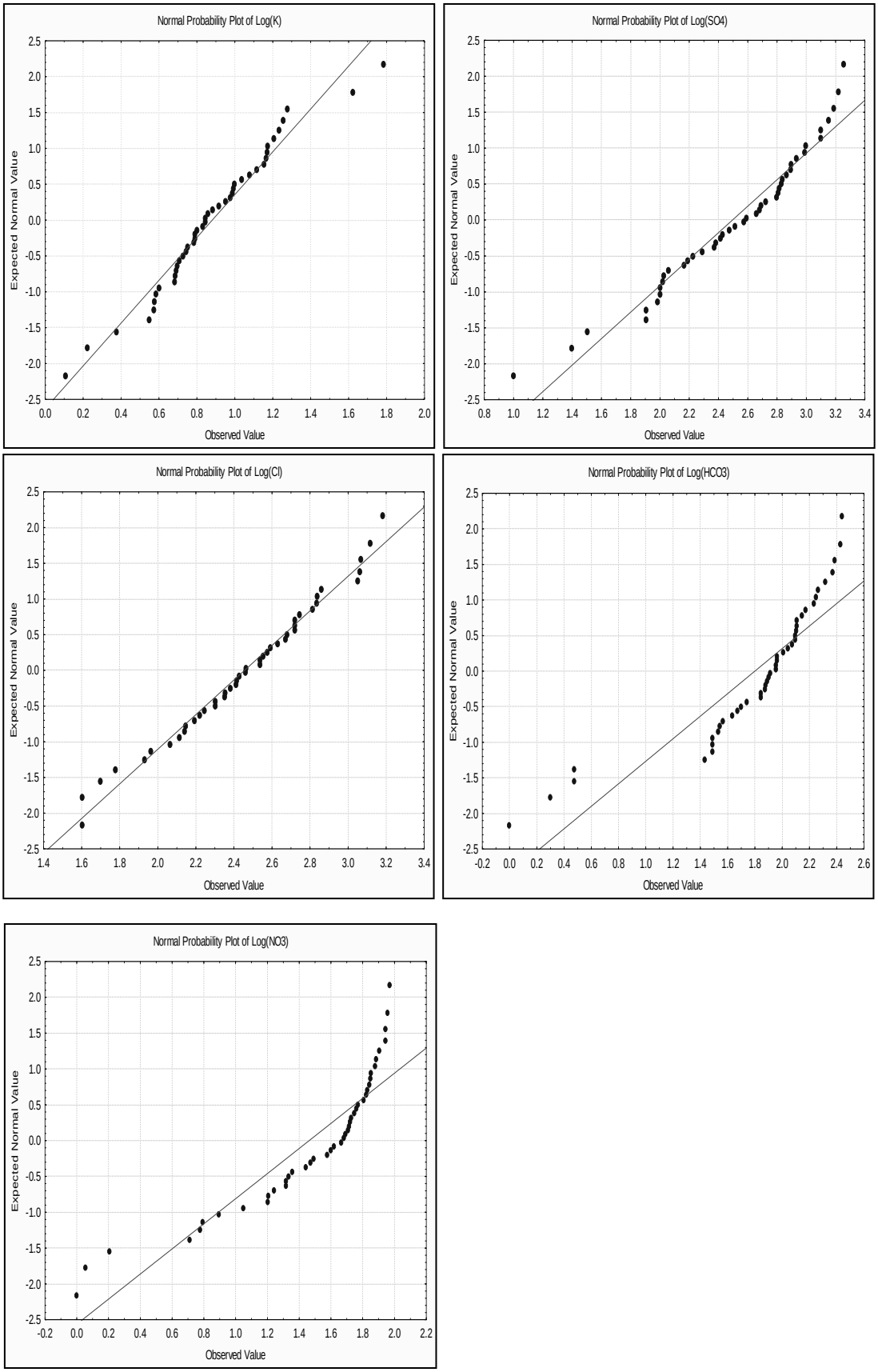


Figure 6.2 Ajustement à la loi normal des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du bassin des Zahrez.